

徐梅, 韩素芹, 武国良, 等. 天津市市区秋冬季大气气溶胶散射系数的变化特征[J]. 气象, 2011, 37(11): 1566-1571.

天津市市区秋冬季大气气溶胶散射系数的变化特征^{* 1}

徐 梅 韩素芹 武国良 赵玉娟

天津市气象局, 天津 300074

提 要: 通过对天津市市区 2006 年 9 月至 2007 年 2 月期间散射系数进行统计分析, 得出天津市市区秋冬季气溶胶散射系数特征: 散射系数小时平均值变化范围在 $100 \sim 10000 \text{ Mm}^{-1}$, 日变化呈典型双峰形, 峰值出现在早 6 时和晚 22 时, 散射系数分别为 508.5 和 431.4 Mm^{-1} 。冬季散射系数要高于秋季。雾日、霾日和晴天时的平均散射系数分别为 588.8, 403.7 和 172.5 Mm^{-1} , 雾日的散射系数最大, 晴天的散射系数最小。细粒子 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化与散射系数日变化曲线非常接近, 两者呈正相关, 相关系数达到 0.78。出现大风扬沙天气时散射系数变化剧烈, PM_{10} 浓度出现高值, 而散射系数却降低, 扬沙天气导致空气中的大粒子浓度增加, 当 PM_{10} 质量浓度表现为高值时, 散射系数并没有表现为高值。

关键词: 大气气溶胶, 散射系数, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}

The Scattering Properties of Aerosols in Urban Site of Tianjin

XU Mei HAN Suqin WU Guoliang ZHAO Yujuan

Tianjin Municipal Meteorological Service, Tianjin 300074

Abstract: With the analysis on the aerosol scattering coefficient in urban site of Tianjin in September 2006 to February 2007, it is found that there are two peaks for the average diurnal variations of the scattering coefficient of aerosols which can be seen at 06:00 BT and 22:00 BT, with values of 508.5 and 431.4 Mm^{-1} . The scattering coefficient is usually higher in winter than that in autumn. The average scattering coefficients are 588.8 Mm^{-1} in fog days, 403.7 Mm^{-1} in haze days, and 172.5 Mm^{-1} in fine days. Therefore, the average scattering coefficient is the highest in fog days, while the lowest in fine days. The aerosol scattering coefficient varies obviously in gale weather and dust weather. Before wind speed increases the scattering coefficient is higher, and it decreases in gale weather and dust weather. Diurnal change of the $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations accords with the daily change of the scattering coefficient. A good correlation between scattering coefficient and $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration can be found with a high coefficient of 0.78.

Key words: aerosols, aerosol scattering coefficient, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}

引 言

大气气溶胶一般是指大气与悬浮在其中的固体和液体微粒共同组成的多相体系。大气气溶胶颗粒物的直径多在 $10^{-3} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 之间, 它不但能通过散射和吸收作用改变太阳辐射而影响整个地气系统的

辐射收支, 直接或间接地影响着全球环境和气候的变化, 还对人类健康有着重要影响^[1-2]。

气溶胶的消光系数为散射系数与吸收系数之和。在一般地区, 颗粒物散射消光系数大于或远远大于颗粒物吸收消光系数, 即相对于颗粒物的散射作用, 其吸收作用对气溶胶消光作用的贡献较小^[3-4], 因此, 测量颗粒物的散射系数能较好地估计

* 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403707)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706036)共同资助

2010 年 11 月 13 日收稿; 2011 年 5 月 26 日收修定稿

第一作者: 徐梅, 主要从事环境气象技术研究. Email: xumxum01010101@yahoo.com.cn

气溶胶对总消光系数的贡献。国外的气溶胶散射试验开展得较早,NOAA 早在 20 世纪 80 年代就开始了气溶胶散射性质的试验^[5-6],1995 年以来国际大气化学研究计划组织了多次气溶胶特性试验(ACE),观测得到气溶胶散射性质的数据^[7-9]。国内的研究相对较少,Xu 等^[10]利用本底站临安的浊度计观测数据研究长江三角洲的气溶胶辐射特性,柯宗建等^[11]利用北京上甸子大气本底站的观测数据详细分析了当地气溶胶的散射特征。胡波等^[12-13]研究了兰州市冬季气溶胶的散射特征及其变化规律。蔡斌彬^[14]对天津市的污染天气散射特征和消光系数的比例构成进行了实验与研究。

天津市位于环渤海经济圈的中心,是中国北方最大的沿海开放城市,是我国北方的海运与工业中心。天津市近几年正处于大规模的建设中,气溶胶污染不容小觑,但对气溶胶散射特性方面的研究相对较少,对大城市气溶胶的散射特性规律的研究特别是空气质量较差的秋冬季是很重要的。

1 观测仪器与资料来源

试验使用澳大利亚 ECOTECH 公司的 M9003 型积分式浊度仪进行气溶胶散射系数的测定,利用浊度仪观测地面气溶胶散射系数是一种相对简单、经济并且有效的手段^[15]。观测仪器安装在天津市气象观测铁塔院实验室内,仪器距地高度 1 m,观测地点位于天津市区东北方向(39°04'N、117°12'E),海拔 2.2 m,周围环境是城市建筑群,东临立交桥,三面被城市建筑包围。院内有天津市城市气候监测站,属于国家观测一般站,分析所用气象资料均来自该观测站。

此仪器用来测量波长为 525 nm 的气溶胶散射系数,采用加热进气管控制湿度影响,试验期间进行连续观测,通过统计天津市区 2006 年 9 月 1 日至 2007 年 2 月 28 日(北京时,下同)期间散射系数 5 min 一次的时间序列,计算得出散射系数小时平均值。其中 2006 年 9 月 23 日至 10 月 10 日的观测数据缺失。有效样本数 3149 个。

PM_{2.5} 质量浓度的观测采用美国 R&P 公司生产的 R&P 1400a 大气颗粒物质量浓度监测仪,仪器安装在气象观测铁塔院内 40 m 高度处,在 2006 年 11 月 1—30 日期间进行观测,PM_{2.5} 质量浓度每分钟一次的时间序列通过计算得出小时平均值。

PM₁₀ 质量浓度观测数据均来自环保局监测结果,天津市秋冬季 PM₁₀ 质量浓度分析来源于 2005 年 1 月 1 日至 2005 年 12 月 31 日市监测中心站(39°05'N、117°09'E)观测数据,采样高度 14.1 m;沙尘天气散射系数变化特征分析所用 PM₁₀ 浓度数据来自天津市环保局梅江监测站(39°03'N、117°13'E),采样高度 12.2 m,两个采样点均位于天津市区内。

2 结果讨论

2.1 天津市秋冬季大气气溶胶散射系数变化特征

天津市秋冬季散射系数小时平均值变化范围在 10⁰~10⁴ Mm⁻¹。有效样本中,最大散射系数值达到 3149.7 Mm⁻¹,出现在 2006 年 12 月 26 日上午 10 时,最小散射系数值为 2.9 Mm⁻¹,出现在 2006 年 12 月 7 日凌晨 4 时,小时散射系数平均值为 412.4 Mm⁻¹,是北京上甸子的 2.3 倍^[11]。

图 1a 反映了天津市秋冬季季节散射系数日变化特征。日变化曲线呈典型的双峰型,日平均散射系数峰值出现在早 6 时和晚 22 时,分别为 508.5 和 431.4 Mm⁻¹。冬季散射系数要高于秋季,峰值出现时间略有差别,冬季散射系数峰值出现在早 9 时和晚 21 时,分别为 553.1 和 541.7 Mm⁻¹;秋季散射系数峰值出现在早 7 时和晚 23 时,分别为 491.9 和 354.2 Mm⁻¹。

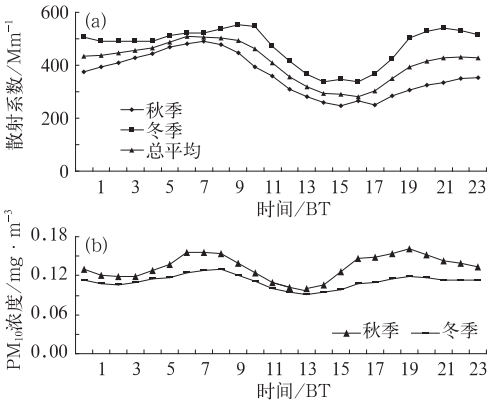


图 1 天津地区秋冬季大气气溶胶散射系数日变化(a)和 PM₁₀ 监测浓度秋冬季日变化(b)

Fig.1 Diurnal variations of the aerosol scattering coefficient (a) and PM₁₀ mass concentration (b) in autumn and winter seasons

从天津市区秋冬季 PM_{10} 浓度的日变化(图 1b)和气象因子相对湿度、风速的日变化(图 2)可知,散射系数的日变化特征和 PM_{10} 等主要污染物的日变化趋势一致, PM_{10} 浓度在早晚出现峰值,主峰出现在早晨^[16]。这与城市大气层结的日变化规律有很好的相关性,城市的早晨容易出现逆温,也是城市交通的高峰时间,此外早晨的风速较小相对湿度较高都会影响气溶胶的散射,污染物聚集条件下气溶胶散射系数增长。随着近地层对流活动逐渐增强,污染物扩散散射系数会逐渐减小。夜间对流减弱,风速减小,相对湿度增大,大气层结稳定不利于气溶胶的扩散,又导致散射系数较高^[17]。

图 3 为天津市区秋冬季节散射系数小时平均值统计分布图,区间间隔设为 100 Mm^{-1} ,由图可知,散射系数小时平均值主要出现在 800 Mm^{-1} 以内,每个级别出现的时次都超过 100,大于 800 Mm^{-1} 每

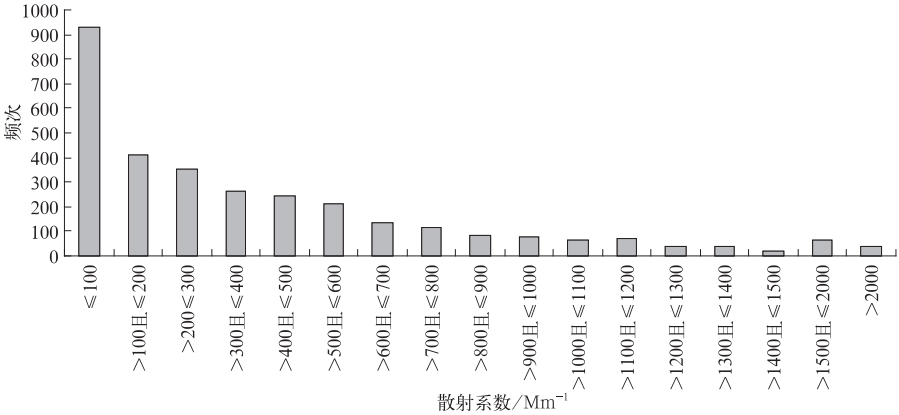


图 3 散射系数统计分布图

Fig. 3 Statistical distribution of the scattering coefficient at intervals of 100 Mm^{-1}

个级别出现时次都低于 90。其中 100 Mm^{-1} 以下散射系数小时平均值出现频次最集中,达到 900 时次以上。

2.2 散射系数与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关分析

刘新民等^[18]对北京市夏季大气消光系数研究得出,颗粒物的散射作用大约占对大气消光系数的 70%,颗粒物的消光贡献可以达到总消光的 90%,而 $\text{PM}_{2.5}$ 在气溶胶散射中又占了大部分;董海燕^[19]通过实验观测数据计算得出,天津市初夏 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度占 PM_{10} 浓度的百分比为 51.1%;刘新昱等^[3]对广州市大气观测结果计算得到:粒径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子在 $\lambda=0.55 \mu\text{m}$ 处对太阳辐射的散射

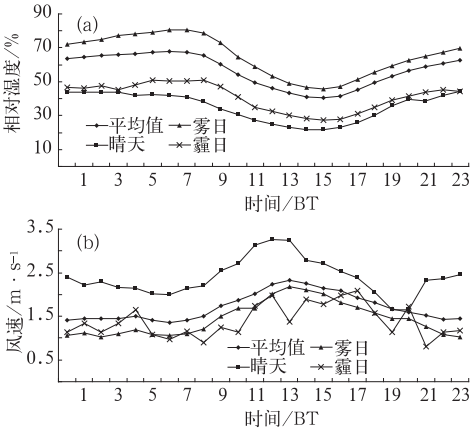


图 2 秋冬季晴天、雾日、霾日相对湿度日变化(a)和风速日变化(b)
Fig. 2 Diurnal variations of relative humidity (a) and wind speed (b) in different weather conditions in autumn and winter seasons

占总散射的 89%,粗粒子的散射比例仅为 11%。散射系数与 $\text{PM}_{2.5}$ 之间存在着很好的关系,有研究通过相关分析得出二者相关系数均超过 0.9^[11,14]。

利用 2006 年 11 月观测的散射系数数据和气象观测铁塔 40 m 高度处观测的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据进行相关分析,有效样本 701 个。2006 年 11 月天津市出现大雾的天数较往年多,合计出现大雾 5 天,轻雾 16 天,霾 1 天,降水 3 天,故做了相对湿度的分组统计。

随着相对湿度的增大, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增加,气溶胶散射系数值相应增大,由图 4 可知,相对湿度小于 20%时, $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度平均值为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,散射系数平均值只有 32.9 Mm^{-1} ,相对湿度大于 80%

时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和散射系数都偏高, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值达到 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 散射系数平均值达到 499.3 Mm^{-1} 。

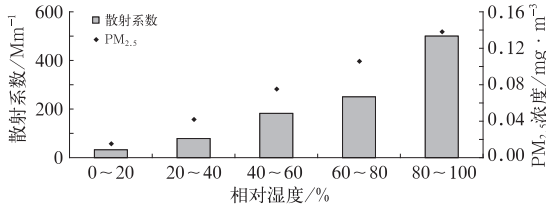


图 4 不同相对湿度时散射系数与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化

Fig. 4 Variations of aerosol scattering coefficient and $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration with different relative humidities

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化与散射系数日变化曲线趋势接近(图 5),特别是 00—12 时两者变化曲线更为吻合,日变化同为早晚双峰形,主峰出现在早晨,日最大值和最小值出现时间相同, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和散射系数的日最大值都出现在 09 时,分别达到 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 374.1 Mm^{-1} ,最小值都出现在 15 时,分别为 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 135.9 Mm^{-1} 。两者呈正相关,相关系数达到 0.78,通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验。气溶胶细粒子浓度对气溶胶散射系数变化影响较大。 $\text{PM}_{2.5}$ 是 PM_{10} 的重要组成部分,北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 的比值全年平均为 0.55^[20],与天津市的研究结果相近^[19],可见 $\text{PM}_{2.5}$ 对气溶胶散射的贡献不小。

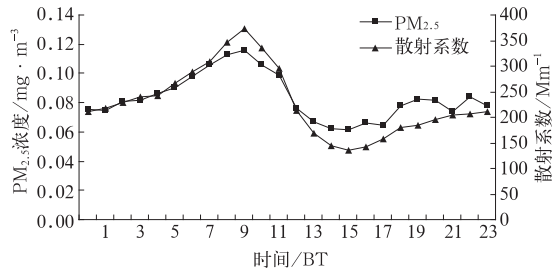


图 5 散射系数与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化图

Fig. 5 Diurnal variations of the scattering coefficient and $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration

2.3 雾霾日散射系数变化特征

雾日定义为排除日降水量大于 0.0 mm 的日期,只要出现轻雾和大雾则记为雾日;霾日定义为排除日降水量大于 0.0 mm 的日期和雾日,只要出现

霾则记为霾日;晴天定义为无视程障碍现象和降水现象出现,三次观测时天空云量均 ≤ 8 成。散射系数观测期间 2006 年 9 月 1 日至 2007 年 2 月 28 日,合计雾日 69 天,霾日 8 天,晴天 31 天。

雾日、霾日时大气气溶胶的散射系数要明显高于晴天时(图 6),雾日、霾日和晴天时的日平均散射系数分别为 588.8, 403.7 和 172.5 Mm^{-1} ,雾日的散射系数最大,晴天的散射系数最小,不到雾日的三分之一。

雾日、霾日时的散射系数日变化呈早晚双峰形,晴天时散射系数在夜晚较高,散射系数高值主要出现在 19—02 时,小时平均值都超过了 200 Mm^{-1} ,夜间 23 时最高,达到 255 Mm^{-1} 。雾日的主要峰值出现在上午,05—09 时散射系数平均值都超过了 700 Mm^{-1} ,07 时最高达到 736.6 Mm^{-1} 。霾日散射系数最大值出现在 23 时为 554.7 Mm^{-1} ,日变化曲线没有雾日和晴天时光滑,主要是因为单纯霾出现的时间不定,早晨和夜间出现的频率相对大些,由图 1b 和图 5 可知 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平呈早晚高下午低的趋势。而雾是在湿度较大时才会出现,主要在早晨观测到,其次是夜间出现较多(图 2a)。

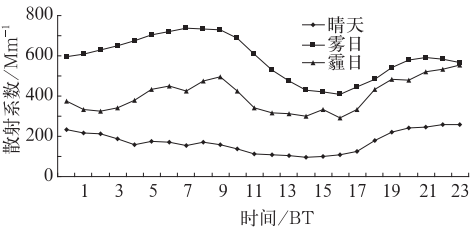


图 6 晴天、雾日、霾日大气气溶胶散射系数日变化

Fig. 6 Diurnal variations of the aerosol scattering coefficient in different weather conditions

2.4 沙尘天气散射系数变化特征

天津地区每年出现沙尘天气的次数不多,这里分析 2007 年的一个典型大风扬沙过程的散射系数以及 PM_{10} 浓度变化情况。分析所用 PM_{10} 浓度数据来自天津市环保局梅江监测站 ($39^{\circ}24' \text{ N}$ 、 $117^{\circ}12' \text{ E}$)。2007 年 2 月 13 日天津市区早晨观测到轻雾,能见度仅为 2.5 km,下午出现了扬沙和大风天气(表 1)。图 7 为出现大风扬沙时散射系数、 PM_{10} 浓度和风速的逐时变化,从变化曲线可以看出

散射系数与 PM_{10} 浓度和风速的变化存在相应关系。12 时以前小时平均风速值均不超过 $2.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 从 13 时开始明显增大, 16 时 42 分出现大风, 极大风速达到 $17.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 随后风速逐渐减弱, 23 时回落到 $3.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。散射系数与 PM_{10} 浓度变化情况不同, 散射系数在风速增大前维持着较高水平, 随着风速增大而大幅减小, 以 12 时为分界线, 12 时以前散射系数都超过 1000 Mm^{-1} , 09 时达到峰值 1654.7 Mm^{-1} , 13 时散射系数大幅减小至 129.7 Mm^{-1} , PM_{10} 浓度在起风前保持在 $0.2 \sim 0.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 13 时风速增大浓度开始增加, 17 时达到峰值 $0.78 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。大风扬沙天气导致 PM_{10} 浓度增大, 而散射系数却减小。对于固定质量浓度的气溶胶, 散射效率最高的粒子尺度在 $0.2 \sim 1.0 \mu\text{m}^{[21]}$, 即对总散射系数的贡献最大, 而粒径大于 $1.0 \mu\text{m}$ 的粒子对质量浓度的贡献较大, 扬沙天气导致空气中的大粒子浓度增加, 当 PM_{10} 质量浓度表现为高值时, 散射系数并没有表现为高值^[22-23]。

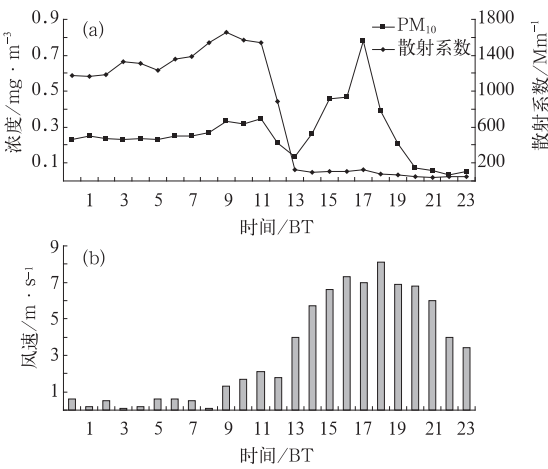


图 7 沙尘天气时 PM_{10} 浓度与散射系数逐时变化图(a)和沙尘天气时风速逐时变化图(b)

Fig. 7 Hourly means of the aerosol scattering coefficient and PM_{10} mass concentration (a) and the hourly means of wind speed (b) during dust weather

表 1 2007 年 2 月 13 日天气情况
Table 1 Weather on 13 February 2007

能见度/km			天气现象
08 时	14 时	20 时	08 时观测到轻雾;15:23—16:30 扬沙;16:42 大风
2.5	12.0	12.0	

3 结 论

天津市秋冬季大气气溶胶散射系数日变化曲线呈典型的双峰形, 日平均峰值出现在早 6 时和晚 22 时, 散射系数分别为 508.5 和 431.4 Mm^{-1} 。冬季散射系数要高于秋季。

雾日、霾日和晴天时的平均散射系数分别为 $588.8, 403.7$ 和 172.5 Mm^{-1} , 雾日的散射系数最大, 晴天的散射系数最小, 不到雾日的三分之一。雾日和霾日时的散射系数日变化呈早晚双峰形, 霾日散射系数日变化曲线没有雾日和晴天时光滑。

出现大风扬沙天气时散射系数与 PM_{10} 浓度变化相反, 扬沙天气带来的大粒子导致 PM_{10} 浓度增加, 而小粒子对散射系数的贡献最大, 扬沙天气并没有使散射系数表现出高值。

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变化与散射系数日变化曲线非常接近, 同为早晚双峰形, 两者呈正相关, 相关系数达到 0.78 , 通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平检验。气溶胶细粒子浓度对气溶胶散射系数变化影响较大。

参考文献

[1] 秦世广, 汤洁, 温玉璞. 黑碳气溶胶及其在气候变化研究中的意义[J]. 气象, 2001, 27(21): 3-7.

[2] 康风琴, 银燕, 张逸轩. 中国北方沙尘气溶胶对云和降水影响的数值模拟研究[J]. 气象, 2009, 35(6): 37-44.

[3] 刘新望, 张远航, 曾立民, 等. 广州市大气能见度影响因子的贡献研究[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(6): 733-738.

[4] 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 等. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系[J]. 环境科学学报, 2003, 23(4): 468-471.

[5] Bodhaine B A. Aerosol measurements at four background sites [J]. J Geophys Res, 1983, 88: 10753-10768.

[6] Bodhaine B A. Aerosol absorption measurements at Barrow, Mauna Loa and the South Pole [J]. J Geophys Res, 1995, 100 (D5): 8967-8975.

[7] 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]. J Geophys Res, 1998, 103(D13): 16565-16574.

[8] 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.

[9] 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]. J Geophys Res, 2003, 108 (D23): ACE15-1-ACE15-19.

- [10] Xu J, Bergin M H, Yu X, et al. Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangze delta region of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(2):161-173.
- [11] 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.
- [12] 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[J]. *高原气象*, 2003, 22(4):354-360.
- [13] 胡波, 张婕, 张武, 等. 应用积分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.
- [14] 蔡斌彬. 城市霾天气下气溶胶的散射消光特征及其影响分析[D]. 天津:南开大学, 2007:29-52.
- [15] Arun D, William K. Integrating nephelometer measurements for the airborne fine particulate (PM_{2.5}) mass concentrations[J]. *Atmos Environ*, 2003, 37:1383-1392.
- [16] 徐梅. 特大城市大气穹隆特征及其对大气环境的影响[D]. 兰州:兰州大学, 2007.
- [17] 阎逢旗, 胡欢陵, 吴永华, 等. 北京地区夏冬季气溶胶变化特征分析[J]. *环境科学研究*, 2004, 17(1):30-33.
- [18] 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, 24:185-189.
- [19] 董海燕. 天津市灰霾天气下气溶胶消光特征研究[D]. 天津:南开大学, 2007.
- [20] 徐敬, 丁国安, 颜鹏, 等. 北京地区 PM_{2.5} 的成分特征及来源分析[J]. *应用气象学报*, 2007, 18(5):645-654.
- [21] Quinn P K, Coffman D J, Kapustin V N, et al. Aerosol optical properties in the marine boundary layer during the First Aerosol Characterization Experiment (ACE21) and the underlying chemical and physical aerosol properties[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D13):16547-16563.
- [22] 陆辉, 魏文寿, 刘明哲, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地大气气溶胶散射特征研究[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(3):660-667.
- [23] 柯宗建, 汤洁, 王炳忠, 等. 积分浊度计在沙尘暴监测网试验中应用分析[J]. *气象科技*, 2004, 32(4):258-262.