

南京城区夏秋季能见度与 PM_{2.5} 化学成分的关系

沈铁迪,王体健*,陈璞珑,蒋自强 (南京大学大气科学学院,江苏 南京 210093)

摘要:为研究南京细颗粒物PM_{2.5}化学成分与能见度的关系,于2011年8月4~17日和2011年10月31日~11月11日在南京城区采集PM_{2.5}样品并分析其化学成分,同时对能见度、PM_{2.5}、相对湿度等进行了同步观测。结果表明:南京城区夏季采样期间的能见度高于秋季,分别约为10.9km、7.5km,低能见度天PM_{2.5}质量浓度较高,能见度与PM_{2.5}的相关系数为-0.75。水溶性离子和总碳分别占PM_{2.5}质量浓度的38%和26%,其中与能见度相关性较显著的是NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺、EC。总消光系数的主要贡献者是颗粒物,达98.2%。8月首要消光组分是硫酸铵(NH₄)₂SO₄,占47.0%,有机碳OC和硝酸铵NH₄NO₃分别占19.2%和14.3%;而11月是NH₄NO₃、(NH₄)₂SO₄和OC,分别占29.3%、28.7%、26.8%。对不同相对湿度下的能见度和PM_{2.5}化学成分进行拟合。进一步根据WRF/Chem细颗粒物化学成分模拟结果,分别利用拟合关系式和美国IMPROVE关系式,对2011年8月和11月能见度进行计算,与观测对比发现,利用本文拟合关系式计算的能见度结果优于IMPROVE关系式。

关键词:南京市; 能见度; PM_{2.5}化学成分; 消光系数

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2015)03-0652-07

Relationship between atmospheric visibility and chemical composition of PM_{2.5} in the summer and autumn of Nanjing. SHEN Tie-di, WANG Ti-jian*, CHEN Pu-long, JIANG Zi-qiang (School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China). *China Environmental Science*, 2015,35(3): 652~658

Abstract: To study the relationship between atmospheric visibility and chemical composition of PM_{2.5} in Nanjing, samples of PM_{2.5} were collected and chemical composition were analyzed from 4August to 17August and from 31 October to 11November 2011 in urban Nanjing, while observations of atmospheric visibility, PM_{2.5}, relative humidity, etc. were conducted simultaneously. Investigations showed that atmospheric visibility in Nanjing was higher in summer (~10.9km) than that in autumn (~7.5km) during the sampling period. The correlation coefficient between atmospheric visibility and PM_{2.5} was -0.75 which indicated the low visibility when the concentration of PM_{2.5} was high. Water-soluble ionic and carbonaceous components accounted for 38% and 26% of PM_{2.5} concentration. The correlation between atmospheric visibility and NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺、EC was significant. Particles, occupying 98.2%, was most important for ambient light extinction coefficient. The largest contributor to ambient light extinction in August was (NH₄)₂SO₄(47.0%), OC and NH₄NO₃accounting for 19.2% and14.3%. (NH₄)₂SO₄, NH₄NO₃ and OC contributed 28.7%、29.3% and 26.8% to light extinction coefficient in November. The atmospheric visibility were fit with chemical composition of PM_{2.5}in different relative humidity ranges. Using the concentration of PM_{2.5} chemical composition simulated by WRF/Chem, the atmospheric visibility in August and November of 2011 was calculated with the fitting relationship formulae and the American IMPROVE formula, respectively. In general, the calculated visibility from the fitting relationship formulae was better than the IMPROVE formula comapred to observations.

Key words: Nanjing; visibility; chemical composition of PM_{2.5}; light extinction coefficient

大气能见度是指视力正常的人在当时天气条件下,能够从天空背景中看到和分辨出目标物(黑色,大小适中)的最大水平距离^[1],是衡量大气透明度状况的重要指标。大气能见度与人们的生活息息相关,低能见度天气会对交通等造成影响。随着工业化和城市化的快速发展,大气污染造成的能见度下降成为重要的大气环境问题^[2-4],因

而大气能见度的研究越来越受到关注。

大气能见度的下降主要是由大气中悬浮的

收稿日期: 2014-07-01

基金项目: 国家“973”项目(2010CB428503,2014CB441203);国家科技部公益行业(气象)科研专项(GYHY201206011-1);国家支撑项目(2011BAK21B03);国家人才培养基金(J1103410)

* 责任作者, 教授, tjiangwang@nju.edu.cn

气溶胶粒子与污染气体对可见光的吸收和散射引起的^[5-8].在城市地区,颗粒物散射消光常被认为是消光削弱的主要原因^[2].研究表明,细粒子(通常表示为 PM_{2.5})对可见光的消光作用、能见度的削减较粗粒子大^[2,9-11].其中,PM_{2.5} 的硫酸盐(SO₄²⁻)、硝酸盐(NO₃⁻)、铵盐(NH₄⁺)、有机碳(OC)和元素碳(EC)对能见度的影响较大^[11-13].关于气象因子和颗粒物尺度分布对大气消光系数和光深度的影响研究比较多,而对于气溶胶化学成分影响能见度的关注较少^[14-15].研究气溶胶成分对能见度的作用需要对能见度、气溶胶质量浓度、气溶胶谱分布和不同地区气溶胶成分的观测.最近,世界各地关于这方面的观测研究越来越多.目前,对气溶胶的成分观测主要是用滤膜采样分析.分析的主要成分包括水溶性离子、含碳气溶胶.水溶性离子包括主要的阴离子(Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻),阳离子(Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Ca²⁺等).含碳气溶胶包括有机碳(OC)、元素碳(EC).

Koschmieder 提出将消光系数与大气能见度联系起来^[16],

$$V_R = 3.91/b_{ext} \quad (1)$$

式中: V_R 为能见度,m; b_{ext} 是总体消光系数, 10^{-4}m^{-1} ,它包括颗粒物散射消光(b_{sp})和颗粒物吸收消光(b_{ap}),分子散射消光(b_{sg})和分子吸收消光(b_{ag}).分子散射消光在空气中可以近似认为常数 $0.13 \times 10^{-4}\text{m}^{-1}$,和其他三项相比,一般可以忽略.分子的吸收消光作用主要是 NO₂ 污染带来的,其值为 NO₂ 浓度的 3.3 倍.目前, b_{ext} 可以通过 IMPROVE 经验公式计算^[17],

$$\begin{aligned} b_{ext}(\text{Mm}^{-1}) &= 3f(\text{RH})[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4] + 3f(\text{RH})[\text{NH}_4\text{NO}_3] \\ &+ 4f(\text{RH})[\text{Organics}] + 10[\text{EC}] + [\text{Soil}] \\ &+ [0.6][\text{Coarse mass}] + 10 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $f(\text{RH})$ 是相对湿度的函数,消光系数随湿度的升高而增大;[Organics]为有机物浓度,是 1.4 倍的有机碳浓度(1.4[OC]);[Soil]是土壤尘气溶胶浓度;Coarse mass (粗颗粒物质量)= [PM₁₀] - [PM_{2.5}];最后一项 10 代表清洁空气的散射系数.有研究根据式(1)和式(2)模拟能见度^[18-19].

南京作为长江三角洲地区的重要城市之一,近年来低能见度天气频发,城市大气环境问题备受关注.

本文利用 2011 年 8 月和 11 月在南京城区进行的 PM_{2.5} 成分观测以及同时观测的能见度和 PM_{2.5} 逐时数据,分析南京城区能见度和 PM_{2.5} 成分的关系,并建立拟合关系.此外,将拟合关系式作为计算方案利用 WRF/Chem 对气溶胶成分的模拟结果算得能见度,且与观测资料进行比较.

1 研究方法

1.1 样品采集与分析

细颗粒物成分观测地点在南京市鼓楼区(32.06°N, 118.76°E),采样时间为 2011 年 8 月(8 月 4~17 日)、11 月(10 月 31 日~11 月 11 日),其中有有效采样天数分别为 10、12d.采样使用两台美国热电公司生产的 Partisol 2300PM_{2.5} 大流量采样器,每个样品采样时间为 24h,分别用 Whatman 公司生产的特氟隆和来自瑞典 Munktell 公司的高纯石英滤膜收集颗粒物样品.对采集到的大气颗粒物样品,分别进行水溶性离子和 OC、EC 成分检测.

对采集到的细颗粒物样品进行水溶性离子分析和 OC、EC 的检测分析.通过离子色谱法对水溶性离子进行检测,使用仪器为万通 850 离子色谱仪.先对样品进行预处理,将一半滤膜与 20mL 超纯水及 20μL 甲醇混合浸泡 30min.用超声波发生器处理样品溶液瓶 30min,温度 40°C.用振荡器将超声处理后的样品瓶振荡 1h.经滤膜过滤后的样品再用离子色谱仪分析.分析后得到 SO₄²⁻、NO₃⁻、F⁻、Cl⁻、NH₄⁺、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺九种水溶性离子浓度.

用高纯石英滤膜采样分析 OC、EC.利用美国 Sunset Lab Inc.热光法有机碳/元素碳分析仪分析 OC、EC 的浓度^[20].

观测细颗粒物成分的同时进行能见度和细颗粒物质量浓度的逐时观测,能见度由 GSN-1 型能见度仪,利用 Koschmider 原理,采用红外前向散射技术,通过传感器测量大气中微小悬浮颗粒(雾,薄雾,烟)和大颗粒(雨,雪,冰粒,毛毛雨)对红外线光束的散射强度来准确有效测量出气象光学能见度.气温、气压、风速、风向和相对湿度的数据来自自动气象站,每小时采集一次.细颗粒物 PM_{2.5} 质量浓度由 TEOM 1400 环境颗粒物监

测仪在线测量得到,该仪器利用锥形元件振荡式微量天平(TEOM)方法,用频率计测定元件振荡频率的变化,亦即是确定过滤器上的质量变化.

1.2 区域空气质量模式

表 1 物理化学参数化方案选择

Table 1 Selection of physical and chemical parameterization schemes

物理化学方案选择	选项
微物理方案	WSM5
长波辐射方案	RRTM 方案
短波辐射方案	Goddard 短波方案
表面层方案	MM5 相似理论方案
陆面方案	Noah 陆面模式
行星边界层方案	YSU 方案
积云对流参数方案	Grell-Devenyi 方案
光化学反应机制	RADM2
光分解计算方案	FAST-J
气溶胶方案	MADE/SORGAM

本研究中所用的区域空气质量模式为 WRF/Chem,该模式是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下的预报系统实验室(FSL)开发的,是气象模式(WRF)和化学模式(CHEM)在线完全

耦合的新一代的区域空气质量模式.在模式的网格设置上,垂直方向分为 24 层,模式顶为 100hpa.水平方向设定四层嵌套网格,区域中心设为南京($32.03^{\circ}\text{N}, 118.8^{\circ}\text{E}$).表 1 中给出了模式设置中物理化学参数化方案,模式的参数化方案选择对模拟的气象场(如温度、辐射等)有重要影响,进而也能影响光化学反应、气溶胶的形成等.

2 结果与讨论

2.1 能见度与 $\text{PM}_{2.5}$ 成分的特征分析

采样期间能见度和 $\text{PM}_{2.5}$ 的日均值变化如图 1 所示,总体上,能见度与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的变化趋势相反,相关系数为 -0.75.8 月份能见度为 $(10.9 \pm 3.4)\text{km}$, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度是 $(34.72 \pm 13.29)\mu\text{g}/\text{m}^3$;而 11 月份能见度较差些,为 $(7.5 \pm 3.1)\text{km}$, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度较高,为 $(53.52 \pm 27.33)\mu\text{g}/\text{m}^3$.根据 2010 年实施的中国气象行业标准《霾的观测和预报等级》中对霾的定义^[21],即排除特殊天气造成的视程障碍,凡大气能见度小于 10km ,RH 小于 80%,且 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度在 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的判识为霾,采样期间仅 11 月份中的 4d(11 月 1、2、10、11 日)判定为霾天气.

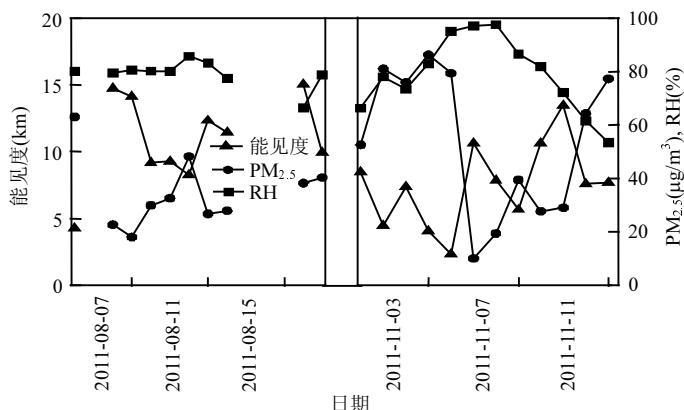


图 1 采样期间能见度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度同步观测的日均值变化曲线

Fig.1 Monitoring daily variation of atmospheric visibility and $\text{PM}_{2.5}$ concentration during sampling period

通过分析 $\text{PM}_{2.5}$ 样品发现,水溶性离子平均占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的 38%,总碳含量(TC)平均占 26%,其余为未检测物质,包括矿物元素、土壤等.图 2 比较了两个月海盐(Na^+ 、 Cl^-)、二次离子

(NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+)、TC 以及其他物质的质量浓度,11 月海盐、二次离子和 TC 的质量浓度均高于 8 月.二次离子的质量浓度水平和银燕等^[22]在 2007 年采样结果($\sim 37\mu\text{g}/\text{m}^3$)相当,但秋季和夏

季的差异较本研究的小.采样期间 TC 浓度均值为 26.49 μg/m³ 与陈魁等^[23]在 2007 年 6 月~2008 年 5 月期间采样结果(26 μg/m³)接近.

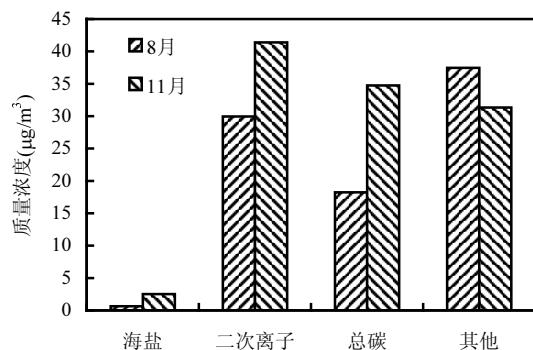


图 2 8 月和 11 月 PM_{2.5} 不同种类化学成分的质量浓度分布

Fig.2 Mass concentration of different chemical composition of PM_{2.5} in August and November

由 PM_{2.5} 成分与能见度的相关系数(表 2)表明,OC、EC 以及大部分离子与能见度是负相关关系,其中相关较显著的是 NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺、

EC,这与以往结果相似^[11].硫酸盐(SO₄²⁻)^[24]、硝酸盐(NO₃⁻)^[25]、铵盐(NH₄⁺)^[26]对可见光有散射作用,EC 对可见光有吸收作用^[27],进而削弱了大气的透明状况,减小了能见度.

2.2 PM_{2.5} 化学成分对消光系数的贡献

美国研究项目 IMPROVE(the Interagency Monitoring of Protected Visual Environments)利用观测数据发展了气溶胶和总消光系数关系的式(2),由此可以利用 PM_{2.5} 化学成分来估计消光系数.该关系式中包括(NH₄)₂SO₄、NH₄NO₃、Organics、EC、细土壤粒子和粗粒子(PM₁₀~PM_{2.5}).研究表明,细土壤粒子和粗粒子对消光系数 b_{ext} 的贡献很小^[28],且考虑到 NO₂ 也有一定的消光作用,引用陶俊等^[29]的研究,将等式修正为:

$$b_{ext} \approx 3f(RH)[(NH_4)_2SO_4] + 3f(RH)[NH_4NO_3] + 4[Organics] + 10[EC] + 0.161[NO_2] \quad (3)$$

式中:[(NH₄)₂SO₄]=1.37[SO₄²⁻];[NH₄NO₃]=1.29[NO₃⁻];[Organics]=1.4[OC]. $f(RH)$ 是相对湿度增长系数,取值见表 3^[29]. b_{ext} 的单位是 Mm⁻¹,化学成分和 NO₂ 的单位是 μg/m³.

表 2 能见度与细颗粒物 PM_{2.5} 各成分的相关系数

Table 2 The correlation coefficients of visibility and chemical species of PM_{2.5}

化学成分	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	OC	EC
VIS	-0.12	-0.38*	-0.47*	-0.44*	-0.45*	-0.22	-0.03	-0.07	0.01	-0.34	-0.56*

注: *为通过90%的显著性检验

表 3 不同相对湿度对应的 $f(RH)$ 值

Table 3 $f(RH)$ value in different relative humidity ranges

RH(%)	40~45	45~50	50~55	55~60	60~65	65~70	70~75	75~80	80~85	85~90	>90
$f(RH)$	1.22	1.27	1.33	1.38	1.45	1.55	1.65	1.83	2.10	2.46	3.17

利用本次采样得到的日均数据,依据公式(3)计算得到 8 月和 11 月采样期间每天的总消光系数以及 PM_{2.5} 化学成分和 NO₂ 对消光系数的贡献.8 月的平均总消光系数为 276.5 Mm⁻¹,11 月的为 432.5 Mm⁻¹,总消光系数 b_{ext} 与能见度是负相关关系,相关系数为 -0.74,因此消光系数越大,能见度越低,这与 11 月能见度较低的观测现象符

合.PM_{2.5} 化学成分和 NO₂ 对消光系数的贡献如图 3 所示,8 月首要消光组分是(NH₄)₂SO₄,而 11 月是(NH₄)₂SO₄ 和 NH₄NO₃,可能是因为秋季的太阳辐射不如夏季大,NO₂ 的光解反应弱,使得二次污染物 NH₄NO₃ 增加,对消光系数的影响也增大.NO₂ 的贡献都在 2.0% 以内,说明气体消光较颗粒物消光小很多.

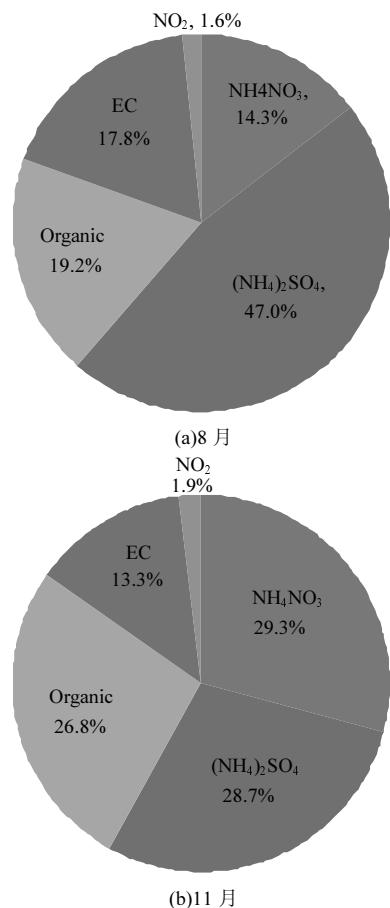
图 3 PM_{2.5} 化学成分和 NO₂ 对消光系数的贡献

Fig.3 Contribution of chemical composition in PM_{2.5} and nitrogen dioxide to extinction coefficients

2.3 能见度与 PM_{2.5} 化学成分关系

选取 PM_{2.5} 四种对能见度影响最大的化学成分对能见度进行拟合,即将能见度的倒数作为因变量,(NH₄)₂SO₄、NH₄NO₃、OC 和 EC 作为自变量做多元线性拟合。由于硫酸盐和硝酸盐会吸湿增长,将相对湿度 RH 分为三档:RH<60%;60%<RH≤80%;RH>80%。拟合结果如表 4 所示,自变量系数代表单位质量浓度的化学成分对能见度的削减能力,该系数数值越大,代表削减能见度能力越小。可以看出,不同月份、不同 RH 条件下削减能见度的首要成分不同,对于相对洁净的 8 月, RH 小于 80% 时,首要成分是硫酸盐,大于 80% 时是硝酸盐;而 11 月除了 RH 在 60%~80% 时首要成分是硫酸盐之外,其余是硝酸盐。这与上一部分利用总消光系数分析能见度削减主要贡献者的结果比较相似。

2.4 利用不同计算方案模拟能见度

WRF/Chem 能模拟 PM_{2.5} 中硫酸盐、硝酸盐、OC、EC 等化学成分的质量浓度。这里利用 WRF/Chen 模拟的 PM_{2.5} 化学成分结果根据两种计算方案模拟能见度。利用表 4 关系式的拟合关系方案记为方案 A;结合式(1)、式(2)计算的 IMPROVE 方案记为方案 B。利用方案 A、B 对 2011 年 8 月和 11 月的能见度模拟,并将模拟结果与观测数据比较。

表 4 2011 年 8 月和 11 月不同 RH 条件下能见度的拟合关系式

Table 4 Fitting relationships with different RH ranges in Auguest and November of 2011

RH(%)	8月	11月
<60	$100/VIS=0.42[(NH_4)_2SO_4]+2.44[EC]+6.07,$ $R^2=0.89$	$100/VIS=0.11[NH_4NO_3]-0.53[(NH_4)_2SO_4]+3.02[EC]$ $-0.18[OC]+6.05,$ $R^2=0.48$
60~80	$100/VIS=0.81[NH_4NO_3]+0.17[(NH_4)_2SO_4]+1.11[EC]$ $-0.85[OC]+3.85,$ $R^2=0.71$	$100/VIS=-0.30[NH_4NO_3]+0.28[(NH_4)_2SO_4]+1.98[EC]$ $-0.06[OC]+4.05,$ $R^2=0.88$
>80	$100/VIS=0.49[NH_4NO_3]+0.64[(NH_4)_2SO_4]-2.13[EC]$ $+0.82[OC]+1.62,$ $R^2=0.46$	$100/VIS=0.25[NH_4NO_3]+0.72[(NH_4)_2SO_4]+1.99[EC]$ $-0.51[OC]+9.17,$ $R^2=0.42$

注: VIS 为能见度,单位 km, 其余自变量单位 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

如图 4 所示,能见度模拟结果整体偏高,8 月的与观测绝对误差较小,相关性较好,这是由于

WRF/Chem 模拟的化学成分质量浓度偏低,且 11 月的模拟结果偏差较大。8 月中,方案 B 的误差偏

大,是方案 A 的 3 倍多.在 11 月份的模拟中,方案 A 的绝对误差依然较小,是方案 B 的 1/2.

表 5 两种方案对 2011 年 8 月和 11 月能见度的模拟与观测比较

Table 5 Comparison of the two schemes simulated and observed visibility in August and November of 2011

统计量	8月		11月	
	方案 A	方案 B	方案 A	方案 B
模拟平均(km)	11.5	13.94	11.44	15.8
观测平均(km)	10.43	10.43	7.44	7.44
绝对误差(km)	1.07	3.51	4	8.25
均方根误差(km)	7.22	8.37	7.71	10.48
归一化平均偏差(%)	10.29	33.64	53.74	110.89
归一化平均误差(%)	53.92	64.19	84.52	122.83

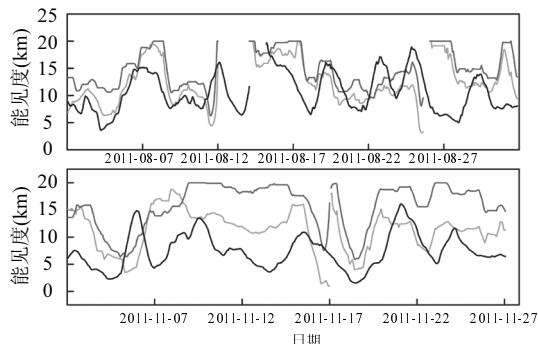


图 4 2011 年 8 月和 11 月能见度模拟和观测的 24h 滑动平均时间序列

Fig.4 24-hour moving average time series of simulated and observed atmospheric visibility in August and November of 2011
—A—B—观测

表 6 两种方案对不同等级能见度模拟的准确率(%)

Table 6 The accuracy rate of two schemes for different levels of visibility simulation (%)

能见度等级	8月		11月	
	方案 A	方案 B	方案 A	方案 B
高能见度(>10km)	65.5	79.2	81.4	90.7
低能见度(<=10km)	60.8	40.7	31.2	21.0

为进一步探究两种方案对能见度模拟的能力,将能见度分为两个等级进行评估,即高能见度>10km,低能见度<=10km,对 8 月和 11 月的模拟与

观测进行分类统计,结果见表 6.分析发现,两个等级中,高能见度的准确率较高,这是由于计算方案模拟结果较观测偏高的原因.对于高能见度等级的模拟准确率均在 65%以上,尤其 11 月份的模拟准确率较高,且在两种方案中 B 的准确率更高.对于低能见度的模拟,方案 A 的准确率高于方案 B,8 月达到 60.8%.可见,方案 A 于低能见度天气具有更好的模拟能力.

3 结论

3.1 南京城区能见度与 PM_{2.5} 呈相反变化趋势,在低能见度天 PM_{2.5} 质量浓度较高.PM_{2.5} 主要化学成分是二次离子和 TC.散射性气溶胶如硫酸盐、硝酸盐、铵盐和吸收性气溶胶 EC 是影响能见度的主要化学成分.

3.2 能见度越低,总消光系数越大.颗粒物是总消光系数 b_{ext} 的主要贡献者.11 月采样期间 b_{ext} 较高,主要贡献者是 $(NH_4)_2SO_4$ 和 NH_4NO_3 ;8 月的 b_{ext} 较低,首要贡献者是 $(NH_4)_2SO_4$.

3.3 根据不同相对湿度 RH,利用 PM_{2.5} 化学成分对能见度进行拟合,得到能见度拟合关系式,利用 WRF/Chem 模式对 PM_{2.5} 化学成分的模拟结果计算能见度,并与 IMPROVE 方案的计算结果进行比较,发现前者结果与观测偏差较小,且能更好地模拟低能见度状况.

参考文献:

- [1] 盛裴轩,毛节泰,李建国.大气物理学 [M].北京:北京大学出版社,2003:451.
- [2] 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.
- [3] Schichtel B A, Husar R B, Falke S R, et al. Haze trends over the United States, 1980~1995 [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(30):5205~5210.
- [4] Doyle M, Dorling S. Visibility trends in the UK 1950~1997 [J]. Atmospheric Environment, 2002,36(19):3161~3172.
- [5] Appel B R, Tokiwa Y, Hsu J, et al. Visibility as related to atmospheric aerosol constituents [J]. Atmospheric Environment, 1985,19(9):1525~1534.
- [6] Hodkinson J R. Calculation of colour and visibility in urban

- atmospheres polluted by gaseous NO₂ [J]. Air and water pollution, 1966,10(2):137.
- [7] Groblicki P J, Wolff G T, Countess R J. Visibility-reducing species in the Denver “brown cloud”—I. Relationships between extinction and chemical composition [J]. Atmospheric Environment, 1981,15(12):2473–2484.
- [8] Madhavi Latha K, Badarinath K V S. Black carbon aerosols over tropical urban environment—a case study [J]. Atmospheric Research, 2003,69(1):125–133.
- [9] Waggoner A P, Weiss R E. Comparison of fine particle mass concentration and light scattering extinction in ambient aerosol [J]. Atmospheric Environment, 1980,14(5):623–626.
- [10] Richards L W, Alcorn S H, McDade C, et al. Optical properties of the San Joaquin Valley aerosol collected during the 1995 integrated monitoring study [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(29):4787–4795.
- [11] Yuan C S, Lee C G, Liu S H, et al. Correlation of atmospheric visibility with chemical composition of Kaohsiung aerosols [J]. Atmospheric Research, 2006,82(3):663–679.
- [12] Chow J C, Watson J G, Edgerton S A, et al. Chemical composition of PM_{2.5} and PM₁₀ in Mexico City during winter 1997 [J]. Science of the Total Environment, 2002,287(3):177–201.
- [13] Han S, Bian H, Zhang Y, et al. Effect of aerosols on visibility and radiation in spring 2009 in Tianjin, China [J]. Aerosol Air Qual. Res., 2012,12:211–217.
- [14] 王琼,毕晓辉,张裕芬,等.杭州市大气颗粒物消光组分的粒径分布特征研究 [J].中国环境科学,2012,32(1):10–16.
- [15] 古金霞,董海燕,白志鹏,等.天津市颗粒物散射消光特征及化学组分贡献研究 [J].中国环境科学,2012,32(1):17–22.
- [16] Larson S M, Cass G R. Characteristics of summer midday low visibility events in the Los Angeles area [J]. Environmental Science and Technology, 1989,23:281–288.
- [17] Chow J C, Bachmann J D. Visibility: Science and regulation [J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 2002, 52(9):973–999.
- [18] 胡荣章,刘红年,张美根,等.南京地区大气灰霾的数值模拟 [J].环境科学学报,2009,29(4):808–814.
- [19] Wang T, Jiang F, Deng J, et al. Urban air quality and regional haze weather forecast for Yangtze River Delta region [J]. Atmospheric Environment, 2012,58:70–83.
- [20] Chow J C, Watson J G, Pritchett L C, et al. The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system: description, evaluation and applications in US air quality studies [J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1993,27(8):1185–1201.
- [21] 中国气象局.霾的观测和预报等级(QXT113—2010) [M]. 北京:气象出版社,2010:1.
- [22] 银燕,童尧青,魏玉香,等.南京市大气细颗粒物化学成分分析 [J]. 大气科学学报, 2009,32(6):723–733.
- [23] 陈魁,银燕,魏玉香,等.南京大气PM_{2.5}中碳组分观测分析 [J]. 中国环境科学, 2010,30(8):1015–1020.
- [24] 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]. Journal of Geophysical Research, 2011,116:D05109.
- [25] Li S, Wang T, Zhuang B, et al. Indirect radiative forcing and climatic effect of the anthropogenic nitrate aerosol on regional climate of China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26:543–552.
- [26] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change [M]. John Wiley and Sons, 2012.
- [27] Zhuang B, Jiang F, Wang T, et al. Investigation on the direct radiative effect of fossil fuel black-carbon aerosol over China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2011,104(3/4):301–312.
- [28] Cheung H C, Wang T, Baumann K, et al. Influence of regional pollution outflow on the concentrations of fine particulate matter and visibility in the coastal area of southern China [J]. Atmospheric Environment, 2005,39(34):6463–6474.
- [29] 陶俊,张仁健,许振成,等.广州冬季大气消光系数的贡献因子研究 [J].气候与环境研究,2009,14(5):484–490.
- [30] 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: 沈铁迪(1990-),女,江苏南通人,南京大学大气科学学院硕士研究生,主要从事大气环境和大气化学方面研究。