

文章编号:1000-694X(2009)01-0183-06

半干旱区冬春季黑碳气溶胶吸收特性的观测研究

章秋英¹, 牛生杰¹, 沈建国², 王英舜³, 武魁³, 王敏³, 张凯霞³

(1. 南京信息工程大学 中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室, 江苏 南京 210044; 2. 山东省气象局, 山东 济南 250031; 3. 内蒙古锡林浩特国家气候观象台, 内蒙古 锡林浩特 026000)

摘要: 利用2006年4月和12月锡林浩特观象台黑碳灰度仪的观测资料, 分析了半干旱地区黑碳气溶胶浓度的变化特征, 讨论了引起这些变化特征的影响因子。结果表明, 黑碳气溶胶浓度冬季远大于春季, 日变化呈明显的双峰型; 讨论了风速对黑碳气溶胶浓度不同影响的范围, 可知风速在较小的情况下(小于 $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 黑碳气溶胶浓度值随风速的增大而减小; 在 $3.5 \sim 4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 风速增大, 黑碳气溶胶浓度值也增大; 风速较大(大于 $4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)后, 黑碳气溶胶浓度与风速之间没有明显的相关性。冬季12月由于黑碳气溶胶吸收作用造成的消光占总气溶胶消光的25%。

关键词: 黑碳气溶胶; 吸收特性; 能见度; 影响因子

中图分类号: X513

文献标识码: A

黑碳气溶胶(Black carbon)是空气中的一种重要的颗粒态污染物, 它是化石和生物质燃料不完全燃烧所排放出来的无定型碳质, 其粒子尺度主要在 $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 之间, 它在大气物理、大气化学、大气光学过程中都具有重要作用。粒子表面在大气中为非均相反应和气-粒转化过程提供活性载体并起到催化作用。黑碳气溶胶具有很强的吸附性, 表面吸附一些有毒、有害物质。黑碳气溶胶具有直接和间接的气候效应, 它在从紫外到红外的波长范围内对太阳辐射有强烈的吸收, 是大气中首要的吸收性气溶胶成分。

黑碳气溶胶的存在严重危害大气环境与人类健康, 对它的研究已经越来越受到国内外的重视, 众多学者通过观测实验或模式模拟对其开展研究^[1-6]。在观测实验方面, 国外黑碳气溶胶的研究较早^[7], 美国科学家从20世纪70年代开始黑碳气溶胶的系统测量; 80年代该工作得到国际上的广泛重视, 全球大气监测网(GAW)将黑碳气溶胶作为一个重要的气溶胶观测项目, 并从1989年起开始监测其变化; 90年代以来, 国际上开展了多项大规模的气溶胶观测实验, 黑碳气溶胶都是实验中的重要观测和研究对象。中国科学家也从80年代开始进行北京冬季取暖期燃煤排放的黑碳气溶胶的测量研究, 90年代在瓦里关、临安等全球和区域本底站开展测量。近十几年, 黑碳气溶胶的研究得到了广泛的重视和长

足的发展。汤洁等^[8]结合气象观测资料以及在我国东部地区的部分观测结果, 对瓦里关本底站大气中的黑碳气溶胶浓度及其变化特点进行过讨论分析。李杨等^[9]在西安站点通过黑碳测量仪获得了大气细粒子中每5 min的黑碳气溶胶浓度, 揭示了黑碳气溶胶浓度与污染指数(API)的变化具有良好的一致性。姜淑娟等^[10]使用两台黑碳仪和一台TEOM1400a, 研究了北京地区不同尺度气溶胶中的黑碳含量。但是受测量设备的限制, 进行黑碳气溶胶测量的地区还是非常有限的, 特别在干旱、半干旱地区, 往往致力于沙尘气溶胶的研究^[11-15], 对于黑碳气溶胶的研究很少。

根据2000年中国大陆黑碳气溶胶排放清单^[16], 2000年中国区域黑碳排放总量为149.94万t, 其中内蒙古地区累计排放2.59万t, 其中生物质燃烧0.43万t, 发电0.04万t, 交通0.07万t, 工业0.50万t, 居民生活1.55万t。相对于其他省份, 内蒙古的排放量比较小, 但也是不可忽略的一部分, 而且其排放源也有一定的特点。笔者利用黑碳灰度仪连续观测黑碳气溶胶质量浓度, 讨论2006年春季4月与冬季12月内蒙古锡林浩特观象台的黑碳气溶胶浓度变化特征及其影响因子。

1 观测仪器与地点

实验采用的仪器为美国玛基科学公司生产的

收稿日期: 2007-08-31; 改回日期: 2007-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(40575048); 科技部社会公益研究专项(2005DIB3J108); 教育部博士点基金项目(20050300002); 南京信息工程大学气象灾害重点实验室项目(KLME05006)共同资助

作者简介: 章秋英(1983—), 女(汉族), 江苏苏州人, 硕士研究生, 研究方向: 大气气溶胶。Email: zhanglu_0105@163.com

AE-31 型黑碳灰度仪 (Aethalometer, Magee Scientific Co, Berkeley, California, USA)。其原理是利用黑碳气溶胶对光的强吸光特性,属于光学灰度测量法^[17]。它通过发光二极管发射 7 个波长的光,用一透光均匀的滤膜采集气溶胶样品,测量光线透过滤膜时产生的光学衰减量。该仪器可以连续实时观测黑碳气溶胶的质量浓度,每 5 min 做一次循环观测。

另外,气溶胶散射系数是利用澳大利亚 Ecotech 公司生产的 M9003 型积分式浊度计测量得到的。大气光学能见度是用 Vaisala 公司的 FD12 能见度仪进行观测,这些仪器的采样频率均为 5 min。同期常规气象资料来自锡林浩特国家气候观象台自动气象站。

观测地点为锡林浩特国家气候观象台 (43°57' N, 116°07' E),该观象台位于锡林浩特市的东南方,处于内蒙古锡林郭勒盟草原腹地,属北温带大陆性气候,平均海拔高度 988.5 m,平均气温 1.7 °C,年

均降水量 195 mm。该地区主要以草原畜牧业经济为主,工业污染源较少。测站周围污染源较少。

2 结果与讨论

2.1 黑碳气溶胶质量浓度小时变化特征和日平均值

图 1A 和 B 分别为锡林浩特 2006 年 4 月与 12 月期间黑碳气溶胶质量浓度的小时变化趋势。从图中可以看出,黑碳的小时平均质量浓度变化很大,但 4 月的波动程度与 12 月相比相对较小。4 月小时平均浓度平均值为 $2\,085.62\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,最大值为 $17\,869.89\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,最小值为 $183.08\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$; 12 月小时平均浓度平均值为 $6\,067.96\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,最大值为 $43\,782.89\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,最小值为 $429.78\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,分别为 4 月的 2.91 倍、2.45 倍和 2.35 倍。表 1 列出了最大值出现的时间及相应天气状

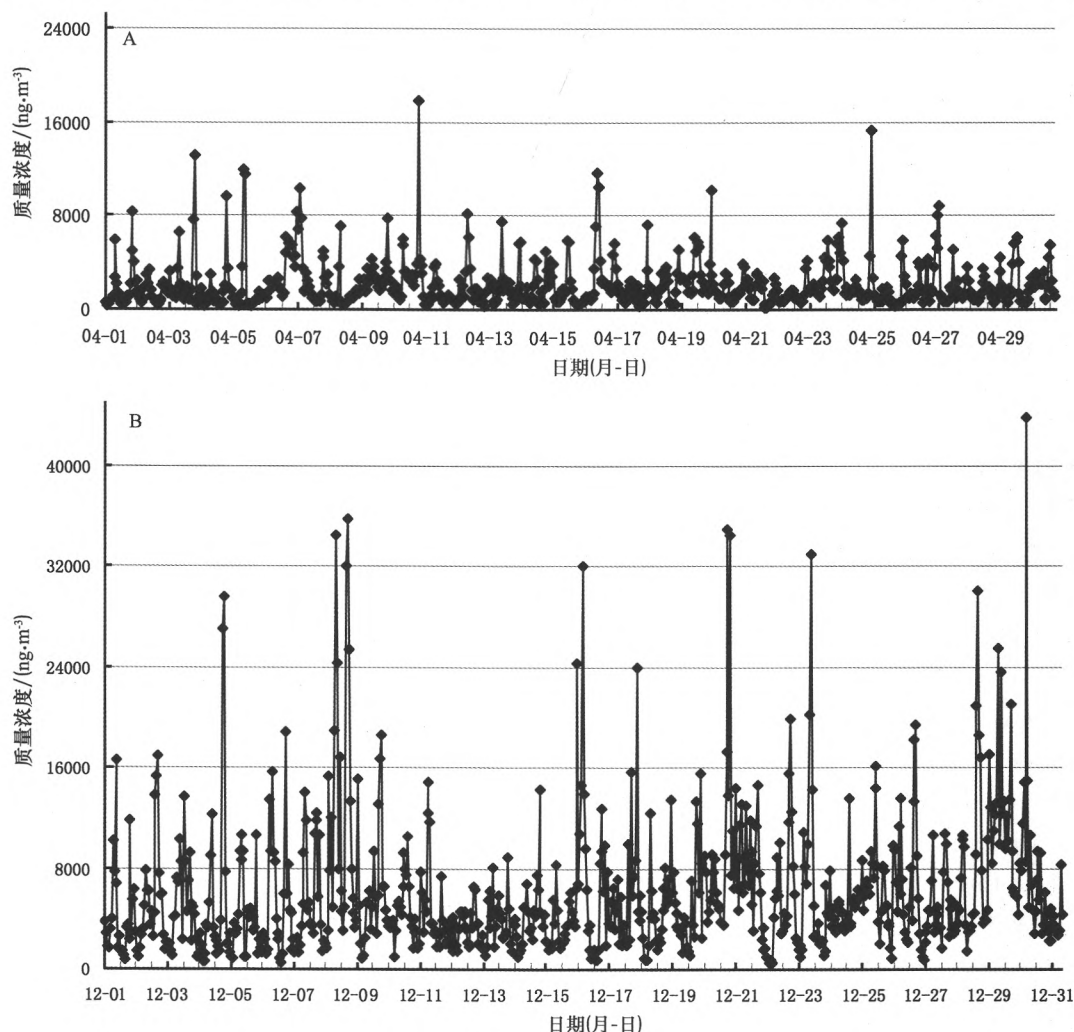


图 1 黑碳气溶胶质量浓度小时变化

Fig. 1 Hourly average variations of black carbon mass concentration

况,从表中可以看出,总云量对最大值的影响比较明显,最大值出现的时候总云量接近或等于 10 成,最小值出现时总云量相对较小。天空云量大,不利于污染物的扩散。降水过程对黑碳气溶胶浓度的变化也有直接的影响,4 月最小值出现时有降水出现。根据地面常规气象资料的记录,2006 年 4 月期间少雨,仅 4 月 7 日、19 日、21 日有降水;12 月有 3 次较大降水过程,分别为 14—16 日、25—27 日和 31 日。对应这些天内,都有连续的黑碳气溶胶浓度的低值出现。可见,降水过程对黑碳气溶胶的湿沉降作用是非常明显

的。风速对黑碳气溶胶浓度的影响将在后文讨论。

从图 1 的比较可以看出,冬季 12 月黑碳气溶胶浓度值比春季 4 月明显高出很多,这主要与冬季采暖燃烧的排放有关。12 月是锡林浩特地区的冬季采暖期,大量燃煤产生大量的黑碳排放进入大气,使得冬季的黑碳气溶胶浓度比春季高。4 月黑碳气溶胶质量浓度日平均值 $2\,052\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,12 月 $6\,228.36\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,这与中国其他城市相比^[18],其浓度值还是相对较低的,表现出较好的大气本底特征,这与该地区的人口密度,工业发展水平等有密切的关系。

表 1 黑碳气溶胶小时平均浓度极值出现时间与相应天气状况

Table 1 Time of hourly average maximum and minimum black carbon mass concentration and the corresponding weather conditions

月份	最大/小值	浓度值/(ng·m ⁻³)	出现时间	总云量/成	风速/(m·s ⁻¹)	降水
4 月	最大值	17 869.89	04-10-18:00	10—	6.4	无
	最小值	183.08	04-21-23:00	6	6.3	有
12 月	最大值	43 782.89	12-30-20:00	10	1.9	无
	最小值	429.78	12-06-14:00	0	3.3	无

图 2 是 4 月与 12 月黑碳气溶胶浓度的平均日变化。和许多其他城市一样,冬春两季黑碳气溶胶浓度日变化呈明显的双峰型。这主要与人类活动以及气象条件有关。4 月清晨 6 时左右,黑碳气溶胶浓度值出现第一个极值,晚间 6 时左右出现第二个极值,这些时间正是人类活动相对频繁的时段,居民烹饪燃烧以及上下班机动车辆的排放集中在这段时间。根据新型 L 波段探空雷达每日早晚 7 时的探空资料可知,4 月与 12 月期间早晚垂直大气均有不同程度的逆温出现。锡林浩特地区气温日较差大,清晨日出后不久,太阳辐射不断增强,加热大气,但此时地面还未开始加温,由此近地面形成逆温层,不

利于大气污染物的扩散。同样,夜间地面散热快,近地面层形成稳定状态,不利于大气扩散。由此导致污染物在大气中不断积累,达到极值。而中午至午后时段人类活动相对较弱,并且地面接受太阳辐射加热,垂直大气间形成较强的湍流交换和对流,使污染物容易扩散,黑碳气溶胶浓度值可以达到极小值。另外,从图中还可以看出,冬季 12 月极值的出现时间清晨比 4 月晚 1 h,傍晚比 4 月早 1 h,除了交通高峰时间的变化外,大气层结的季节变化也是一个重要因素。

2.2 风速对黑碳气溶胶质量浓度变化的影响

从上面的讨论中可以看出,除了人类活动的影响,降水、大气层结均能对黑碳气溶胶浓度产生影响。另外一个重要的因子——风对黑碳气溶胶浓度的变化也起着重要的作用。高风速可以卷起地面扬尘进入空气,使得进入空气的颗粒增加;但同时较大的风速又能较快地稀释空气,降低颗粒物浓度。另外,黑碳气溶胶浓度在不同风向的输送条件下会有明显的不同,主导风向吹来的是否是污染气团,直接影响黑碳气溶胶浓度水平。如果污染源在上风方,则黑碳气溶胶浓度会增大;如果吹来的是清洁大气,则黑碳气溶胶浓度值会降低。风向对黑碳气溶胶浓度的影响研究相对比较简单而且直观,很多研究在考虑风对黑碳气溶胶浓度影响时,往往只考虑或者重点考虑这一点;而风速由于其作用的复杂性,目前

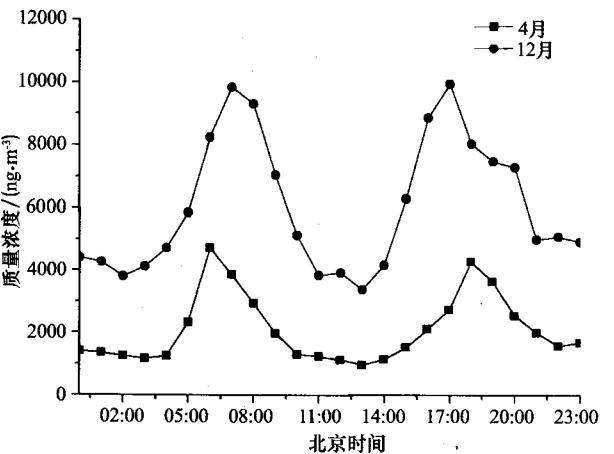


图 2 黑碳气溶胶浓度的日变化
Fig. 2 Diurnal variation of black carbon mass concentration for April and December

还没有广泛的研究。研究地点(锡林浩特地区)受蒙古气压和季风的影响,具有风大、风多的气候特征,特别是春季,极地干冷空气侵袭频繁,风速大,大风日多,沙尘天气主要发生在这个季节。因此,以春季4月为例,去除3个降水日后,分为正常天气、沙尘暴天气和扬沙天气,研究风速对黑碳气溶胶浓度的影响。

图3是根据自动气象站记录的每日定时风速和相对应定点的黑碳气溶胶质量浓度值,根据不同的风速区间取平均后得到的结果,3条曲线分别代表正常天气下、沙尘暴天气下和扬沙天气下的情况。由图可以看出,在风速小于 $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区间内,3条曲线都是随着风速的增大黑碳气溶胶浓度值减小的,这主要由于在风速较小的情况下,风速的增大对黑碳气溶胶浓度具有明显的稀释作用。风速在 $3.5 \sim 4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,风速增大,黑碳气溶胶浓度值也增大,这主要由于风速增大到一定程度后,地面浮尘就会被吹入空气。研究表明,黑碳气溶胶主要存在 $\text{PM}_{2.5}$ 中^[10],其中另外的一些含碳气溶胶也随之进入,同时,较大的风速将较远污染源的黑碳携带过来,使得黑碳浓度增大。而大于 $4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 后,黑碳气溶胶浓度与风速之间没有明显的相关性,随着风速的增大,黑碳气溶胶浓度值可能减小,也可能增大。可见在高风速下,风速对黑碳气溶胶浓度的影响具有不确定性。

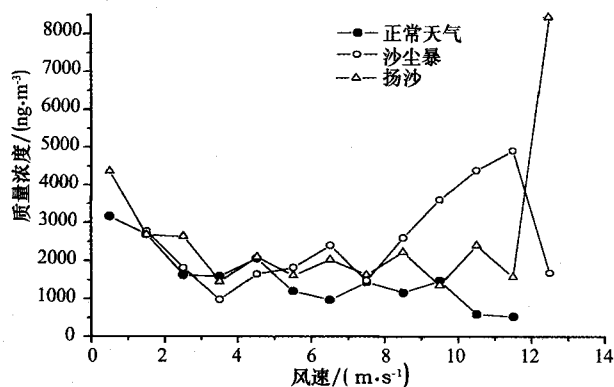


图3 不同天气下风速与黑碳气溶胶质量浓度的关系

Fig. 3 Relation between black carbon mass concentration and wind speed under different weather conditions

2.3 黑碳气溶胶吸收特性与能见度

能见度的大小主要受空气中气体分子与颗粒物对光的吸收和散射作用的影响,在一般情况下,由气溶胶引起的消光是降低能见度的主要因素。研究表明^[19-20],散射系数与能见度之间存在着密切的关

系。由于各个地区气溶胶成分的不同,由气溶胶散射或吸收造成的能见度降低的程度也不同。由于4月积分浊度计工作出现状况,因此采用冬季12月积分浊度计观测的散射系数,结合黑碳灰度计的观测数据讨论气溶胶吸收和散射造成的消光与能见度之间的关系。

积分浊度计直接测量出散射系数的值,黑碳灰度计测量的是大气中黑碳气溶胶的质量浓度,但根据其原理可以将质量浓度转化成吸收系数^[20]:

$$\sigma_{\text{ap}} = \rho_{\text{BC}} \cdot \sigma / 1.9 \quad (1)$$

式中: ρ_{BC} 为黑碳气溶胶质量浓度; σ 为吸收常数,值随波长的改变而改变^[17],在880 nm处 σ 取16.6;1.9为校准常数,用于滤除气溶胶在石英膜上对光的多次散射和吸收造成的影响。

在大气水平均一的情况下,气象能见距 R 和大气消光系数 δ_{ext} 有下述关系^[21]:

$$R = \frac{1}{\delta_{\text{ext}}} \ln \frac{1}{\epsilon} = \frac{3.912}{\delta_{\text{ext}}} \quad (2)$$

式中: $\epsilon=0.02$,是视角对比阈值,为观测者开始不能把目标物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的影响,(2)式中的 δ_{ext} 用 δ_{ep} 代替,即:

$$R = \frac{3.912}{\delta_{\text{ep}}} \quad (3)$$

图4是利用(3)式计算得到的能见度值与能见度仪观测得到的实际的能见度变化。从图中可以清楚地看出,计算值与实际值之间存在很好的趋势关系,实际能见度升高或降低的地方,计算值也同样出现升高或降低。另外可以发现,计算得到的能见度值总体比实际观测得到的大,两者的相对误差在31%左右,这主要由于在计算的过程中忽略了大气分子的消光作用,仪器的测值误差对最后的结果也有影响。总体上来说,计算的能见度还是能较好地反映实际情况。另外,通过计算可知,冬季12月由于黑碳气溶胶吸收作用造成的消光占总气溶胶消光的25%,这表明冬季该地区黑碳气溶胶吸收作用对能见度的影响是一个不可忽视的因素。

3 结论

通过对锡林浩特地区冬春季气溶胶吸收特性观测资料的研究分析,可以得到以下结论:

1) 锡林浩特地区春季4月黑碳气溶胶质量浓度日平均值 $2.052 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,冬季12月日平均值 $6.228.36 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。冬季黑碳气溶胶浓度值比春季

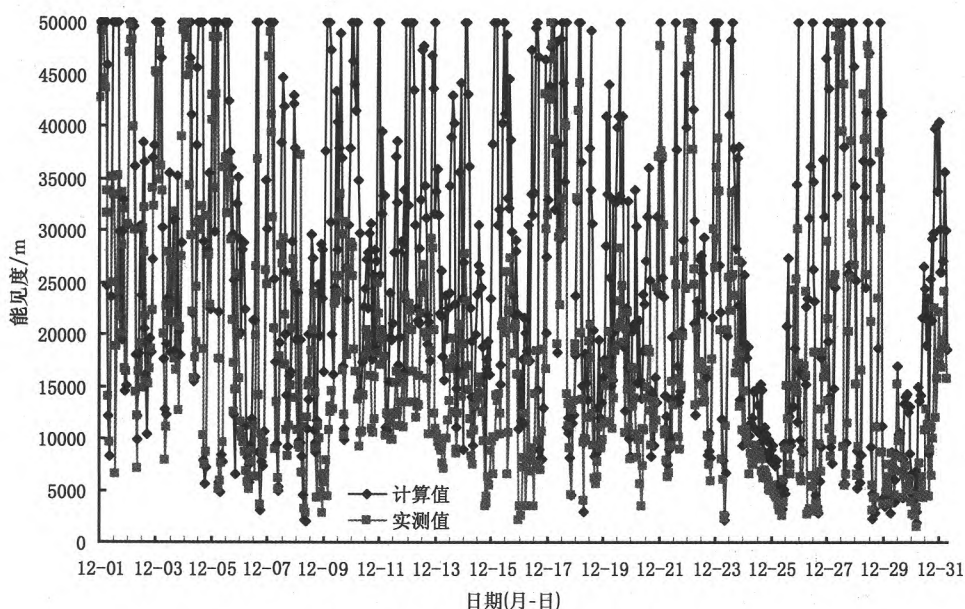


图4 12月能见度的计算值与实测值

Fig. 4 Variation of calculated versus observed aerosol visibility

明显高出很多,这主要与冬季采暖燃烧的排放有关。降水过程对黑碳气溶胶具有明显的湿沉降作用。

2)冬春两季黑碳气溶胶浓度日变化呈明显的双峰型。这主要与人类活动以及气象条件有关。峰值出现时间季节间存在不同,除了交通高峰时间的变化外,大气层结的季节变化也是一个重要因素。

3)风速对黑碳气溶胶浓度有重要影响。在风速较小的情况下(小于 $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),黑碳气溶胶浓度值随风速的增大而减小;风速在 $3.5 \sim 4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,风速增大,黑碳气溶胶浓度值也增大;风速较大(大于 $4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)后,黑碳气溶胶浓度与风速之间没有明显的相关性。

4)通过散射系数和吸收系数计算得到的能见度能较好地反映实际能见度的情况。冬季12月由于气溶胶吸收作用造成的消光占总的由气溶胶引起消光的25%,表明冬季该地区黑碳气溶胶吸收作用对能见度的影响是一个不可忽视的因素。

参考文献(References):

- [1] Novakova T, Hansen J E. Black carbon emissions in the United Kingdom during the past four decades: an empirical analysis[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 4155—4163.
- [2] Hugwant C B, Cachier H, Bessafi M, et al. Impact of traffic on black carbon aerosol concentration at la Reunion Island (Southern Indian Ocean) [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34: 3463—3473.
- [3] Pakkanen T A, Kermien V M, Ojanen C H, et al. Atmospheric black carbon in Helsinki[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34: 1497—1506.
- [4] 吴润,符淙斌.近五年来东亚春季黑碳气溶胶分布输送和辐射效应的模拟研究[J]. *大气科学*, 2005, 29(1): 112—119.
- [5] 张瑛,高庆先.硫酸盐和黑碳气溶胶辐射效应的研究[J]. *应用气象学报*, 1997, 8(增刊): 87—91.
- [6] 张美根,徐永福,张仁健,等.东亚地区春季黑碳气溶胶源排放及其浓度分布[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 46—51.
- [7] 许黎,王亚强.黑碳气溶胶研究进展:排放、清除和浓度[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(4): 352—360.
- [8] 汤洁,温玉璞,周凌晔,等.中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究[J]. *应用气象学报*, 1999, 10(2): 160—170.
- [9] 李杨,曹军骥,张小曳,等.2003年西安大气中黑碳气溶胶的演化特征及其来源解析[J]. *气候与环境研究*, 2005, 10(2): 229—237.
- [10] 娄淑娟,毛节泰,王美华,等.北京地区不同尺度气溶胶中黑碳含量的观测研究[J]. *环境科学学报*, 2005, 21(1): 17—22.
- [11] 牛生杰,章澄昌.贺兰山地区春季沙尘气溶胶的化学组分和富集因子分析[J]. *中国沙漠*, 2000, 20(3): 264—268.
- [12] 李霞,胡秀清,崔彩霞,等.新疆盆地沙尘气溶胶光学特性及我国沙尘天气强度划分标准的研究[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(4): 488—495.
- [13] 牛生杰,孙继明.贺兰山地区大气气溶胶光学特征研究[J]. *高原气象*, 2001, 20(3): 298—301.
- [14] 辛金元,张文煜,袁九毅,等.沙尘气溶胶对直接太阳辐射的衰减研究[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(3): 311—315.
- [15] 延昊,矫海燕,毕宝贵,等.塔克拉玛干沙漠中心的沙尘气溶胶观测研究[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(3): 389—393.
- [16] 曹国良,张小曳,王亚强,等.中国大陆黑碳气溶胶排放清单[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(6): 259—264.
- [17] Magee Scientific Company Berkeley, California, USA[R/OL]. www.mageesci.com.
- [18] 伍德侠,魏庆农,刘文清,等.2005年夏季背景大气中碳黑气

- 溶胶的观测研究[J]. 大气与环境光学学报, 2006, 1(3): 210—215.
- [19] 杨莲梅, 张广兴, 魏文寿, 等. 粒子散射系数在沙尘天气观测分级中的初步分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 380—383.
- [20] 柯宗建. 我国东部地区气溶胶光学特性观测研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2004.
- [21] 章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程[M]. 北京: 气象出版社, 1995: 297—298.

Observational Study on Aerosol Absorption Properties in Winter and Spring in Semiarid Area

ZHANG Qiu-ying¹, NIU Sheng-jie¹, SHEN Jiao-guo², WANG Ying-shun³,
WU Kui³, WANG Min³, ZHANG Kai-xia³

(1. Key Laboratory for Atmospheric Physics & Environment (LAPE) of China Meteorological Administration (CMA), Nanjing University of Information Science & Technology (NUIST), Nanjing 210044, China; 2. Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031, China; 3. Xilinhot National Climate Observation, Xilinhot 026000, China)

Abstract: The aerosol absorption properties were measured with an aethalometer in April and December 2006. Analyzing these real-time black carbon (BC) mass concentration data, we found that the BC mass concentration in winter was much larger than in spring, the daily variations of concentration in the two seasons present a curve of bi-peaks. We specially analyzed the wind speed range which has different influence on BC concentration, and found that when the wind speed is slow (less than $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), there has an significantly dilution effect to BC concentration. When the wind speed is between $3.5 \sim 4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the BC concentration increases as the wind speed increased. When the wind speed is larger than $4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, no apparent relevance is occurred. We also discussed the relationship between the absorption coefficient and the visibility, and we found that the extinction due to aerosol absorption is 25 % of the total extinction which due to aerosol absorption and scattering in winter.

Keywords: black carbon aerosol; absorption properties; visibility; influencing factor