

灰霾期间气溶胶的污染特征

侯美伶,王杨君

(上海大学环境与化学工程学院,环境污染与健康研究所,上海 200444)

摘要:从颗粒物的时空分布和浓度水平方面综述了灰霾期间气溶胶的污染特征,介绍了灰霾期间气溶胶中金属元素、水溶性离子、有机碳和元素碳的浓度特征,以及颗粒物与能见度的相关性研究进展。指出:灰霾天气多发生在冬季,且气溶胶中 $PM_{2.5}$ 占的比重大;气溶胶污染与地理环境、气候条件、经济发展水平等有密切关系;水溶性离子多集中在 $PM_{2.5}$ 中;能见度的下降与气溶胶特别是细颗粒物有很大关系。提出目前灰霾研究中主要存在3大问题:一是对灰霾期间气溶胶中含有的有机物类别及其对不同季节发生灰霾的贡献率仍需进一步研究;二是灰霾期间气溶胶中有机物的形成机理尚不明确;三是不同源排放的气溶胶对灰霾形成的贡献率有待探讨。建议系统地开展大气细颗粒物有害成分的鉴定、源排放颗粒物的物理化学特性、扩散过程中各种物质间的反应和转化等方面的研究,为大气污染防治法规的制定提供依据。

关键词:灰霾;气溶胶;能见度;大气污染

中图分类号:X513

文献标识码:A

文章编号:1006-2009(2012)02-0006-06

Pollution Characteristics of Aerosols during Haze Period

HOU Mei-ling, WANG Yang-jun

(Research Institute of Environment Pollution and Health, College of Environment and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The aerosol characteristics during haze were analyzed from particulate matters of space and time distribution and concentration. The analysis described concentration characteristics of metal elements, water soluble ions, organic and elemental carbon, as well as correlation of particulate matters with atmospheric visibility. It indicated haze usually occurs in winter, and $PM_{2.5}$ held big proportion in aerosol. Aerosol pollution had close relationship with geographical environment, climate conditions, economic development level etc. Water soluble ions more likely concentrated on the $PM_{2.5}$. The visibility drop had highly related to aerosol especially fine particle matters. There were three matters in future haze research works that included the kinds of organic matters which contained in particulate matters and for the contribution in different season during haze, the formation mechanism of the organic matter in aerosol during haze, and contribution of haze formation by aerosol from different emission sources. To provide support of regulation establishment for the air pollution control, suggestion was made for research works including harmful substance identification of fine particulate matters in air, physical and chemical characteristics of particulate matters from emission source, reaction and transformation of all kinds of matters in diffusion process.

Key words: Haze; Aerosols; Visibility; Atmospheric pollution

灰霾天气指大量极细微的干尘粒等均匀地悬浮在空中,使能见度 <10 km、空气普遍有浑浊现象的天气状况^[1],一般是大气边界层乃至对流层低层整体的大气浑浊现象^[2]。雾和灰霾都会使能见度恶化,但二者不尽相同。雾是一种自然的大气现

象,是由大量悬浮在近地面空气中的微小水滴或冰

收稿日期:2011-04-19;修订日期:2012-02-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41105102)

作者简介:侯美伶(1987—),女,河北石家庄人,在读研究生,研究方向为柴油机排放颗粒物中多环芳烃及其衍生物的测定。

晶组成的气溶胶系统,是近地面层空气中水汽凝结(或凝华)的产物;而灰霾是一种稳态大气中的污染现象,静风、逆温、颗粒物和污染气体排放增加均可引起灰霾,其中细颗粒物和污染气体是灰霾的直接诱因^[3]。通常用相对湿度区别霾与雾。一般认为相对湿度 $\leq 80\%$ 为干霾;相对湿度在 $80\% \sim 95\%$ 之间为湿霾;相对湿度 $\geq 95\%$ 为轻雾或雾。当灰霾发生时,细粒子浓度升高,大量极细微的干性尘粒、烟粒、盐粒等均均匀地悬浮在空气中^[4],严重危害人体健康。最早的灰霾天气可追溯到1952年的伦敦烟雾事件^[5]。

灰霾的成分非常复杂,目前所知的主要成分为硫酸盐、硝酸盐、铵盐、含碳颗粒(包括元素碳和有机碳,元素碳主要产生于高温燃烧过程,有机碳主要来自相对低温的燃烧过程)、重金属、地壳物质等^[6]。其中大部分有害元素和化合物都富集在细颗粒物上,一旦被人从呼吸道吸入,就会沉积于肺泡。沉积肺泡的烟尘被溶解后进入血液,容易造成血液中毒,未被溶解的部分被细胞吸收,容易破坏细胞造成尘肺。近年研究表明,大气灰霾不仅损害人体健康^[7],污染环境,而且在全球能量平衡方面起重要作用^[8]。Raloff^[9]发现灰霾天气会降低农作物的光合作用,使农业减产。另外,灰霾使空气能见度降低,视野模糊不清,易引发交通事故、空难和海难。

目前,国内针对灰霾天气的研究仍处于初期阶段,针对灰霾期间气溶胶的研究主要集中在粒径分布、污染现状、时空分布等方面。而国外学者对灰霾天气及气溶胶的研究相对较早,研究层面比国内更深入,主要集中在气溶胶的组分、浓度及来源等方面。

1 灰霾期间气溶胶的时空分布

从时空分布的角度,由于各地气候及地理环境的差异,导致灰霾产生的时间和季节分布也各不相同。吴兑等^[10]研究表明,广州市灰霾天气主要出现在10月至次年4月,冬季灰霾发生频率较高,而较高的 $PM_{2.5}$ 质量浓度和相对湿度是引起灰霾天气的主要原因。张立多等^[11]在探讨灰霾天气对厦门市能见度影响的研究中发现,灰霾多发生在秋冬季,1月份最多,7月份最少。金均等^[12]研究了杭州市灰霾天气的基本特征,发现浙江省灰霾天数呈现出冬春季高于夏秋季。Li等^[13]研究发现,在乌

鲁木齐冬季和秋季是污染比较严重的季节,分析原因为10月15日至次年4月15日燃煤取暖造成;其次是春季,受西北准噶尔盆地和当地沙尘天气的影响,气溶胶浓度增大,灰霾天气频发。吴国平等^[14]对我国广州、武汉、兰州、重庆等4个城市空气中颗粒物污染的季节性变化特征进行了研究,发现在大多数情况下,均是冬春季污染最重,秋季次之,而夏季最轻。

不同时期的灰霾,空气中颗粒物的污染特征也不尽相同。Tan等^[15]对广州市冬夏两次灰霾事件的颗粒物进行分析,发现两次灰霾期间 PM_{10} 对总悬浮颗粒物(TSP)的贡献率不同,冬季 PM_{10} 占TSP的55.6%,而夏季则低一些,为51.7%;不同物质在不同季节的浓度特征也不同,例如多环芳烃,相对分子质量大的多环芳烃在夏季出现的灰霾中含量更高,而相对分子质量小的多环芳烃则在冬季出现的灰霾中含量更高,这可能是由于灰霾发生时温度不同,颗粒物的饱和蒸气压不同所造成。

目前,国内针对灰霾期间气溶胶的时空分布,大多开展不同季节发生的灰霾气溶胶中各项指标的测定及研究。然而,在一次灰霾事件中,一天之内,日照时长、紫外线强度、人类各项活动的频率等,都会影响TSP、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的变化。因此,加强对气溶胶日变化的监测和研究,可以为政府有关部门提供有效依据,引导人们调整出行时间,避开不利的天气状况。

2 灰霾期间气溶胶的浓度水平

在污染水平方面,灰霾期间气溶胶污染比较严重,TSP的平均质量浓度几乎是正常天气的两倍^[16]。Tan等^[15]分析了2003年广州市一次灰霾天气期间的颗粒物样品,发现一次灰霾中所有 PM_{10} 样品均超过国家空气质量二级标准,其中冬季出现的灰霾中 PM_{10} 的浓度是空气质量标准的1.73倍,对TSP的贡献率超过了50%,而在正常天气下其贡献率仅为35%左右。Xie等^[17]在研究北京沙尘暴天气下颗粒物的浓度特征期间出现了灰霾天气,并且检测到高浓度的 PM_{10} ,超过国家空气质量二级标准两倍有余。

表1^[15-18]列出了我国4个典型城市灰霾期间测定的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度。由表1可知,当出现灰霾时,我国大中城市的 $PM_{2.5}$ 年平均质量浓度均超过美国EPA规定的日平均质量浓度标准

65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 大中城市气溶胶污染严重; PM_{10} 也处于较高的质量浓度水平, 远高于我国规定的三级空气质量标准 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 南京测得的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度最低, 西安测得的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度最高, 北京和广州的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度水平相当, 这种地区差异与当地

的地理环境、气候条件和经济发展水平有关。例如西安, 地处我国中部偏西, 气候干燥, 工业发展水平居我国中小城市前列, 因而灰霾期间气溶胶污染严重。

表1 我国4个典型城市灰霾期间 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的日平均质量浓度对比^[15-18]

Table 1 Average concentrations of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ during the haze period in four typical cities of China^[15-18]

城市	北京	南京	广州	西安
测定时段	2000-04-01— 2000-04-30	2007-09— 2007-12	2002年夏季— 2003年冬季	2006-10-01— 2007-12-30
PM_{10} 测定均值 $\rho/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	257.5		233.5	477.3
$\text{PM}_{2.5}$ 测定均值 $\rho/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	230	96.24	204.5	351.2

灰霾期间气溶胶中的细颗粒物占了很大比例。1998年在文莱发生的一次灰霾中, 有99%以上的颗粒物粒径 $< 2.5 \mu\text{m}$ ^[19]。Radojevic^[20]也得出了相同的结论, 并提出颗粒物中含碳化合物占主导地位。此次灰霾事件引起了众多学者的关注, 很多学者分析了事件中颗粒物的浓度特征^[21-22], 均得出相似的结论。Yang等^[18]分析了南京市2007年发生的一次灰霾事件中细颗粒物的化学性质, 发现灰霾中 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均质量浓度是非灰霾天气的1.19倍, 即此次灰霾中 $\text{PM}_{2.5}$ 污染比非灰霾期间严重得多, 而且所有 $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度均超过EPA的最低标准。Xie等^[17]发现在北京2004年发生的灰霾事件中, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的比例约为80%, 比正常天气甚至沙尘天气高很多。Xu等^[23]对比分析了广州市2006年灰霾期间和非灰霾期间 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度, 发现灰霾期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度是非灰霾期间的两倍左右。Shen等^[16]测定了西安TSP和 $\text{PM}_{2.5}$ 在大气污染过程中的浓度特征, 发现 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度在灰霾天气(351.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 是非灰霾天气(130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 的两倍多, 占TSP的51.8%。Wang等^[24]也得出了相似的结论, 说明气溶胶污染主要是细颗粒物污染。

3 灰霾期间气溶胶的化学组成特征

3.1 灰霾期间气溶胶中金属元素组成特征

灰霾期间气溶胶中的金属元素主要来源于人类活动, 如工业活动(冶金、炼钢等)、机动车尾气排放等。Yang等^[18]分析了一次灰霾事件大气样品中34种金属元素(K、Fe、Na、Ca、Zn、Al、Pb、Mg、Ti、Mn、As、Cu、Ba、Sn、Rb、Bi、Ge、Cr、Ni、Ga、Cd、

Se、Sr、W、Zr、V、Ag、Ce、Cs、Co等)的来源, 认为其来源可分为两类: 一类是表面积尘的结果, 包括Mg、Ca、Ti、V、Fe、Ba、Ce、Zr、Al等; 另一类是人类污染源的结果, 包括K、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、As、Zn、Hg、Pb、Se、Rb、Ag、Cd、Cs、Na等。Li等^[13]分析乌鲁木齐一次灰霾颗粒物样品中金属元素的来源时也得出了类似的结论: Al、Fe、Ca、Mg、Na、Sr、Mn的富集因子 < 5 , 来自地壳源; S、Cd、Pb、As、Zn的富集因子 > 50 , 来自人为源。

从灰霾期间气溶胶中金属元素的季节变化看, 不同金属元素的季节变化有所不同。Qureshi等^[25]采用等离子质谱仪(ICP/MS)研究了纽约城区 $\text{PM}_{2.5}$ 中15种金属元素(Mg、Al、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Zn、As、Se、Cd、Sb、Pb)的含量, 发现Co、Ni、Zn、Pb季节变化显著, 在冬季和夏季的浓度比分别为1.7、2.1、1.5、1.6, 而其他元素则没有非常明显的季节差别。

3.2 灰霾期间气溶胶中水溶性离子组成特征

水溶性离子可以在灰霾天气下形成或在颗粒物中保留^[23], 因而灰霾期间离子浓度比非灰霾天气下高很多。有研究表明, 灰霾期间的主要二次污染离子是 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ , 且其浓度在灰霾天气逐渐形成的过程中迅速增长^[15]。Xie等^[17]在研究2000年发生在北京的一次灰霾天气时发现, 灰霾期间的主要污染物是硫酸盐、硝酸盐、有机物和铵盐, 与西安^[17]出现的灰霾天气中采集的颗粒物样品分析结果一致。

水溶性离子更易富集在细粒子中。Tan等^[15]分析了广州市一次灰霾中的颗粒物样品, 发现 $\text{PM}_{2.5}$ 中的水溶性离子浓度比TSP中高, 占 $\text{PM}_{2.5}$ 的

44.9%^[26] 硝酸根和硫酸根浓度分别是正常天气的6.5倍和3.4倍。Li等^[13]分析了2007年在乌鲁木齐发生的一次灰霾大气样品,发现总水溶性离子对PM_{2.5}和TSP的贡献率分别为50.9%和41.5%,而且PM_{2.5}中总铵盐比例高达51.0%。西安^[17]的相关报道与其相似,灰霾期间水溶性离子总浓度占PM_{2.5}的58.7%,而在非灰霾期间仅占49.1%。

3.3 灰霾期间含碳气溶胶特性

Tan等^[26]研究了广州市有机碳(OC)和元素碳(EC)在一次灰霾事件中和非灰霾期间的浓度特征,得出结论:当发生灰霾时,随着风速降低,温度和相对湿度增加,OC和EC开始增加,在灰霾天气下的浓度是非灰霾天气的近两倍;灰霾天气下OC/EC明显高于正常天气,二次气溶胶增多。2004年6月和10月在韩国出现了两次季节性灰霾, Lee等^[27]分析了这两次灰霾期间的气溶胶,PM₁₀的平均浓度没有太大差别,可能与韩国地处沿海领域、空气湿度大,以及当时的气象条件有关。但利用半实时监测仪器测定OC和EC质量浓度时发现,两次灰霾期间OC和EC的质量浓度有一定差别:第一次灰霾期间即6月,OC和EC的质量浓度最高分别达15.5 μg/m³和16.5 μg/m³,PM₁₀平均质量浓度为207 μg/m³,最大质量浓度为256 μg/m³;而在第二次灰霾期间即10月,OC和EC的质量浓度分别达19.1 μg/m³和12.9 μg/m³,PM₁₀平均质量浓度为210 μg/m³,最大质量浓度为309 μg/m³。

目前,国内外对一次灰霾中气溶胶的研究主要针对一次灰霾中颗粒物的粒径大小及其对能见度的影响等方面分析,对气溶胶中含碳物质的分析较少,而OC和EC对环境的影响不容忽视。气溶胶中EC含量的变化会影响对流层的能量平衡^[28],还可以吸附许多大气污染物质,成为这些物质的反应床和触媒,促进多种污染物的转化^[29];OC则是大气光化学反应的基础,还含有多种危害人体健康的物质,如多环芳烃、正构烷烃等。因此,在今后的研究中应当加强对一次灰霾中OC和EC的研究,分析各地OC和EC的主要来源,这对大气环境保护及污染防治具有现实意义。

4 灰霾期间气溶胶对能见度的影响

大气能见度的变化可以反映大气污染状况^[30-32]。低能见度会破坏人居环境^[33],易引发交

通事故,并且容易让人产生悲观情绪甚至导致失控。能见度低表明空气污染严重,能引发呼吸系统疾病^[34]。因此,能见度是当前大气环境研究的重要指标。

大气能见度降低是气象因素和空气污染共同作用的结果,除气象因素外,能见度的降低主要是由于大气污染物尤其是气溶胶对可见光吸收和散射所产生的消光作用所致^[35]。Kyung等^[36]观测了韩国光州城区和远郊2004年出现的灰霾天气的污染特征,认为灰霾中的二次污染物特别是硝酸盐和有机碳,对消光的贡献最大。

气溶胶对光的散射是造成能见度降低的主要原因^[37-38],而细颗粒物与可见光的波长类似,对能见度起控制作用^[36]。因此,大气能见度的变化与大气中的气溶胶细粒子(PM_{2.5})污染有密切关系^[39-40]。Shen等^[16]对西安市大气环境的研究揭示,能见度与PM_{2.5}质量浓度有很大的相关性($R = 0.71$)。张新玲等^[41]进一步对比了1993年和2002年观测期间的南京大气环境质量,发现TSP的质量浓度无明显差异,而颗粒物数量显著增加,这是由于TSP中细颗粒物所占比例增加所导致。细颗粒物的增加,为能见度恶化及灰霾天气形成提供了有利条件。

目前,国内对能见度的研究仅停留在能见度与颗粒物浓度及气象条件的关系上,而缺乏对颗粒物化学组成的深入研究,并且仍存在一些问题有待解决。一方面,不同实验室之间的研究成果难以对比。大气颗粒物成分复杂,对不同粒径化学成分的分析方法和数据处理方法不同,使得不同实验室间的研究结果难以对比。另外,有些研究较早的物质已经有较成熟且统一的标准测定方法,而有些物质如硝基多环芳烃等,由于研究起步较晚,至今仍没有统一的测定方法,不同方法的测定结果也难以对比。另一方面,不同区域之间的研究程度不平衡。由于自然环境条件和人类活动方式的差异,各地大气颗粒物的化学成分及各要素的比重有所不同。因此,各地区都应当开展大气气溶胶研究。然而一些地区因科技实力、科研水平较薄弱,专题性研究开展较少,与大中城市相比,研究程度差异较大。

5 结语

灰霾是以细颗粒物(主要是PM₁和PM_{2.5})为载体,因气象要素和污染因素共同作用而产生的一

种危害性天气现象,目前对灰霾的研究主要集中在颗粒物污染方面^[42-43]。通过国内外相关研究的综述,可以得到以下结论:灰霾天气多发生在冬季,且气溶胶中PM_{2.5}占的比重大;气溶胶污染与地理环境、气候条件、经济发展水平等有密切关系;水溶性离子多集中在PM_{2.5}中;能见度的下降与气溶胶特别是细颗粒物有很大关系。

随着经济高速发展,人民生活水平不断提高,我国城市煤烟型污染已逐渐转变为煤烟与机动车尾气并重的复合型污染,机动车成为城市气溶胶特别是细颗粒物和超细颗粒物的另一个重要来源,灰霾天气现象的发生也日益频繁。灰霾中的细颗粒物是其他污染物进入人体的重要载体,而国内目前对灰霾天气与细颗粒物的相关性研究还不够深入。首先,当灰霾发生时,气溶胶浓度迅速增加,气溶胶中含有的有机物类别尚不清楚,而且不同有机物对不同季节发生灰霾的贡献率也有所不同,对其原因还缺少统一的认知,仍需进一步研究;其次,冬季灰霾频发,气溶胶中含有大量的有机物,如正构烷烃、硝基多环芳烃、含氧多环芳烃等,这些有机物的形成机理尚不明确;再次,机动车排放、工业生产、燃料燃烧等都会向空气中排放大量的颗粒物,弄清不同源排放的气溶胶对灰霾形成的贡献率,有助于从源头控制污染物排放,防止灰霾的频繁发生。因此,应系统地开展大气细颗粒物有害成分的鉴定、源排放颗粒物的物理化学特性、扩散过程中各种物质间的反应和转化等方面的研究,为政府有关部门制定大气污染防治法规提供重要的科学依据。

[参考文献]

- [1] 中国气象局. QX/T 113-2010 霾(灰霾)的观测和预报等级[S]. 北京:气象出版社,2010.
- [2] 余锡刚,吴建,郦颖. 灰霾天气与气溶胶的相关性研究综述[J]. 环境污染与防治,2010(2):86-88.
- [3] 谭吉华. 广州一次灰霾中气溶胶物化特征性及其对能见度影响的初步研究[M]. 广州:中国科学院广州地球化学研究所,2007:7-9.
- [4] 中央气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,1979:22-27.
- [5] 阚海东,陈秉衡,汪宏. 上海市城区气溶胶污染对居民健康危害的经济学评价[J]. 中国卫生经济,2004,23(2):8-11.
- [6] WILLIAM C M. Characteristics and origins of haze in the Continental United-States[J]. Earth-Sci Rev,1992,33:1-36.
- [7] RUZER L, HARLEY N. Aerosols handbook: measurement, dosimetry, and health effects [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005.
- [8] MENON S, HANSEN J, NAZARENKO L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. Science, 2002 (297): 2250-2253.
- [9] RALOFF J. Sorry air cuts China's crop yields [J]. Science News, 1999(156): 356.
- [10] 吴兑,邓雪娇,毕雪研. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降[J]. 热带气象学报,2007,23(1):1-6.
- [11] 张立多,叶文健,陈德花. 灰霾天气对厦门市城市能见度影响问题初探[J]. 气象研究与应用,2007(9):149-150.
- [12] 金均,吴建,蔡菊珍. 杭州市灰霾天气基本特征及成因分析[J]. 环境污染与防治,2010(5):61-67.
- [13] LI J, ZHUANG G, HUANG K, et al. The chemistry of heavy haze over Urumqi, Central Asia [J]. Atmos Chem, 2008, 61(9): 57-72.
- [14] 吴国平,胡伟,滕恩江. 我国四城市空气中PM_{2.5}和PM₁₀的污染水平[J]. 中国环境科学,1999,19(2):133-137.
- [15] TAN J H, DUAN J C, CHEN D H, et al. Chemical characteristics of haze during summer and winter in Guangzhou [J]. Atmospheric Research, 2009(94): 238-245.
- [16] SHEN Z X, CAO J J, ARIMOTO R, et al. Ionic composition of TSP and PM_{2.5} during dust storms and air pollution episodes at Xi'an, China [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43: 2911-2918.
- [17] XIE S D, YU T, ZHANG Y H, et al. Characteristics of PM₁₀, SO₂, NO_x and O₃ in ambient air during the dust storm period in Beijing [J]. Science of the Total Environment, 2005(345): 153-164.
- [18] YANG W F, YIN Y, CHEN K. The characteristics and source of elemental composition in fine particles during haze days in autumn in Nanjing [C]//2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology. 2009: 128-131.
- [19] MURALEEDHARAN T R, RADOJEVIC M, WAUGH A, et al. Chemical characterisation of the haze in Brunei Darussalam during the 1998 episode [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34: 2725-2731.
- [20] RADOJEVIC M. Haze research in Brunei Darussalam during the 1998 episode [J]. Pure Appl. Geophys, 2003(160): 251-264.
- [21] RADOJEVIC M, HASSAN H. Air quality in Brunei Darussalam during the 1998 haze episode [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33: 3651-3658.
- [22] YADAV A K, KUMAR K, KASIM A M B H A, et al. Visibility and incidence of respiratory diseases during the 1998 haze episode in Brunei Darussalam [J]. Pure Appl. Geophys, 2003(160): 265-277.
- [23] XU H J, WANG X M, POSCHL U, et al. Genotoxicity of total and fractionated extractable organic matter in fine air particulate matter from urban Guangzhou: comparison between haze and nonhaze episodes [J]. Environmental Toxicology and Chemistry,

- 2008, 27(1): 206–212.
- [24] WANG Y, ZHUANG G S, SUN Y L, et al. The variation of characteristics and formation mechanisms of aerosols in dust, haze, and clear days in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 6579–6591.
- [25] QURESHI S, DUTKIEWICZ V A, KHAN A R. Elemental composition of PM_{2.5} aerosols in Queens, New York: Solubility and temporal trends [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(2): 238–251.
- [26] TAN J H, DUAN J C, HE K B, et al. Chemical characteristics of PM_{2.5} during a typical haze episode in Guangzhou [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21: 774–781.
- [27] LEE K H, KIM Y J, KIM M J. Characteristics of aerosol observed during two severe haze events over Korea in June and October 2004 [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 5146–5155.
- [28] 王玮, 陈宗良. 大气气溶胶中无机碳和有机碳 [J]. *环境科学丛刊*, 1991, 12(12): 27–34.
- [29] 唐小玲, 毕新惠, 陈颖军. 不同粒径气溶胶中有机碳(OC)和元素碳(EC)的分布 [J]. *环境科学研究*, 2006, 19(1): 104–108.
- [30] DOYLE M, DORLING S. Visibility trends in the UK 1950–1997 [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36: 3161–3172.
- [31] HUSAR R B, HUSAR J D, MARTIN L. Distribution of continental surface aerosol extinction based on visual range data [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34: 5067–5078.
- [32] CHAN Y C, SIMPSON R W, MCTAINSH G H, et al. Source apportionment of visibility degradation problems in Brisbane (Australia) using the multiple linear regression techniques [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(19): 3237–3250.
- [33] WILLIAM C M. Introduction to visibility [R]. USA: Colorado State University, 1999: 1–2, 8–14, 19–21.
- [34] SCHWARTZ J, DOCKERY D W, NEAS L M. Is daily mortality associated specifically with fine particles? [J]. *Journal of Air and Waste Management Association*, 1996, 46: 927–939.
- [35] HODKINSON J R. Calculations of color and visibility in urban atmospheres polluted by gaseous NO₂ [J]. *Int J Air Water Pollut*, 1966, 10: 137–144.
- [36] KYUNG W, KIM Y J, KIM S Y B. Summer time haze characteristics of the urban atmosphere of Gwangju and the rural atmosphere of Anmyon, Korea [J]. *Environ Monit Assess*, 2008(141): 189–199.
- [37] LATHA K M, BADARINATH K V S. Black carbon aerosols over tropical urban environment—a case study [J]. *Atmos Res*, 2003, 69: 125–133.
- [38] LIOUSSE C, CACHIER H, JENNIGS S G. Optical and thermal measurements of black carbon aerosol content in different environments: Variation of the specific attenuation cross-section, Sigma [J]. *Atmos Environ*, 1993, 27(8): 1203–1211.
- [39] OZAKAYNAK H A, SCHATZ D, THURSTON G D, et al. Relationships between aerosol extinction coefficients derived from airport visual range observations and alternative measure of airborne particle mass [J]. *Journal of Air Pollution Control Association*, 1985, 35: 1176–1185.
- [40] MALM W C, SISLER J F, HUFFMAN D, et al. Spatial and seasonal trends in particle concentrations and optical extinction in the United States [J]. *Geophys Res*, 1994(99): 1347–1370.
- [41] 张新玲, 张利民, 李子华. 南京市可吸入颗粒物数浓度变化及尺度分布 [J]. *江苏环境科技*, 2003, 16(4): 33–34.
- [42] 韩毓, 白志鹏, 孙韧. 颗粒物质量浓度对大气能见度水平影响分析 [J]. *环境监测管理与技术*, 2008, 20(4): 60–61, 65.
- [43] 韩毓. 灰霾天气条件下天津市环境空气中颗粒物污染特征分析 [J]. *环境监测管理与技术*, 2009, 21(4): 32–35.

本栏目责任编辑 姚朝英

(上接第5页)

- [31] SCHAMPELAERE K A C D, VANDENBROUCK T, MUYSSEN B T A, et al. Integration of molecular with higher-level effects of dietary zinc exposure in *Daphnia magna* [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology (Part D)*, 2008, 3(4): 307–314.
- [32] CASEBOLT D B, SPEARE D J, HORNEY B S. Care and use of fish as laboratory animals: current state of knowledge [J]. *Laboratory Animal Science*, 1998, 48(2): 124–136.
- [33] MOHANTY G, MOHANTY J, GARNAYAK S K, et al. PCR based detection of furadan genotoxicity effects in rohu (*Labeo rohita*) fingerlings [J]. *Veterinary Research Communications*, 2009, 33(7): 771–780.
- [34] LAPOINTE D, PIERRON F, COUTURE P. Individual and combined effects of heat stress and aqueous or dietary copper exposure in fathead minnows (*Pimephales promelas*) [J]. *Aquatic Toxicology*, 2011, 104(1–2): 80–85.
- [35] SAJIKI J, YONEKUBO J. Leaching of bisphenol A (BPA) to seawater from polycarbonate plastic and its degradation by reactive oxygen species [J]. *Chemosphere*, 2003, 51(1): 55–62.
- [36] 端正花, 朱琳, 冯鸣凤, 等. 斑马鱼基因芯片技术在双酚A毒性机制研究中的应用 [J]. *环境科学*, 2010, 31(3): 808–814.
- [37] ROCCO L, FRENZILLI G, ZITO G. Genotoxic effects in fish induced by pharmacological agents present in the sewage of some Italian water-treatment plants [J]. *Environmental Toxicology*, 2010, online, DOI: 10.1002/tox.20607.
- [38] ZHANG X W, HECKER M, PARK J W, et al. Real-time PCR array to study effects of chemicals on the Hypothalamic-Pituitary-Gonadal axis of the Japanese medaka [J]. *Aquatic Toxicology*, 2008, 88(3): 173–182.