0577-6619/2012/70(4)-0814-20 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

辽宁中部城市群夏季大气能见度的观测研究*

刘宁微 马雁军 王扬锋
LIU Ningwei MA Yanjun WANG Yangfeng

中国气象局沈阳大气环境研究所，沈阳，110016
Institute of Atmospheric Environment, *CMA*, *Shenyang* 110016, *China*
2011-04-19 收稿，2011-09-13 改回.

Liu Ningwei, Ma Yanjun, Wang Yangfeng. 2012. Observational study of atmospheric visibility in summer in the area of multi-cities in central Liaoning Province. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(4): 814-820.

Abstract Using the observational data of 4 cities in central Liaoning Province from June to August, the mean seasonal, monthly and daily characteristics of visibility is analyzed in this paper. In addition, the diurnal visibility and influence factors are also studied. The results indicate that each city in the area of multi-cities in central Liaoning Province shows the same trend of monthly visibility variety. The weather system and atmospheric environment has generally uniform and regional features. Daily visibility variety of each city presents the distribution of single period peaks and valleys in which the lowest valueis are at 06:00 BT and the highest ones at 15:00－16:00 BT. Furthermore, fine particles, vapor and wind speed all have effects on visibility, among which fine particles are the major factor. Only a small part of the low visibility duration is due to slight fog. It is the haze that causes most of the low visibility events in the area of multi-cities in central Liaoning Province.
Key words The area of multi-cities in central Liaoning Province, Visibility, Affecting factors, Haze, Fog

摘 要 利用2009年6—8月辽宁中部4个城市的观测资料，分析了辽宁中部城市群夏季的季、月、日能见度分布，并探讨了能见度的日变化特征及其影响因子。结果表明：辽宁中部城市群内各城市夏季大气能见度月际变化趋势基本一致，天气系统和大气环境比较均一，具有明显的区域性特征；各城市大气能见度日变化呈明显的单周期谷、峰形分布，06时前后能见度最差，15—16时最好；大气细粒子、水汽和风速都对城市群能见度有一定的影响，其中，大气细粒子是主要影响因子；城市群夏季的低能见度时次，仅有一小部分是由轻雾引发的，而大部分则是由霾天气造成的。
关键词 辽宁中部城市群，能见度，影响因子，霾，雾
中图法分类号 P412.17

1 引 言

大气能见度是环境空气质量最直接的指标之一(吴兑等，2007)，直接影响人们的工作、生活以及交通活动的正常进行。因此，探讨和掌握大气能见度的变化特征及主要影响因素，是大气能见度预报预警的基础，对保证交通安全、提高人们生活质量和城市减灾都具有十分重要的意义。国际上从20世纪60年代就已展开对大气能见度的研究，从通过能见度来分析空气污染的变化规律，发展到目前从气象条件和不同污染物等多角度的细化分析(Craig, et al, 1979; Sloane, 1982; Horvath, 1995; Doyle, et al, 2002; Kim, et al, 2006; Singh, et al, 2008)。中国对大气能见度的研究开始于20世纪80年代，由最初的能见度大区域总体特征研究逐步发展为演变规律和影响因子的研究(Chang, et al, 1986; 苏维

* 资助课题：国家公益性行业(气象)专项(GYHY200806020)，中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CAMGJ2012M14)。
作者简介：刘宁微，主要从事大气物理与大气环境研究。E-mail: ningweiliu@126.com
通讯作者：马雁军，主要从事大气物理与大气环境研究。E-mail: mayanjun0917@163.com

瀚等,1986;王继志等,2002;于凤莲,2002;宋宇等,2003;王淑英等,2003;袁成松等,2003;范引琪等,2005;马雁军等,2005;刘新罡等,2006;王京丽等,2006;吴兑等,2006,2007)。上述研究有的利用气象台站长期历史资料的能见度日均值进行年、季、月的统计分析,有的利用能见度仪观测结果分析能见度的日变化规律及其与颗粒物浓度间的相互影响。事实上,能见度在一天内是不断变化的,气象台站粗线条的观测结果已经不能满足精细化研究的需要;同时,影响能见度的因素较为复杂(王淑英等,2003),除了颗粒物以外,还包括一些相关的气象因子。此外,上述研究大多集中在京津冀和珠三角地区,但对大气污染同样比较严重的辽宁中部城市群,研究得却相对较少。

辽宁中部城市群(40°—43.5°N,122°—125.5°E)是以沈阳为中心,包括鞍山、抚顺、本溪、辽阳、铁岭、营口 6 个城市的辽宁中部地区,人口密集,工业集中,对辽宁乃至东北的发展起着十分重要的作用,现已成为全国第 4 大城市群(王厚军等,2009)。然而,城市化的高速发展、人口增多、车辆增加和气候变迁等一系列原因,使城市群的大气环境质量受到严重影响。辽宁中部城市群的大气能见度在 20 世纪 60、70 年代就有过较低的记录(吴兑等,2010),近 20 年又呈总体下降趋势(马雁军等,2005)。更值得注意的是,珠三角和京津冀地区常见的霾天气在辽宁中部城市群日益增多,甚至在夏季也时有出现①。相关研究(马雁军,2005)也表明,辽宁中部城市群大气能见度冬、夏季低,春、秋季高。然而,辽宁中部城市群夏季能见度的恶化尚未得到公众的广泛认知。为此,本研究试图利用 2009 年 6—8 月辽宁中部 4 个城市的观测资料,在分析辽宁中部城市群夏季的季、月、日能见度分布的基础上,以小时为单位,重点探讨夏季能见度的日变化特征以及能见度与细颗粒物、气象因子的相关关系。

2 数据与方法

辽宁中部沈阳、鞍山、抚顺、本溪 4 个城市的大气成分站于 2007 年 8 月开始正式运行,目前站内设有德国 GRIMM180 颗粒物监测仪,美国热电反应气体监测仪,并已进行 2 年多的连续监测;2009 年 6 月开始利用芬兰维萨拉 FD12 能见度仪,法国 CE318 太阳光度计和太阳辐射仪等进一步开展大气环境因子的连续在线观测。表 1 给出本研究使用的 FD12 能见度仪和 GRIMM180 颗粒物仪的性能参数。

本研究以 6—8 月代表夏季,用沈阳、鞍山、抚顺、本溪 4 个城市代表辽宁中部城市群,对不同时间频率的大气成分观测数据,首先计算其小时平均值,进而计算其日、月、季的平均值。沈阳、鞍山、抚顺、本溪 4 个城市的相关气象要素(湿度、风速等)来自各城市常规气象台站的逐时自动观测资料,细粒子浓度与气象要素的小时平均值用以进行能见度的日变化及其影响因子分析。

表 1 FD12 与 GRIMM180 的性能参数

Tab. 1 The performance parameters of FD12 and GRIMM180

	FD12	GRIMM180
工作原理	33°红外光前向散射	90°激光散射
观测要素	能见度及其变化趋势	气溶胶数浓度和 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 和 PM_1 的质量浓度
测量时间	15 s	1—60 min
测量范围	1 min 平均值时为 10—15000 m; 10 min 平均值时为 5000 m—50 km	粒径 0.25—32 μm; 质量浓度 1—1500 μg/m³
精度	10—10000 m 范围内为 ±10%; 10—50 km 范围内为 ±20%	量程的 ±2%

3 夏季大气能见度的分布特征分析

3.1 目测与器测能见度的相关关系

为使本研究的结果更具说服力,首先将常规气象台站 1 日 4 次的能见度目测值(简称为“目测能见度”)与 FD12 观测仪的能见度值(简称为“器测能见度”)进行比对。通过同一时段(2009 年 6 月 1 日—8 月 31 日)能见度日平均值的对比分析,发现辽宁中部城市群夏季的目测与器测能见度具有较好的线性相关关系(图 1)。利用得到的相关方程对 1987—2008 年辽宁中部城市群夏季目测能见度的历史数据进行订正(图 2),使其与器测能见度的标准一致,从而使两者之间具备了可比性。此外,各年夏季能见度的订正值均不同程度地低于相应的目测能见度。

①《辽宁省 2008 年大气成分综合评估报告》和《辽宁省 2009 年大气成分综合评估报告》

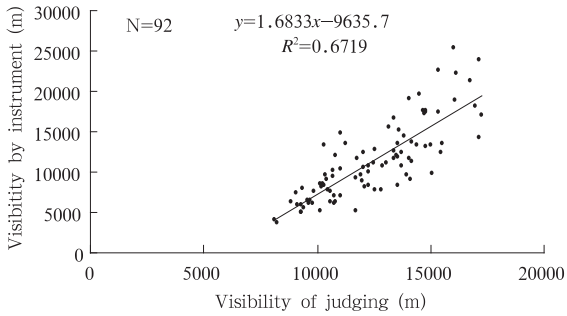


图 1 夏季目测与器测能见度的散点分布

Fig. 1 Visibility scatter diagram between judging and instrumental values

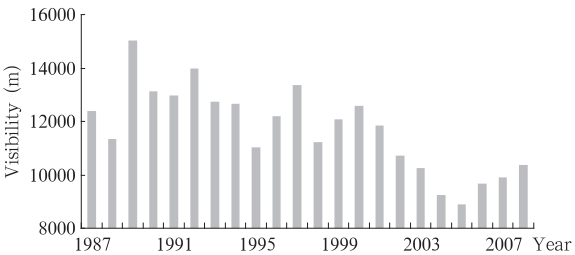


图 2 订正后的 1987—2008 年夏季目测能见度

Fig. 2 Revised judging visibility from 1987 to 2006

3.2 季平均状况及月际变化

对器测能见度的统计表明,辽宁中部城市群内各城市 2009 年夏季大气能见度平均值最高的是抚顺,沈阳、本溪次之,最低的是鞍山(图 3)。在能见度的月际变化方面,4 个城市的变化趋势基本一致,均为 6 月最高,8 月次之,7 月最低(图 4)。辽宁中部 4 个城市大气能见度月际变化趋势较高的一致性表明,在夏季这样的时间尺度上,各城市大气能见度的影响因子基本相同;在辽宁中部城市群这样的空间尺度上,天气系统和大气环境比较均一,具有明显的区域性特征。

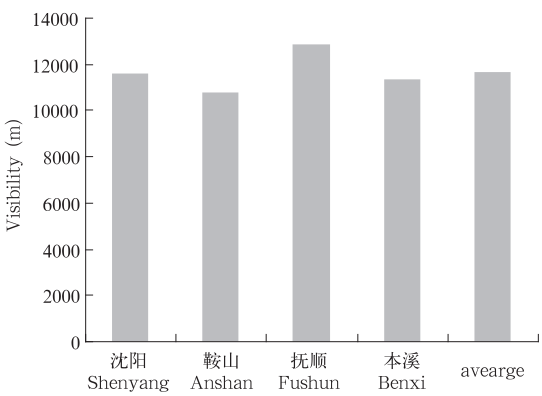


图 3 夏季各城市大气能见度的平均值

Fig. 3 Mean visibility for each city in summer

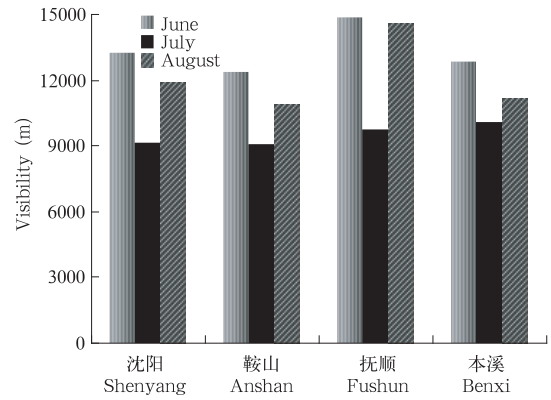


图 4 各城市夏季大气能见度的月际变化

Fig. 4 Monthly visibility in summer for each city

2009 年城市群夏季的平均大气器测能见度为 11662 m,此值略低于订正后的 1987—2008 年辽宁中部城市群夏季目测能见度(4 城市平均值为 11706 m)。由图 2 可以看出,1987—2008 年辽宁中部城市群夏季的平均能见度变化范围为 8880—15024 m;能见度在 2000 年之后直线下降,到 2005 年达到最低值,2006 年之后缓慢回升,但 2004—2008 年均低于 10 km。考虑到 2009 年城市群的夏季能见度,可以说近 10 年辽宁中部城市群的夏季大气能见度始终处于较低的水平。

3.3 日平均值分布

根据器测能见度的结果,2009 年夏季辽宁中部 4 个城市日平均大气能见度的变化范围为 2103—33548 m,低于 1 km 的日数在各城市均未出现。图 5 给出各城市日平均能见度小于 5、5—10 km以及大于 10 km 日数的出现频率。可以看出,日平均能见度低于5 km出现频率最高的是抚顺,达到9.6%,出

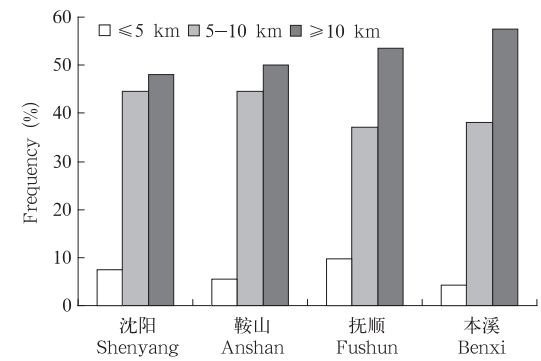


图 5 不同限值能见度的出现频率

Fig. 5 Percent frequency of visibility in the different grades

现频率最低的是本溪,仅为 4.3%。4 个城市日平均能见度大于 10 km 的出现频率均超过或接近 50%,这一比例高于张凯等(2008)2006 年对天津武清的观测结果(20%)。

3.4 日变化特征

利用 2009 年夏季辽宁中部 4 个城市器测能见度的全部观测数据,统计得到各城市能见度的日变化特征(图 6a)。可以看出,能见度日变化明显,呈单周期谷、峰形分布,各城市的能见度均在 06 时(北京时,下同)达到最低,随后开始上升,沈阳、抚顺的能见度在 16 时达到最高,鞍山、本溪的能见度在 15 时达到最高,此后则逐渐下降。总体来看,辽宁中部城市群能见度最差时段在早上,最好时段在下午,这种日变化趋势与陈静等(2010)对广州地区的能见度研究结果近似,但能见度的值大于广州地区。

另外,考虑到夏季的辽宁处于汛期,频繁的降水会对能见度产生一定的影响,统计剔除了降水时段的大气能见度日变化形势(图 6b),能更准确地反映出辽宁中部城市群夏季的空气质量状况。可以看到,在无降水的情况下,各城市的大气能见度同样分别在下午和早晨达到最好和最差。有所不同的是,剔除降水时段后辽宁中部 4 个城市的能见度最大值均有所上升,最小值基本持平,日较差有所增大。由此可见,滤去降水导致的能见度低值主要影响一天中的高能见度时段,也就是说导致辽宁中部城市群夏季低能见度的主要天气过程并不是降水,而可能是雾、霾等。

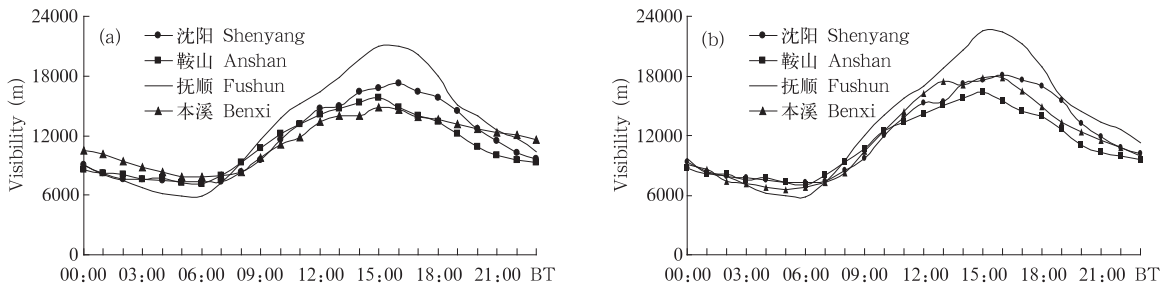


图 6 各城市大气能见度的日变化(a. 未剔除降水时段, b. 剔除降水时段)

Fig. 6 Diurnal variations of visibility for each city

(a) with the precipitation hours included, and (b) with the precipitation hours excluded

4 大气能见度的影响因子分析

已有的研究结果表明,大气细粒子是影响能见度的主要因素(王淑英等,2003;刘新罡等,2006;王京丽等,2006;吴兑等,2007;王晓丽等,2008;杨凌霄,2008;张凯等,2008),水汽对能见度有一定的制约关系(陆辉等,2008;王晓丽等,2008;张凯等,2008)。此外,风速也常被作为影响污染物扩散与输送的重要条件(马雁军等,2005;王淑英等,2003;张利娜等,2008)。因此,本研究将大气细粒子和相关气象要素作为影响能见度的主要因子,将辽宁中部 4 城市作为一个整体(取 4 个城市的平均值),分别讨论城市群 $PM_{2.5}$ 质量浓度、相对湿度、地面风速与能见度的关系。

4.1 能见度与大气细粒子的关系

夏季,辽宁中部城市群能见度和 $PM_{2.5}$ 质量浓度小时值的总样本个数(N_A)均为 2208,剔除降水时段的样本个数(N_B)为 1796,选择相关系数最大的拟合曲线,分别给出两种情况下能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度的散点分布(图 7a、b),两种情况下其相关分布特征均通过了置信度 0.01 的显著性水平检验。可以看出,能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度呈对数相关,细粒子浓度较大(高于 50 $\mu g/m^3$)时,大气能见度普遍较低(10 km以下);细粒子浓度很小(低于 30 $\mu g/m^3$)时,大气能见度较高(20 km 以上)。在剔除降水的情况下,能见度与细粒子相关系数增大。这是由于在夏季的降水时段,湿沉降对细粒子产生一定的冲涮作用,两者处于同时下降的状态;而在无降水时段,持续的高温会使大气中的光化学反应异常活跃,生成了更多以细粒子为主的二次气溶胶(宋宇等,2002),因此相关性更为明显。

由图 7a、b 还可以看出,当细粒子浓度高于

50 μg/m³时，能见度随着细粒子浓度的降低在10 km限值内缓慢增大；而当细粒子浓度低于30 μg/m³时，能见度随着细粒子浓度的降低而迅速增大。这一现象的存在是由细粒子浓度与能见度的非线性关系造成的，即细粒子浓度较高时能见度对其响应不敏感，而细粒子浓度较低时能见度对其响应比较敏感。

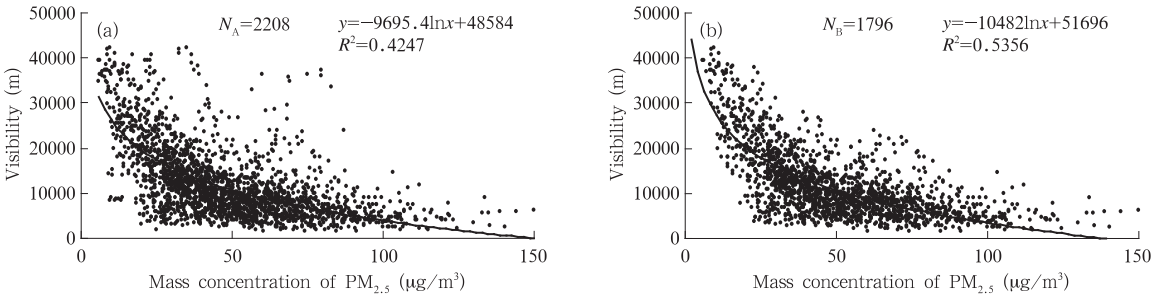


图7 辽宁中部城市群能见度与$PM_{2.5}$质量浓度小时值的散点分布（a. 未剔除降水，b. 剔除降水）

Fig. 7 Scatter plots between the hourly visibility and mass concentrations of $PM_{2.5}$ for the area of multi-cities in central Liaoning Province (a) with the precipitation hours included, and (b) with the precipitation hours excluded

4.2 能见度与相对湿度及地面风速的关系

图8给出了剔除降水情况下辽宁中部城市群夏季大气能见度分别与相对湿度和地面风速小时值的散点分布。前者最佳拟合曲线的相关系数为0.004，后者最佳拟合曲线的相关系数不足0.001，均未通过相关的显著性检验，散点只在相对湿度大于80%或地面风速小于2 m/s的情况下分布得比较密集。因此可以说，从整体趋势上来看，夏季的低能见度与高湿、微风有一定的对应关系，但不存在明显的相关关系。

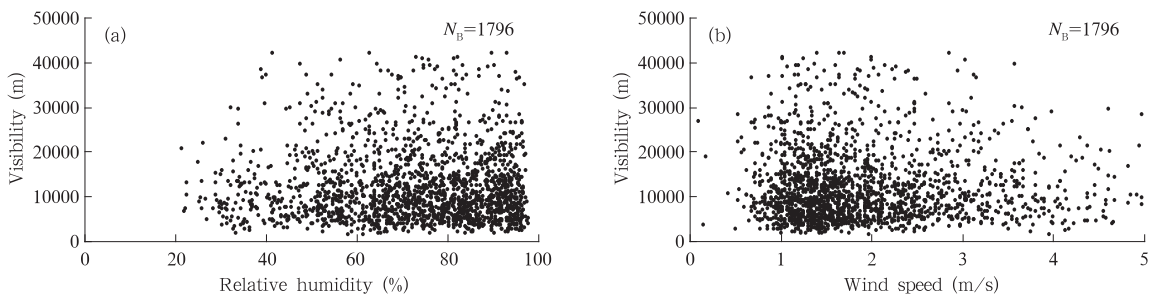


图8 辽宁中部城市群能见度与相对湿度(a)、地面风速(b)小时值的散点分布

Fig. 8 Scatter plots between the hourly visibility and humidity (a) /surface wind speed (b) for the area of multi-cities in central Liaoning Province

将夏季剔除降水时段的所有数据做统计得到辽宁中部城市群能见度、细粒子、相对湿度和风速的日变化形势(图9)。由图9可见，相对湿度和细粒子浓度的日变化趋势基本一致，它们与能见度呈反相关关系，能见度的波谷和波峰分别对应它们的波峰与波谷；风速与能见度的日变化趋势较为一致，都分别在凌晨和午后达到波谷和波峰。这是由于从夜晚到日出前(20时—次日05时)大气不断降温，相对湿度不断增大，同时微风、静风导致扩散条件差，污染物浓度增大，大量的水汽自身和颗粒物中的吸湿性物质都会起到消光作用而降低能见度。从日出后到傍晚(06—19时)，相对湿度降低，风速增大，大气垂直湍流加强，污染物浓度降低，能见度逐渐升高。值得注意的是，在细粒子浓度下降、能见度升高的时段，相对湿度始终在80%以下；而在相对湿度高于80%的00—01时，虽然细粒子浓度也在下降，但能见度并没有升高。这表明在环境空气湿度较大的情况下，水汽对能见度的影响是不可忽略的，这也是夏

季雾天造成低能见度的主要原因。

利用剔除降水时段的小时数据得到能见度与细粒子浓度的线性相关系数为－0.6,说明线性相关不如非线性相关明显,但经过线性相关的显著性检验发现两者的相关关系高度显著,也就是说能见度与细粒子仍然有明显的线性负相关。能见度与相对湿度、风速的线性相关系数均小于0.01。结合前面的分析可以认为,大气细粒子、水汽和风速都对辽宁中部城市群的能见度有一定影响,但与大气细粒子相比,水汽和风速不是主要影响因子。

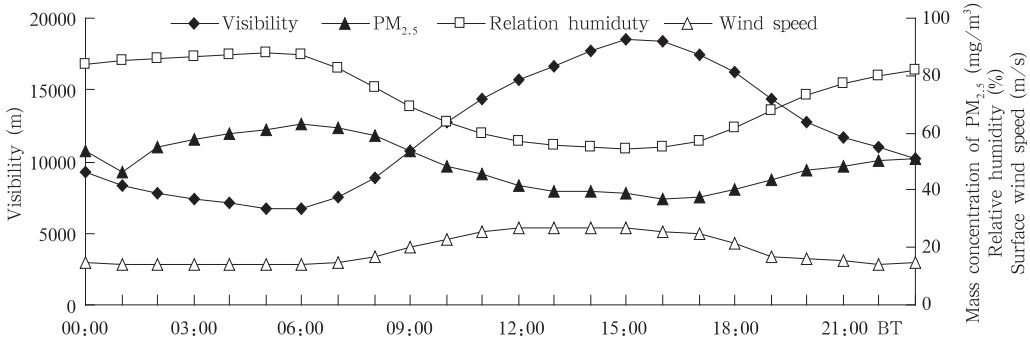


图9 辽宁中部城市群能见度、$PM_{2.5}$浓度、相对湿度和地面风速的日变化

Fig. 9 Mean diurnal variations of visibility, mass concentration of $PM_{2.5}$, humidity and surface wind speed for the area of multi-cities in central Liaoning Province

4.3 能见度与雾、霾的关系

2010年2月10日,中国国家气象行业标准《霾的观测和预报等级》(中国气象局,2010)正式颁布,其中规定:排除降水、沙尘暴、扬沙、浮尘、烟幕、吹雪、雪暴等天气现象造成的视程障碍,凡是能见度小于10 km、相对湿度小于95%的就可记为霾。本研究按照上述标准,统计出2009年夏季辽宁中部城市群能见度小于10 km的时次有932个,其中有872个相对湿度小于95%的时次可以被判识为霾。

国际气象组织规定,雾的能见度低于1 km,轻雾的能见度在1—10 km(WMO,2005)。本研究定义在排除降水、沙尘暴、扬沙、浮尘、烟幕、吹雪、雪暴等天气现象造成的视程障碍后,相对湿度不小于95%,能见度小于1 km的记为雾,能见度在1—10 km的记为轻雾。根据这一方法,统计得到2009年夏季辽宁中部城市群能见度小于10 km的932个时次中相对湿度不小于95%的时次有60个,可以判识为雾或轻雾。同时,这60个时次的大气能见度均在1—10 km,因此应全部判识为轻雾,其出现的时次不及霾的1/14。由此可见,在辽宁中部城市群夏季,小于10 km的低能见度时次仅有一小部分是由轻雾引发的,而大部分低能见度时次则是由霾天气造成的。

5 结 论

(1)辽宁中部城市群内各城市夏季大气能见度月际变化趋势基本一致,城市群内天气系统和大气环境比较均一,具有区域性特征。综合考虑2009年城市群的夏季能见度,可以说近10年辽宁中部城市群的大气能见度始终处于较低的水平。

(2)辽宁中部城市群内各城市夏季大气能见度日变化呈明显的单周期谷、峰形分布,最差时段出现在06时,最好时段出现在15—16时;相对湿度和细粒子浓度的日变化与能见度呈反相关关系,风速与能见度的日变化趋势较为一致。

(3)大气细粒子、水汽和风速都对能见度有一定的影响,其中大气细粒子是主要影响因子。此外,由于细粒子浓度与能见度存在非线性关系,使得细粒子浓度较高时能见度对其响应不敏感,而细粒子浓度较低时能见度对其响应比较敏感。

(4)在辽宁中部城市群夏季932个小于10 km的低能见度时次中,仅有一小部分是由轻雾引发的,而大部分低能见度时次则是由霾天气造成的,霾是导致城市群夏季大气污染的主要天气过程。

参考文献

陈静,吴兑,刘启汉. 2010. 广州地区低能见度事件变化特征分析.

热带气象学报，26(2)：156-164

范引琪，李二杰，范增禄. 2005. 河北省1960—2002年城市大气能见度的变化趋势. 大气科学，29(4)：526-535

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

陆辉，魏文寿，刘明哲. 2008. 塔中春季水平能见度变化及影响因子分析. 中国沙漠，28(5)：974-979

马雁军，左洪超，张云海等. 2005. 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，24(4)：623-628

宋宇，唐孝炎，张远航等. 2002. 夏季持续高温天气对北京市大气细粒子($PM_{2.5}$)的影响. 环境科学，23(4)：33-36

宋宇，唐孝炎，张远航等. 2003. 北京市大气能见度规律及下降原因. 环境科学研究，16(2)：10-12

苏维瀚，张秋彭，沈济等. 1986. 北京地区大气能见度与大气污染的关系初探. 大气科学，10(2)：138-144

于凤莲. 2002. 城市大气气溶胶细粒子的化学成分及其来源. 气象，28(11)：3-6

王厚军，李小玉，何兴元等. 2009. 辽宁中部城市群城市体系等级规模结构. 生态学杂志，28(3)：490-496

王继志，徐祥德，杨元琴. 2002. 北京城市能见度及雾特征分析. 应用气象学报，13(增刊)：160-169

王京丽，刘旭林. 2006. 北京市大气细粒子质量浓度与能见度定量关系初探. 气象学报，64(2)：221-228

王淑英，张小玲，徐晓峰. 2003. 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，31(2)：109-114

王晓丽，张苏平，张晓梅等. 2008. 青岛市水平能见度变化特征及气象影响因子分析. 气象科学，28(增刊)：31-36

吴兑，毕雪岩，邓雪娇等. 2006. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究. 气象学报，64(4)：510-517

吴兑，邓雪娇，毕雪岩等. 2007. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降. 热带气象学报，23(1)：1-6

吴兑，吴晓京，李菲等. 2010. 1951—2005年中国大陆霾的时空变化. 气象学报，68(5)：680-688

杨凌霄. 2008. 济南市大气$PM_{2.5}$污染特征、来源解析及其对能见度的影响. 济南：山东大学

袁成松，卞光辉，冯民学等. 2003. 高速公路上低能见度的监测与预报. 气象，29(11)：36-40

张凯，柴发合，陈义珍等. 2008. 天津武清能见度特征分析. 气候与环境研究，13(6)：800-805

张利娜，张朝林，王必正等. 2008. 北京高速公路大气能见度演变特征及其物理分析. 大气科学，32(6)：1229-1240

中国气象局. 2010. QX/T 113－2010 霾的观测和预报等级. 北京：气象出版社

Chang W L, Elaine H K. 1986. A study of visibility trends in Hong Kong. Atmos Environ, 20(10): 1847-1858

Craig C D, Faulkenberry G D. 1979. The application of ridit analysis to detect trends in visibility. Atmos Environ, 13(12): 1617-1622

Doyle M, Dorling S. 2002. Visibility trends in the UK 1950－1997. Atmos Environ, 36(19): 3161-3172

Horvath H. 1995. Estimation of the average visibility in central Europe. Atmos Environ, 29(2): 241-246

Kim Y J, Kim K W, Kim S D, et al. 2006. Fine particulate matter characteristics and its impact on visibility impairment at two urban sites in Korea: Seoul and Incheon. Atmos Environ, 40 (Suppl2): 593-605

Sloane C S. 1982. Visibility trends-Ⅱ. Mid-eastern United States 1948－1978. Atmos Environ, 16(10): 2309-2321

Singh T, Khillare P S, Shridhar V, et al. 2008. Visibility impairing aerosols in the urban atmosphere of Delhi. Environ Monitor Assess, 141(1-3): 67-77

World Meteorological Organization. 2005. WMO-No. 782 - Aerodrome Reports and Forecasts: A User's Handbook to the Codes (4th edition). Geneva: WMO, 18, 71, 72