

石家庄春季大气气溶胶的散射特征

张勇¹, 银燕^{1*}, 肖辉¹, 匡顺四², 吴志会³ (1.南京信息工程大学, 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏南京 210044; 2.河北省石家庄市气象局, 河北石家庄 050000; 3.河北省人工影响天气办公室, 河北石家庄 050021)

摘要: 利用2010年5月积分浊度仪、PCASP-X2和能见度仪的观测资料,分析了石家庄大气气溶胶的散射特征及其与气溶胶粒子浓度、能见度、气象条件的关系。结果表明,观测期间,450,550,700nm 3个波段的气溶胶散射系数平均值±标准差分别为(257±293),(199±237)和(143±173)Mm⁻¹,散射系数的变化很大,但气溶胶微物理特征相对比较稳定。散射系数日变化呈3峰分布,峰值出现在8:00、13:00和0:00。以550nm波长为例,气溶胶散射系数的变化范围为144~308Mm⁻¹,夜间散射系数大于白天,非晴天散射系数平均值(524.9Mm⁻¹)是晴天散射系数(112.3Mm⁻¹)的4.7倍。气溶胶3个波段后向散射比均大于0.15,说明石家庄细粒子污染比较严重。散射系数和体积浓度成正比,但由于局地气象条件和污染源的影响,有气溶胶体积浓度变大,散射系数变化不大的情况出现。气溶胶散射系数和能见度呈负相关。根据Koschmieder公式计算得到的能见度,能较好反映实际观测情况。当大气相对湿度较高时,气溶胶散射系数随湿度增大呈现两种不同的变化趋势,即一部分气溶胶的散射系数有明显的增大,而另一部分则随着相对湿度的增加并未增大,反而比干气溶胶散射系数要小。局地风场也会影响气溶胶散射特性。

关键词: 气溶胶; 散射系数; 体积浓度; 能见度; 气象条件

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2012)05-0769-11

An observation study of the scattering properties of aerosols over Shijiazhuang City in spring. ZHANG Yong¹, YIN Yan^{1*}, XIAO Hui¹, KUANG Shun-si², WU Zhi-hui³ (1.Key Laboratory for Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2.Shijiazhuang Meteorological Bureau, Hebei Province, Shijiazhuang 050000, China; 3.Hebei Weather Modification Office, Shijiazhuang 050021, China). *China Environmental Science*, 2012,32(5): 769~779

Abstract: The data measured by a three-wavelength integrating nephelometer, a PCASP-X2 and a visibility meter over Shijiazhuang, Hebei Province, China, from May 7~23, 2010, were used to investigate the scattering properties of aerosol particles and the relationship with particle size spectra, visibility and meteorological conditions. The results show that the scattering coefficients were (257±293), (199±237), and (143±173) Mm⁻¹, respectively, for the three wavelengths, 450, 550 and 700 nm, and that the values varied significantly from day to day, while the microphysical property of aerosol is stable. It was also found that the daily variation of the aerosol scattering coefficient was a tri-peak shape, with the coefficient reaching peak values at about 8, 13 and 0 o'clock, respectively, and higher values were measured during nighttime. There was also a significant difference in the mean scattering coefficient under different weather conditions, with the mean value (524.9Mm⁻¹) of overcast days was 4.7 times higher than that of fine days (112.3Mm⁻¹). The ratios of backscattering coefficient to the total scattering coefficient of three wavelengths were all larger than 0.15, indicating that a significant fraction of the particular matter in Shijiazhuang was attributed to fine mode particles. There existed a positive correlation between the scattering coefficient and the volume concentration of aerosol, but sometimes when the volume concentration was large, the scattering coefficient was small, maybe because of the local emission source or meteorological condition. There was a negative correlation between the scattering coefficient and visibility. Our results also find that the scattering coefficient would exhibit two different trends when the relative humidity increases, and the local wind direction and speed could also influence the scattering properties of aerosol.

Key words: aerosol; scattering coefficient; volume concentration; visibility; meteorological condition

收稿日期: 2011-07-31

基金项目: 科技部公益性行业(气象)科研专项经费(GYHY200706036);江苏省“333 人才工程”项目;江苏省高校优秀创新团队项目和江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

* 责任作者, 教授, yinyan@nuist.edu.cn

气溶胶粒子是悬浮在大气中直径在 $10^{-3}\sim 10\mu\text{m}$ 的固体或液体粒子,其质量仅占整个大气质量的十亿分之一,但对大气辐射传输和水循环均有重要的影响^[1].气溶胶粒子中空气动力学直径小于 $10\mu\text{m}$ 的粒子,被称为可吸入颗粒物,可以吸入呼吸道,对人体的健康造成严重危害.颗粒物通过吸收和散射太阳光影响大气能见度,其中散射过程造成能见度减弱 $60\%\sim 95\%$ ^[2].气溶胶通过直接辐射和间接辐射效应影响气候变化,但由于其分布、自身理化性质、下垫面光学性质等的巨大差异,以及缺乏大范围连续气溶胶观测资料,给气候效应的研究带来了很大的困难.通常以散射系数表征直接辐射效应中气溶胶对太阳辐射的散射作用.气溶胶谱分布、质量浓度和气象条件的不同,对其散射特征有明显的影响.

国外在气溶胶散射特征研究方面做了大量的工作.Charlson^[3]利用积分浑浊度仪研究大气中大分子气体的瑞利散射系数,并通过观测散射系数准确得出大分子气体的退偏振度、极化因子等.Chan等^[4]利用积分浑浊度仪研究了大气能见度、 PM_{10} 与散射系数的相互关系.Delene等^[5]利用散射系数资料分析单次散射反照率 ω_0 与不对称因子的变化规律.从1995年起,国际大气化学计划(IGAC)组织了多次气溶胶特性实验(ACE),获得了许多珍贵的气溶胶散射资料^[6-8].

国内对气溶胶散射性质的研究则相对有限,多是一些零散点的短期观测.胡波等^[9]利用积分浊度仪监测得到的散射系数和多波段光度计观测资料分析了兰州冬季气溶胶的光学特征,计算了后向散射比、不对称因子、单次反照率、波长指数等重要辐射参数,并建立了一种适合利用散射系数反演气溶胶细微粒子谱分布的方法.Zhang等^[10]利用兰州2001/2002,2002/2003两个冬天积分浑浊度仪的观测数据,分析了气溶胶的散射特征,及其和空气污染的关系.柯宗建等^[11]分析了北京上甸子秋冬季气溶胶散射系数的变化特征,散射系数与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的关系,并结合气象资料分析了风场对气溶胶散射系数变化的影响.徐正等^[12]利用黑碳仪和积分浊度计数据对济南市大气气溶胶的光学特性进行了观测.

结果显示,霾天气的气溶胶散射系数和吸收系数分别为非霾天气的2.6倍和2.8倍,单次散射反照率(SSA)也高于非霾天气,并分析了影响非霾天气和霾天气污染气流来源.

华北地区是我国大气气溶胶污染比较严重的地区^[13].孙霞等^[14]利用2006年和2007年河北省机载粒子探测系统(PMS)获得的飞行探测资料,分析了石家庄地区春季上空大气气溶胶粒子的浓度垂直分布特征、不同高度上的谱分布和水平变化特征,并对粒子谱分布进行了负幂函数拟合.谭稳等^[15]利用石家庄大气气溶胶、 NO_x 和 SO_2 数据对石家庄地区大气细粒子增长特征进行了初步研究.这些研究并未涉及气溶胶光学特性方面,而气溶胶光学特性对大气能见度有着巨大影响,与人们生产生活息息相关.为加深对气溶胶散射特性与空气污染物之间关系的认识,给政府部门在控制污染物排放,改善能见度方面提供借鉴,作者于2010年5月在石家庄气象局进行了外场观测实验,并在对数据进行质量控制的基础上分析了华北地区气溶胶的光学特征及其变化规律.

1 实验

1.1 仪器

观测仪器为美国TSI公司生产的TSI-3563型积分浊度仪,DMT公司生产的被动腔式气溶胶分光探测仪PCASP-X2以及英国Biral公司的VPF-730能见度和天气现象仪.浊度仪可以提供波长450,550和700nm的大气气溶胶总散射系数和后向散射系数.该仪器具有全天候、自动、高分辨率($5\times 10^{-8}\text{Mm}^{-1}$)、不破坏气溶胶的成分,且标定简单方便等特点.观测时每5min获取1次气溶胶散射系数和后向散射系数,同时进行多波段光度计观测.PCASP-X2可以对 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ 的气溶胶颗粒进行自动计数和粒径分级,采集的颗粒物分为40档,同时可以用于计算颗粒物的数浓度、体积浓度和有效半径.采样流量为 1mL/s ,1s采集一组数据.环境中气溶胶粒子密度的非均一性、形状的差异性、空气湿度对气溶胶密度的影响等因素会引起粒子尺度分级与捕获效率的误差.VPF-730能见度和天气现象仪能够测量能见度和天气现

象,具有很高的精度和可靠性.该仪器利用红外线技术测量在样品区内的散射颗粒,得到大气消光系数,再从大气消光系数导出 MOR 气象光学视程和能见度.量程 10m~75km,精度±2%(2km).

1.2 采样时间与方法

观测从 2010 年 5 月 7~23 日,观测期间主要以多云、晴天为主(除 8、15~17 日阴,其中 16 日夜间有小雨).观测地点设在石家庄市气象局(114°25'E,38°02'N,海拔 81.0m)大气探测中心三楼,距地面 10m 左右,浊度仪和 PCASP-X2 进气口加防虫网,能见度仪放在室外.观测点地处石家庄市西南,毗邻中山西路和西石环路.工业区在该市东北部,位于观测点东边的 11km 华北制药厂和东北向 15km 的化肥厂具有相当的规模.还有一些粉末冶金厂、印染厂是大气主要的污染源,西北部的建材业特别是小水泥厂粉尘污染对环境影响也很大.观测点处在城市下风方向.

同时,使用自动气象站同步测量的气象要素,包括温度、风速、风向、相对湿度(RH)和能见度.根据观测的实际情况,剔除了部分由于仪器开关机,人为影响产生的无效数据,最后确定 14 个有效观测日的测量结果.

2 结果与分析

2.1 气溶胶散射系数的逐时变化

图 1 为观测期间浊度仪 3 个波段气溶胶散射系数和气象要素的逐时变化图.可以看出它们的小时平均值变化趋势非常一致,高值区一般都出现在大气条件为高湿低温的时段.表 1 为观测期间 3 个波段气溶胶散射系数每 5min 观测值的统计结果.从表可以看出散射系数 3 个波段的平均值分别为 257,199,143Mm⁻¹,标准差为 293,237,173Mm⁻¹.而且散射系数的变化非常大,最大值和最小值分别相差 59 倍、75 倍和 94 倍.

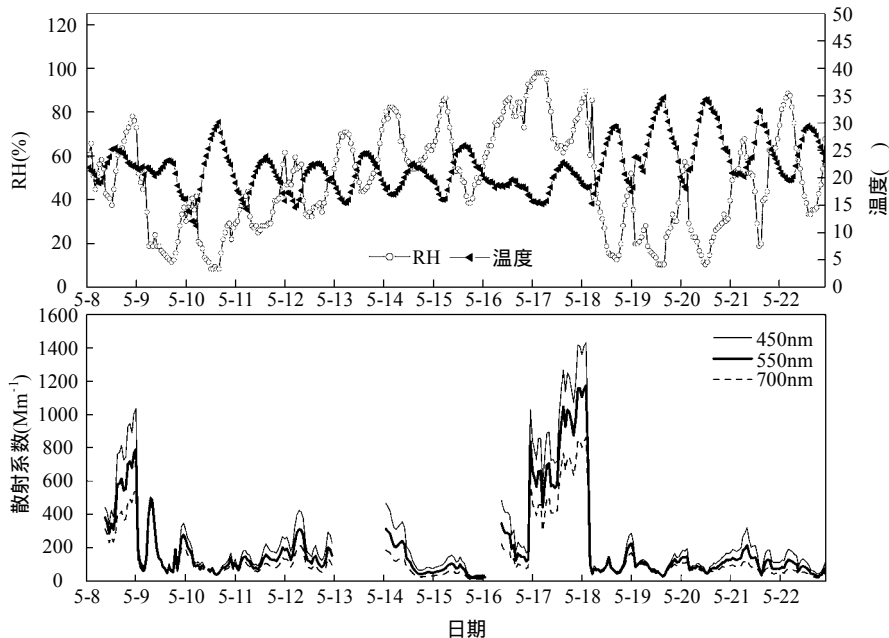


图 1 散射系数和气象要素的逐时变化

Fig.1 Hourly mean of the scattering coefficients and meteorological elements

本文以 550nm 气溶胶散射系数的变化代表 3 个波段散射系数的逐时变化(下文若无具体说明,则指的是 550nm 气溶胶散射系数).整体来看,大部分时间气溶胶散射系数在 300Mm⁻¹ 以下,但

8 日和 17 日气溶胶散射系数均出现高于 400Mm⁻¹ 的时段,尤其是 17 日,散射系数大部分高于 600Mm⁻¹,最高值接近 1200Mm⁻¹.根据观测的气溶胶体积浓度和数浓度数据,发现这 2d 气溶

胶数浓度、体积浓度均较大,在与其他观测日气溶胶浓度相当,而相对湿度远远大于其他日的情况下,8日和17日散射系数远高于其他时段,吸湿增长起了重要作用^[16-17].17日散射系数高出8日很多,相对湿度也高于8日,而数浓度和体积浓度比只8日稍大,认为17日气溶胶的吸湿增长作用更为显著.

表1 石家庄气溶胶3个波段散射系数统计
Table 1 The statistics of the three wavelengths scattering coefficients measured in Shijiazhuang

波长(nm)	散射系数(Mm ⁻¹)			
	平均值	最大值	最小值	标准差
450	257	1610	27.2	293
550	199	1300	17.2	237
700	143	936	9.9	173

图2为气溶胶散射系数小时平均的统计分布.本研究共收集有效样本306个,区间间隔设为100Mm⁻¹.从图2可以看出,石家庄气溶胶散射系数小时平均值出现最高的区间为0~100Mm⁻¹,占到总数41.5%,而200Mm⁻¹以下则占到总数的73.1%,比其他区间高出许多.

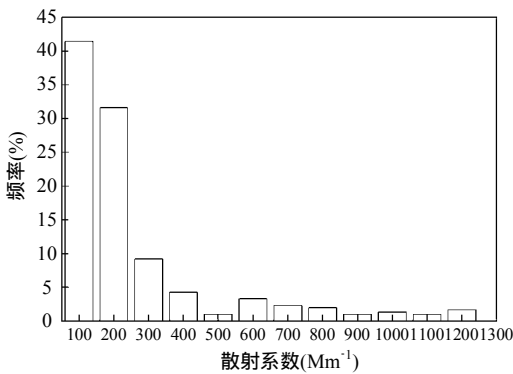


图2 散射系数小时平均的统计分布

Fig.2 Statistical distribution of the scattering coefficients

2.2 气溶胶散射系数的日变化

图3为气溶胶散射系数日变化.可以看出,3个波段的散射系数变化趋势非常一致.认为期间气溶胶的微物理特性基本不变,而仅仅是浓度在改变.同时,利用PCASP-X2数据得到观测期间多个观测

时段的大气气溶胶的粒子谱(图4),可以看到所有时间段气溶胶谱型基本一致,只是大粒径段稍有差异,表明观测期间观测点气溶胶源比较稳定,没有受到外来气溶胶输送的影响,气溶胶的微物理特性基本不变,与浊度仪3个波段散射系数的数据很好的配合起来.从图3还可以看出,550nm气溶胶散射系数的变化范围为144~308Mm⁻¹,平均值为197Mm⁻¹,标准差为47Mm⁻¹,夜间高于白天,夜间极大值是白天极大值的1.54倍.总体呈三峰分布,峰值所对应的时间为8:00、13:00和0:00,下午16:00出现全天散射系数最低值.早晨,由于逆温层依然存在,以及炊事活动、上班高峰的汽车尾气排放和扬尘造成散射系数高值.13:00气溶胶散射系数达到一个次峰值,这与气溶胶数浓度日变化(图略)是一致的,这可能是二次气溶胶引起的.午后,太阳辐射达到最强,地面温度增高,对流增强,近地面污染物被输送到上层,地面污染物浓度逐步下降,对应于16:00散射系数极小值.16:00以后,伴随着太阳辐射的减弱,逆温层开始出现,边界层下降,大气层结稳定,加之可能夜间企业排放管制较少,地面污染物浓度逐渐增加,散射系数也随之变大,到第2日0:00达到1d的最大值.

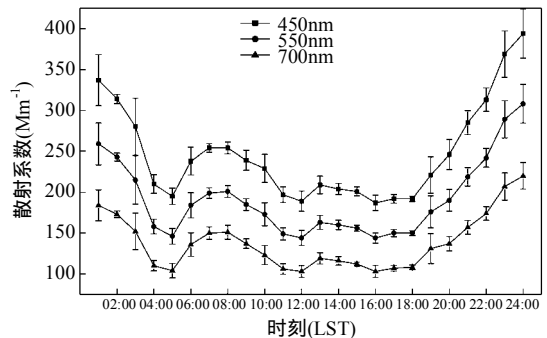


图3 散射系数日变化

Fig.3 Diurnal variation of the scattering coefficients

观测期间只有16日夜间有零星降水,期间浊度仪关闭,所以观测数据并没有受到降水的影响.对数据进行分类,按照云量分为晴天和非晴天(多云和阴天).这2种不同天气下,散射系数平均值分别为112.3Mm⁻¹和524.9Mm⁻¹,标准差为40.6Mm⁻¹和138.1Mm⁻¹.非晴天散射系数平均值

是晴天的 4.7 倍,比柯宗建^[11]在上甸子地区的观测结果高出许多,这说明石家庄非晴天状态下空气污染异常严重.图 5 为不同天气条件下气溶胶散射系数的日变化,可以看出晴天的散射系数基本在 100Mm^{-1} 左右,而且变化很平缓,但还是有比较明显的日变化特征.非晴天的散射系数高出晴天许多,波动比较大,变化范围为 $300\sim 850\text{Mm}^{-1}$,这是因为阴天天气系统比较稳定,边界层较低,近地面的气溶胶粒子扩散缓慢外,而且观测点局地风速风向,污染源排放情况以及周边输送情况都会影响散射系数的变化.

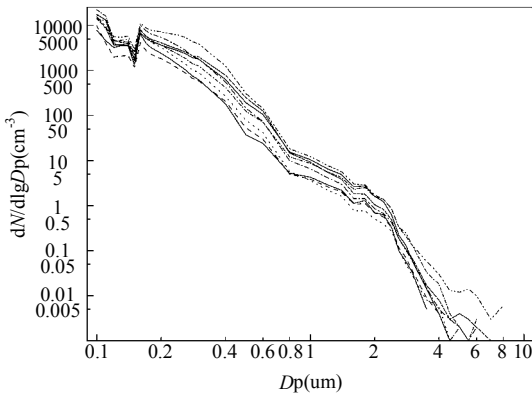


图 4 观测期间粒子数浓度随粒径的变化

Fig.4 The spectrums of aerosols in the observation

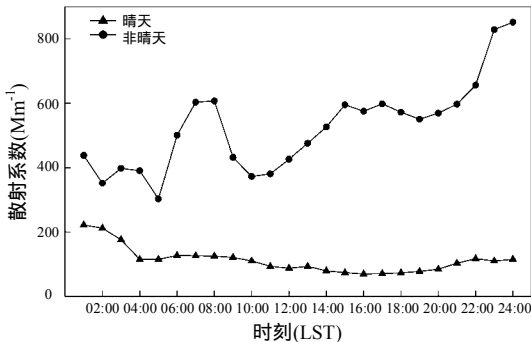


图 5 不同天气条件下散射系数的日变化

Fig.5 Diurnal variation of the scattering coefficients in different weather conditions

2.3 后向散射比

气溶胶后向散射比是体现气溶胶中细粒子含量的一个参数,其计算公式为 $b = \frac{\delta_{\text{bscat}}}{\delta_{\text{scat}}}$,其中

δ_{bscat} 是气溶胶的后向散射系数, δ_{scat} 是气溶胶的总散射系数.根据 Mie 散射理论,当粒子尺度参数增大时,前向散射与后向散射之比增大,即后向散射比的大小可以反映细粒子($d < 1.5\mu\text{m}$)在气溶胶中所占的比例.

图 6 为石家庄气溶胶后向散射比的变化图.以 $\lambda=550\text{nm}$ 后向散射比为例,可以看出,后向散射比的日变化有略微波动,但总体上,上午呈增加趋势,中午 13:00 达到峰值.这表明大气中细粒子的含量在不断增加,到 13:00 细粒子达到峰值,这与前面散射系数 13:00 的次峰值对应.而且下午后向散射比明显偏高,这与下午出现总散射系数的低值相对应.还可以看出,后向散射比在 3 个波段的变化趋势一致,均在 0.15 以上,平均值分别为 0.161(450nm),0.175(550nm)和 0.201(700nm),大于兰州观测的结果^[10].根据 Mie 散射理论计算,当气溶胶后向散射比大于 0.1,气溶胶粒子大部分小于 $1\mu\text{m}$.从表 2 可以看出,观测期间小于 $1\mu\text{m}$ 的粒子占到粒子总数的 99.97%.这两者都说明石家庄细粒子污染比较严重,与翟晴飞等^[18]对石家庄的研究结果一致,而粒径 $0.05\sim 1.5\mu\text{m}$ 的气溶胶粒子对太阳辐射和散射的影响最大^[19].

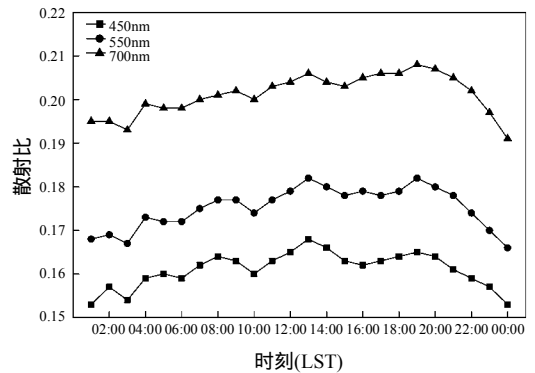


图 6 气溶胶后向散射比日变化

Fig.6 Diurnal variation of the ratio of backscattering coefficient to total scattering coefficient

2.4 散射系数和体积浓度、数浓度的关系

气溶胶的质量浓度和散射系数之间存在一定的关联性,一般气溶胶质量浓度越高,散射系数越大.对于单位质量的气溶胶,细粒子的散射作用

明显大于粗粒子^[20]。本文假设气溶胶密度恒定,利用 PCASP-X2 的体积浓度数据,得到气溶胶散射系数与体积浓度逐时变化图,近似表示气溶胶散射系数与质量浓度的关系。图 7 和图 8 分别为气溶胶散射系数和体积浓度的逐时变化。

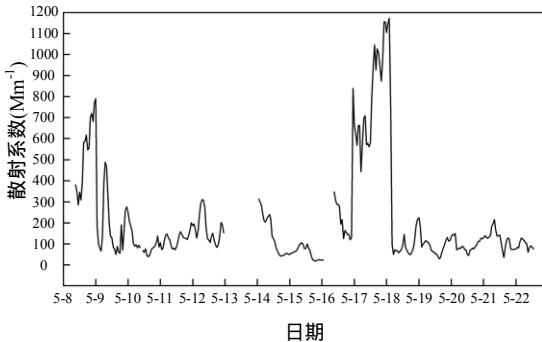


图 7 气溶胶散射系数逐时变化

Fig.7 Hourly mean of the scattering coefficients of aerosol

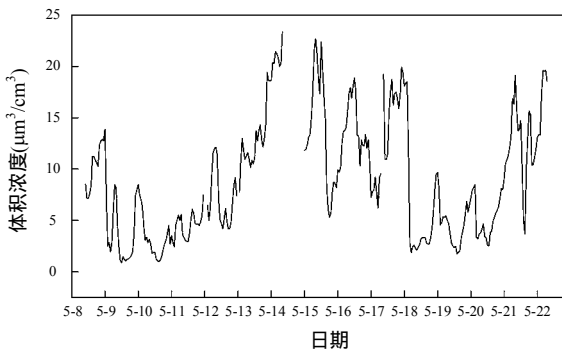


图 8 气溶胶体积浓度逐时变化

Fig.8 Hourly mean of the volume concentration of aerosol

由图 7、图 8 可以看出,散射系数和体积浓度的变化趋势基本一致,只是在 15 日出现了气溶胶体积浓度很大,散射系数很小的情况。出现上述差异可能有以下原因,15 日上午为偏西风,附近公路粒径较大的粒子被吹向观测点,造成体积浓度不断增大。研究表明^[21],当大气中有较大粒子,质量浓度表现为较大值,散射系数并不一定表现为大值。伴随着风速的减小,体积浓度急剧减小,但颗粒物数浓度(图 9)依然在高值波动,认为是大粒子的沉降及空气湿度降低造成的。大粒子比例逐渐下降使散射系数有上升趋势,湿度下降使散

射系数有下降趋势,而该时段散射系数变化比较平缓可能是这两个因素的综合效果。15 日中午起,持续偏东风,风速达到 4m/s,较大的风速将市中心污染物刮向观测点,数浓度维持在高值,伴随着空气湿度不断增大,体积浓度也不断增大。当日下午午后向散射比为 0.18,大于上午的 0.15,说明下午细粒子含量大与上午,但散射系数波动很小,始终维持在 100Mm^{-1} 左右,这可能与市区污染物中黑炭含量较多有关^[22],也说明了细粒子组分是造成气溶胶散射系数波动的重要原因。另外,16 日夜间有降水发生,在雨水的冲刷作用下颗粒物数浓度、体积浓度和散射系数均出现下降。17 日风速减小到 1m/s 左右,相对湿度达到观测阶段的最高值,污染物浓度维持在高水平,散射系数也达到观测阶段的最高值,但受风向、局地源和气象条件的影响,波动很大。上午西风条件和高湿环境与午后东风和高湿环境影响的散射系数和体积浓度差别较大。东风条件下市区污染物被刮向观测点,造成颗粒物数浓度、体积浓度增大,同时城市气溶胶中的硫酸盐等吸湿性颗粒较多^[23],吸湿增长使散射系数明显增大,而西风条件下可能更多是扬尘、沙尘、生物质燃烧物等对水汽并不敏感的颗粒。可见,具体的天气特征、局地气象条件和局地源都会对气溶胶的散射特性产生影响。

对散射系数和体积浓度做小时平均,得出散射系数与体积浓度散点。如图 10 所示,可以看出散点分为两部分,一部分随着体积浓度的增大散射系数增大,而且随着相对湿度的增大,这部分气溶胶的散射系数也是增大的,认为吸湿性颗粒在高湿度条件下吸湿长大,造成体积浓度增大,散射系数增大;另一部分则是随着体积浓度的增大,散射系数变化不大,始终维持在 200Mm^{-1} 上下,而且相对湿度的增大并没有对这部分气溶胶散射特性造成影响。从图 7、图 8 知道这部分数据主要来自 14、15、21 日。由于气溶胶射系数的变化不但与颗粒物浓度有关,还与气溶胶谱分布和化学成分有关。因为缺乏气溶胶化学成分的观测资料,本文仅从气溶胶的谱分布对散射特征的影响做出分析。设 10、11、12 日气溶胶谱为情况 1,14、15、21 日为情况 2。情况 1 和情况 2 散射系数差别很

小,均在 200 Mm^{-1} 左右,但情况 1 气溶胶数浓度和体积浓度均小于情况 2 很多,图 11 为 2 种情况下日平均气溶胶谱对比.情况 2 谱宽于情况 1,而且大粒子浓度大于情况 1.大粒子对于体积浓度的贡献要大于细粒子的贡献,可以认为图 10 那部分体积浓度增大散射系数变化不大情况的出现是由大粒子造成的,并且可以认为其主要为沙尘、扬尘类非吸湿性颗粒.

表 2 不同粒径范围颗粒物的数浓度

Table 2 Particle number concentration in different size

粒径范围(μm)	数浓度($\text{个}/\text{cm}^3$)			各段粒子占总数浓度百分比(%)
	平均值	最大值	最小值	
0.1~0.2	2082	3845	315	85.19
0.2~0.5	354	1173	28	14.48
0.5~1.0	7	40	1	0.30
1.0~10.0	0.23	2	0	0.03

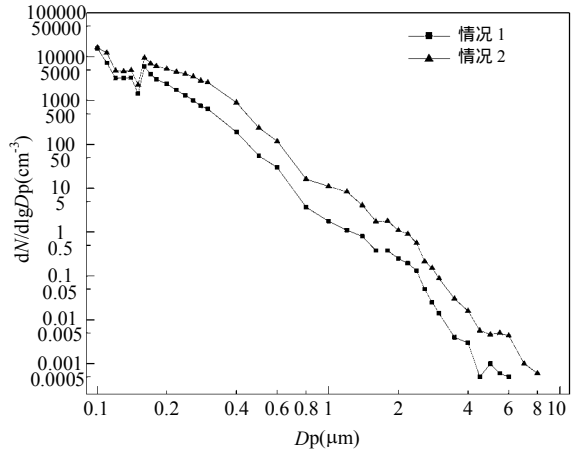


图 11 两种不同情况气溶胶谱的对比

Fig. 11 Comparison of the aerosol spectrum in two different cases

2.5 散射系数和气象因子的关系

2.5.1 散射系数和能见度的关系 大气能见度可以反映大气浑浊度和空气污染状况,影响景观和人居环境^[4,24-27].因此,大气能见度成为当前区域大气环境研究的重要指标之一^[27].由图 12 可以看出,气溶胶散射系数和大气能见度呈明显的负相关.但在 15 日出现了散射系数小而能见度仍然很小的现象,这说明仅靠散射系数数据不能全面解释颗粒物消光效应对能见度的影响.大气气溶胶谱分布和成分都会影响颗粒物的消光作用.碳是大气颗粒物的重要成分,颗粒物中的含碳量,大气 NO_x 分子都会对能见度产生影响^[28-31].

在大气水平方向均一的情况下,气象能见度 (R) 和大气消光系数 (δ_{ext}) 有下述关系^[32],

$$R = \frac{1}{\delta_{\text{ext}}} \ln \frac{1}{\varepsilon} = \frac{3.912}{\delta_{\text{ext}}}$$

式中 $\varepsilon=0.02$,是视觉对比阈值,为观测者开始不能把目标从背景中区分出来的亮度对比值.作为近似处理,暂不考虑大气分子散射和吸收对能见度得影响,并假设石家庄颗粒物散射消光占总消光的 70%^[33],则 $\delta_{\text{ext}} = \delta_{\text{scat}} \times (10/7)$.

图 13 是利用上式计算得到的能见度值与能见度仪和人工观测的实际能见度变化.可以看出,除 14 日和 15 日误差较大外,计算值和实际值之间存在很好的吻合性,实际能见度升高或降低的地

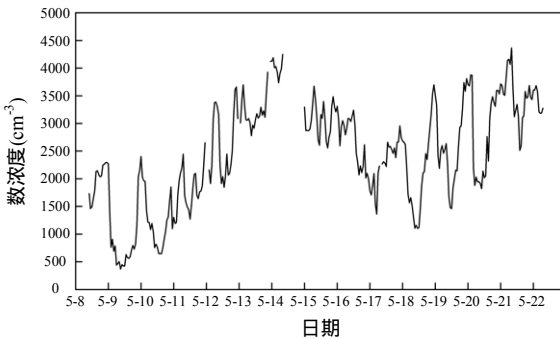


图 9 气溶胶数浓度逐时变化

Fig. 9 Hourly mean of number concentration of aerosol

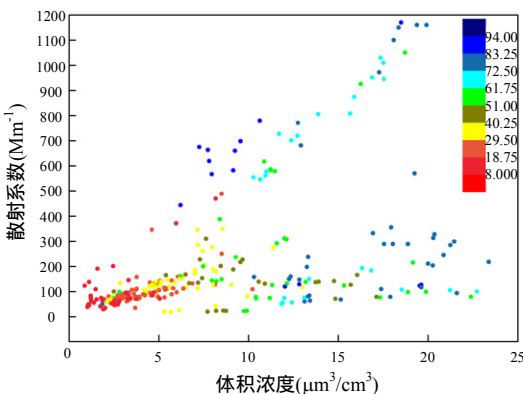


图 10 散射系数与体积浓度散点

Fig. 10 Scattergram of the scattering coefficients and volume concentration

方,计算值同样出现升高或降低.14日和15日出现较大误差主要是由于观测得到的气溶胶散射系数很小,而计算结果认为当天的散射消光占总消光的比例仍为70%,这与实际情况有较大差别.总体看来,计算值偏大,能见度仪观测值偏小.这主要是由于计算时忽略了分子的消光作用,以及对石家庄气溶胶散射消光占总消光比例的假设与实

际情况有所差别,再加上能见度仪对近距离扬尘的敏感和浊度仪本身的测值误差.根据对能见度仪和浊度仪数据反算可知,石家庄粒子散射系数占消光系数的50%~70%,这说明石家庄黑炭污染异常严重,而燃煤和汽油柴油机动车是碳成分的主要来源^[34],适当控制燃煤企业排放和机动车数量,对提高石家庄市大气能见度有重要作用.

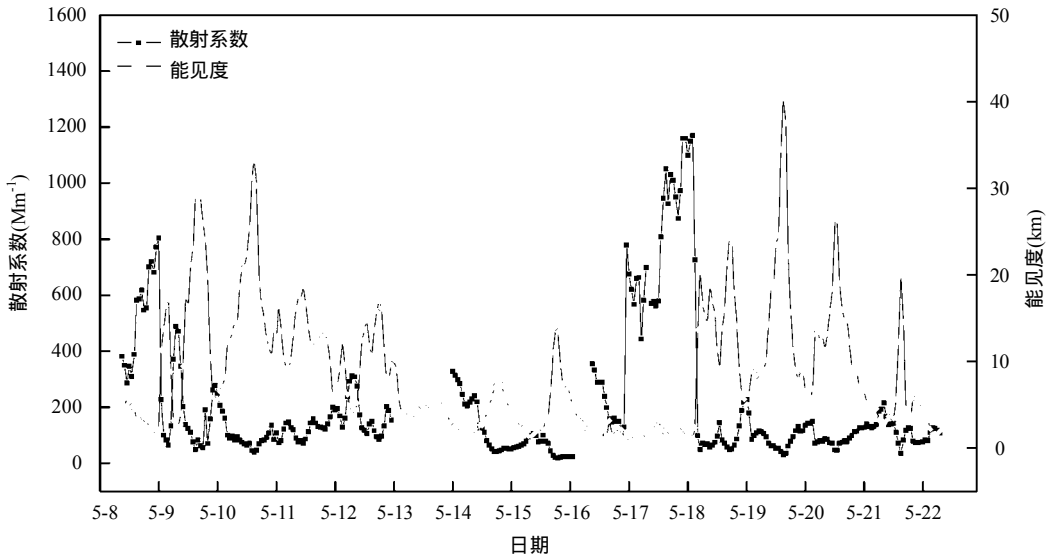


图 12 散射系数和大气能见度随观测时间的变化

Fig.12 Variation of the scattering coefficients and visibility

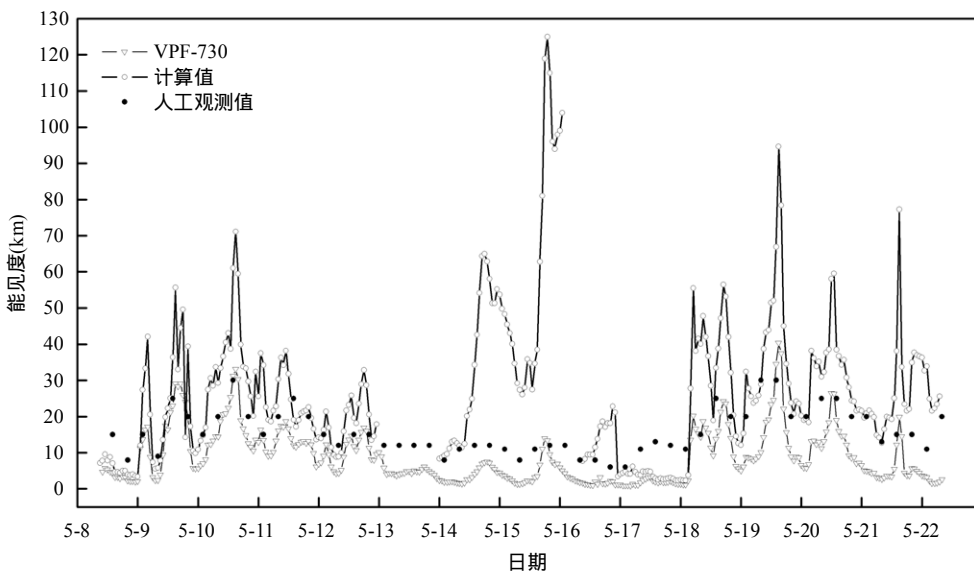


图 13 能见度计算值、VPF-730 观测值和人工观测值随观测时间的变化

Fig.13 Variation of the visibility of calculation, VPF-730 and artificiality

2.5.2 散射系数和相对湿度的关系 悬浮在大气中的气溶胶颗粒,其形态、性质无时无刻不在发生着各种变化,而大气中的水汽就是影响这种变化的最重要的因子之一.当相对湿度较大时,水汽在气溶胶表面凝结,使得气溶胶颗粒增大,从而导致质量浓度、粒径和复折射指数等性质发生改变,从而影响气溶胶的散射能力.计算表明^[16],当相对湿度为 85%时,硫酸铵粒子谱($D_p=0.4\mu\text{m}$, $\sigma=1.9$)的散射系数为干气溶胶的 3.33 倍. Koloutson-Vakakis 等^[17]在伊利斯诺州的观测表明,当相对湿度为 82.5%时,观测点气溶胶颗粒的总散射系数为干气溶胶总散射系数的 1.4~1.5 倍,后向散射能力提高了 1.1~1.2 倍.另外, Malm 等^[35]的研究表明,气溶胶散射能力对相对湿度的响应与气溶胶的颗粒物的化学组成有密切的关系.

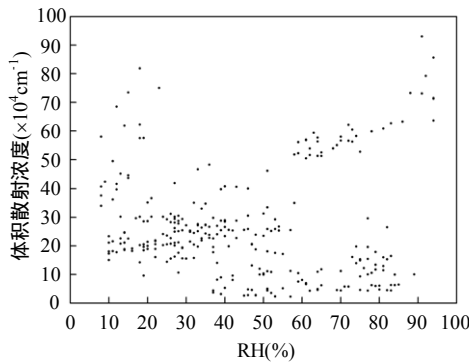


图 14 体积散射系数与相对湿度关系散点

Fig. 14 Scattergram of the scattering coefficients and relative humidity

图 14 为石家庄气溶胶单位体积散射系数与相对湿度关系.可以看出,当相对湿度低于 40%时,单位体积气溶胶散射系数对相对湿度的响应并不明显,可以认为是干气溶胶的体积散射系数;而当相对湿度达到 57%以上时,气溶胶体积散射系数随相对湿度的变化分为明显的两部分,一部分有明显的增大过程,当相对湿度为 90%以上时,趋势更为明显,说明气溶胶吸湿增长对其散射特性的巨大影响,进一步验证了图 10 的结果.但还有一部分气溶胶体积散射系数随着相对湿度的增加并未增大,反而比干气溶胶单位体积散射系数

要小,前文认为这部分气溶胶为沙尘、扬尘类气溶胶,其对体积浓度贡献较大,但对水汽并不敏感^[17,35],散射系数随相对湿度增加变化不大,进而导致单位体积散射系数较小.

2.5.3 散射系数和风向的关系 从图 15 可以看出,散射系数、数浓度和体积浓度的高值区均出现在东偏南扇区上,而低值区则出现在偏西扇区.石家庄市气象局地处石家庄市偏西南方向,西边靠近公路,接近郊区.气象局东南 4 公里处有两个大的工业园区,正东则为石家庄市中心,当风速稍大时,会将工业园区和市中心的污染物吹向观测点.分别对 90~150°,240~300°两个扇区气溶胶数浓度、体积浓度和散射系数求平均,得出偏西南方向三者均值分别为 2639 个/cm³, 9.1 $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$, 166.4Mm⁻¹, 而偏西方向则为 1834 个/cm³, 5.5 $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ 和 122.8Mm⁻¹.还可以看出,在西北扇区上,数浓度和体积浓度有一些高值出现,但相应的散射系数在西北扇区上很少有高值出现,这也从侧面反映了影响气溶胶散射系数的因素,除了数浓度的大小,还与气溶胶源密切相关.

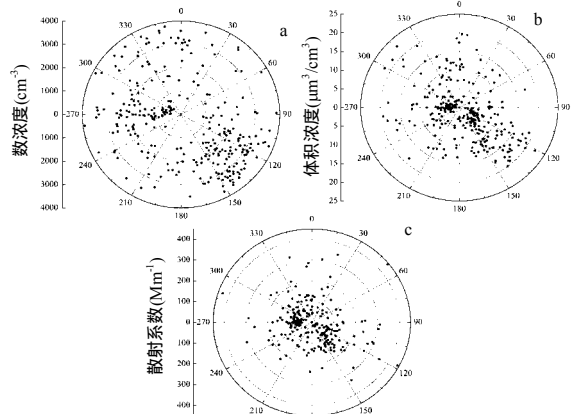


图 15 气溶胶的散射系数、数浓度、体积浓度与风向的关系

Fig.15 Relations between the aerosol scattering coefficients, number concentration and volume concentration with wind direction

3 结论

3.1 石家庄气溶胶散射系数 3 个波段的平均值

分别为 $257,199,143\text{Mm}^{-1}$, 标准差为 $293,237,173\text{Mm}^{-1}$, 散射系数的变化很大. 3 个波段散射系数变化趋势一致, 气溶胶微物理特性比较稳定, 但由于局地气象条件差异, 散射系数出现波动. 散射系数日变化呈三峰分布, 峰值出现时间分别为 8:00、13:00 和 0:00, 夜间散射系数明显大于白天. 晴天散射系数变化平缓, 非晴天波动较大, 非晴天散射系数平均值是晴天散射系数的 4.7 倍.

3.2 气溶胶 3 个波段后向散射比变化趋势一致, 比值均大于 0.15, 表明石家庄市大气气溶胶中细粒子含量较大. 散射系数和体积浓度成正比, 但因为局地气象条件的影响, 有气溶胶体积浓度变大, 散射系数变化不大的情况出现.

3.3 气溶胶散射系数和能见度呈负相关. 根据散射系数计算得到的能见度, 能较好的反应能见度的实际情况. 石家庄散射消光占总消光的 50%~70%, 黑炭污染比较严重.

3.4 由于气溶胶类型的差异, 当石家庄大气相对湿度较高时, 气溶胶散射系数呈现两种不同的变化趋势. 局地风向会显著影响气溶胶散射特性. 当为东南风时, 气溶胶散射系数有高值出现, 而刮偏西风时散射系数则相对较低.

参考文献:

- Penner J E, Dong X, Chen Y. Observational evidence of a change in radiative forcing due to the indirect aerosol effect [J]. *Nature*, 2004,427(6971):231-234.
- 朱岗麓. 大气污染物理学基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- Charlson R J. Integrating nephelometer [J]. *Atmospheric Technology (United States)*, 1980,12:10-14.
- 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.
- Delene D J, Ogren J A. Variability of aerosol optical properties at four North American surface monitoring sites [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002,59(6):1135-1150.
- Quinn P K, Bates T S, Coffman D J, et al. A comparison of aerosol chemical and optical properties from the 1st and 2nd aerosol characterization experiments [J]. *Tellus*, 2000,52B: 239-257.
- Carrico C M, Rood M J, Ogren J A. Aerosol light scattering properties at Cape Grim, Tasmania, during the first aerosol characterization experiment (ACE1) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998,103(D13):16565-16574.
- Anderson T L, Masonis S J, Covert D S, et al. Variability of aerosol optical properties derived from in situ aircraft measurements during ACE-Asia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D23):8647.
- 胡波, 张婕, 张武, 等. 应用积分浑浊度仪研究兰州城市冬季大气气溶胶 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2005,41(3): 19-25.
- Zhang W, Hu B, Chen C, et al. Scattering properties of atmospheric aerosols over Lanzhou City and applications using an integrating nephelometer [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004,21(6):848-856.
- 柯宗建, 汤洁. 北京上甸子秋冬季大气气溶胶的散射特征 [J]. *大气科学*, 2007,31(3):553-559.
- 徐政, 李卫军, 于阳春, 等. 济南秋季霾与非霾天气下气溶胶光学性质的观测 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(4):546-552.
- 李良玉, 任爱玲, 梁银英. 石家庄市颗粒物质量浓度及粒度随高度变化规律 [J]. *环境科学与管理*, 2007,32(1):61-64.
- 孙霞, 银燕, 孙玉稳, 等. 石家庄地区春季晴、霾天气气溶胶观测研究 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(5):705-713.
- 谭稳, 银燕, 陈魁, 等. 石家庄地区大气细粒子增长特征初步研究 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(9):1431-1437.
- Hand J L, Malm W C. Review of the IMPROVE Equation for Estimating Ambient Light Extinction Coefficients [M]. 2007: CIRA, Colorado State University.
- Koloutsou-Vakakis S, Carrica C M, Kus P, et al. Aerosol properties at a midlatitude Northern Hemisphere continental site [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001,106(D3):3019-3032.
- 瞿鹏飞, 金莲姬, 林振毅, 等. 石家庄春季大气气溶胶数浓度和谱的观测特征 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(6):886-891.
- Xu J, Bergin M H, Yu X, et al. Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangtze delta region of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002,36(2):161-173.
- Bergin M H, Gass G R, Xu J, et al. Aerosol radiative, physical, and chemical properties in Beijing during June 1999 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001,106(D16):17,969-17,980.
- 章秋英, 牛生杰, 沈建国, 等. 半干旱区气溶胶散射特性研究 [J]. *中国沙漠*, 2008,28(4):755-761.
- 张素敏, 王赞红, 张荣荣, 等. 石家庄市大气能见度变化特征及其与大气颗粒物碳成分的关系 [J]. *河北师范大学学报(自然科学版)*, 2008,(6):825-829.
- 王海英, 郭琳. 离子色谱法测定石家庄环境空气中可吸入颗粒物水溶性成分[C]//第十一届全国离子色谱学术报告会论文集. 杭州: 浙江大学, 2006:102-103.
- Doyle M, Dorling S. Visibility trends in the UK 1950-1997 [J].

- Atmospheric Environment, 2002,36(19):3161-3172.
- [25] Husar R B, Husar J D, Martin L. Distribution of continental surface aerosol extinction based on visual range data [J]. Atmospheric Environment, 2000,34(29/30):5067-5078.
- [26] Malm W C. Introduction to visibility [R]. 1999: Cooperative Institute for Research in the Atmosphere, NPS Visibility Program, Colorado State University.
- [27] Quinn P K, Bates T S. North American, Asian, and Indian haze: Similar regional impacts on climate [J]. Geophysical Research Letter, 2003,30(11):1555.
- [28] 迟旭光,段凤魁,董树屏,等.北京大气颗粒物中有机碳和元素碳的浓度水平和季节变化 [J]. 中国环境监测, 2000,(3):35-38.
- [29] Horvath H. Size segregated light absorption coefficient of the atmospheric aerosol [J]. Atmospheric Environment, 1995,29(8): 875-883.
- [30] Appel B R, Tokiwa Y, Hsu J, et al. Visibility as related to atmospheric aerosol constituents [J]. Atmospheric Environment, 1985,19(9):1525-1534.
- [31] Latha K M, Badarinath K. Black carbon aerosols over tropical urban environment-a case study [J]. Atmospheric Research, 2003,69(1/2):125-133.
- [32] 胡 波,张 武,张 镭,等.兰州市西固区冬季大气气溶胶粒子的散射特征.高原气象, 2003(04):354-360.
- [33] 刘新民,邵 敏.北京市夏季大气消光系数的来源分析 [J]. 环境科学学报, 2004,24(2):185-189.
- [34] 叶 堤,蒋昌潭,赵 琦,等.重庆市春季大气 PM₁₀ 中有机碳、元素碳浓度水平及污染特征分析 [J]. 中国环境监测, 2007,(3): 69-73.
- [35] Malm W C, Day D E. Estimates of aerosol species scattering characteristics as a function of relative humidity [J]. Atmospheric Environment, 2001,35(16):2845-2860.
- 作者简介：张 勇(1986-),男,陕西渭南人,南京信息工程大学硕士研究生,研究方向为大气气溶胶辐射与光学.

加快燃煤锅炉清洁能源替代

上海市委副书记、市长韩正日前在上海市政府常务会议上指出,燃煤(重油)锅炉清洁能源替代工作是“十二五”节能减排的重点工作之一,对于改善大气环境质量和市民生活环境有重要意义。

会议指出,上海要加快实施燃煤锅炉清洁能源替代,有效降低污染物排放,改善空气质量和城市居民生活环境.会议通过了《关于实施燃煤(重油)锅炉清洁能源替代工作方案》,将按照引导和倒逼相结合的原则,采取控制使用高污染燃料等环保措施,采取严格的执法、监管措施,并给予相应资金补贴,加快燃煤(重油)锅炉实施清洁能源替代.到2015年底,拟对上海市划定的“无燃煤区”、“基本无燃煤区”范围内1300多台燃煤(重油)锅炉实施清洁能源替代.

这一方案落实后,预计每年可减少分散燃煤用量约100万吨标煤;减排二氧化碳约146万吨,二氧化硫约1.2万吨,氮氧化物约0.7万吨,烟尘约0.4万吨;锅炉综合能效水平整体提升约30%,每年可节约30万吨标煤.

据悉,上海市还将加强对区县政府燃煤(重油)锅炉清洁能源替代工作的绩效考核,严格控制高污染燃料使用,加强能效和排放监管,对替代项目给予财政资金补贴,同时加大清洁能源配套支持力度.

摘自《中国环境报》

2012-04-12