

张利娜, 张朝林, 王必正, 等. 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, 2008, **32** (6): 1229~1240

Zhang Lina, Zhang Chaolin, Wang Bizheng, et al. Evolution characteristics of atmospheric visibility in the Beijing expressway and the corresponding physical analysis. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (6): 1229~1240

北京高速公路大气能见度演变特征及其物理分析

张利娜^{1, 2, 3} 张朝林¹ 王必正² 曾庆存²

1 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 根据首都国际机场高速公路专业气象自动监测站网所提供的高时间分辨率资料, 对大气能见度演变特征以及相应的物理因子进行分析。结论如下: (1) 大气能见度具有明显的日变化和逐月变化特征。就日变化而言, 能见度以 14 时最大, 但最低值出现时段却不一定。对于季节变化, 全年以夏季大气能见度状况最好。(2) 无论是季节变化还是日变化, 高速公路上的大气能见度与气象要素之间都是复杂的非线性关系, 而不是简单的线性关系。通过对 21 个月中能见度最低月资料的分析表明, 大气能见度与湿度间呈明显的乘幂分布关系, 其与气温呈 U 型相关。但在月平均能见度最大月, 能见度则与湿度呈指数关系。(3) 从物理上来看, 大气能见度与湿度的关系, 主要是通过水汽分子的 Rayleigh 散射和雾的 Mie 散射两个方面来表现; 风速则是由于压力阻力卷起大气气溶胶来影响大气能见度的; 而 0℃ 附近温度影响大气能见度则主要是通过 Bergeron 三相过程。(4) 200 m 以下的低能见度基本上是湿度在 100% 的情况下发生的, 即都是大雾天气影响的直接结果, 但对 200 m 以上的低能见度则不同, 200~1000 m 其间有一半是雾, 而 1~4 km 的能见度中不到三分之一是雾, 主要是由灰霾、沙尘暴等天气现象造成。

关键词 大气能见度 大雾 灰霾 高速公路 道路气象

文章编号 1006-9895 (2008) 06-1229-12

中图分类号 P426

文献标识码 A

Evolution Characteristics of Atmospheric Visibility in the Beijing Expressway and the Corresponding Physical Analysis

ZHANG Lina^{1, 2, 3}, ZHANG Chaolin¹, WANG Bizheng², and ZENG Qingcun²

1 *Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089*

2 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract Based on the fine-resolution temporal observation data provided by the auto monitoring stations for road weather information in Beijing airport expressway, the evolution characteristics of atmospheric visibility in the Beijing expressway and the corresponding physical factors are studied. The main conclusions are as follows: (1) It is demonstrated that the visibility in the Beijing expressway has distinct daily and monthly variation features, that is to say, the visibility at 1400 LST is the highest in a day, and the time with the lowest visibility is uncertain in any day. For the seasonal variation, the summer visibility is the highest in a year. (2) Of monthly and daily variation, the re-

收稿日期 2007-03-16, 2007-08-16 收修定稿

资助项目 国家科技部公益研究专项 2005DIB3J098, 2006 年“城市气象基金”UMRF200602

作者简介 张利娜, 女, 1982 年出生, 硕士研究生, 主要从事数值天气预报研究。E-mail: hudieyuzhang@sina.com

relationship between the visibility and the meteorological factors is the complex nonlinear correlation, rather than the simple linear correlation. Through analyzing the lowest monthly visibility with 21-month data, it is shown that the relationship between the visibility and the humidity is in the distribution of power, and is U type between the visibility and the temperature. However, in the highest monthly visibility, the relationship between the visibility and the humidity becomes exponential. (3) From the view of physics, the visibility reduction is affected by humidity through the water vapor's Rayleigh scattering and the fog's Mie scattering, is affected by the aerosol through the pressure resistance from the wind, and is affected by the water phase change through the Bergeron three-phase processes when the temperature is around 0°C . (4) It is shown that the visibility below 200 m happens mostly in the conditions that relative humidity of atmosphere is close to 100% (fog weather phenomenon), while the visibility above the 200 m is different. It is found that about 50% of visibility between 200 m and 1000 m happens in the case of fog, and about 30% of 1–4 km visibility is caused by fog. Thus, 1–4 km visibility mainly results from haze, sand storm and other weather phenomena.

Key words atmospheric visibility, fog, haze, expressway, road weather

1 引言

高速公路交通安全运输属于对气象高度敏感的行业,其所追求的快速、高效、安全、准时的目标,在很大程度上要受到气象因素的制约。随着国家经济与城市化的快速发展,由气象条件引起的高速公路交通安全保障问题已成为影响经济发展的一个关键因素。根据统计显示,近几年大雾等低能见度天气现象对交通的影响、危害和造成的灾难达到了空前的程度,已成为影响高速公路交通安全的重要因素。而作为首都机场高速公路,气象条件较差时,不仅容易造成交通事故,并且直接对首都机场产生影响。

因此高速公路气象预报与服务具有广泛的社会与应用需求。张朝林等^[1]通过对国、内外在高速公路气象预报系统研究方面的进展进行简要的回顾,探讨了目前国际上主要高速公路气象预报系统的特点、主要涉及的大气科学问题以及所面临的主要问题和未来发展趋势。分析指出,尽管冬季积雪、积冰天气是影响美欧等中高纬国家或地区交通的主要因子,其高速公路气象预报系统通常以满足冬季冰、雪天气状况下应如何进行优化的道路维护与管理决策作为核心目标;但由于道路气象信息具有很强的局地性与特殊性,在中国,高速公路气象预报系统的建立与设计应从实际天气气候条件对交通影响的实际出发进行分析,进而加以研制。如在华北等地,大雾等低能见度天气事件对交通的影响更为频繁和严重,系统的开发就应更多考虑影响低能见度天气事件的大气微物理过程与机制。需要我们在

设计和发展高速公路预报系统时有针对性地加以考虑。

对于大气能见度的研究,英国、美国等国家在 20 世纪 60 年代就已经展开,并且一般是把能见度与空气污染相联系,从能见度来分析空气污染的变化规律,20 世纪 80 年代以后,国外对能见度的研究工作逐渐细化,从气象条件和不同大气污染物等多角度进行详细的分析^[2~5],与此同时,我国也开始了对能见度的研究工作^[6~8],但由于监测技术发展水平和布网的限制,其只能在较大的区域范围和总体特征上对各地区的能见度给出有意义的结果。近年国内外关于城市大气能见度演变规律和影响因子方面的研究,主要是从空气质量和气象条件这两大方面来做分析研究^[9~15]。如在分析台湾地区能见度变化时,Tsai 等^[12]建立了能见度与大气污染物和气象参数的关系,做出了预报能见度的经验公式,并且还特别分析了工作日和周末由于大气污染物不同导致大气能见度变化的周末效应,但此工作比较侧重于对大气污染物的分析,对气象要素的分析不够详细。而对于高速公路上能见度的变化研究更是很少,国外对于高速公路气象方面的研究主要侧重于高速路上有结冰、积雪、积水等问题,并且还建立了很多相关方面的预报模式^[16~19]。国内则主要是分析能见度对道路安全的影响,这与中国很多地区多发生雾霾天气有关。如利用北京地区常规地面气象观测站网资料,王淑英等^[20]从北京高速公路能见度与气象要素的日变化、逐月变化、季节变化等不同角度,分析大气能见度与地面气象要素的相关性;张德山等^[21]则是选取大气稳定度、低层

水汽含量和低层大气中悬浮颗粒物 3 个基本要素作为预报因子，得出首都机场各月的日能见度预报指标。在华南地区，吴兑等^[22]利用观测试验与数值试验相结合的方法，系统分析雾生成的微物理机制，并研究开发了 4 种南岭山地京珠高速公路云岩雾区的能见度预报方法。

但应特别指出，由于国内以前没有建立专门的道路监测系统，对于高速公路能见度的研究资料主要是根据地面常规天气观测数据得到，难以取得长期稳定的高时间分辨率实际道面监测数据。因此以前的研究，其所用数据在空间上只能近似代表高速公路特殊环境上的实际状况，在时间分辨率方面较粗，难以真实反映高速路面上气象状况的快速变化和细致特征。2004 年，采用芬兰 VAISALA 公司的 ROSA 自动监测系统，北京在道路国际机场高速路温榆河和五元桥两路段建立了首都国际机场高速公路气象自动监测网，实时在线监测高速路气温、湿度、风速和风向等气象基本要素，同期采集影响行车安全的水、冰、雾、路面温度等 20 多种道面环境状况监测数据。监测数据的时间分辨率高达 5 min，为进一步深入开展高速公路的能见度演变特征和物理分析提供了可能。

本文根据首都国际机场高速公路专业气象自动监测站网在 2004~2006 年期间的连续监测数据，对北京高速路上的大气能见度演变特征和影响因子进行了初步分析。其结果对开发影响高速公路交通安全的高危险天气道路气象预报系统，提高气象专

业服务水平具有重要的现实意义和实用价值。对如何根据道路专业气象自动监测站网高时间分辨率资料进行大气能见度演变特征和影响因子的深入分析具有的参考价值。

2 仪器设备和数据来源（观测、数据和规定）

本文所用资料是首都国际机场高速路上温榆河[大雾多发地段，(40°01′52″N，116°33′31″E)]和五元桥[高速公路入口，(39°59′45″N，116°29′30″E)]两路段 Vaisala 的 ROSA 道面气象站^[23]观测得到的（参见图 1），ROSA 道面气象站主要用于检测公路和机场跑道表面的状况，从而向维护人员和使用 者提供实时数据。其道面状态分析是基于气象及道面测量资料和对道面现象的经验而得出的，而道面测量是基于道面覆盖层的导电性和电化学极化性。因此，利用 ROSA 系统可以分析道面状况，估计融冰化学物质浓度、道面水量或湿气量和结冰温度，并对冰、霜和降水做出警报。

ROSA 气象站主要有 3 个部分组成：（1）道面传感器 DRS511 是用来测量道面状况的，可以测量道面温度、冰点和融冰化学物量以及道面状态如冰、雪、霜、湿、潮、干等。（2）大气的传感器有：①传感器 HMP45D 用来测量大气温度、湿度、露点；② WAA151 和 WAV151 分别测量风向和风速；③传感器 PWD20 测量能见度；④DRD11A 降水传感器。（3）数据采集和公路适配卡（DRI 卡）。

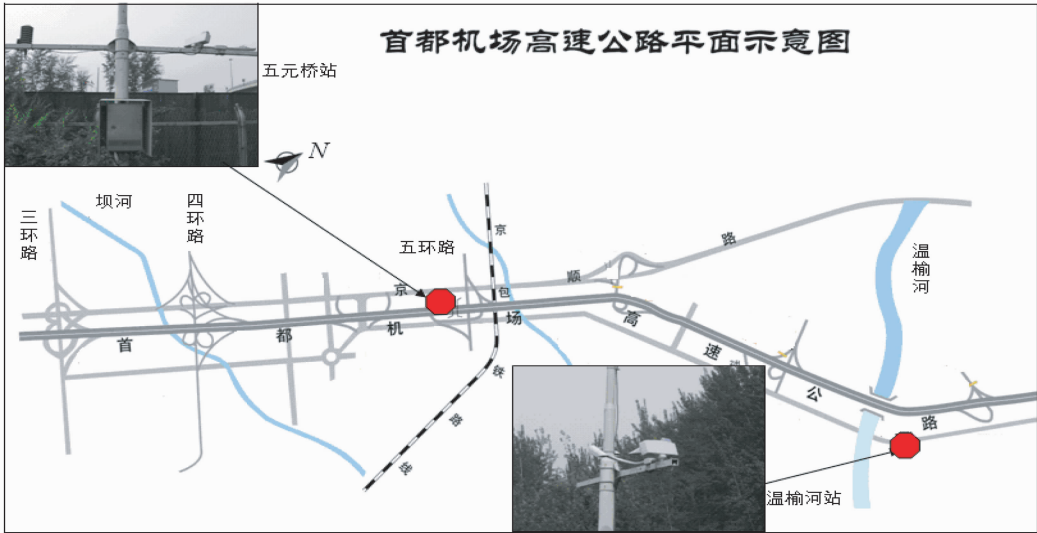


图 1 首都国际机场高速公路监测站网示意图
Fig. 1 Schematic diagram for the meteorological monitor stations of the Beijing airport expressway

能见度传感器 PWD20 测量范围为 10~20000 m, 也就是说在安装地点上的能见度如果低于 20000 m, 则报告实际能见度数值, 如 300 m、500 m 等, 但若能见度大于 20000 m, 则按 20000 m 报告。因此在做能见度平均值时可能会有一定的误差, 但这并不影响能见度变化的总体趋势。

3 大气能见度的演变特征分析

3.1 月际变化

利用 2004 年 12 月至 2006 年 8 月共 21 个月北京机场高速公路大气能见度的月平均资料, 可得到首都国际机场高速路上五元桥和温榆河两个站点各月能见度的月际变化曲线 (见图 2)。由图 2 可以明显看到, 两个站点具有完全一致的月际变化趋势和差别很小的月均值 (由于温榆河站缺测资料较五元桥站多, 会使得月均值有一些差别), 都是 2006 年 1 月能见度最低, 次低值出现在 2005 年 8 月, 而 2006 年 6 月能见度最高, 2005 年 3 月和 4 月的能见度也很好。两个站点大气能见度各月特征与月际演变趋势的高度一致性表明, 在较大的时间尺度上, 首都国际机场高速公路上的大气能见度的影响

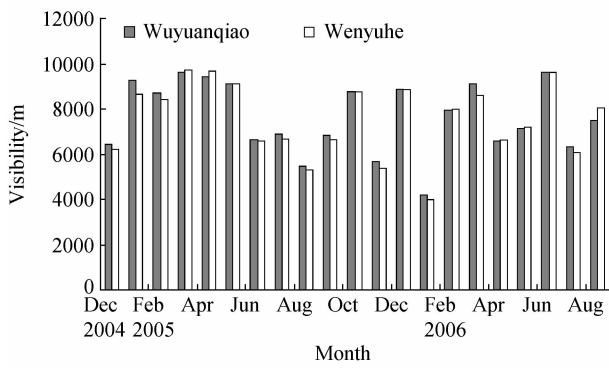


图 2 五元桥和温榆河各月能见度的逐月变化
Fig. 2 Monthly variation of visibility at Wuyuanqiao and Wenyuhe

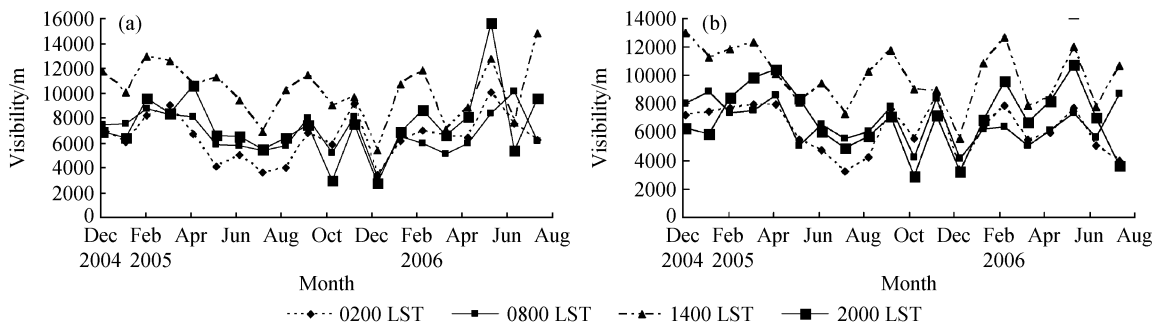


图 3 02、08、14 和 20 时能见度的逐月变化: (a) 五元桥; (b) 温榆河
Fig. 3 Monthly variation of visibility at 0200 LST, 0800 LST, 1400 LST and 2000 LST: (a) Wuyuanqiao; (b) Wenyuhe

因子是一致的, 在两站相距较小的空间尺度上, 其天气系统和大气环境应是较为均一的。

由于两站相距在 10 km 以内的空间尺度, 并且均处于平原地区, 因此下垫面在水平方向基本上是均匀的。并且一般影响能见度的气象要素其空间尺度大部分在 β 中尺度上, 故两站变化的高度一致是完全符合物理原则的。

3.2 各时刻逐月平均能见度的极值分布及物理分析

以下我们选取典型时刻来进一步分析其变化。
单独取出各月 02、08、14 和 20 时 (北京时, 下同) 能见度的数值, 做出这四个时刻能见度的逐月变化图 (图 3), 从总体上来看, 大气能见度的日变化明显, 并且除了五元桥站 2006 年 6 月之外 (可能是由于观测方面的原因, 也可能是由其他原因造成的, 还不是很清楚), 14 时的大气能见度最好, 这与邱金桓^[8]和王淑英等^[24]所做的工作相一致, 因此在下文中我们就认为 14 时大气能见度在所有时段上都是最好的。而能见度最低值出现时段却不一定, 在其他三个时刻都有可能。两站在 2004 年 11 月~2005 年 1 月和 2005 年 11 月~2006 年 1 月这两个时段内都是在 20 时能见度最差; 五元桥站从 2006 年 1~6 月和 2005 年 3 月是 08 时能见度最差的, 温榆河站则是从 2005 年 3~6 月、2006 年 2~6 月能见度为最小值; 02 时能见度较小的时段, 对于五元桥站是 2005 年 4~10 月, 温榆河站则是 2005 年 7~9 月。

也就是说, 冬季时, 20 时的大气能见度相对最低, 到了春季则是 08 时能见度最差, 夏季一般则是 02 时的大气能见度最低。但不管是哪个季节, 14 时的能见度都是最好的。以上特征应与以下因素相关: (1) 一般而言, 夜间至早晨大气的气温较

低，相对湿度一般较大，因此露点较高，而风速一般也比较小，特别容易产生雾；并且污染物也不易扩散，使得夜间和早晨能见度不高，因此能见度较低的时刻一般都是出现在夜间和早晨；（2）日出以后，随着太阳辐射的加强，空气湿度相对减小，大气垂直交换加强，而且午后风速一般是一天之中最大的，空气中的污染物也就可以得到及时的扩散，因此午后大气能见度一般是一日之中最好的时段。宋宇等^[25]研究认为，北京市大气能见度夏季能见度最差的时刻一般是在早上，这与本文不同，他的解释是早上风速比较小，但在我们的资料当中夏季夜间的风速更小（见表 1），很明显可以看到 08 时的风速一般都比 02 时的风速大一倍，并且夜间的降水量一般比 08 时大，这就使得 02 时的能见度较 08 时低，并且是夏季一天当中能见度最差的时段。

表 1 夏季 02 时和 08 时平均能见度、总降水量以及平均风速的比较

Table 1 Comparison of the average visibility, total precipitation and average wind speed at 0200 LST and 0800 LST in summer

	时间	能见度平 均值/m	总的降水/ mm	平均风速/ m·s ⁻¹
2005 年 6 月	02:00	4130.3	60.1	0.59
	08:00	5818.467	0.7	1.22
2005 年 7 月	02:00	5006.097	29.6	2.33
	08:00	5721.677	2.2	5.26
2005 年 8 月	02:00	3627.133	133.2	1.86
	08:00	5381.355	19.7	4.72
2006 年 6 月	02:00	10041.1	29	0.42
	08:00	8343.41	2.6	1.25
2006 年 7 月	02:00	7508.032	45.2	0.52
	08:00	10101.03	1.9	1.19
2006 年 8 月	02:00	6272.357	69.3	0.41
	08:00	6110.071	0.1	1.28

但夏季不管那个时次，大气能见度都是全年最好的。

4 能见度极值月份的分析

根据图 2 的资料分析结果，可见 2006 年 1 月是所有资料中北京机场高速公路月平均能见度最低的月份，而 2006 年 6 月又是我们资料中能见度最好的一个月。下面对这两个极值月份的能见度特征进行分析。

4.1 2006 年 1 月和 6 月能见度的日变化

从图 4 可以看出，首都国际机场高速公路上的大气能见度具有明显的季节变化和差异，在夏季 6 月各时刻平均值都达 8000 m 以上，远高于冬季（各时刻均值在 3000~4000 m 之间），清楚反映了北京冬季大雾和稳定天气形势较夏季多，大气污染较夏季严重的影响。对于 1 月，其能见度每天最差的时段（8~10 时和 19~21 时）与上、下班高峰期有较好的对应关系，这一方面可能昼夜交替时气温较低、露点较高有关，另一方面也可能与北京上、下班高峰期机动车辆较多，汽车产生的污染物较多会导致能见度下降有紧密联系。而能见度最好是在下午 13~15 时和凌晨。6 月能见度最好时段是在下午 13~19 时，凌晨和早上能见度都不好。尤其是早上 8 时，不管是 1 月或 6 月，能见度都是很差的，而下午 13~15 时则是能见度最好的时段，这与前面的分析相一致。

4.2 能见度影响因子分析

为了分析能见度等级与对应气象要素之间的关系，我们利用 1 月和 6 月各个整点时刻上的资料，做出能见度与主要气象要素之间关系的散点图（图 5），以期进行其相关性趋势分析。

图 5 中 N_A 表示 2006 年 1 月五元桥站资料的个数（只是整点时刻的资料，下同），即 A 站总

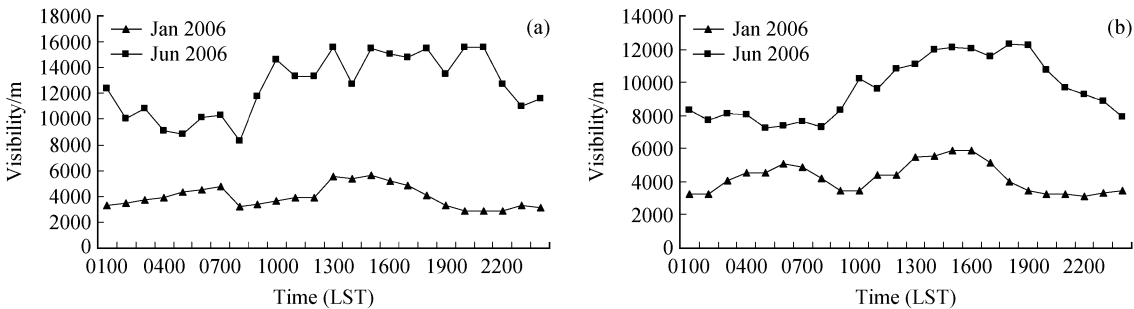


图 4 两个站点在 2006 年 1 月和 6 月能见度的日变化：(a) 五元桥；(b) 温榆河

Fig. 4 Daily variation of visibility averaged over Jan and Jun 2006: (a) Wuyuanqiao; (b) Wenyuhe

的样本个数, N_B 表示温榆河站资料的个数, N 表示两个站点数据总的个数, 并且为了更好地看出 1000 m 以下的较低能见度与各个气象要素的散点关系, 在图 5d、h、l 上, 分别给出了 1000 m 以下的能见度与各个气象要素关系图, 图中的 M 表示 1000 m 以下的能见度在 1 月整点时刻上出现的频数, R 是能见度分别与各个气象要素的相关系数, V 表示能见度。

从图 5 中很明显可以看到, 能见度与这些气象要素都不是一般的线性相关, 而是非线性相关。对于湿度与能见度的相关性进行分析, 不管是在五元桥、温榆河, 还是两站的总和, 均呈乘幂关系, 且负相关很好。我们还可以看到除了高湿使得能见度很低以外, 湿度不是很高的情况也能使得能见度降低, 也就是说低能见度除了是由于雾引起之外, 很大一部分是由于霾引起的 (霾日相对湿度较雾日

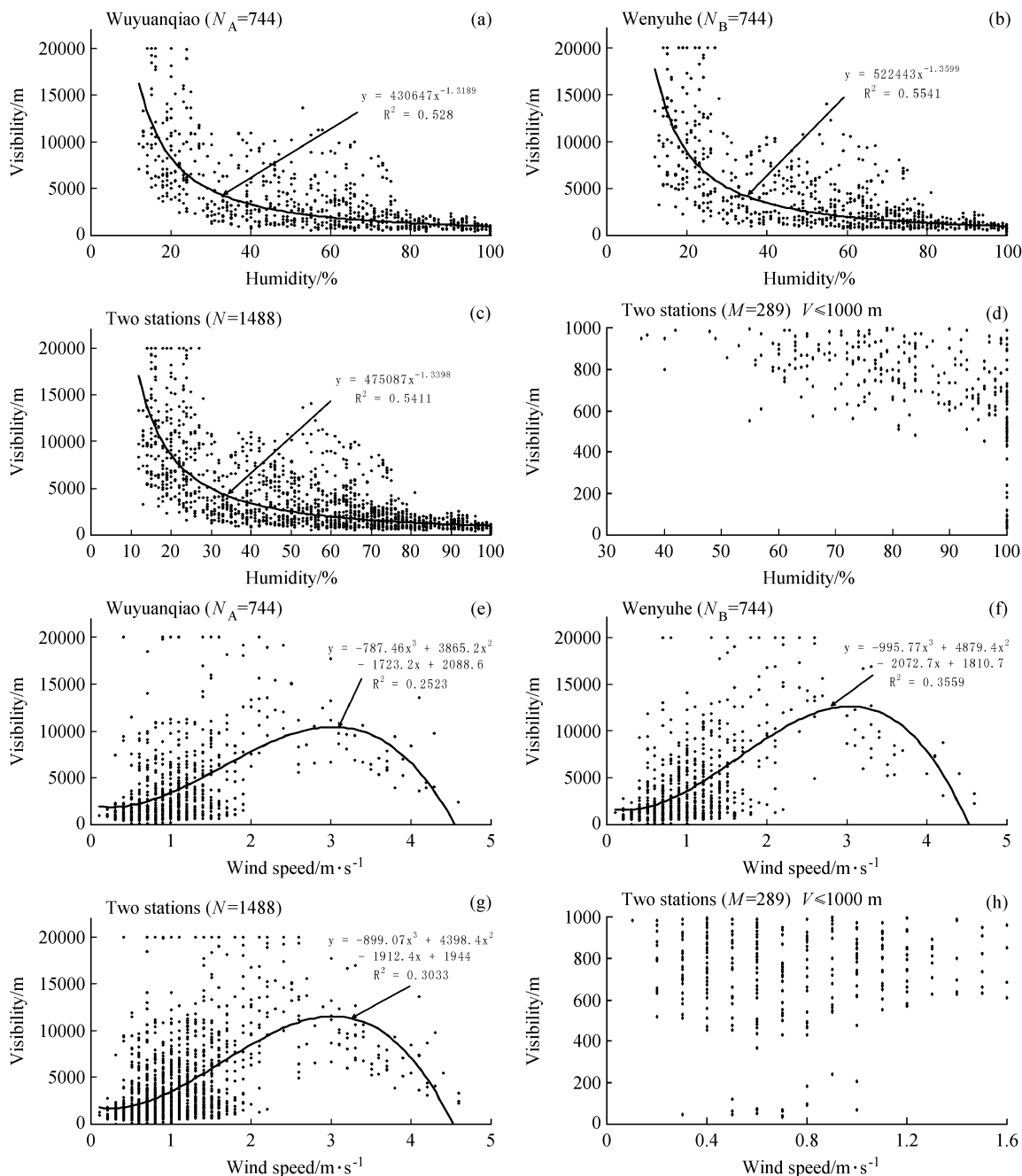


图 5 2006 年 1 月能见度与湿度 (a~d)、风速 (e~h) 以及温度 (i~l) 的关系散点分布

Fig. 5 Scatter diagrams of the relationship between visibility and (a~d) humidity, (e~h) wind speed, (i~l) temperature in Jan 2006

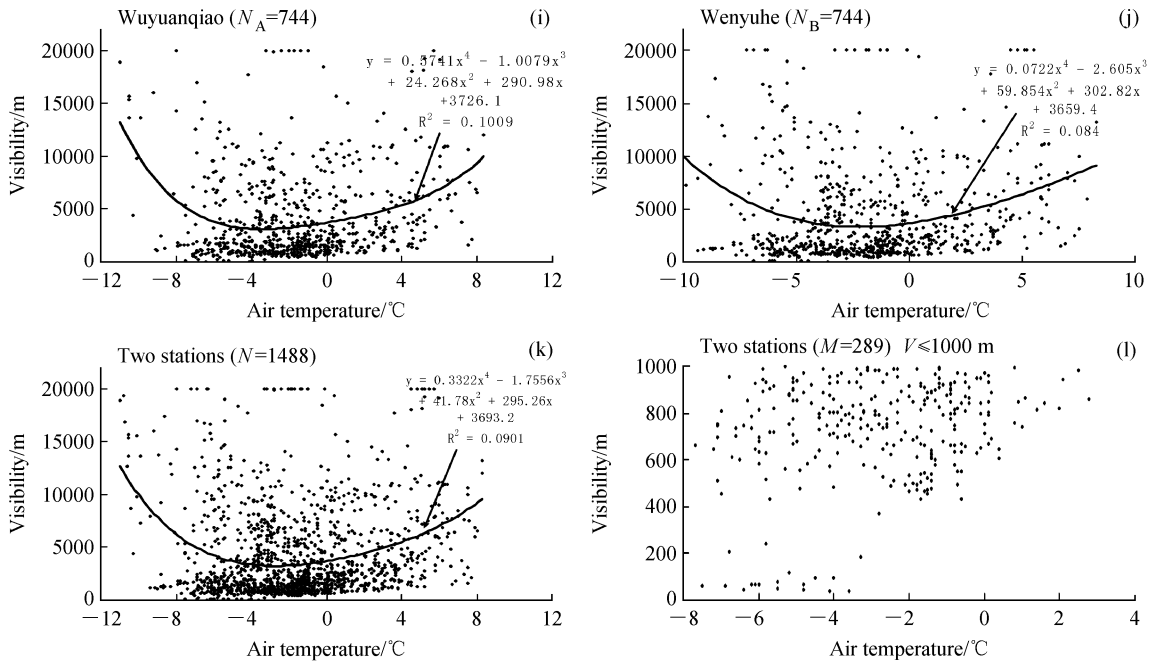


图 5 (续)
Fig. 5 (Continued)

低), 并且, 我们知道霾造成能见度下降也比雾日严重^[26], 尤其是在高速路上, 由于车辆较多, 交通量大, 使得汽车尾气污染比较严重, 因此灰霾更容易发生, 从而会导致能见度的下降。因此以后对能见度的分析中, 应多考虑霾的影响。

吴兑^[27]利用南岭山地实测数据得出, 出现雾时, 极端最小相对湿度是 91%, 在相对湿度低于 90% 的情况下, 没有观测到雾。他还通过分析雾和霾的物理过程, 并综合考虑中国气象局和香港天文台的工作, 最后将湿度的临界值值定为 90%, 作为区分轻雾与霾的辅助判据, 因此这一判据也适合于北京地区。这是从总体上来说, 但当能见度小于 1000 m 时, 排除吹雪、雪暴、沙尘暴、浮尘、烟雾等视程障碍之后, 最好将湿度的阈值定为 95%, 而 90% 的阈值对于能见度为 1~10 km 时比较合理。

而对于湿度与能见度之所以呈乘幂关系, 并且在湿度大于 90% 时, 湿度与能见度的关系变化比较平稳, 这是由于能见度与粒子的散射、吸收能力和气体的散射、吸收能力有关, 其中主要是与大气粒子的散射能力密切相关^[28], 在湿度小于 90% 时, 影响能见度的主要为水汽分子, 其对光的散射主要为 Rayleigh 散射, 散射在各向基本上均匀, 随着湿度的增加, 吸收与散射都会增大, 使得能见度下降; 而在湿度大于 90% 的情况下, 影响能见度的主要为雾, 此时主要为 Mie 散射, 明显地为向前散射, 加上雾对光线的吸收, 使得能见度明显下降, 直到下降到某一个临界值。

而风速与能见度的相关有点复杂, 大风并没有使能见度越来越高, 反倒是能见度降低了, 可能是由于空气中的灰尘太多, 大风反而把污染物颗粒吹得到处都是, 能见度降低。其物理解释就是由于流体作用在物体上的力, 对于每一面元都可以分成经向分力和切向分力^[29], 即分成一个压力和一个摩擦力, 所有这些压力的合力给出压力阻力。因为阻力 $F \propto \rho v^2$, 故随着风速 v 增大到某个临界值 F_c , 当 $F \geq F_c$ 时, 地面上的沙尘等就会被卷起, 能见度就会降低。

我们的资料当中关于温度的量有空气温度、表面温度和大地温度, 但其变化都比较一致, 因此只选取空气温度作为代表来讨论。空气温度与能见度呈 U 型相关, 温度对能见度的影响范围主要是在 $-7 \sim 5^\circ\text{C}$ 之间, 其可能的原因从大气物理角度上来说是由于冬季当大气温度降低到 0°C 以下时, 冰面的饱和水汽压 E_i 小于水面的饱和水汽压 E_w , 也就是说, 同样的水汽压 (e) 时, 在 0°C 以下时, 会发生

相对于冰面饱和而水面不饱和的情况,即 Bergeron 三相过程^[30]: $E_i \leq e < E_w$ 。

如果发生上述情况,则水汽会形成冷雾(冰晶雾),因此在冬季 0°C 附近由于冰面饱和水汽压小于水面饱和水汽压,有利于雾的形成。而温度太高,水汽又不易发生相变,形成不了雾,如果太低,水汽结成冰了,能见度反倒不会很低。另一方面从冬季的天气形势上来说,当地面温度在 $-7\sim 5^\circ\text{C}$ 之间时,一般对应稳定的大气,有利于雾或轻雾的形成,而不利大气气溶胶和大气污染物的扩散;而当温度更低时,一般对应锋面或冷高压过境,天气干燥,污染物被大量扩散,当然也有扬尘等影响能见度,但总的说来,这种天气过程有利于能见度变好。

图 6 给出了 2006 年 6 月能见度与温度、风速以及温度关系的散点分布,从图中可见,由于 2006 年 6 月两站均缺测一些资料,故 N_A 和 N_B 都小于 720,并且,由于 6 月能见度最好,1000 m 以下的能见度出现的频数就特别少,因此 M 只为 10,较之 1 月的 289 小很多。

从整体趋势上看,虽然高湿、夏季平均最低温度与小风仍与低能见度有明显的对应关系,但与冬季 1 月(图 5)相比,夏季 6 月(图 6)气象要素与

能见度的关系不如明显。其中湿度与能见度呈指数关系(此时能见度总体较好,雾的影响也很小,不再呈乘幂关系),但相关系数明显变小,并且在高湿情况下,能见度也会很好。同时风速与能见度的关系不存在明显的相关趋势,对应不同的能见度,风速变化不是很大,也就是说 6 月风速的变化不是影响能见度的主要因子。同时,夏季 6 月平均气温在 20°C 以上,显然空气温度对大气水汽无直接的相关和贡献,因此其与能见度的关系和冬季明显不同,只可以看到低能见度时对应的空气温度是 6 月份最低的(见图 5)。综合 1 月份的情况,我们可以说低温只是低能见度发生的必要条件。这是由于一般是在夜间温度较低,此时经常会出现地面较冷,而上层温度较高的情况,就易产生逆温层,逆温层的这种稳定层结不仅使得大气中的烟尘及其他污染物压抑于低空难于扩散,并且这种稳定的层结,再附加上一些有利的条件,就易产生雾,也就是说逆温条件下对于雾霾天气的出现都很有利,因此,即使是在 6 月份,这个不易产生雾的季节,在夜间的稳定层结的情况下,大气中细粒子污染对能见度的影响也很大,使得能见度明显降低。

但低温情况下,能见度也可以很好,从下面表 2 中可以看到,200 m 以下的能见度主要是由雾引

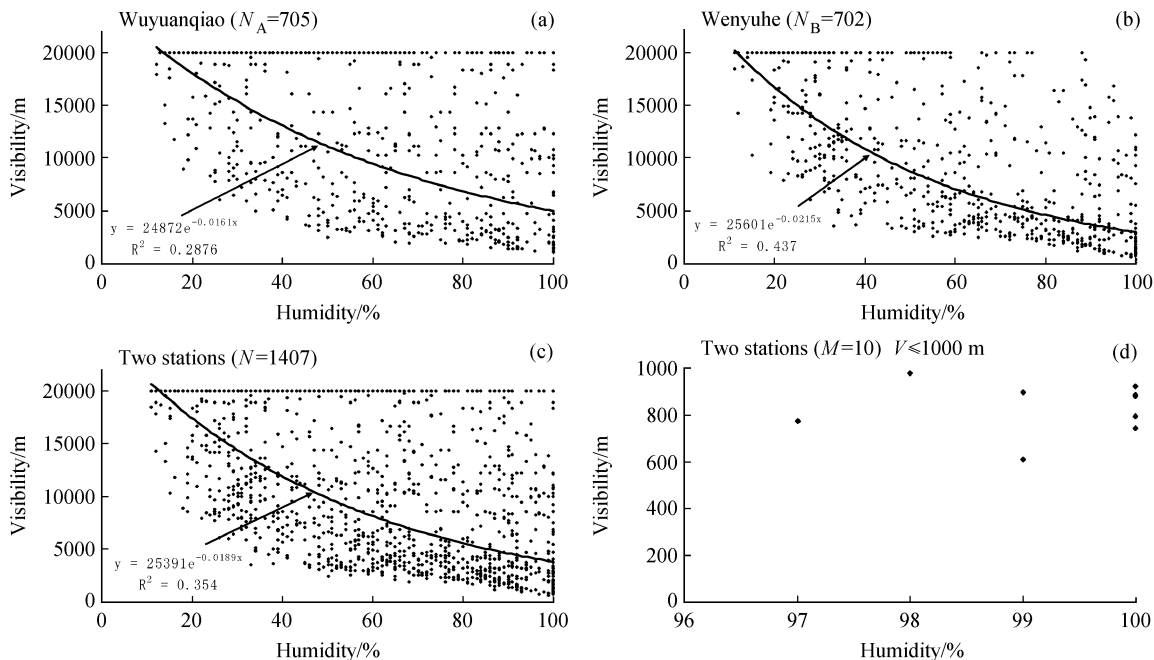


图 6 同图 5, 但为 2006 年 6 月

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for Jun 2006

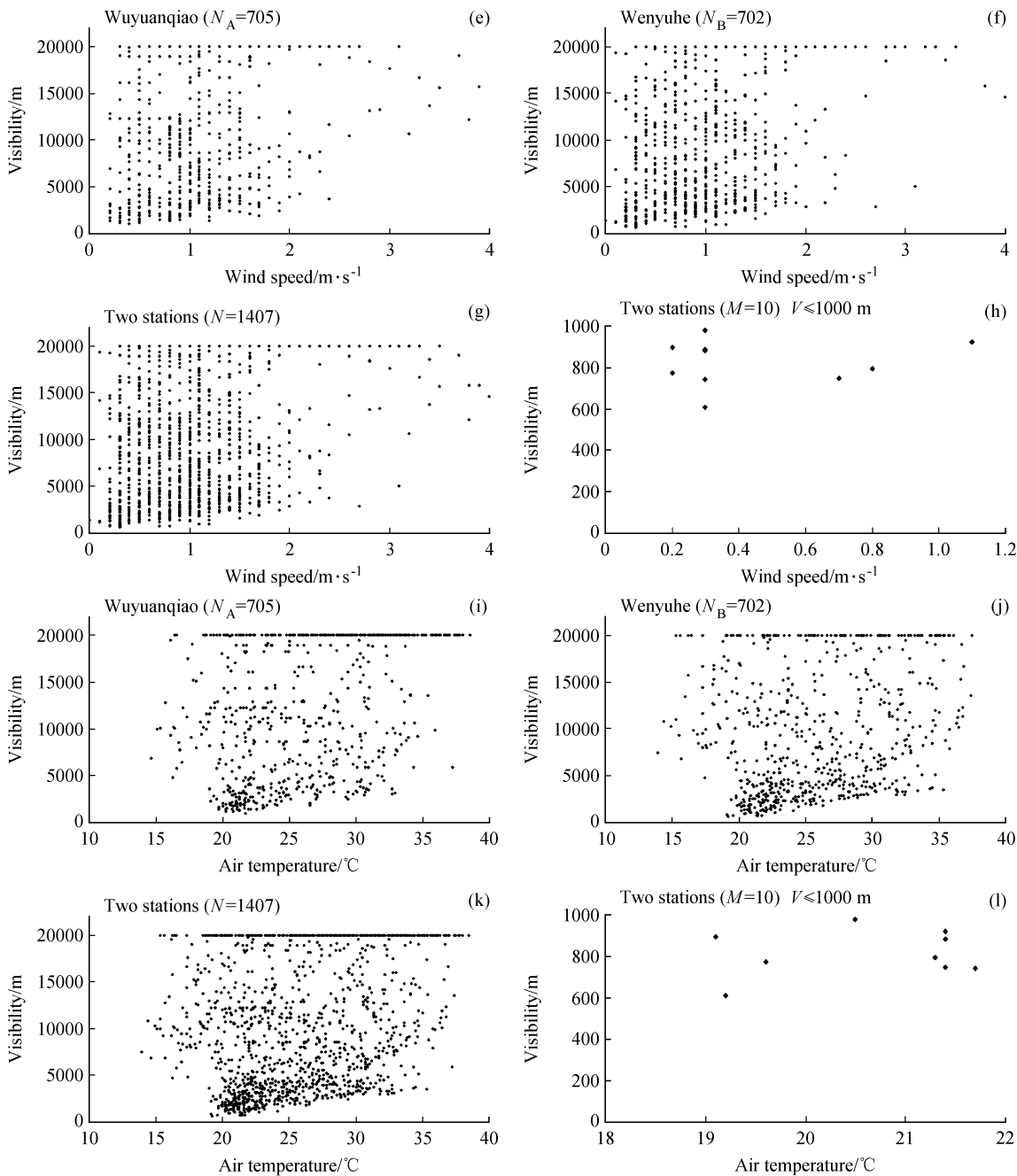


图 6 (续)
Fig. 6 (Continued)

起的，而雾的形成要求温度相对比较低，但还要求其他气象条件共同配合才能形成。

4.3 雾和霾对低能见度的影响分析

为了看出雾和霾分别对低能见度的影响，我们给出全部资料当中能见度小于 4000 m 出现的频数及其与湿度的关系（表 2）。

很明显，200 m 以下的低能见度可以说都是湿

度在 100% 情况下发生的，都是雾，而 200~1000 m 的低能见度一半是由于雾造成的，也就是说霾、沙尘暴、浮尘、烟幕等对低能见度的发生有一半的贡献，而 1~4 km 的能见度只有不到三分之一是雾引起的，也就是说主要是由霾等其他因素造成的。

以上我们指出能见度与各气象要素间是明显的非线性相互关系，从线性相关对其进行分析研究是

表 2 能见度小于 4000 m 出现的频数及其与湿度的关系
Table 2 Times of visibility less than 4000 m and the association with humidity

能见度/m	频数	湿度 100%		湿度 95%~100%		湿度 90%~100%	
		频数	频率	频数	频率	频数	频率
$V<50$	84	81	96%	83	99%	83	99%
$50\leq V<200$	230	211	92%	230	100%	230	100%
$200\leq V<1000$	21706	7124	33%	11029	51%	13664	63%
$1000\leq V<4000$	121560	13539	11%	23555	19%	33559	28%

不恰当的。这可从下面进一步加与证实。

5 能见度和主要气象要素之间的线性相关特性

我们把能见度、湿度、风速、最大风速和空气温度都做一个月平均，然后试图计算能见度与不同气象要素之间是否存在明显的线性相关关系，并且用 t 检验法来对相关系数进行显著性检验：

- (1) $|R|<R_{0.05}(n-2)$ 时，相关不显著；
- (2) $R_{0.05}(n-2)<|R|<R_{0.01}(n-2)$ 时，相关显著；
- (3) $|R|>R_{0.01}(n-2)$ 时，相关关系非常显著。

其中， n 为资料样本数， R 为相关系数， $R_{0.05}(n-2)$ 、 $R_{0.01}(n-2)$ 分别为显著性水平 $\alpha=0.05$ 、 $\alpha=0.01$ 时相关系数的临界值。当 $n=21$ 时， $R_{0.05}(n-2)=0.433$ 、 $R_{0.01}(n-2)=0.549$ 。

表 3 即为各气象因子与能见度的线性相关系数分布。其中 R_A 和 R_B 分别表示是五元桥站和温榆河站的相关系数。由表 3 可以看出能见度和气象要素的线性相关明显不如非线性相关好。不过能见度与湿度仍然有明显的线性负相关，从上面的图 4 和 5 中我们也能看到湿度与能见度可以近似的看作是一个线性相关。但与空气温度的线性负相关不大好。风速与能见度总体上来看虽然是线性负相关，但从图 7 风速与能见度的线性相关系数的月变化图中，

表 3 能见度和主要气象要素的相关系数
Table 3 The correlation coefficient between visibility and main meteorological factors

气象要素	R_A	R_B
湿度	-0.5035	-0.5279
风速	-0.23565	-0.26598
空气温度	-0.07761	-0.13767

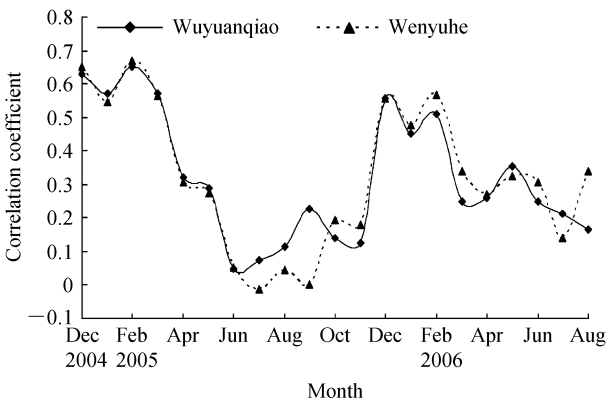


图 7 风速与能见度的线性相关系数的月际变化
Fig. 7 Monthly variation of the linear correlation coefficient between visibility and wind speed

会发现大部分时段是呈正相关，只是在个别时间上是负相关，并且按照我们的常识，一般情况下，当风较大时，空气的透明度比较好，能见度就好；但当风特别大时，风吹起地面的沙尘、泥土等，空气中含有大量的颗粒物，使能见度又降低。

6 结论和讨论

本文初步分析了北京高速路上的大气能见度演变特征和和影响因子，并侧重研究湿度、风速、温度等气象因子对大气能见度的影响，研究指出：

(1) 在分析的 21 个月的资料中，温榆河和五元桥两个站点大气能见度各月特征与月际演变趋势有着高度一致性，在较大的时间尺度上，首都国际机场高速公路上的大气能见度其影响因子是一致的，在两站相距较小的空间尺度上，其天气系统和大气环境应是较为均一的。

(2) 北京机场高速公路大气能见度具有明显的日变化和逐月变化特征。就日变化而言，能见度以 14 时最大，但最低值出现时段却不一定：冬季时，20 时的大气能见度相对不好，到了春季则是 08 时

能见度最低, 夏季 02 时的大气能见度相对不好。对于季节变化, 全年以夏季大气能见度状况最好, 这与高速路面上的天气状况和大气环境条件的好坏与否则有紧密联系。

(3) 高速公路上的大气能见度与气象要素之间是复杂的非线性相关, 2006 年 1 月是能见度最低月, 其大气能见度与湿度间呈明显的乘幂分布关系, 且非线性相关很好, 这与大气粒子散射的不同有关, 在湿度小于 90% 时, 影响能见度的主要为水汽, 大气中粒子对光的散射主要为 Rayleigh 散射, 散射在各向基本上均匀, 随着湿度的增加, 吸收与散射都会增大, 使能见度下降; 而在湿度大于 90% 的情况下, 影响能见度的主要为雾, 此时主要为 Mie 散射, 明显为向前散射, 加上雾对光线的吸收, 使能见度明显下降, 直到下降到某一个临界值。

(4) 2006 年 1 月, 能见度与气温却呈 U 型相关, 6 月, 能见度与气温也可以近似看作是 U 型相关, 并且低温是低能见度发生的必要条件, 这是由于一般是在夜间温度较低, 易产生逆温层, 逆温层的这种稳定层结不仅使大气中的烟尘及其他污染物压抑于低空难于扩散, 并且这种稳定的层结, 再附加上一些有利的条件, 就易产生雾, 也就是说逆温条件下对于雾霾天气的出现都很有利, 就会使得能见度降低。

(5) 200 m 以下的低能见度基本上是大雾天气影响的直接结果, 但对 200 m 以上的低能见度则不同, 但 200~1000 m 其间仅一半是雾, 而 1~4 km 的能见度只有不到三分之一是雾, 主要是由灰霾、沙尘暴等天气现象造成。

本文对于高速公路大气能见度的影响因子主要是从气象条件这方面着手, 但其他研究工作^[31, 32]也表明了大气能见度与云雾的含水量以及大气细粒子浓度密切相关, 并且他们的研究方法也很值得我们在后面开展的关于大气污染物对于高速公路能见度的影响工作中借鉴。

参考文献 (References)

[1] 张朝林, 张利娜, 王必正, 等. 高速公路气象预报系统研究现状与未来趋势. 热带气象学报, 2007, **23** (6): 652~658
Zhang Chaolin, Zhang Lina, Wang Bizheng, et al. Advances on road weather forecasting system and its future development. *Journal of Tropical Meteorological* (in Chinese), 2007, **23** (6): 652~658

[2] Naegele P S, Sellers W D. A study of visibility in eighteen cities in the western and southern United States. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **109**: 2394~2400
[3] Lee D O. Trends in summer visibility in London and southern England. *Atmos. Environ.*, 1983, **17**: 151~159
[4] Lee D O. The choice of visibility statistics in the analysis of long term visibility trends in southern England. *Weather*, 1988, **43**: 332~338
[5] Lee D O. The influence of wind direction, circulation type and air pollution emissions on summer visibility trends in southern England. *Atmos. Environ.*, 1990, **24A**: 195~201
[6] 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 Weihuan, Zhang Qiupeng, Shen Ji, et al. The relationship between visibility and air pollution in Beijing. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1986, **10** (2): 138~144
[7] 郑景春. 上海城市对能见度的影响, 城市气候与区域气候. 上海: 华东师范大学出版社, 1989
Zheng Jingchun. *The Influence of Shanghai City on Visibility, Urban Climate and Regional Climate*. Shanghai: East China Normal University Press, 1989
[8] 邱金恒. 北京等地气象能见度的变化特征分析. 大气科学, 1986, **10** (4): 437~442
Qiu Jinhuan. An analysis of annual variation of visibility in Beijing and other places. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1986, **10** (4): 437~442
[9] Sequeira R, Lai K H. The effect of meteorological parameters and aerosol constituents on visibility in urban Hong Kong. *Atmos. Environ.*, 1998, **32**: 2865~2871
[10] Doyle M, Dorling S. Visibility trends in the UK 1950~1997. *Atmos. Environ.*, 2002, **36**: 3161~3172
[11] Tsai Y I, Lin Y H, Lee S Z. Visibility variation with air qualities in the metropolitan area in southern Tai Wan. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2003, **144**: 19~40
[12] Tsai Y I. Atmospheric visibility trends in an urban area in Taiwan 1961~2003. *Atmos. Environ.*, 2005, **39**: 5555~5567
[13] 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 factors in multi-cities in central Liaoning. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (4): 623~628
[14] 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
- [15] 刘新罡, 张远航, 曾立民, 等. 广州市大气能见度影响因子的贡献研究. 气候与环境研究, 2006, **11** (6): 733~738
Liu Xingang, Zhang Yuanhang, Zeng Limin, et al. Research on the influential factors of visibility reduction in Guangzhou. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (6): 733~738
- [16] Crevier L P, Delage Y. Metro: A new model for road condition forecasting in Canada. *J. Appl. Meteor.*, 2001, **40**: 2026~2037
- [17] Shao J, Lister P J. Automated road ice nowcasts and Internet/Intranet application. Proceedings of the 11th International Road Weather Conference, Sapporo, Japan. January 2002, SIRWEC
- [18] Sass B H, Peterson C. A coupled automatic road-weather forecasting system. Proceedings of the 12th International Road Weather Conference, Bingen, Germany. June 2004, SIRWEC
- [19] Peterson C, Sass B H. Operational Danish road weather forecasting using high resolution satellite data. Proceedings of the 13th International Road Weather Conference, Turin, Italy, March 2006, SIRWEC
- [20] 王淑英, 孟燕军, 赵习方, 等. 北京高速公路大气能见度与气象条件的相关分析. 气象科技, 2002, **30** (5): 306~320
Wang Shuying, Meng Yanjun, Zhao Xifang, et al. Analysis on the relationship between the atmospheric visibility and meteorological factors in Beijing expressway. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2002, **30** (5): 306~320
- [21] 张德山, 魏建明, 陈廷良等. 首都机场高速公路能见度预报方法. 气象科技, 2002, **30** (6): 358~361
Zhang Deshan, Wei Jianming, Chen Tingliang, et al. The predictive method of visibility in Beijing airport expressway. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2002, **30** (6): 358~361
- [22] 吴兑, 邓雪娇, 游积平等. 南岭山地高速公路雾区能见度预报系统. 热带气象学报, 2006, **22** (5): 417~422
Wu Dui, Deng Xuejiao, You Jiping, et al. Forecast system of visibility at speedway foggy area at Nanling mountains. *Journal of Tropical Meteorological* (in Chinese), 2006, **22** (5): 417~422
- [23] VAISALA. Surface analyzer for roads and runways ROSA, DM32 version user's guide. 2002
- [24] 王淑英, 张小玲, 徐晓峰, 等. 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, et al. Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2003, **31** (2): 109~114
- [25] 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, **16** (2): 10~12
Song Yu, Tang Xiaoyang, Zhang Yuanhang, et al. The study of the status and degradation of visibility in Beijing. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 2003, **16** (2): 10~12
- [26] 王京丽, 刘旭林. 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, 2006, **64** (2): 222~228
Wang Jingli, Liu Xulin. The discuss on relationship between visibility and mass concentration of PM_{2.5} in Beijing. *Acta Meteorologica Sincia* (in Chinese), 2006, **64** (2): 222~228
- [27] 吴兑. 再论都市霾与雾的区别. 气象, 2006, **32** (4): 9~15
Wu Dui. More discussions on the differences between haze and fog in city. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2006, **32** (4): 9~15
- [28] Liou K N. *An Introduction to Atmospheric Radiation*. New York: Academic Press, 1980. 73~83
- [29] Prandtl L. *Essentials of Fluid Dynamics*. New York: Hafner Pub. Co., 1952. 174~179
- [30] Mason B J. *The Physics of Clouds*. London: Oxford University Press, 1971. 1~20
- [31] 谢兴生, 吴兑, 邓雪娇, 等. 用 CCD 摄像机动态估算测量云雾含水量的初步试验. 光学技术, 2001, **27** (4): 321~323
Xie Xingsheng, Wu Dui, Deng Xuejiao, et al. Elementary experiment of using CCD camera to estimate the liquid water content of fog. *Optical Technique* (in Chinese), 2001, **27** (4): 321~323
- [32] 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究. 气象学报, 2006, **64** (4): 510~517
Wu Dui, Bi Xueyan, Deng Xuejiao, et al. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pearl River Delta. *Acta Meteorologica Sincia* (in Chinese), 2006, **64** (4): 510~517