

# 大气细颗粒物对大气能见度的影响

黄元龙<sup>①</sup>, 杨新<sup>①②\*</sup><sup>①</sup> 上海市大气颗粒物污染防治重点实验室, 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433;<sup>②</sup> 复旦大学全球环境变化研究所, 上海 200433

\* 联系人, E-mail: yangxin@fudan.edu.cn

2013-02-15 收稿, 2013-03-26 接受, 2013-04-19 网络版发表

国家自然科学基金(20937001, 21177027, 41275126)、上海市科委基础研究项目(12DJ1400100, 10JC1402000)和复旦大学研究生创新基金资助

**摘要** 大气颗粒物污染是造成灰霾的主要原因. 本文总结了大气颗粒物影响大气能见度的几个主要因素, 即颗粒物的数浓度(或质量浓度)粒径分布、化学组分以及混合状态. 我们认为, 空气动力学粒径小于  $1 \mu\text{m}$  的细颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )是影响大气能见度最关键的大气成分. 而要准确理解颗粒物的光学性质还必须结合颗粒物的化学组分及其混合状态来综合分析.

**关键词**大气颗粒物  
光学性质  
 $\text{PM}_{10}$   
化学组成  
混合态

大气气溶胶颗粒被定义为悬浮在气体中的固相或液相粒径约  $3 \text{ nm} \sim 10 \mu\text{m}$  的小颗粒<sup>[1]</sup>, 它们是地球大气的重要组成部分, 对全球气候、区域空气污染及人体健康有很大影响. 在可见光波长范围内, 大气气溶胶能显著影响大气能见度, 直接通过散射和吸收太阳辐射改变地球的能量收支和循环; 而其作为云凝结核和冰晶核能改变云层反射率及云的生命周期, 对大气辐射平衡的间接影响更为深远<sup>[2]</sup>. 虽然气溶胶本身是构成地球大气的重要组成部分, 但是随着全球经济的迅速发展和城市化进程的加快, 城市区域颗粒物污染现象越来越严重, 影响城市美观和人们生活, 成为目前大城市最关注的大气污染物之一<sup>[3]</sup>.  $\text{PM}_{2.5}$  (particulate matter)是指粒径小于  $2.5 \mu\text{m}$  的超细颗粒物, 一般在城区大气中占气溶胶总质量一半以上<sup>[1]</sup>, 高浓度  $\text{PM}_{2.5}$  可以显著降低大气能见度, 从而导致一个重要的污染现象——灰霾(相对湿度低于 80%时发生的大气低能见度现象)<sup>[5]</sup>. 造成灰霾的细颗粒物大多与人类活动有关, 包括人类直接排放的细颗粒物或污染气体经过气-粒转化二次形成的细颗粒物等<sup>[5]</sup>. 我国城市大气能见度一直呈现快速退化的

趋势. 来自我国 681 个气象站点的能见度数据统计结果表明<sup>[6]</sup>, 1957~2005 年期间我国出现了 4 个重污染灰霾地区(华北平原、长江三角洲地区、珠江三角洲地区以及四川盆地), 其中我国东部地区能见度平均下降约 10 km, 这正是人类活动排放污染的结果<sup>[7]</sup>.

## 1 大气颗粒物光学性质的定量描述

经过 20 世纪 80 年代对单颗粒气溶胶光学属性理论模型的发展, 米散射理论成为描述气溶胶散射和吸收光学属性的最经典理论<sup>[8]</sup>. 其关键的 3 个参数是: 入射光波长  $\lambda$ , 表示颗粒粒径大小的参数  $\alpha$  ( $\alpha = \pi D_p / \lambda$ ) 以及复折射率  $N$  ( $N = n + k \cdot i$ ). 其中  $D_p$  表示颗粒的直径, 复折射率  $N$  的实部  $n$  表示反射或散射辐射的能力, 虚部  $k$  表示吸收辐射的能力, 实部和虚部都是波长  $\lambda$  的函数. 通过复折射率  $N$  可以模拟计算出气溶胶与气候相关的参数并进一步用于各种气候模型研究. 这些参数具体包括散射系数  $b_{\text{sca}}$ 、吸收系数  $b_{\text{abs}}$ 、消光系数  $b_{\text{ext}}$  ( $b_{\text{ext}} = b_{\text{sca}} + b_{\text{abs}}$ )、气溶胶单次反照率  $\omega$  ( $\omega = b_{\text{sca}} / b_{\text{ext}}$ ) 以及气溶胶光学厚度  $\tau_{\text{ext}}$  等等. 与消光系数  $b_{\text{ext}}$  相关的另一个参数即消光效率  $Q_{\text{ext}}$ , 它们

**引用格式:** 黄元龙, 杨新. 大气细颗粒物对大气能见度的影响. 科学通报, 2013, 58: 1165–1170

Huang Y L, Yang X. Influence of fine particulate matter on atmospheric visibility (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2013, 58: 1165–1170. doi: 10.1360/972013-200

之间的关系为<sup>[8]</sup>

$$b_{\text{ext}}(\lambda) = \int_{D_p^{\text{min}}}^{D_p^{\text{max}}} \frac{\pi D_p^2}{4} Q_{\text{ext}}(N, \alpha) n(D_p) dD_p, \quad (1)$$

其中  $Q_{\text{ext}}(N, \alpha)$  是颗粒粒径的函数,  $n(D_p)$  是数浓度粒径分布, 二者均可通过实验测量获得.

一般假设人眼能分辨的背景与目标物间光强差阈值为 2%, 由 Beer-Lambert 定律可近似得到能见度  $x_v(m)$  与消光系数  $b_{\text{ext}}$  的关系为<sup>[8]</sup>

$$x_v = \frac{3.192}{b_{\text{ext}}}. \quad (2)$$

## 2 粒径分布对颗粒物光学性质的影响

公式(1)表明颗粒物的粒径分布对气溶胶的消光系数有重要影响. 事实上, 公式(1)对气体分子同样适用, 只是在可见光波段表示气体分子大小的参数  $\alpha \ll \lambda$ , 此时空气分子实际遵循瑞利散射原理, 这也是干净的天空呈现蓝色的原因. 根据米散射理论计算的可见光波长范围内空气分子的消光系数很小, 比如干净海平面上空的能见度能达到 296 km<sup>[8]</sup>.

由于在实际测量中颗粒物的质量最易测得, 为简化探讨将公式(1)改写为如下形式:

$$b_{\text{ext}}(\lambda) = \int_{D_p^{\text{min}}}^{D_p^{\text{max}}} \frac{3}{2\rho_p D_p} Q_{\text{ext}}(N, \alpha) n_M(D_p) dD_p, \quad (3)$$

其中  $\rho_p$  是颗粒密度,  $n_M(D_p)$  是质量粒径分布, 将

$$E_{\text{ext}}(D_p, \lambda, N) = \frac{3}{2\rho_p D_p} Q_{\text{ext}}(N, \alpha), \quad (4)$$

称为质量消光效率<sup>[8]</sup>(质量散光和吸光效率的表达式类似).

根据  $PM_{2.5}$  的来源可将其细分为两个模态: 粒径在 0.01~0.08  $\mu\text{m}$  间的艾根核模态以及 ~0.08  $\mu\text{m}$  至 1~2  $\mu\text{m}$  间的积聚模态. 在可见光范围内(400~700 nm), 对于  $D_p \ll \lambda$  的颗粒物而言(一般指  $D_p < 0.1 \mu\text{m}$ ),  $E_{\text{scat}}(D_p, \lambda, N) \propto D_p^3$ , 由于分布在这一粒径范围的颗粒物质量很小, 因此它们对总体的散光贡献不大; 而  $E_{\text{abs}}(D_p, \lambda, N) \propto D_p^0$ , 说明对于有吸光性能的颗粒物, 粒径小于 0.1  $\mu\text{m}$  时其单位质量的吸光能力不随粒径变化而变化. 对于  $D_p \ll \lambda$  的颗粒物而言(一般指  $D_p > 1 \mu\text{m}$ ),  $E_{\text{scat}}(D_p, \lambda, N) \propto D_p^{-1}$ ,  $E_{\text{abs}}(D_p, \lambda, N) \propto D_p^{-1}$ , 即颗粒物单位质量的散光和吸光能力都以  $D_p^{-1}$  下降. 理论计算结果<sup>[8]</sup>表明, 那些具有与可见光波长同量

级粒径 ( $\alpha \approx 1$ ) 的颗粒物对可见光的消光程度最强, 说明粒径在 0.1~1  $\mu\text{m}$  之间的颗粒物( $PM_{1}$ )才是造成大气能见度降低的本质原因. 研究人员在对我国珠江三角洲地区的细颗粒物消光性质的研究中发现  $PM_{1}$  的贡献能达到 90%<sup>[9]</sup>. 虽然  $PM_{2.5}$  的质量浓度常被用来估计单位质量颗粒物的消光效率, 但是仅仅用这一个参数估算出来的结果并不精确, 公式(4)表明质量消光效率还由  $Q_{\text{ext}}(N, \alpha)$  决定, 而  $Q_{\text{ext}}$  与颗粒物的化学组成密切相关, 因此气溶胶中的化学组成信息也至关重要.

## 3 化学组分对大气颗粒物光学性质的影响

气溶胶颗粒一般是由有机物、无机物或它们的混合物构成<sup>[10]</sup>, 其化学组分决定了颗粒的物理化学属性(化学反应活性、吸湿性、光学属性等等<sup>[11]</sup>). 早于 20 世纪 70 年代人们就已经开始研究气溶胶的化学组分与其光学特性的关系, 美国保护能见度联合监测网络 IMPROVE(Intergency Monitoring of Protected Visual Environment)通过长期对气溶胶和能见度的观测研究, 建立了根据气溶胶中的化学成分核算消光系数的经典公式. 现有的对于含不同化学组分的气溶胶光学性质的研究表明: 由无机物(如海盐<sup>[12]</sup>、硫酸盐<sup>[13]</sup>、硝酸盐、铵盐<sup>[8]</sup>等)和不吸光的有机物<sup>[14,15]</sup>组成的气溶胶趋向于散射可见光, 形成气溶胶的致冷效应; 而由黑碳<sup>[16-18]</sup>(BC)、煤烟灰(soot)<sup>[19-22]</sup>或中度吸光的有机物(即所谓的“棕色碳”<sup>[23-27]</sup>)趋向于吸收可见光, 形成气溶胶的增暖效应. “棕色碳”是最近比较热门的一类有机气溶胶, 不仅可以是一次源排放(如生物质燃烧<sup>[28]</sup>), 还可以通过有机胺类<sup>[29,30]</sup>或无机铵盐<sup>[25,31,32]</sup>与醛酮类化合物反应等化学过程生成, 虽然在大气中的含量并不多, 但是由于其超强的吸收辐射的能力, 吸引了很多研究者的目光. 矿尘气溶胶在可见光波段一般是散射致冷效应, 但在红外波段则扮演着温室气体的角色<sup>[8,33,34]</sup>. 目前, 研究人员已经能够有效地将大气中不同化学组分对气溶胶光学性质的贡献比例计算出来<sup>[35-38]</sup>, 而这也一直是气溶胶光学性质研究的重点.

然而, 不论是直接源排放的一次气溶胶还是经过大气物理化学过程形成的二次气溶胶, 它们的化学组成和物理形态在大气中都会一直变化. 化学成分的变化往往都会引起颗粒物的物理性质发生变化, 如粒径、光学属性等. 可以想见, 当具有不同光学性

质的化学物质按不同的混合方式集合到一起时,它们对外表现出的吸光和散光的性质也会不同.所以对气溶胶光学性质的准确研究还必须引入混合态的概念.

#### 4 颗粒物混合态对气溶胶光学性质的影响

大气中的单个气溶胶颗粒一般都是由不同的化学物质构成,而这些化合物在颗粒相中的分布情况影响颗粒物与光的相互作用,因此对于颗粒物混合态的讨论很有必要.黑碳气溶胶是大气中已知的仅次于  $\text{CO}_2$  的致暖因子,它的混合状态直接影响其在全球气候变化中所起的作用.不同混合态的黑碳气溶胶<sup>[39,40]</sup>会影响其与光的相互作用.例如,纯硫酸铵与纯黑碳外部混合物与光的相互作用效果跟黑碳颗粒外表面包裹一层硫酸铵就不一样,后者中的黑碳颗粒被认为吸光能力得到了增强<sup>[16,41,42]</sup>.这里提到的是两个极端的混合情形,前者被称为外混合态,每个颗粒物都有特定的光学性质,如仅散射或仅吸收;后者是一种理想的内混合态模型,每个颗粒物都有吸收和散射的能力,所以这两种混合态对外表现出的光学属性不同.

大气颗粒物的外混和内混两种混合态可用示意图 1 表示.外混指单一化合物只分布在单颗粒上(图 1(a)),内混指不同化合物混合分布在单颗粒上(图 1(b)~(e))<sup>[8]</sup>.内混态气溶胶分为同质内混和异质内混,同质内混即不同种类化合物均匀分布于单个颗粒中(图 1(b)),异质内混又可称为颗粒的核壳分布形态(图 1(c)~(e)).核壳分布的颗粒有多种形成方式:半挥发性气体冷凝于已存在的颗粒上,含不同溶解性物质的水滴脱水后的残留物或发生异相化学反应(如氧化反应、自由基反应、光化学反应等等),这些作用均

会在气溶胶表面形成与气溶胶核的物理化学性质均不同的壳<sup>[2]</sup>.因此这种形态的气溶胶在模型假设上可细分为多种组合,如有吸收性的核(如黑碳、煤灰或矿尘)与无吸收性的或弱吸收性的壳(冷凝有机物)组合<sup>[18~22,33,34]</sup>(图 1(c))、无吸收性的核(如  $\text{NaCl}$ )与无吸收性的壳(如  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、不吸光的有机物等)组合<sup>[43,44]</sup>(图 1(d))、无吸收性的核与弱吸收性的壳(如“棕色碳”、类腐殖质物质 HULIS)组合<sup>[15,25,31]</sup>(图 1(e))等等.单颗粒气溶胶的核壳模型更易于解释气溶胶的二次形成以及在大气中老化的过程,而且在实验室模拟气溶胶的形成过程也更容易实现,因此在研究中这种模型常被用来假设单颗粒气溶胶的混合状态,再利用 Mie 散射理论计算它们的光学性质,通过与实际测量结果的对比来修正相应的理论假设<sup>[12,45,46]</sup>.

对于颗粒物混合态的分析还有助于研究与气溶胶光学性质密切相关的另一个重要物理性质——颗粒物的吸湿性.  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和黑碳是大气中两种典型的吸湿和不吸湿的物种,以上文的极端情况为例,当相对湿度增加时,外混态气溶胶中仅  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  颗粒会吸湿增长,而内混态气溶胶中每个颗粒都会吸湿增长,因为黑碳核表面的  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  壳改变了黑碳表面原本憎水的性状,长大的黑碳颗粒以及颗粒物表面的水层会显著增加它的散光能力<sup>[47]</sup>.由上面的讨论可以知道,如果仅仅根据化合物的质量以及颗粒物粒径分布等信息而不考虑它们的混合状态来核算气溶胶消光系数,必定会导致误差.

随着我国快速的经济发展和城市化进程,我国东部城市地区的空气污染严重.高浓度的污染排放以及与多种污染的相互作用,使得研究中国城市大气颗粒物的化学组分变化极为复杂,准确地研究老

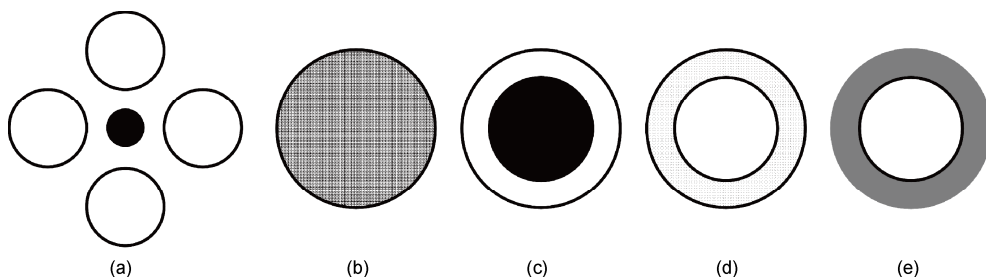


图 1 气溶胶颗粒的混合态分类示意图

(a) 外混态气溶胶,黑色小球代表由吸光性物质组成的颗粒(如黑碳),白色球代表由散射性物质组成的颗粒(如硫酸铵);(b)~(e)示意内混态气溶胶,其中(b)代表均质混合气溶胶,(c)~(e)代表异质内混气溶胶,黑色及灰色代表具有吸光性的物质,白色代表具有散射性的物质

化气溶胶的光学性质变得更为具有挑战性<sup>[7]</sup>。气溶胶的数浓度(或质量浓度)粒径分布、化学组分以及混合状态对于帮助我们全面了解它的光学属性缺一不可。目前的技术手段,如扫描电迁移率粒径谱仪 SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer), 在线气溶胶质谱

技术 AMS (Aerosol Mass Spectrometer)、ATOFMS (Aerosol Time-of-Flight Mass Spectrometer), 单颗粒黑碳谱仪 SP2 (Single Particle Soot Photometer)等, 已经可以做到在线监测大气颗粒物的上述属性, 为快速诊断雾霾污染的成因和发展趋势提供了技术保障。

## 参考文献

- 1 Finlayson-Pitts B J, Pitts J N. Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications. San Diego: Academic Press, 2000
- 2 Pöschl U. Atmospheric aerosols: Composition, transformation, climate and health effects. *Angew Chem Int Ed*, 2005, 44: 7520–7540
- 3 Wang K C, Dickinson R E, Liang S L. Clear sky visibility has decreased over land globally from 1973 to 2007. *Science*, 2009, 323: 1468–1470
- 4 Wu D, Bi X Y, Deng X J, et al. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pearl River Delta. *Acta Meteorol Sin*, 2007, 21: 215–223
- 5 Hoyle C R, Boy M, Donahue N M, et al. A review of the anthropogenic influence on biogenic secondary organic aerosol. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11: 321–343
- 6 Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols. *Atmos Chem Phys*, 2012, 12: 779–799
- 7 Chan C K, Yao X. Air pollution in mega cities in China. *Atmos Environ*, 2008, 42: 1–42
- 8 Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2006
- 9 Garland R M, Yang H, Schmid O, et al. Aerosol optical properties in a rural environment near the mega-city Guangzhou, China: Implications for regional air pollution, radiative forcing and remote sensing. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8: 5161–5186
- 10 Zhang Q, Jimenez J L, Canagaratna M R, et al. Ubiquity and dominance of oxygenated species in organic aerosols in anthropogenically-influenced Northern Hemisphere midlatitudes. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L13801
- 11 Cappa C D, Che D L, Kessler S H, et al. Variations in organic aerosol optical and hygroscopic properties upon heterogeneous OH oxidation. *J Geophys Res-Atmos*, 2011, 116: D15204
- 12 Li Y, Ezell M J, Finlayson-Pitts B J. The impact of organic coatings on light scattering by sodium chloride particles. *Atmos Environ*, 2011, 45: 4123–4132
- 13 Harris B M, Highwood E J. A simple relationship between volcanic sulfate aerosol optical depth and surface temperature change simulated in an atmosphere-ocean general circulation model. *J Geophys Res-Atmos*, 2011, 116: D05109
- 14 Maria S F, Russell L M, Gilles M K, et al. Organic aerosol growth mechanisms and their climate-forcing implications. *Science*, 2004, 306: 1921–1924
- 15 Dinar E, Riziq A A, Spindler C, et al. The complex refractive index of atmospheric and model humic-like substances (HULIS) retrieved by a cavity ring down aerosol spectrometer (CRD-AS). *Faraday Discuss*, 2008, 137: 279–295
- 16 Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature*, 2001, 409: 695–697
- 17 Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, 297: 2250–2253
- 18 Henson B F. An adsorption model of insoluble particle activation: Application to black carbon. *J Geophys Res-Atmos*, 2007, 112: D24S16
- 19 Zhang R Y, Khalizov A F, Pagels J, et al. Variability in morphology, hygroscopicity, and optical properties of soot aerosols during atmospheric processing. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 10291–10296
- 20 Monge M E, D'Anna B, Mazri L, et al. Light changes the atmospheric reactivity of soot. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 6605–6609
- 21 Khalizov A F, Zhang R Y, Zhang D, et al. Formation of highly hygroscopic soot aerosols upon internal mixing with sulfuric acid vapor. *J Geophys Res-Atmos*, 2009, 114: D05208
- 22 Xue H X, Khalizov A F, Wang L, et al. Effects of coating of dicarboxylic acids on the mass-mobility relationship of soot particles. *Environ Sci Technol*, 2009, 43: 2787–2792
- 23 Sun H L, Biedermann L, Bond T C. Color of brown carbon: A model for ultraviolet and visible light absorption by organic carbon aerosol. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L17813

- 24 Yang M, Howell S G, Zhuang J, et al. Attribution of aerosol light absorption to black carbon, brown carbon, and dust in China—interpretations of atmospheric measurements during EAST-AIRE. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9: 2035–2050
- 25 Nguyen T B, Lee P B, Updyke K M, et al. Formation of nitrogen- and sulfur-containing light-absorbing compounds accelerated by evaporation of water from secondary organic aerosols. *J Geophys Res-Atmos*, 2012, 117: D01207
- 26 Andreae M O, Gelencsér A. Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols. *Atmos Chem Phys*, 2006, 6: 3131–3148
- 27 Wonaschütz A, Hitztenberger R, Bauer H, et al. Application of the integrating sphere method to separate the contributions of brown and black carbon in atmospheric aerosols. *Environ Sci Technol*, 2009, 43: 1141–1146
- 28 Alexander D T L, Crozier P A, Anderson J R. Brown carbon spheres in East Asian outflow and their optical properties. *Science*, 2008, 321: 833–836
- 29 De Haan D O, Corrigan A L, Smith K W, et al. Secondary organic aerosol-forming reactions of glyoxal with amino acids. *Environ Sci Technol*, 2009, 43: 2818–2824
- 30 De Haan D O, Hawkins L N, Kononenko J A, et al. Formation of nitrogen-containing oligomers by methylglyoxal and amines in simulated evaporating cloud droplets. *Environ Sci Technol*, 2011, 45: 984–991
- 31 Updyke K M, Nguyen T B, Nizkorodov S A. Formation of brown carbon via reactions of ammonia with secondary organic aerosols from biogenic and anthropogenic precursors. *Atmos Environ*, 2012, 63: 22–31
- 32 Bones D L, Henricksen D K, Mang S A, et al. Appearance of strong absorbers and fluorophores in limonene-O<sub>3</sub> secondary organic aerosol due to NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-mediated chemical aging over long time scales. *J Geophys Res-Atmos*, 2010, 115: D05203
- 33 Xue M, Ma J Z, Yan P, et al. Impacts of pollution and dust aerosols on the atmospheric optical properties over a polluted rural area near Beijing city. *Atmos Res*, 2011, 101: 835–843
- 34 Weinzierl B, Sauer D, Esselborn M, et al. Microphysical and optical properties of dust and tropical biomass burning aerosol layers in the Cape Verde region—An overview of the airborne *in situ* and lidar measurements during SAMUM-2. *Tellus B*, 2011, 63: 589–618
- 35 Cao J J, Wang Q Y, Chow J C, et al. Impacts of aerosol compositions on visibility impairment in Xi'an, China. *Atmos Environ*, 2012, 59: 559–566
- 36 Huang K, Zhuang G, Lin Y, et al. Impact of anthropogenic emission on air quality over a megacity—Revealed from an intensive atmospheric campaign during the Chinese Spring Festival. *Atmos Chem Phys*, 2012, 12: 11631–11645
- 37 Zhang F W, Xu L L, Chen J S, et al. Chemical compositions and extinction coefficients of PM<sub>2.5</sub> in peri-urban of Xiamen, China, during June 2009–May 2010. *Atmos Res*, 2012, 106: 150–158
- 38 Wang X M, Ding X, Fu X X, et al. Aerosol scattering coefficients and major chemical compositions of fine particles observed at a rural site hit the central Pearl River Delta, South China. *J Environ Sci-China*, 2012, 24: 72–77
- 39 Li W J, Zhou S Z, Wang X F, et al. Integrated evaluation of aerosols from regional brown hazes over northern China in winter: Concentrations, sources, transformation, and mixing states. *J Geophys Res-Atmos*, 2011, 116: D09301
- 40 Cappa C D, Onasch T B, Massoli P, et al. Radiative absorption enhancements due to the mixing state of atmospheric black carbon. *Science*, 2012, 337: 1078–1081
- 41 Bond T C, Habib G, Bergstrom R W. Limitations in the enhancement of visible light absorption due to mixing state. *J Geophys Res-Atmos*, 2006, 111: D20211
- 42 Chung S H, Seinfeld J H. Climate response of direct radiative forcing of anthropogenic black carbon. *J Geophys Res-Atmos*, 2005, 110: D11102
- 43 Laskin A, Gaspar D J, Wang W H, et al. Reactions at interfaces as a source of sulfate formation in sea-salt particles. *Science*, 2003, 301: 340–344
- 44 Randles C A, Russell L M, Ramaswamy V. Hygroscopic and optical properties of organic sea salt aerosol and consequences for climate forcing. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L16108
- 45 Lang-Yona N, Abo-Riziq A, Erlick C, et al. Interaction of internally mixed aerosols with light. *Phys Chem Chem Phys*, 2010, 12: 21–31
- 46 Riziq A A, Erlick C, Dinar E, et al. Optical properties of absorbing and non-absorbing aerosols retrieved by cavity ring down (CRD) spectroscopy. *Atmos Chem Phys*, 2007, 7: 1523–1536
- 47 Qiu C, Khalizov A F, Zhang R. Soot aging from OH-initiated oxidation of toluene. *Environ Sci Technol*, 2012, 46: 9464–9472

## Influence of fine particulate matter on atmospheric visibility

HUANG YuanLong<sup>1</sup> & YANG Xin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Key Laboratory of Atmospheric Particle Pollution and Prevention, Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;

<sup>2</sup> Research Institute for Changing Global Environment, Fudan University, Shanghai 200433, China

Particulate pollution in the atmosphere is the major reason of haze formation. This paper summarizes the characteristics of airborne particles which affect the atmospheric visibility the most, including size segregated number (or mass) concentration, chemical composition and mixing state. Among all the atmospheric components, PM<sub>1</sub> (particulate matter smaller than 1 μm) plays the most important role on impairing the visibility. Besides, knowledge of particles' chemical composition and mixing state are necessary to fully understand their optical properties.

**particulate matter, optical properties, PM<sub>1</sub>, chemical composition, mixing state**

doi: 10.1360/972013-200