

陶俊, 张仁健, 许振成, 等. 2009. 广州冬季大气消光系数的贡献因子研究 [J]. 气候与环境研究, 14 (5): 484-490. Tao Jun, Zhang Renjian, Xu Zhencheng, et al. 2009. Contribution factors of ambient light extinction coefficient in the winter of Guangzhou [J]. Climatic and Environmental Research (in chinese), 14 (5): 484-490.

## 广州冬季大气消光系数的贡献因子研究

陶俊<sup>1</sup> 张仁健<sup>2</sup> 许振成<sup>1</sup> 陈来国<sup>1</sup> 朱李华<sup>1</sup> 韩静磊<sup>1</sup> 曹军骥<sup>3</sup>

1 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 中国科学院地球环境研究所, 西安 710075

**摘要** 2008年1月1~31日和2月6~24日在广州城区每天采集一个PM<sub>2.5</sub>样品, 对样品进行有机碳、元素碳及水溶性离子分析, 利用美国IMPROVE能见度方程计算得到广州冬季大气消光系数。结果发现: 冬季PM<sub>2.5</sub>日均值质量浓度为 $89.0 \pm 53.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , OC (Organics Carban) 质量浓度为 $16.9 \pm 11.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , EC (Element Carbon) 质量浓度为 $5.9 \pm 3.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 水溶性离子总浓度为 $43.9 \pm 23.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。冬季大气消光系数均值为 $342 \pm 185 \text{Mm}^{-1}$ 。广州冬季大气消光系数主要贡献者为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 、POM (Particulate organic matter)、EC和 $\text{NO}_2$ , 对消光系数的贡献率分别为36.3%、14.5%、26.6%、17.4%和5.2%。

**关键词** PM<sub>2.5</sub> 化学组分 消光系数 能见度

**文章编号** 1006-9585 (2009) 05-0484-07 **中图分类号** X513 **文献标识码** A

## Contribution Factors of Ambient Light Extinction Coefficient in the Winter of Guangzhou

TAO Jun<sup>1</sup>, ZHANG Renjian<sup>2</sup>, XU Zhencheng<sup>1</sup>, CHEN Laiguo<sup>1</sup>,  
ZHU Lihua<sup>1</sup>, HAN Jinglei<sup>1</sup>, and CAO Junji<sup>3</sup>

1 *South China Institute of Environmental Sciences, Guangzhou 510655*

2 *Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029*

3 *Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Science, Xi'an 710075*

**Abstract** Aerosol samples of PM<sub>2.5</sub> were collected from 1 January to 31 January and 6 February to 24 February 2008 in Guangzhou. The concentrations of organic carbon, element carbon, water-solubility ions of all particle samples were obtained by chemical analyses. Ambient light extinction coefficients were calculated by IMPROVE visibility formula. The results indicated that the average mass concentration of PM<sub>2.5</sub>, OC, EC, water-solubility ions was  $89.0 \pm 53.4$ ,  $16.9 \pm 11.9$ ,  $5.9 \pm 3.4$ , and  $43.9 \pm 23.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , respectively. The averaged value of extinction coefficient was  $342 \pm 185 \text{Mm}^{-1}$  in winter. The major contributors to ambient light extinction coefficients included  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (36.3%),  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (14.5%), POM (26.6%), EC (17.4%), and  $\text{NO}_2$  (5.2%), respectively.

**Key words** PM<sub>2.5</sub> aerosol, chemical compositions, extinction coefficient, visibility

**收稿日期** 2008-08-06 收到, 2009-09-27 收到修定稿

**资助项目** 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 (IAP09320) 资助和中央级公益科研院所基本科研业务专项基金 (ZX20071201)

**作者简介** 陶俊, 男, 1979年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事大气环境研究。Email: taojun@scies.org

## 1 引言

大气能见度下降是大城市主要的大气环境问题之一。能见度下降时大量的细粒子悬浮在空中, 高浓度细粒子可以导致呼吸道系统疾病 (Pope et al., 2002)。能见度下降主要是由于大气细粒子的散射和吸光特性导致的, 因此大气能见度是判别城市环境空气质量好坏的重要指标之一 (Watson, 2002)。国外对大气能见度的研究十分重视, 美国 1988 年在建立 30 个能见度和 PM<sub>2.5</sub> 观测点的基础上实施了大型能见度观测计划 IMPROVE (Interagency Monitoring of Protected Visual Environment) (Sisler et al., 2000), 澳大利亚、英国、韩国等随后开始重视大气能见度的观测研究 (Chan et al., 1999; Doyle et al., 2002; Kim, 2007)。我国在大气能见度方面也开展了一些研究工作, 并取得一定的成果 (王玮等, 2001; 宋宇等, 2003; 马雁军等, 2005; Yang et al., 2007)。

广州作为珠三角地区人口规模最大的城市之一, 由于近年来机动车保有量快速增长, 工业燃料消耗增加, 广州细颗粒物的污染越来越严重, 高浓度的细颗粒物污染导致了广州地区大气能见度急剧恶化 (Wu et al., 2005)。近年来有学者逐渐开展广州大气能见度的研究, 其中比较有代表性的有中国气象局热带海洋研究所对大气能见度、颗粒物质量浓度、黑碳浓度、气溶胶散射系数、气象因子进行的观测研究, 分析了广州大气能见度下降的原因 (Deng et al., 2008)。北京大学通过对气溶胶散射系数和吸收系数、粒子化学成分以及 NO<sub>2</sub> 浓度等进行观测, 初步探讨了气溶胶散射系数、吸收系数和水汽分子散射系数对广州大气消光系数的贡献 (刘新罡等, 2006)。这些研究成果对进一步认识广州能见度下降的成因起到较大作用, 但没有具体解析出导致广州大气能见度降低的主要化学成分及其贡献率。

本研究利用华南环境科学研究所大气观测研究站作为观测点, 经过 2008 年 1~2 月约 50 天的连续观测, 获得了 PM<sub>2.5</sub> 水溶性离子、有机碳和元素碳以及 NO<sub>2</sub> 质量浓度等第一手观测数据, 利用 IMPROVE 消光系数计算公式得到观测期间每天的大气消光系数和 PM<sub>2.5</sub> 中主要的化学成分和

NO<sub>2</sub> 对大气消光系数的贡献率, 初步探讨了导致广州冬季大气能见度降低的大气污染源, 希望能为开展城市大气霾污染的防治工作提供科学依据。

## 2 实验与方法

### 2.1 采样地点

采样地点设在广州市天河区华南环境科学研究所综合大楼顶 (23°07'N, 113°21'E), 距离地面约 50 m, 采样点周围是集中居住区, 2 km 范围内无明显大气污染源, 周围无建筑物遮挡视野比较开阔, 观测数据在一定程度上代表了广州城市区域大气污染水平。

### 2.2 样品采集和其他在线数据采集

2008 年 1 月和 2 月 6~24 日, 使用美国 RP2000H 型采样器, 每天采集一个 PM<sub>2.5</sub> 样品, 采样时间为当日的 10 时 (北京时间, 下同) 到次日的 09:30, 采样器流量为 16.7 L·min<sup>-1</sup>, 使用的滤膜为直径 47 mm 的 Whatman 石英膜。

### 2.3 NO<sub>2</sub> 浓度和气象因子数据采集

利用热电 43i 型氮氧化物在线观测 NO<sub>2</sub> 质量浓度, 利用芬兰 MAWS 自动气象站在线观测风速、温度、相对湿度、降雨量等气象因子, 并利用 PWD22 现时天气现象传感器 (红外前向散射原理) 观测大气能见度。

### 2.4 样品化学分析

#### 2.4.1 水溶性离子分析

剪取 1/4 的石英膜加入 10 mL 去离子水 (电阻  $R > 18.2 \text{ M}\Omega$ ), 超声萃取 1 h, 采用 0.45  $\mu\text{m}$  的过滤器过滤定容, 用中国科学院地球环境研究所气溶胶实验室的 Dionex-500 型离子色谱仪对水溶性离子进行分析。Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 4 种阳离子使用 CS12A 分析柱和 CG12A 保护柱及 CSRS 抑制器进行检测分析, 淋洗液使用浓度为 20 mmol·L<sup>-1</sup> 的 MSA, 流速为 1 mL·min<sup>-1</sup>。3 种阴离子 Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 使用 AS11-HC 分析柱和 AG11-HC 保护柱及 ASRS 抑制器进行检测分析, 淋洗液是 20 mmol·L<sup>-1</sup> 的 KOH, 流速为 1 mL·min<sup>-1</sup>。数据质量控制采用美国沙漠所 (DRI) 质量控制标准, 每测定 10 个样品复检 1 个, 样品质量浓度在 0.030~0.100 g·L<sup>-1</sup> 时, 允许的标准偏差为 ±30%; 质量浓度在 0.100~

0.150 g·L<sup>-1</sup>时,要求标准偏差小于20%;样品质量浓度大于0.150 g·L<sup>-1</sup>时,允许的标准偏差为10%。

#### 2.4.2 有机碳和元素碳分析

所有样品的OC (Organics Carbon) 和EC (Element Carbon) 分析采用中国科学院地球环境研究所气溶胶实验室的DRI Model 2001热光碳分析仪 (Thermal/Optical Carbon Analyzer; 美国沙漠研究所研制)。应用IMPROVE热光反射的实验方法 (Chow et al., 1993), 该方法的主要测试原理是: 在无氧的纯He环境中, 分别在120 °C (OC1)、250 °C (OC2)、450 °C (OC3) 和550 °C (OC4) 下, 对0.526 cm<sup>2</sup>的滤膜片进行加热, 将滤纸上的颗粒态碳转化为CO<sub>2</sub>; 然后再将样品在含2%O<sub>2</sub>的He环境下, 分别于550 °C (EC1)、700 °C (EC2) 和800 °C (EC3) 逐步加热, 此时样品中的元素碳释放出来。上述各个温度梯度下产生的CO<sub>2</sub>经MnO<sub>2</sub>催化, 于还原环境下转化为可通过火焰离子检测器 (FID) 检测的CH<sub>4</sub>。样品在加热过程中, 部分有机碳可发生碳化现象而形成黑碳使滤膜变黑, 因此, 在测量过程中, 利用633 nm的氦-氖激光监测滤纸反光光强的变化明确指示出元素碳氧化的起始点。有机碳碳化过程中形成的碳化物称之为光学检测裂解碳 (OP)。IMPROVE协议将有机碳定义为OC1+OC2+OC3+OC4+OP, 元素碳定义为EC1+EC2+EC3-OP。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub>、能见度及气象因子逐日变化趋势

广州冬季PM<sub>2.5</sub>质量浓度见表1。PM<sub>2.5</sub>日均值质量浓度为89.0±53.4 μg·m<sup>-3</sup>, 变化范围为16.4~254.6 μg·m<sup>-3</sup>, OC质量浓度为16.9±

11.9 μg·m<sup>-3</sup>, 变化范围为4.1~53.7 μg·m<sup>-3</sup>, EC质量浓度为5.9±3.4 μg·m<sup>-3</sup>, 变化范围为1.8~13.8 μg·m<sup>-3</sup>, 水溶性离子总浓度为43.9±23.5 μg·m<sup>-3</sup>, 平均占PM<sub>2.5</sub>质量浓度的49.3%。水溶性离子中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>浓度最大, 分别为19.4±9.0、10.1±9.0和7.0±4.3 μg·m<sup>-3</sup>。图1为冬季PM<sub>2.5</sub>中主要的化学成分日均值浓度变化趋势。图2为冬季大气能见度、NO<sub>2</sub>和气象因子逐日变化趋势。由图2可知, 冬季能见度为5.9±3.6 km, 变化范围为1.2~19.6 km。NO<sub>2</sub>日均值浓度为109.4±64.3 μg·m<sup>-3</sup>, 浓度范围为39.3~300.9 μg·m<sup>-3</sup>。相对湿度为58.5±20.0%, 变化范围为16.6~91.0%。风速为1.7±0.8 m·s<sup>-1</sup>, 变化范围0.4~3.2 m·s<sup>-1</sup>。

由图1和图2可知, 1月2~12日出现一次持续时间较长的霾天气过程, 能见度小于10 km, PM<sub>2.5</sub>和NO<sub>2</sub>质量浓度保持在较高的水平, 其中PM<sub>2.5</sub>质量浓度均超过60 μg·m<sup>-3</sup>, 相对湿度在80%以下, 平均风速小于1.0 m·s<sup>-1</sup>, 1月7日是这次霾天气过程中污染最为严重的一天, 能见度只有1.9 km, PM<sub>2.5</sub>日均值浓度均达到254.6 μg·m<sup>-3</sup>, 超过美国PM<sub>2.5</sub>日均值浓度标准 (35 μg·m<sup>-3</sup>) 约6.3倍, 超过世界卫生组织 (WHO) PM<sub>2.5</sub>日均值浓度标准 (25 μg·m<sup>-3</sup>) 约9.2倍。1月18~20日是一次持续时间较短的霾天气过程, 其中1月19日污染最为严重, 能见度只有1.9 km, PM<sub>2.5</sub>日均值浓度均达到161.4 μg·m<sup>-3</sup>。1月24~30日出现连续的降雨过程, 使得PM<sub>2.5</sub>等大气污染物保持在较低的浓度水平, 连续降雨后能见度明显好转达到10 km以上。春节期间 (2月6~12日) 能见度平均值只有6.0 km, 相对湿度小于60%, 也属于一次霾天气过程, PM<sub>2.5</sub>质量浓度平均值为75.1 μg·m<sup>-3</sup>, PM<sub>2.5</sub>中主要化学成分为SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 占PM<sub>2.5</sub>质量

表1 广州冬季PM<sub>2.5</sub>化学成分质量浓度水平

Table 1 Mass concentration of PM<sub>2.5</sub>, water-soluble ions, and carbonaceous aerosol in winter μg·m<sup>-3</sup>

	PM <sub>2.5</sub>	OC	EC	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
1月	81.0±61.4	16.7±13.3	5.5±3.7	16.1±9.0	9.3±9.4	2.2±2.3	2.0±1.0	6.0±4.6	1.9±1.3	1.1±0.7
2月	102.0±34.8	17.4±9.4	6.6±2.9	24.8±6.1	11.6±8.2	1.5±1.6	1.9±0.3	8.6±3.1	2.6±0.9	1.2±0.2
平均	89.0±53.4	16.9±11.9	5.9±3.4	19.4±9.0	10.1±9.0	2.0±2.1	2.0±0.8	7.0±4.3	2.1±1.2	1.2±0.6

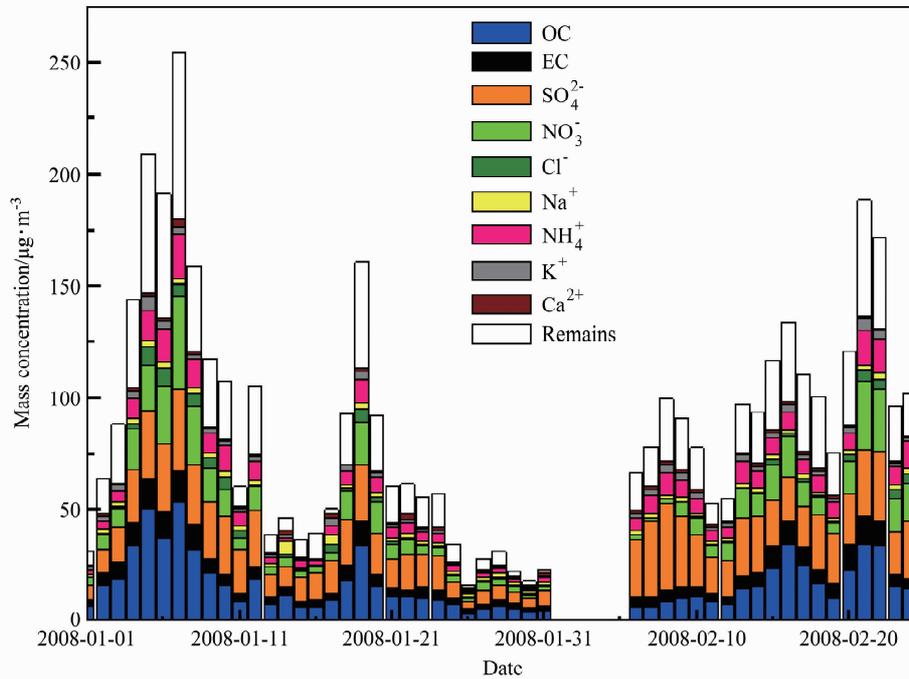


图 1 广州冬季 PM2.5 中主要的化学成分日均值浓度变化趋势

Fig. 1 Diurnal variation of major components of PM2.5 in winter in Guangzhou

的 35% 左右。总体来讲 1~2 月 PM2.5 中主要化学成分均为 OC 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>，两者合计约占 PM2.5 质量的 40% 左右。

### 3.2 消光系数逐日变化特征

利用美国 IMPROVE 研究计划得到的颗粒物消光系数 ( $B_{ext}$ ) 计算公式 (Sisler et al., 2000), 来计算广州冬季大气颗粒物消光系数, 公式如下:

$$B_{ext} = 3f(RH)[(NH_4)_2SO_4 + NH_4NO_3] + 4[POM] + 10[LAC] + 1[fine\ soil] + 0.6[coarse\ mass] + 10, \quad (1)$$

其中  $(NH_4)_2SO_4 = 4.125 [S]$ ;  $NH_4NO_3 = 1.29 [NO_3^-]$ ;  $POM$  (particulate organic matter) =  $1.4 [OC]$ ;  $LAC$  (light-absorbing carbon) =  $EC$ ;  $fine\ soil = 2.2 [Al] + 2.49 [Si] + 1.63 [Ca] + 2.42 [Fe] + 1.94 [Ti]$ ;  $coarse\ mass = PM_{10}mass - PM_{2.5}mass$ .  $RH$  为相对湿度,

$f(RH)$  为相对湿度增长系数,  $f(RH)$  取值见表 2 (Malm et al., 2001)。方程的最后一项 10 代表清洁空气的散射系数。 $B_{ext}$  单位为  $Mm^{-1}$ 。化学成分的单位为  $\mu g \cdot m^{-3}$ 。

有研究表明 [fine soil] 和 [coarse mass] 两部分对  $B_{ext}$  贡献很小 (Cheung et al., 2005), 此外考虑到  $NO_2$  具有吸光作用 (Hodkinson, 1966), 因此本研究将公式 1 简化修正为:

$$B_{ext} \approx 3f(RH)[(NH_4)_2SO_4 + NH_4NO_3] + 4[POM] + 10[EC] + 161[NO_2], \quad (2)$$

其中  $[NO_2]$  单位为  $mg \cdot m^{-3}$ 。

图 3 为冬季消光系数的逐日变化趋势。冬季广州大气消光系数为  $342 \pm 185 Mm^{-1}$ 。1 月发生的两次霾天气过程中, 污染最为严重的 1 月 7 日和 1 月 19 日的消光系数分别为  $903 Mm^{-1}$  和  $624 Mm^{-1}$ ,  $(NH_4)_2SO_4$ 、 $NH_4NO_3$ 、 $POM$  和  $EC$  对消光系数的贡献分别为 22.6%、23.5%、33.3%、

表 2 不同相对湿度条件下 f(RH) 值

Table 2 Statistical summary of mean f(RH) values in selected relative humidity ranges

RH 范围	40%~45%	45%~50%	50%~55%	55%~60%	60%~65%	65%~70%	70%~75%	75%~80%	80%~85%	85%~90%	>90%
f(RH)值	1.22	1.27	1.33	1.38	1.45	1.55	1.65	1.83	2.10	2.46	3.17

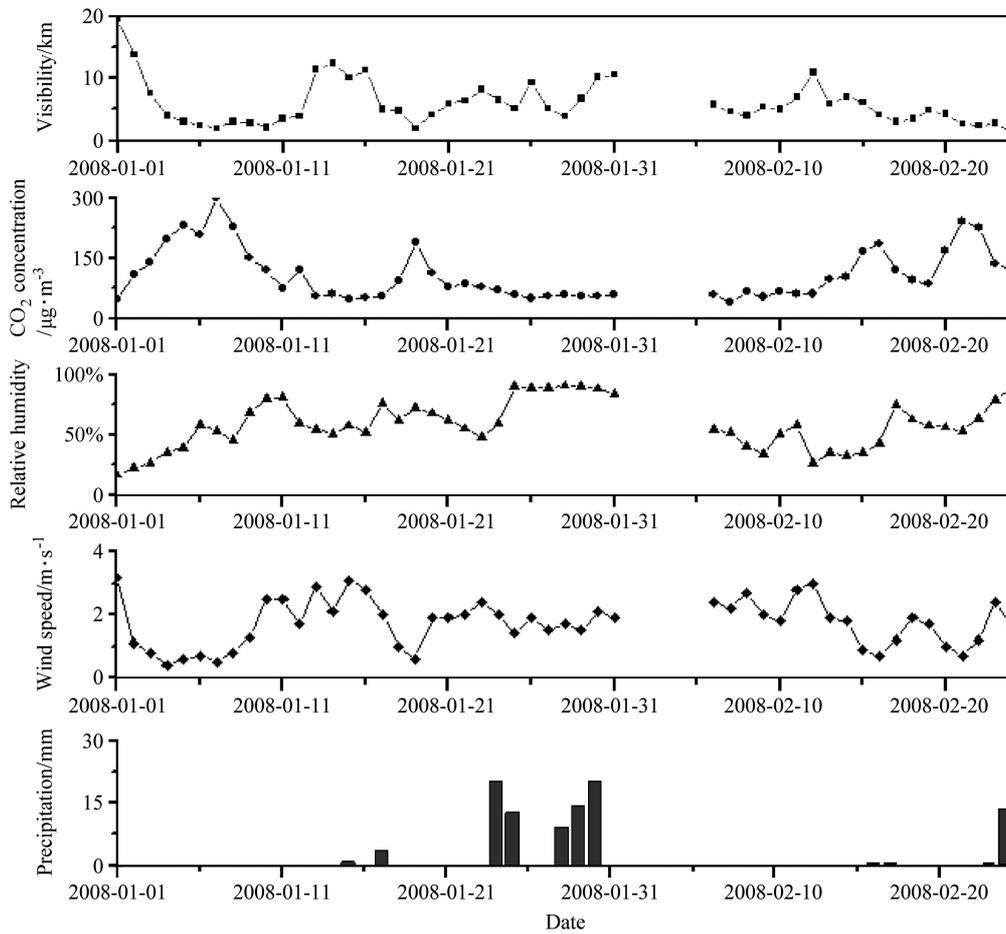


图2 广州冬季能见度和 $\text{NO}_2$ 以及气象因子的变化趋势

Fig. 2 Diurnal variation of visibility, nitrogen dioxide, and meteorological parameters in winter in Guangzhou

15.3%和28.0%、18.9%、30.7%、17.6%。这4种成分对消光系数的贡献之和达到95.0%左右。春节期间消光系数平均约为 $257 \text{ Mm}^{-1}$ ，主要的消光成分为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ，对消光系数的贡献达到51.0%。

由图2和图3可知， $B_{\text{ext}}$ 和能见度的变化趋势相反。但是在相同能见度天气，大气消光系数还是存在较大差异，如1月7日和19日大气能见度均为1.9 km，而消光系数却分别为 $903 \text{ Mm}^{-1}$ 和 $624 \text{ Mm}^{-1}$ 。比较发现，1月7日主要的大气消光污染物的浓度均高于19日，均为静小风天气，主要的差别是1月7日相对湿度为53%而19日的相对湿度为73%，类似同样的情况还有2月11日和2月14日，1月21日和2月13日等，这说明即使污染物浓度相对较低，较高的相对湿度同样可以导致能见度降低，而与计算出

的大气消光系数存在一定差异，这可能是由于高湿度天气条件下 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 散光能力更强，即高湿度 $f(\text{RH})$ 取值应更大。因此急需在广州开展 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 湿度增长曲线的研究。

### 3.3 $\text{PM}_{2.5}$ 中化学成分和 $\text{NO}_2$ 对消光系数贡献

图4为广州冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中化学成分和 $\text{NO}_2$ 对消光系数的贡献。由图4可知，广州冬季大气消光系数主要贡献者为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 、POM、EC和 $\text{NO}_2$ ，对消光系数的贡献分别为36.3%、14.5%、26.6%、17.4%和5.2%， $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 、POM和EC对消光系数的贡献之和达到94.8%。颗粒物中的硫酸盐主要来自 $\text{SO}_2$ 转化，而 $\text{SO}_2$ 主要来自工业排放燃煤排放，由此可以推断工业燃煤排放是导致广州冬季能见度降低最主要的因子之一。

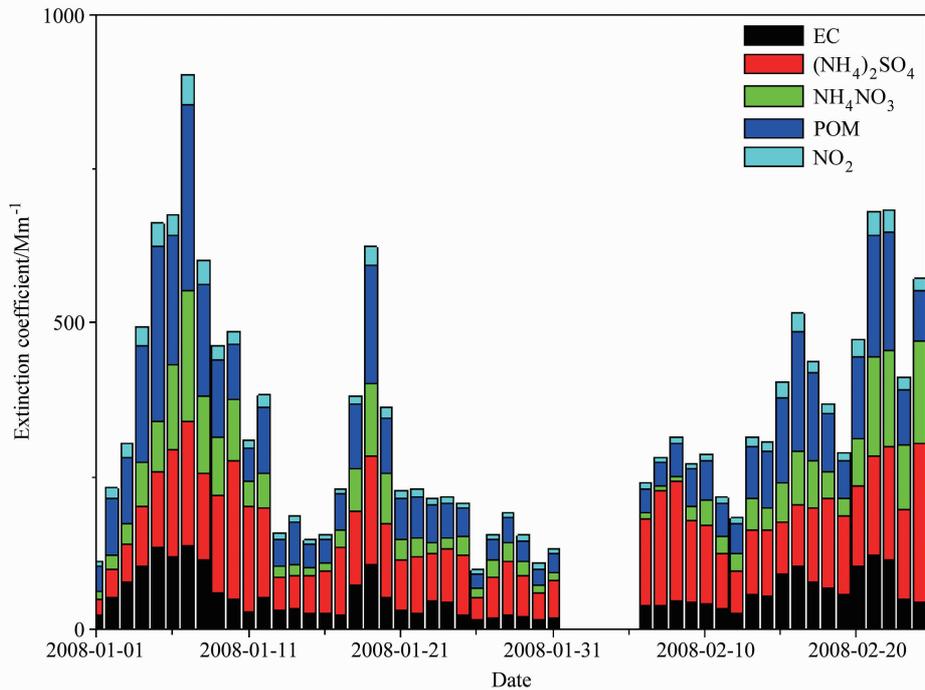
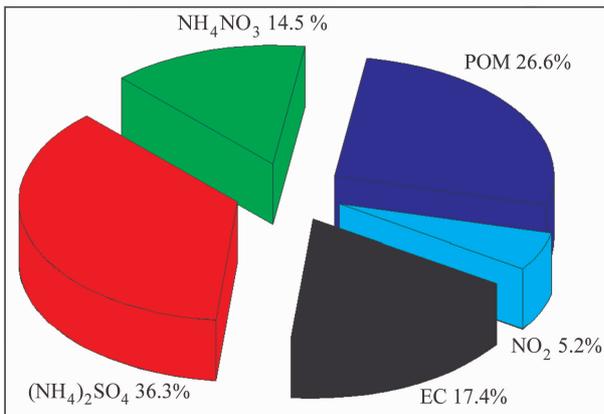


图3 广州冬季消光系数的逐日变化趋势

Fig. 3 Diurnal variation of extinction coefficients of chemical compositions in PM<sub>2.5</sub> in winter in Guangzhou图4 广州冬季 PM<sub>2.5</sub> 中化学成分和 NO<sub>2</sub> 对消光系数的贡献Fig. 4 Contribution of chemical compositions in PM<sub>2.5</sub> and nitrogen dioxide to extinction coefficients in winter in Guangzhou

## 4 结论

(1) 广州冬季 PM<sub>2.5</sub> 日均值质量浓度为  $89.0 \pm 53.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , OC 质量浓度为  $16.9 \pm 11.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , EC 质量浓度为  $5.9 \pm 3.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 水溶性离子总浓度为  $43.9 \pm 23.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 平均占 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的 49.3%。水溶性离子中  $\text{SO}_4^{2-}$ 、

$\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  浓度最大, 分别为  $19.4 \pm 9.0$ 、 $10.1 \pm 9.0$  和  $7.0 \pm 4.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(2) 春节期间属于一次霾天气过程, PM<sub>2.5</sub> 质量浓度平均值为  $75.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , PM<sub>2.5</sub> 中主要化学成分为  $\text{SO}_4^{2-}$ , 占 PM<sub>2.5</sub> 质量的 35% 左右。广州冬季 PM<sub>2.5</sub> 中主要化学成分均为 OC 和  $\text{SO}_4^{2-}$ , 两者合计约占 PM<sub>2.5</sub> 质量的 40% 左右。

(3) 广州冬季大气消光系数为  $342 \pm 185 \text{Mm}^{-1}$ 。春节期间消光系数平均约为  $257 \text{Mm}^{-1}$ , 主要的消光成分为  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , 对消光系数的贡献达到 51.0%。

(4) 广州冬季大气消光系数主要贡献者为  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 、POM、EC 和  $\text{NO}_2$ , 对消光系数的贡献分别为 36.3%、14.5%、26.6%、17.4% 和 5.2%,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 、POM 和 EC 对消光系数的贡献和达到 94.8%。

## 参考文献 (References)

- Chan Y C, Simpson R W, McTainsh G H, et al. 1999. Source apportionment of visibility degradation problems in Brisbane (Australia) using the multiple linear regression techniques [J]. Atmos. Environ., 33 (19): 3237-3250.

- Cheung H C, Wang T, Baumann K, et al. 2005. Influence of regional pollution outflow on the concentrations of fine particulate matter and visibility in the coastal area of southern China [J]. *Atmos. Environ.*, 39: 6568–6577.
- Chow J C, Watson J G, Pritchett L C, et al. 1993. The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system: Description, evaluation and applications in US air quality studies [J]. *Atmos. Environ.*, 27A (8): 1185–1201.
- Deng X, Tie X, Wu D. 2008. Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta (PRD) region, China [J]. *Atmos. Environ.*, 42: 1424–1435.
- Doyle M, Stephen D. 2002. Visibility trends in the UK 1950–1997 [J]. *Atmos. Environ.*, 36: 3161–3172.
- Hodkinson R J. 1966. Calculations of colour and visibility in urban atmospheres polluted by gaseous NO<sub>2</sub> [J]. *International Journal of Air and Water Pollution*, 10: 137–144.
- Kim K W. 2007. Physico-chemical characteristics of visibility impairment by airborne pollen in an urban area [J]. *Atmos. Environ.*, 41: 3565–3576.
- 刘新翌, 张远航, 曾立民, 等. 2006. 广州市大气能见度影响因子的贡献研究. *气候与环境研究* [J], 11 (6): 733–738. Liu Xingang, Zhang Yuanhang, Zeng Limin, et al. 2006. Research on the influential factor of visibility reduction in Guangzhou [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (6): 733–738.
- 马雁军, 左洪超, 张云海, 等. 2005. 辽宁中部城市群大气能见度变化趋势及影响因子分析 [J]. *高原气象*, 24 (4): 623–628. Ma Yanjun, Zuo Hongchao, Zhang Yunhai, et al. 2005. Analyses on variation trends of atmospheric visibility and its effect factor in multi-cities in central Liaoning [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 24 (4): 623–628.
- Malm W C, Derek E D. 2001. Estimates of aerosol species scattering characteristics as a function of relative humidity [J]. *Atmos. Environ.*, 35: 2845–2860.
- Pope C A, Dockery D W. 2006. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect [J]. *J. Air and Waste Manage. Assoc.*, 56: 709–742.
- Sisler J F, Malm W C. 2000. Interpretation of Trends of PM<sub>2.5</sub> and Reconstructed Visibility from the IMPROVE Network [J]. *J. Air and Waste Manage. Assoc.*, 50: 775–789.
- 宋宇, 唐孝炎, 张远航, 等. 2003. 北京大气能见度规律及下降原因 [J]. *环境科学研究*, 16 (2): 10–12. Song Yu, Tang Xiaoyan, Zhang Yuanhang, et al. 2003. The study of the status and degradation of visibility in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences (in Chinese)*, 16 (2): 10–12.
- 王玮, 潘志, 刘红杰, 等. 2001. 交通来源颗粒物粒径谱分布及其与能见度关系 [J]. *环境科学研究*, 14 (4): 17–22. Wang Wei, Pan Zhi, Liu Hongjie, et al. 2001. Characteristics of size distribution of particles from traffic sources and their relations with visibility [J]. *Research of Environmental Sciences (in Chinese)*, 14 (4): 17–22.
- Watson J G. 2002. Visibility: Science and regulation [J]. *J. Air and Waste Manage. Assoc.*, 52: 628–713.
- Wu D, Tie X, Li C, et al. 2005. An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study [J]. *Atmos. Environ.*, 39: 6568–6577.
- Yang L X, Wang D C, Cheng S H, et al. 2007. Influence of meteorological conditions and particulate matter on visual range impairment in Jinan, China [J]. *Sci. Total Environ.*, 383: 164–173.