

天津武清能见度特征分析

张 凯¹ 柴发合¹ 陈义珍¹ 王淑兰¹ 胡炳清¹ 于 杰² 郑 勇²

1 中国环境科学研究院, 北京 100012

2 天津市武清区气象局, 天津 301700

摘 要 利用2006年8~9月的野外观测资料, 分析了天津武清区晴天能见度的变化特征, 并分析了能见度与细粒子(PM_{2.5})、大气污染物和大气相对湿度(RH)的相关性。结果表明: 观测期内大气平均能见度为6.3 km, 低于4 km的时间段占50%; 日变化表现为日出前(北京时间5时)能见度最低, 约为2.6 km, 下午15时最高, 约为11.1 km; 不同大气相对湿度下能见度与大气中细颗粒物浓度相关性不同; 污染气体浓度与能见度呈反相关关系, φ (SO₂)、 φ (NO₂)、 φ (NO)、 φ (NH₃)和 φ (CO)越高, 能见度越低。

关键词 能见度 变化特征 气象因素 大气污染物

文章编号 1006-9585 (2008) 06-0800-07 **中图分类号** X16 **文献标识码** A

Analysis on the Characteristics of Visibility in Wuqing, Tianjin

ZHANG Kai¹, CHAI Fa-He¹, CHEN Yi-Zhen¹, WANG Shu-Lan¹,
HU Bing-Qing¹, YU Jie², and ZHENG Yong²

1 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

2 Wuqing District Meteorological Bureau, Tianjin 301700

Abstract The characteristic of visibility in Wuqing, Tianjin was analyzed by using the experiment data from August to September, 2006. The relationship between visibility and the fine particle (PM_{2.5}), atmosphere pollution, Relative Humidity (RH) was analyzed at the same time. The results indicate that the average visibility was 6.3 km during experiment, and there was half time which visibility was lower than 4 km. The lowest visibility appeared at 0500 LST, which was about 2.6 km, and the highest visibility appeared at 1500 LST, which was about 11.1 km. The relationship between visibility and PM_{2.5} was different in different RH. The concentration of atmosphere pollution and visibility showed inverse correlation, which the concentration of SO₂, NO₂, NO, NH₃ and CO was higher, the visibility was lower.

Key words visibility, change character, meteorology factor, atmosphere pollutants

1 引言

城市工业的发展和城市规模的扩大, 增加了有害颗粒物的排放, 城市污染日益加重, 导致城

市能见度不断降低^[1, 2]。Horvath^[3]研究了欧洲的能见度, 发现乡村能见度好的地区可达到40~50 km, 城市中由于人为活动能见度会明显降低。Doyle等^[2]用统计方法研究了英国1950~1997年大气能见度的变化趋势, 结果表明低能见度日数

收稿日期 2007-08-30 收到, 2008-07-10 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目2002CB410811、环保公益性行业科研专项200809117以及中国博士后科学基金20070420419

作者简介 张凯, 女, 1977年出生, 博士, 主要从事大气环境和大气化学的研究。E-mail: zhangk96@163.com

所占百分比不断升高。Cheng^[1]等分析了 1950~2000 年台湾城市、沿海郊区和偏远地区能见度的变化趋势,结果表明,城市能见度从 20 世纪 50 年代的 25 km 下降到 90 年代的 8~10 km,沿海郊区下降到 12~15 km,偏远地区能见度接近 25~30 km。影响大气能见度的因素除降水和水汽形成的雾外,大气气溶胶中的硫酸盐、硝酸盐、碳黑的吸收、散射消光对能见度影响也非常重要^[4,5]。Tang 等^[4]发现气象因素、颗粒物湿度导致了能见度降低。Baik 等^[6]认为细小颗粒物污染可导致烟雾日发生。

我国对大气能见度的研究开始于 20 世纪 80 年代^[7]。范引琪等^[8]分析了 1960~2002 年间河北省 11 个城市的能见度,发现沧州、廊坊、邢台、衡水和邯郸 5 个城市受区域性大气污染的影响较大。马雁军等^[9]分析了辽宁中部相对集中的 5 个城市 1987~2002 年大气能见度及影响因子,结果表明,能见度与相对湿度呈显著负相关,与各污染物浓度也成负相关。Qiu 等^[10]分析了 1980~1994 年北京能见度变化趋势,发现平均能见度为 15~16 km,并呈波动下降趋势。王淑英等^[11]对北京地区能见度的影响因子进行分析,得出空气湿度、PM10、风速是影响能见度的主要因子。宋宇等^[12]研究认为,高浓度的颗粒物是使北京市大气能见度下降的主要因素。Yan 等^[13]分析了北京夏季和冬季能见度与颗粒物(PM10 和 PM2.5)的日变化和相关性,发现夏季 0~9 时(北京时间,下同)能见度低于冬季,原因与大气相对湿度有关。

由于受观测仪器所限,对能见度的研究多用长年历史资料的日均值进行统计分析^[7~10],获取其月、季和年际变化特征等。对能见度及其影响因子也多用日平均结果进行分析^[11]。实际上一天内各种气象要素不断变化,不同时间段内天气情况有所差异,污染等级也有变化,这种粗线条的分析结果已不能满足科研的需要。因此本文分析结果以小时浓度为单元,分析能见度的逐时变化情况、影响能见度的主控因子以及能见度与大气污染物的相关性。

京津冀地区是我国人口密度比较大的地区,现已形成以政治为中心的城市群。此地区大气污染呈典型的复合大气污染特征,即区域范围内环

境恶化、大气氧化性物种和细颗粒物浓度增高。天津武清区位于北京和天津两大城市之间,距北京约 70 km,距天津市区 25 km。研究和掌握武清地区能见度的变化特征,对于了解京津地区污染天气状况和污染物输送具有极其重要的意义。

2 实验方案

2.1 实验仪器介绍

本实验中的能见度仪是芬兰 Vaisala 公司的 PWD22 能见度传感器,它是一种单光路前向散射仪,散射仪直接测量来自一个小的采样容积的散射光强,通过散射光强来有效地计算消光系数(σ)。根据 Koschmic 原理,能见度 $L = -\ln 0.05/\sigma$ 。能见度测量范围:10~20 000 m;准确度:±10% (10~10 000 m) 以及 ±15% (10 000~20 000 m);工作温度:−40~+60 °C;湿度:0~100%。

PM2.5 采用美国 Rupperecht & Patashnik 公司生产的颗粒物在线分析仪器(RP1400a),SO₂、NO_x、CO、O₃采用美国 API 公司生产的环境监测仪,气象要素采用芬兰 Vaisala 公司生产的自动气象站观测仪器。

2.2 观测时间及地点

实验观测点(39°23'N, 117°01'E)位于天津市武清区气象局,海拔高度 4.5 m。观测点周围为农田,南边 100 m 外有一城乡公路。观测时间为 2006 年 8 月 12 日~9 月 21 日。

2.3 数据采集及分析

气象数据采集频率为 1 次/1 min,污染气体和颗粒物的采集频率为 1 次/5 min。为了避免降雨时雨滴对能见度的影响,剔除降雨时间段内的数据,然后做小时平均,本文数据分析均采用小时平均值。

3 能见度特征分析

3.1 能见度分级

整个观测时间段内大气平均能见度为 6.3 km,日均变化范围为 1.1~19.0 km。此值低于 Qiu 等^[10] 1980~1994 年北京观测结果(15~16 km)和王淑英等^[11] 1990~2000 年北京夏、秋季

能见度的研究结果（夏季的平均值为 10.1 km，秋季为 12.0 km），与宋宇等^[12] 1999 年秋季 9~10 月在北京的观测结果相近（6.04 km）。虽然 Qiu 等^[10] 和王淑英等^[11] 的观测结果为能见度目测值，宋宇等^[12] 和本文为能见度仪观测结果，但都说明京津地区能见度在不断降低。这也说明随着工业的发展和城市规模的扩大，人口数量不断增加，京津地区能见度越来越低，空气质量越来越差。

能见度分级主要遵循自身的统计特征，利用 K-均值聚类法对实验数据进行聚类分析，将能见度划分为 7 级：非常差、差、较差、一般、较好、好、非常好，对应的能见度范围分别为 $V_d < 2$ km、 $2 \text{ km} < V_d < 4$ km、 $4 \text{ km} < V_d < 7$ km、 $7 \text{ km} < V_d < 10$ km、 $10 \text{ km} < V_d < 14$ km、 $14 \text{ km} < V_d < 17$ km、 $V_d > 17$ km。图 1 给出不同等级能见度

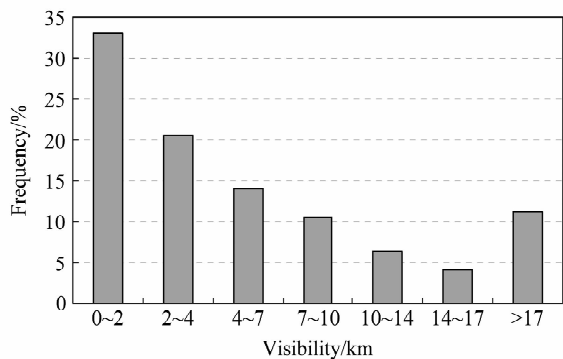


图 1 不同等级能见度的出现频率

Fig. 1 The percent frequency of visibility in different grade

的出现频率，从图中可以看出，能见度非常差的天气 ($V_d < 2$ km) 出现时间占总观测时段的 1/3，有一半时间大气能见度小于 4 km。而能见度比较好，大气透明度较高的天气 ($V_d > 10$ km) 仅占 20%。

3.2 能见度日变化特征分析

将观测期内无降水时间段的所有数据做统计日变化得到武清区能见度的日变化形势，从图 2 可知，最小值出现在凌晨 5 时，能见度为 2.6 km 左右，最高值出现在下午 15 时前后，能见度为 11.1 km 左右。

另外，由图 2 可知能见度与大气相对湿度 (RH) 有非常好的反相关关系，能见度的波谷和波峰分别对应 RH 的波峰和波谷。0 时到日出前大气温度不断降低，RH 不断增大，水汽不仅自身会消光影响能见度，而且颗粒物中的吸湿性物质也会消光，特别是硫酸盐的潮解作用^[4,7]。Mangelson 等^[14] 证实在高 RH 下，硫酸盐在液滴内以非常快的速率形成。太阳出来后，随着温度升高 RH 降低，能见度开始升高。下午能见度最高的时刻 (15 时) RH 最低 (49%)， $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 也因大气湍流扩散作用下降到一天的低谷 ($71.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。夜间 22 时到第 2 天 7 时， $\text{RH} > 80\%$ 时， $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化与能见度相似；从 8~21 时， $\text{RH} < 80\%$ 时， $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化与能见度相反，由此可知不同 RH 下 PM_{2.5} 对能见度的影响不同。

本文观测的日变化趋势与 Yan 等^[13] 夏季在大

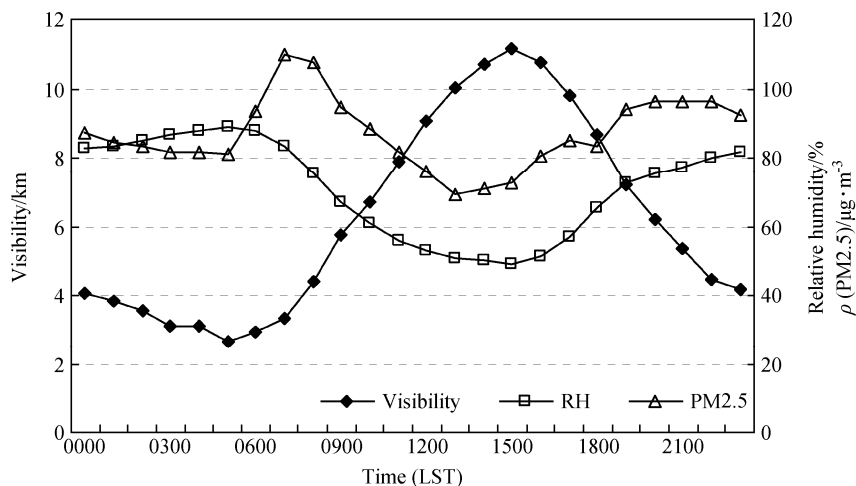


图 2 能见度、PM_{2.5} 浓度和 RH 的日变化

Fig. 2 Average diurnal variations of atmospheric visibility, PM_{2.5} and Relative Humidity (RH) in Wuqing

兴观测结果相似，与宋宇等^[12]夏季在北京市区内观测结果相近。王淑英等^[11]分析结果是早晨 8 时能见度最小，这是因为受当时观测手段和资料的限制，没有凌晨 5 时的数据，只能依据每日 2、8、14、20 时 4 次定时观测结果。

4 影响能见度的各种因素分析

4.1 影响能见度的主因子分析

为了分析影响能见度的主要因子，用 Spss11.0 对污染物、气象因素等做主因子分析（表 1）。首先做 KMO（Kaiser-Meyer-Olkin）检验， $KMO=0.656$ ，因此主因子分析结果能被接受。根据主因子分析结果，前 4 个因子能概括污染物和气象因素中的大部分信息，因此选取 F1~F4（即污染物，RH，GR 和 UV， t_d 和 p ）作为影响能见度的主因子。

根据表 1 的分析结果可知，F1 在 SO_2 、 NO_2 、CO 和 $PM_{2.5}$ 上的载荷比较大，集中了污染指标；F2 在大气相对湿度（RH）上的载荷比较大；F3 在太阳总辐射（GR）和紫外辐射（UV）上的载荷比较大；F4 在露点（ t_d ）和大气压（ p ）上的载荷比较大。主因子之间是相互独立的，能见度与主因子 F1、F2、F3 和 F4 的相关性比较好。地面观测到的 GR 和 UV 是穿过大气层被大气中的各种污染物（如颗粒物和污染气体）吸收、散射后

表 1 旋转后的因子载荷矩阵

Table 1 Rotated component matrix

变量	主因子			
	F1	F2	F3	F4
SO_2	0.856	-0.261	0.076	0.173
NO	0.116	0.848	-0.130	0.165
NO_2	0.672	0.399	-0.243	0.166
CO	0.750	0.083	-0.126	0.055
$PM_{2.5}$	0.816	0.148	-0.101	-0.166
NH_3	0.589	0.476	0.145	0.017
t	-0.036	-0.591	0.418	-0.551
RH	0.180	0.703	-0.440	-0.315
t_d	0.202	0.168	-0.098	-0.907
p	0.295	0.046	-0.038	0.797
GR	-0.019	-0.195	0.961	0.009
UV	-0.165	-0.184	0.944	0.016
v	-0.059	-0.524	0.144	0.262

的辐射强度，如果大气中污染物浓度高，到达地面的辐射强度减弱幅度较大，能见度也相对较低，反之亦然。因此，晴天近地面大气的太阳辐射和紫外辐射强弱与大气中污染物浓度有关，它们与能见度的关系反映了大气中污染物与能见度关系。由于 t_d 与 RH 关系密切， t_d 随着 RH 的升高而升高，因此 t_d 对能见度的影响反映了 RH 的影响。气压的变化反应了大气的流动和扩散，进而影响到大气中污染物浓度的变化，因此气压对能见度的影响反映了污染物对能见度影响。基于此分析，选取污染物和 RH 作为影响能见度的主因子。

根据以往研究结果可知，影响能见度的因素包括颗粒物吸收消光和散射消光、大气分子的吸收消光（主要是 NO_2 分子吸收）和散射消光^[15]，其中颗粒物的散射消光占总体消光的 70.5%~80%^[16]。因此我们将污染物分为颗粒物和气态污染物，分别讨论它们与能见度的关系。

4.2 能见度与细粒子的相关性分析

图 2 为能见度、 $PM_{2.5}$ 浓度和 RH 的日变化曲线。从图中可清楚看到， $RH>80\%$ 时，能见度与 $\rho(PM_{2.5})$ 表现为同时升降； $RH<80\%$ 时能见度与 $\rho(PM_{2.5})$ 变化趋势相反。根据吴兑^[17]的建议， $RH<80\%$ 影响能见度的天气称为霾， $RH>90\%$ 的为雾，介于二者之间的为雾和霾共存现象。因此我们在不同 RH 下分别讨论能见度与颗粒物和污染物的关系。

当 $RH>90\%$ 时，85.7% 的能见度低于 2 km， $\rho(PM_{2.5})$ 平均值约为 $0.09\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ， $PM_{2.5}$ 与能见度无明显相关性。当 $80\%<RH<90\%$ 时，47.9% 的能见度低于 2 km，80.0% 的能见度低于 4 km， $PM_{2.5}$ 与能见度呈非常好的负相关（ $R^2=0.7433$ ），能见度随 $\rho(PM_{2.5})$ 的增加呈指数性降低，方程式为 $y=230.81x^{-0.8981}$ 。当 $RH<80\%$ 时，能见度随 $\rho(PM_{2.5})$ 的增加呈指数性降低（ $R^2=0.724$ ），方程式为 $y=441.06x^{-0.9557}$ 。由此可见，能见度与 $\rho(PM_{2.5})$ 呈较好的负指数关系是基于不同 RH，根据这种相关性，就可以通过相对湿度和细颗粒物浓度的监测估算出能见度的大概数值。

同时，从图 3 能见度与 $PM_{2.5}$ 的相关性中也可以看出能见度与 $\rho(PM_{2.5})$ 拟合曲线存在一个明显的拐点，当 $\rho(PM_{2.5})>0.05\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时，

能见度的变化不太明显,而当 $\rho(\text{PM}_{2.5}) < 0.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,能见度会迅速升高。由此说明,在细粒子治理的开始阶段,虽然颗粒物浓度下降了,但对于能见度的改善并不是非常显著,而当细粒子浓度降低到一定程度后,能见度的改善效果会非常显著。

4.3 能见度与污染气体

表 2 给出不同相对湿度和不同能见度下各种污染物的浓度。从表中看出,在 $\text{RH} < 80\%$ 的低能见度下 ($< 2 \text{ km}$) 大气中 $\varphi(\text{SO}_2)$ 、 $\varphi(\text{NO}_2)$ 和 $\varphi(\text{CO})$ 的浓度最高,也就是说这段时期内大气污染最为严重。 SO_2 和 NO_2 在高湿 ($\text{RH} > 80\%$) 的天气条件下,可以在气液界面上发生反应生成 H_2SO_3 和 H_2NO_3 ,使得大气中的 SO_2 和 NO_2 浓度

降低。低能见度下,NO 在高湿天气 ($\text{RH} > 80\%$) 下的浓度 ($\sim 0.032 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 要高于低湿 ($\text{RH} < 80\%$) 条件下的浓度 ($0.017 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$),这是因为高湿天气通常发生在日出前 (图 2),无太阳辐射,无光化学反应,此时大气中的氧化剂 (例如 O_3) 浓度较低,大气为还原性质,NO 不会被氧化转化为 NO_2 ,因此浓度较高。这也是为什么 NO 和 RH 都在主控因子 F2 中载荷高的原因。 NH_3 也是还原性气体,在没有光化学反应和还原性大气中较为稳定。但由于 NH_3 主要是与大气中的酸性气体和颗粒物发生氧化-还原反应,此反应在任何情况下都可以发生,反应速率只依赖于 NH_3 和酸性气体浓度,因此影响相对不明显。

4.4 能见度和相对湿度

湿度对能见度的影响也是显著的^[4],水汽的散射和吸收作用可造成能见度降低。由图 2 可知,在 22 时至次日 5 时 $\text{RH} > 80\%$ 的时间段内,虽然 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在下降,但能见度并没有升高,说明高相对湿度情况下,水汽也是影响能见度的一个重要因素。McMurry^[18] 研究发现当 $\text{RH} > 80\%$ 时,水份占细粒子质量浓度的一半以上。由图 3 中 $\text{RH} < 80\%$ 和 $80\% < \text{RH} < 90\%$ 条件下能见度与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 两个方程式的系数也可以看出,第 1 个方程式系数为第 2 个的一半,因此高湿条件下水汽对能见度的影响是不容忽视的。

$\text{RH} > 90\%$ 的出现时间多在凌晨 4~7 时 (图 2),此时如果大气颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 浓度较低 ($< 0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) (图 3),则天气为雾或者轻雾,大气中的其他气体污染物浓度也都比较低。如果 $\rho(\text{PM}_{2.5}) > 0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,此时的天气为污染雾,大气中气体污染物浓度较高。 $80\% < \text{RH} < 90\%$ 的时间段水汽和颗粒物同时影响能见度。若 $\rho(\text{PM}_{2.5}) < 0.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,且能见度 $> 4 \text{ km}$,此时的天气认为是雾;若 $\rho(\text{PM}_{2.5}) > 0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 且能见度 $< 2 \text{ km}$,此时的天气认为是灰霾天气;介于二者之间的可以认为是雾和霾的共同作用。

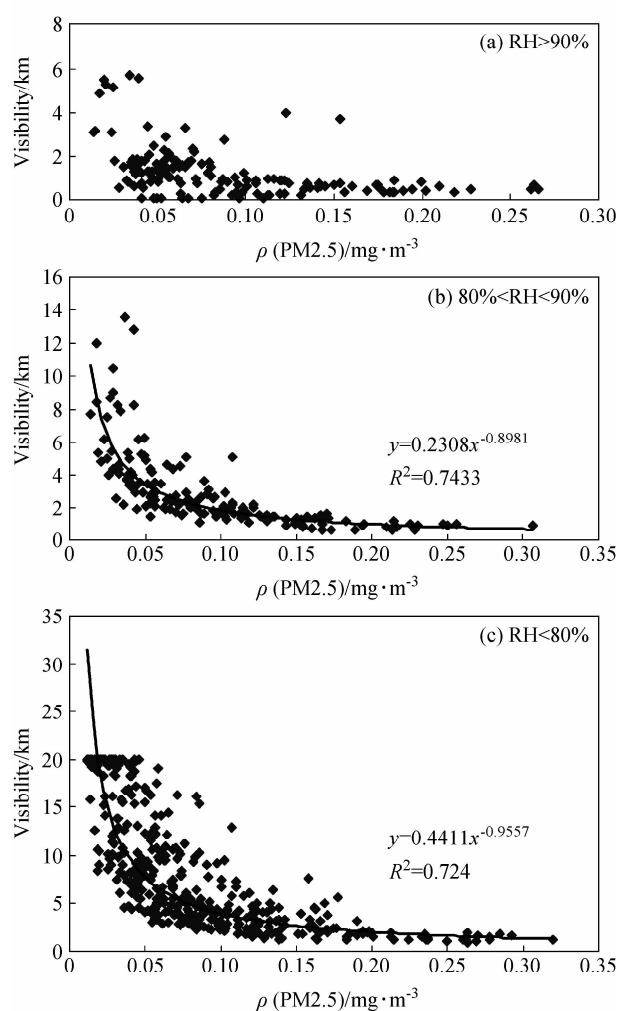


图 3 能见度与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性

Fig. 3 Relationship between the visibility and concentration $\text{PM}_{2.5}$

5 结论

由以上的分析可以得到如下结论:

(1) 利用聚类分析将观测期内武清区的平均

表 2 不同相对湿度和不同能见度下各种污染物浓度
Table 2 Concentration of atmosphere pollution in different relative humidity and different visibility

RH	能见度/km	污染物浓度/mg · m ⁻³					
		SO ₂	NO	NO ₂	CO	PM2. 5	NH ₃
RH<80%	<2	0.082	0.017	0.078	1.841	0.198	0.083
	2~4	0.075	0.011	0.055	1.470	0.116	0.068
	4~7	0.060	0.010	0.048	1.165	0.082	0.060
	7~10	0.047	0.008	0.046	0.989	0.056	0.059
	10~14	0.041	0.006	0.034	0.806	0.048	0.055
	>14	0.019	0.005	0.022	0.371	0.031	0.042
80%<RH<90%	<2	0.052	0.031	0.071	1.589	0.142	0.075
	2~4	0.031	0.019	0.054	1.055	0.067	0.061
	4~7	0.022	0.016	0.049	0.901	0.046	0.067
	7~10	0.014	0.011	0.035	0.675	0.027	0.059
	10~14	0.011	0.016	0.027	0.441	0.031	0.045
RH>90%	<2	0.028	0.034	0.059	1.490	0.097	0.083
	2~4	0.014	0.031	0.039	0.950	0.062	0.080

能见度分为 7 级，其中 $V_d<2\text{ km}$ 的天气占 1/3， $V_d<4\text{ km}$ 的占 50%， $V_d>10\text{ km}$ 的仅占 20%。

(2) 晴天日平均能见度呈现单峰的日变化形式，最低值出现在凌晨 5 时，这与日出前大气相对湿度较高有关 ($RH>80\%$)。最高值出现在下午 15 时前后，此时大气中颗粒物浓度最低。

(3) $PM_{2.5}$ 和 RH 是影响能见度的主要因子。不同相对湿度下， $PM_{2.5}$ 与能见度的相关性不一样， $RH>90\%$ 时 $PM_{2.5}$ 与能见度无明显相关性； $80\%<RH<90\%$ 时二者呈指数反相关。 $PM_{2.5}$ 和 RH 同时影响能见度， $RH<80\%$ 时 $PM_{2.5}$ 与能见度也呈指数反相关，但此时 RH 对能见度的影响较弱，主要是 $PM_{2.5}$ 的影响。

(4) 污染气体的浓度升高时，大气能见度会降低， $\varphi(SO_2)$ 、 $\varphi(NO_2)$ 、 $\varphi(NO)$ 、 $\varphi(NH_3)$ 和 $\varphi(CO)$ 最高值都出现在能见度 $<2\text{ km}$ 时。

致 谢 中国环境科学研究院张新民博士以及岳婷婷、马晓溪等参与监测工作，天津市武清区气象局和环境监测站在实验过程中给予的帮助，在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

[1]

Cheng M T, Tsai Y I. Characterization of visibility and atmospheric aerosols in urban, suburban, and remote areas. *The Science of the Total Environment*, 2000, **263**: 101~114

[2]

Doyle M, Dorling S. Visibility trends in the UK 1950 1997. *Atmos. Environ.*, 2002, **36**: 3161~3172

[3]

Horvath H. Estimation of the average visibility in central Europe. *Atmos. Environ.*, 1995, **29**: 241~246

[4]

Tang I N, Wong W T, Munkelwitz H R. The relative importance of atmospheric sulfate and nitrates in visibility reduction. *Atmos. Environ.*, 1981, **15**: 2463~2471

[5]

Malm W C, Pitchford M L. Comparison of calculated sulfate scattering efficiencies as estimated from size-resolved particle measurements at three national locations. *Atmos. Environ.*, 1997, **31**: 1315~1325

[6]

Baik N, Kim Y P, Moon K C. Visibility study in Seoul, 1993. *Atmos. Environ.*, 1996, **30**: 2319~2328

[7]

苏维瀚, 张秋彭, 沈济, 等. 北京地区大气能见度与大气污染的关系初探. *大气科学*, 1986, **10** (2): 138~144
Su Weihang, Zhang Qiupeng, Shen Ji, et al. The relationship between visibility and air pollution in Beijing. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1986, **10** (2): 138~144

[8]

范引琪, 李二杰, 范增禄. 河北省 1960~2002 年城市大气能见度的变化趋势. *大气科学*, 2005, **29** (4): 526~535
Fan Yinqi, Li Erjie, Fan Zenglu. Visibility trends in 11 cities of Hebei province during 1960—2002. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (4): 526~535

[9]

马雁军, 左洪超, 张云海, 等. 辽宁中部城市群大气能见度变化趋势及影响因子分析. *高原气象*, 2005, **24** (4): 623~628

- Ma Yanjun, Zuo Hongchao, Zhang Yunhai, et al. Analyses on variation trends of atmospheric visibility and its effect factor in mult-cities in central Liaoning. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (4): 623~628
- [10] Qiu J H, Yang L Q. Variation characteristics of atmospheric aerosol optical depths and visibility in North China during 1980 — 1994. *Atmos. Environ.*, 2000, **34**: 603~609
- [11] 王淑英, 张小玲, 徐晓峰. 北京地区大气能见度变化规律及影响因子统计分析. *气象科技*, 2003, **31** (2): 109~114
- Wang Shuying, Zhang Xiaoling, Xu Xiaofeng. Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2003, **31** (2): 109~114
- [12] 宋宇, 唐孝炎, 张远航, 等. 北京市大气能见度规律及下降原因. *环境科学研究*, 2003, **2**: 10~12
- Song Yu, Tang Xiaoyan, Zhang Yuanhang, et al. The study of the status and degradation of visibility in Beijing. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 2003, **2**: 10~12
- [13] Yan Fengqi, Hu Huanling, Yu Tong. Analysis of particulate mass concentration, aerosols number concentration and visibility in Beijing. *China Particology*, 2004, **2** (1): 25~30
- [14] Mangelson N F, Lewis L, Joseph J M, et al. The contribution of sulfate and nitrate to atmospheric fine particles during winter inversion fogs in Cache Valley, Utah. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 1997, **47**: 167~175
- [15] 刘新罡, 张远航, 曾立民, 等. 广州市大气能见度影响因素的贡献研究. *气候与环境研究*, 2006, **11** (6): 733~738
- Liu Xingang, Zhang Yuanhang, Zeng Limin, et al. Research on the influential factor of visibility reduction in Guangzhou. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (6): 733~738
- [16] 刘新民, 邵敏. 北京市夏季大气消光系数的来源分析. *环境科学学报*, 2004, **24** (2): 185~189
- Liu Xinmin, Shao Min. The analysis of sources of ambient light extinction coefficient in summer time of Beijing city. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 2004, **24** (2): 185~189
- [17] 吴兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论. *气象*, 2005, **31** (4): 3~7
- Wu Dui. A discussion on difference between haze and fog and warning of ash haze weather. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2005, **31** (4): 3~7
- [18] McMurtry P H. A review of atmospheric aerosol measurements. *Atmos. Environ.*, 2000, **34**: 1959~1999