

北京机场高速公路能见度与大气动力和热力因子的 诊断及物理分析

张利娜^{1,2} 张朝林³ 王必正² 程从兰³

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

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, 结合大尺度背景场对大气能见度演变的动力热力条件和各级能见度条件下对应的主要气象要素特征进行分析。结论如下: 1) 在低频时间尺度, 大气能见度的低频变化有如下的规律: 850 hPa 垂直速度与能见度呈现同位相关系, 并通过垂直速度影响水汽变化, 进而通过水汽的 Rayleigh 散射与水粒子的 Mie 散射来影响大气能见度的变化, 反映出大尺度动力因子与水汽共同作用影响了大气能见度变化。500~850 hPa 之间的位温差与能见度的反位相关系, 反映出大气稳定度控制了大气边界层的分子扩散和湍流扩散, 即通过热力因子影响大气能见度。但要注意, 能见度的变化并不是由某一个单因子所决定的, 必须综合考虑动力、热力和水汽等多个因子的相互制约。2) 造成2005年1月和2006年1月能见度差异的主要原因是垂直速度和水汽的差异, 即垂直下沉运动时, 水汽易干燥, 比湿较小, 能见度较高, 故2005年1月能见度比2006年1月高。3) 能见度的等级分布与大气湿度、温度以及风速有重要的物理联系, 尤其是温度在0℃以下, 冰面饱和水汽压低于水面饱和水汽压时, 有利于雾的形成, 从而使得能见度较低。4) 200~1 000 m的低能见度出现频数的日变化呈现以午时为低中心的U型分布, 并且1 000 m以下的低能见度一定对应了低温、高湿和微风, 但这只是必要条件, 并不是其发生的充分条件, 尤其对于200 m以下的浓雾。而对大于4 000 m的较高能见度, 其出现频数的日变化呈以午时为高中心的拱形分布。

关键词 大气能见度 高速公路 动力和热力因子 雾

文章编号 1006-9585 (2008) 03-0260-13 **中图分类号** P427 **文献标识码** A

The Diagnose and Physical Analyses about the Relationship between Atmospheric Visibility and the Corresponding Dynamical and Thermodynamical Factors in the Beijing Airport Expressway

ZHANG Li-Na^{1,2}, ZHANG Chao-Lin³, WANG Bi-Zheng², and CHENG Cong-Lan³

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

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

3 *Institute of Urban Metrology, China Meteorological Administration, Beijing 100089*

Abstract Based on the fine resolution temporal observation data, which was observed by the auto monitoring stations for road weather information in Beijing airport expressway, combined with the background field in the large

收稿日期 2007-05-08 收到, 2008-01-06 收到修定稿

资助项目 国家科技部公益研究专项 2005DIB3J098 和 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

scale, the dynamical and thermodynamical conditions of atmospheric visibility's evolution and the characteristics of main meteorological factors under different classification of visibility in the Beijing expressway are studied. The main results are as follows: 1) In the low-frequency temporal scale, the law of the atmospheric visibility's low-frequency oscillation is that the vertical velocity at 850 hPa and the corresponding visibility is positive phase. From the physical view of point, the mechanism is that the vertical velocity influences the vapor changing and the visibility is reduced by the effects of the water vapor's Rayleigh scattering and the water particle's Mie scattering. This reflects the effects of the large-scale dynamical factor and the vapor factor on the visibility. The potential temperature difference from 500 hPa to 850 hPa and the viability is negative phase. It is suggested that the atmospheric stability controls the molecular diffusion and turbulent diffusion of the boundary layer. Because of this reason, the corresponding visibility is affected by the thermodynamical factor, but one thing should be noticed is that elements, which result in the variation of visibility, are extensive, the interactional physics process, including dynamical or thermodynamical and vapor must be taken into account, and single-factor analysis is not available. 2) The reason that results in difference between the visibility in January 2005 and that in January 2006 is the difference of the vertical velocity and the vapor between two months, that is to say, when there is sinking vertical motion, the vapor tends to get dryer and the humidity becomes less, hence the visibility turns better. So the visibility in January 2006 is finer than that in January 2005. 3) The classification of the visibility has important physical relationship with the humidity, temperature and the wind speed, especially when the temperature is below than 0 °C, the saturation ice surface water pressure is less than the corresponding water, so that the cooling fog is easily formed, and the corresponding visibility becomes bad. 4) The daily frequency variation of visibility between 200 m and 1 000 m presents U type distribution, and the visibility below 1 000 m appears on the conditions that temperature is very low, humidity is very high and the wind velocity is very small, but it is only the essential condition not the full condition, especially for the heavy fog which visibility is below 200 m. And for the better visibility which is higher than 4 000 m, its daily variation of frequency presents arch form distribution.

Key words atmospheric visibility, expressway, dynamical and thermodynamical factors, fog

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。如 2006 年 11 月 20 日北京出现大雾，部分地区的能见度不足 50 m，使得包括六环路在内的多条高速公路封路，首都机场近万名旅客滞留，仅早上 7~8 时就出现拥堵报警 34 起，事故报警 154 起，多为刮蹭追尾轻微事故。而对于首都机场高速公路，气象条件较差时，不仅容易发生交通事故，并且直接对首都机场的旅客能否按时到达机场乘机，以及飞机的起降等产

生影响。

对于大气能见度的研究，英国、美国等国家 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^[1~4]。与此同时，我国也开始了对能见度的研究工作^[5~7]，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。近年来国内外关于城市大气能见度的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^[8~14]。但对于高速公路上气象条件的研究，国外主要侧重于高速路上结冰、积雪和积水等问题，并且还建立了很多相关方面的预报模式^[15~18]。而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，但迄今为止研究不同能见度与对应气象要素之间关系的工作仍然较

少，并且这些研究也缺乏详细而深入的分析。

张朝林等^[19]对国内外在高速公路气象预报系统研究方面的进展进行了回顾。国外对于积雪、结冰等已经建立了很好的预报模式，但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由地面常规天气观测数据得到，难于取得长期稳定的高时间分辨率的实际道面监测数据。因此以前研究所用的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，且时间分辨率较粗，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的气温、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。这就使得我们有可能将不同能见度时相应的气象要素进行物理分析。

由于大气能见度是由不同时间和空间尺度的大气过程非线性相互作用所产生的，因此极为复杂。为了研究能见度的演变规律，有必要既分析大尺度气象条件与能见度的关系，又分析局地观测资料与能见度的关系。这种分析是很有意义的，一方面可以从机制角度揭示能见度的演变与不同

时空尺度相应的大气动力热力的关系，另一方面能见度的预报随着交通（飞机、高速公路和航海等）的迅速发展，而显得极为重要。目前能见度的预报在时间上是短时间的（1 d），在空间上是局地的（约 100 km）；而较长时间和较大范围能见度的演变规律也是重要的，将来成熟后可以作为天气预报的新预报量，为业务部门对高速公路能见度的预报提供物理依据。具体而言，本文利用高时间分辨率的能见度观测资料，首先从大尺度动力与热力角度探讨其是如何影响大气能见度的；其次，考虑到大气能见度的低值直接影响高速公路的交通安全，以 2006 年 1 月作为典型个例，在比较 2006 年 1 月和 2005 年 1 月能见度和气象要素场的基础上，从局地角度分析大气能见度的不同等级与其他大气因子的动力与热力关系。

2 仪器设备和资料

本文所用资料是首都国际机场高速路温榆河（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^[20]观测资料（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

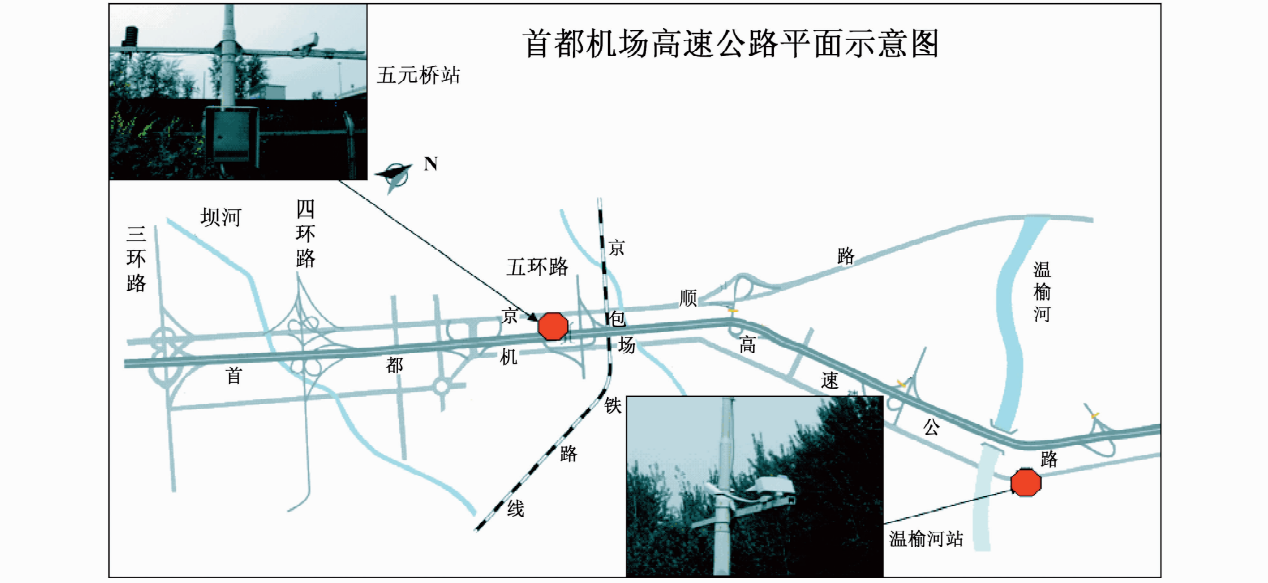


图 1 首都国际机场高速公路监测站网示意图
Fig. 1 Schematic diagram for the meteorological monitor station of the Beijing airport expressway

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、道面水量或湿气量以及结冰温度，并对冰、霜和降水做出警报。

ROSA 气象站主要由 3 个部分组成：1) 道面传感器 DRS511：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) 大气传感器：a) HMP45D 用来测量大气温度、湿度、露点；b) WAA151 和 WAV151 分别测量风向和风速；c) PWD20 测量能见度；d) DRD11A 降水传感器。3) 数据采集和公路适配卡 (DRI 卡)。

能见度传感器 PWD20 的测量范围为 10～20 000 m，也就是说在安装地点上的能见度如果低于 20 000 m，则报告实际能见度数值，如 300 m、500 m 等；但若能见度大于 20 000 m，则按 20 000 m 报告。因此在做能见度平均值时可能会有一定的误差，但并不影响分析能见度变化的总体趋势。

3 大气能见度的变化特征及其大尺度动力热力学分析

根据 Hoskins 等^[21]的研究，大气大尺度变量的低频变化 (≥ 10 d) 的方差比天气尺度 (约 7 d) 的方差要大得多，而大气能见度是与其他大气因子

密切相关的，故有必要从低频和高频两种尺度来研究。本文仅以逐日变化为例研究大气能见度的高频变化，而以逐月变化为例研究大气能见度的低频变化。

3.1 大气能见度的逐月变化

利用 2004 年 12 月～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。由图 2 可明显看到，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 和 4 月能见度也很高。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，在较长的时间尺度上，首都国际机场高速公路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。事实上，由于同处于北京市的东北郊区，其直线距离 r 与大尺度大气的水平运动尺度 L 之比 α 为

$$\alpha=r/L\sim 10\text{ km}/5\,000\text{ km}\sim 1/500,$$

并且两个站点其海拔高度基本相同，故从大气动力学角度上表明了这种高度一致性的内在物理原因。

3.2 大气能见度逐月变化的大尺度动力热力分析

既然大气能见度的月变化特征在较长时间尺

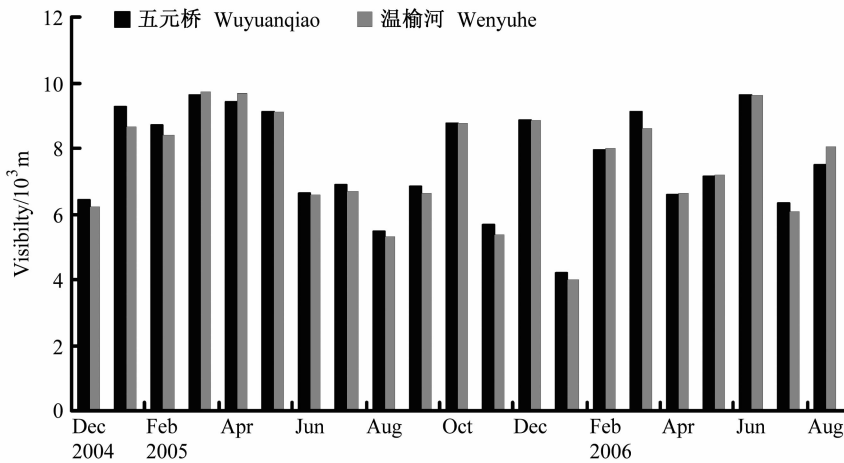


图 2 能见度的逐月变化
Fig. 2 Monthly variation of visibility

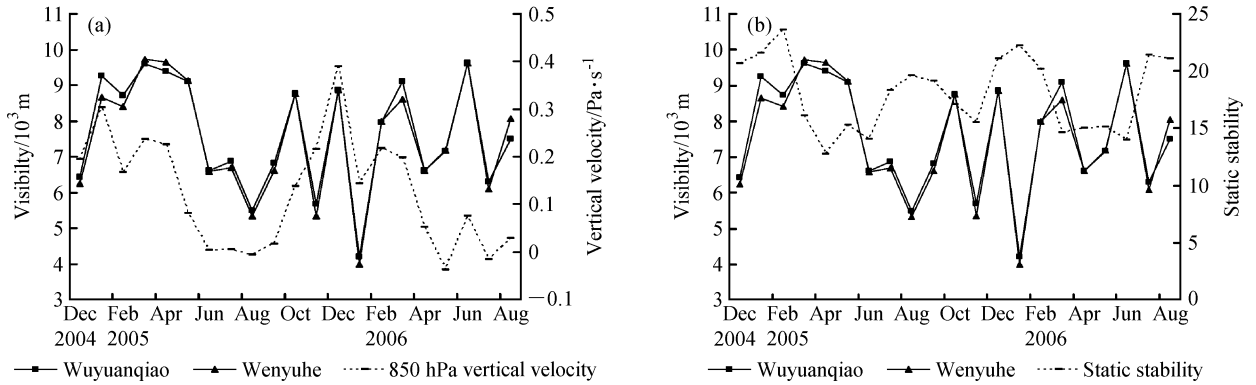


图 3 (a) 850 hPa 的垂直速度和 (b) 自由大气的稳定度与大气能见度的逐月变化
Fig. 3 The monthly variation of the vertical velocity at 850 hPa (a) and the stability of the free atmosphere (b), as well as the atmospheric visibility

度和较小距离内存在高度的一致性,能见度在较长时间内的低频变化与大气环流的低频变化应该有本质的物理联系。为了说明存在着这种联系,我们利用 NCEP 的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 格点资料,并选取 (40°N , 116°E) 作为北京的代表点,取此格点上 850 hPa 的垂直速度代表自由大气与边界层大气的大尺度相互作用中的动力因子,计算了 500~850 hPa 之间的位温差,以此代表边界层大气上自由大气中的稳定度,作为热力因子,当 $\theta_{500}-\theta_{850}>0$ 时, $\partial\theta/\partial z>0$,此时大气层结稳定。

3.2.1 大气能见度逐月变化的大尺度动力分析

由图 3a 可以看到,850 hPa 的垂直运动(这与笛卡尔坐标系下的垂直速度 w 不同,当 850 hPa 的垂直速度为正值时,此时为垂直下沉运动,反之是垂直上升运动),其逐月变化与能见度的变化趋势比较一致,即下沉运动较强时,对应的能见度也较高,并且上升(或下沉)运动的极值点与能见度的极值点基本一致。应该指出这与传统的结论不同,一般认为上升运动大,对应的能见度较大,反之则少。为了揭示其原因,我们分析了垂直运动与大气水汽变化(同上取 NCEP 的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 格点资料,北京代表点上的比湿)的关系。由图 4 可见 850 hPa 的垂直速度与大气比湿是反相关关系,并且两者的相关系数为 -0.7975 (见表 1),这种负相关是非常显著的,即垂直下沉运动较大时(850 hPa 的垂直速度为正值),对应的比湿相对较小;而上升速度越大,比湿也就越大,对应的湿度越高。850 hPa 大尺度垂直运动,既反映了大气边界层与自由大气的相互作用,又反映

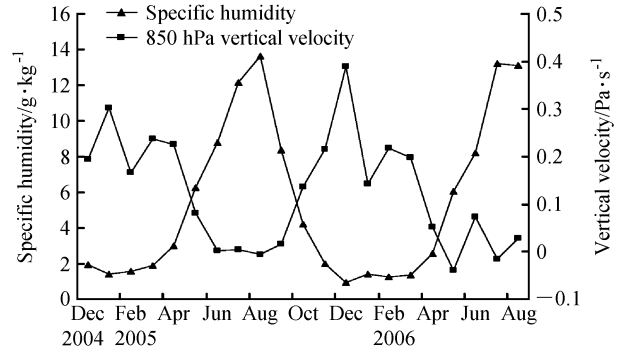


图 4 850 hPa 的垂直速度与比湿的逐月变化
Fig. 4 The monthly variation of the vertical velocity at 850 hPa and the specific humidity

了大气大尺度水平辐合运动。因此,850 hPa 垂直运动与水汽的明显反相关,反映了大气动力因子变化与水汽变化的一致性。而水汽对大气能见度的影响,是通过水汽的 Rayleigh 散射与水粒子的 Mie 散射^[22]这两种机制。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,散射在各向上基本均匀,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,使得能见度下降。总的来看,存在如下的联系:

大尺度大气条件的低频变化→水汽低频变化→大气能见度的低频变化(通过水汽分子的 Rayleigh 散射与雾滴的 Mie 散射)。

故垂直运动→水汽→能见度的关系不仅是一种动力统计诊断关系,而且是有明显物理意义的

规律。

3.2.2 大气能见度逐月变化的大尺度热力分析

分析图 3b，可以看到能见度与静力稳定度的对应关系总体上呈现一种反位相的关系，即大气层结越稳定，能见度越差；反之，大气层结越不稳定，能见度越大，这个诊断结果从物理上来说，反映了大尺度热力因子的影响。500~850 hPa 之间的位温差，代表了大气边界层上大气能见度对其下边界层的影响，一般而言，层结稳定时，不利于大气边界层的物质通过边界层顶向自由大气中输送。由于层结稳定，垂直运动小，因而通过的大气垂直分子扩散和湍流垂直扩散都是小值，故大量的气溶胶和化学物质留在大气边界层中，从而导致了大气能见度变差。也就是说，自由大气中的层结稳定度在一定程度上通过热力因子影

响大气能见度的变化。

3.3 2006 年 1 月和 6 月大气能见度的日变化

根据图 2 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月，而 2006 年 6 月又是能见度最高月，下面对这两个月能见度的日变化和对应的大尺度动力热力场进行分析。

就日变化而言，2006 年 1 月（图 5）能见度以 3~9 日和 27~31 日较高。其他时间则相对较低。2006 年 6 月（图 6）能见度是以 7~20 日较大，中间也有一些小起伏，月初和月底能见度相对低一些。分析两个月相对应的动力热力条件，可见，尽管在个别时间段上有些例外，但 850 hPa 的垂直运动与大气能见度总体上呈同位相关系，而比湿与 850 hPa 的垂直速度则基本上呈负位相

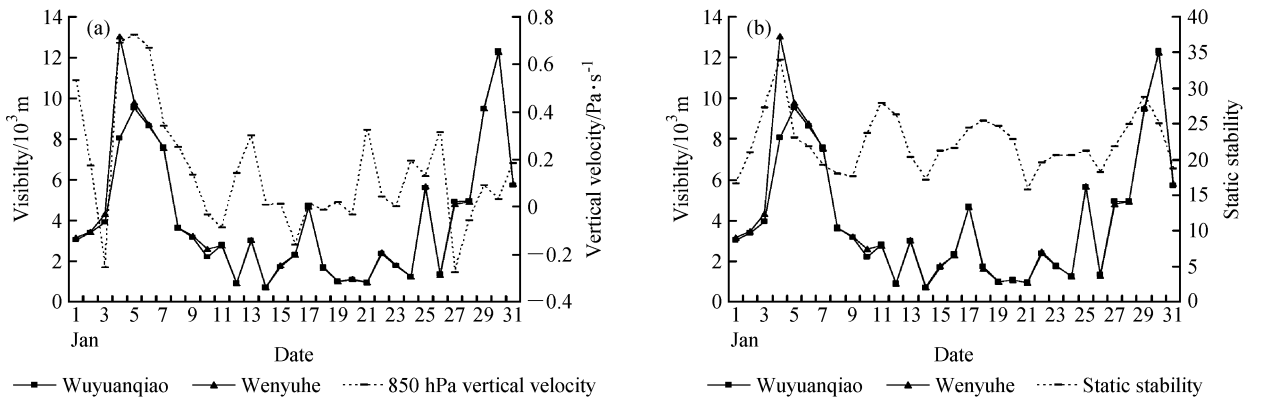


图 5 2006 年 1 月 (a) 850 hPa 的垂直速度和 (b) 自由大气的稳定度与大气能见度的日变化
Fig. 5 The daily variation of the vertical velocity at 850 hPa (a) and the stability of the free atmosphere (b), as well as the atmospheric visibility in Jan 2006

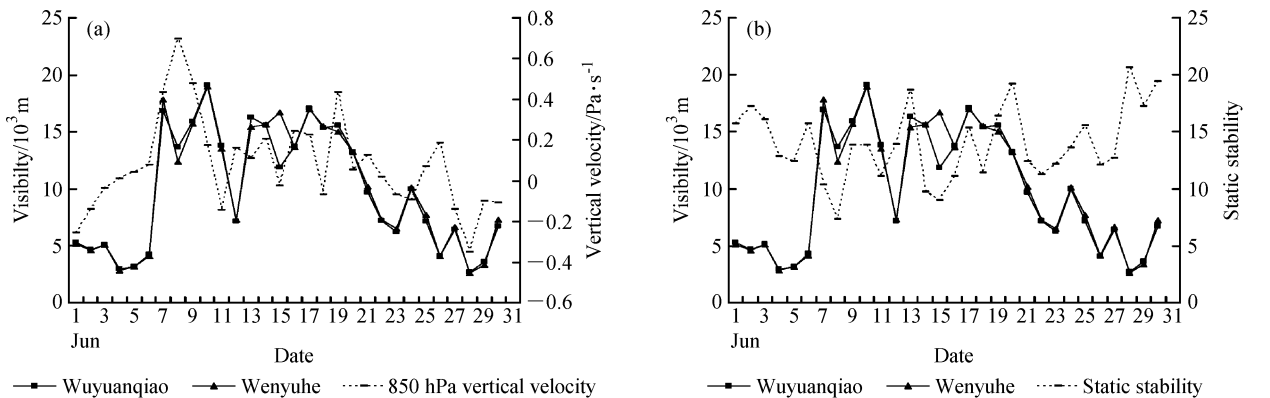


图 6 2006 年 6 月 (a) 850 hPa 的垂直速度和 (b) 自由大气的稳定度与大气能见度的日变化
Fig. 6 The daily variation of the vertical velocity at 850 hPa (a) and the stability of the free atmosphere (b), as well as the atmospheric visibility in Jun 2006

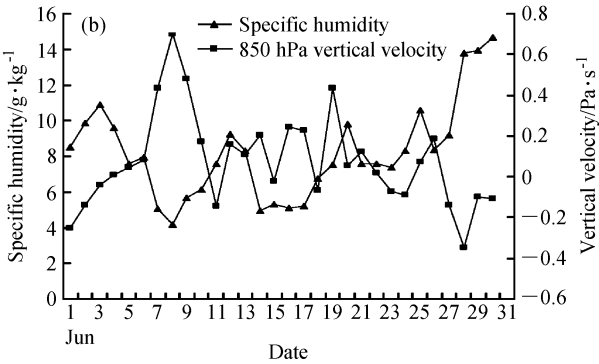
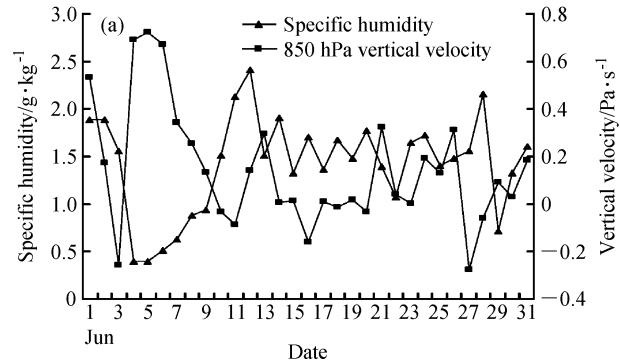


图 7 2006 年 (a) 1 月和 (b) 6 月 850 hPa 的垂直速度与比湿的日变化
Fig. 7 The daily variation of the vertical velocity at 850 hPa and the specific humidity in Jan (a) and Jun (b) 2006

(见图 7), 500~850 hPa 之间的位温差与大气能见度呈负位相关关系, 这与月变化时的情况相一致。

3.4 统计可靠性检验

我们把比湿和 850 hPa 的垂直速度进行月平均, 并且分别做 2006 年 1 月和 6 月的日平均, 然后试图计算 850 hPa 的垂直速度与比湿间是否存在明显的线性相关关系, 并且采用 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。
- 式中, 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 (月平均), $R_{0.05}(n-2)=0.433$ 、 $R_{0.01}(n-2)=0.549$;
当 $n=31$ 时 (1 月), $R_{0.05}(n-2)=0.355$ 、 $R_{0.01}(n-2)=0.456$;
当 $n=30$ 时 (6 月), $R_{0.05}(n-2)=0.361$ 、 $R_{0.01}(n-2)=0.463$ 。

表 1 即为比湿与 850 hPa 垂直速度的线性相关系数分布。由表 1 可以看出, 不管是在极值月, 还是月平均状况下, 850 hPa 垂直速度与比湿的关系系数都通过显著性检验, 并且可能影响大气能见度的变化。

综上所述, 无论是在高频时间尺度, 还是在低频时间尺度: 1) 850 hPa 垂直速度与能见度呈现同位相关关系, 是通过垂直速度影响水汽变化, 进而通过 Rayleigh 散射与 Mie 散射来影响大气能

表 1 比湿与 850 hPa 垂直速度的相关系数

Table 1 The correlation coefficient between visibility and the vertical velocity at 850 hPa

	<i>R</i>
月平均	-0.7975
1 月	-0.5748
6 月	-0.6402

见度的变化, 反映了大尺度动力因子与水汽共同作用影响了大气能见度变化; 2) 500~850 hPa 之间的位温差与能见度的反位相关关系, 反映了大气稳定度控制了大气边界层的分子扩散和湍流扩散, 即通过热力因子影响大气能见度。

以上分析是从单因子角度研究了大气能见度的变化, 但在实际大气中, 影响大气能见度变化的因子是相互制约的。根据流体力学中的相似原则, 大气能见度 V 与其他大气变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的关系肯定有

$$V=f(x_1, x_2, \dots, x_n), \tag{1}$$

则能见度 V 的变化为

$$dV=(\partial f/\partial x_1)_{x_2, \dots, x_n}dx_1+\dots+(\partial f/\partial x_n)_{x_1, \dots, x_{n-1}}dx_n. \tag{2}$$

上面的分析相当于 (2) 式中其他因子固定, 而只考虑某一个单因子。如果综合考虑, 则可能有

$$\partial f/\partial x_1>0, \partial f/\partial x_2<0,$$

此时因子 x_1 与因子 x_2 对能见度的作用完全呈现相反的影响, 也就是说, 能见度的变化并不是由某一个单因子所决定的, 其因子是多方面的, 必须综合考虑动力、热力和水汽等多个因子的相互制约。

4 2005 年 1 月和 2006 年 1 月能见度的对比分析

根据图 2 资料分析结果，可见 2006 年 1 月是北京机场高速公路月平均能见度最低的月份，但是 2005 年 1 月的能见度却较高，同样是冬季的相同月份，能见度有如此大的差别，这与气象要素场的不同密切相关。

为了比较 2005 年和 2006 年 1 月的能见度、比湿、垂直速度以及稳定度的差异性，我们利用 NCEP 的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 格点资料（选取 850 hPa 垂直速度以及 500 hPa 和 850 hPa 上的位温资料）以及北京市观象台和昌平站的比湿资料（均为 6 h 一次，时间为 2、8、14 和 20 时），做出两个月这 4 个量的平均值（见表 2），并对它们分别做 t 检验，此时 t 检验临界值为 1.645，可以看出，2006 年 1 月的平均能见度还不到 2005 年 1 月平均能见度的一半，地面的平均湿度比 2005 年 1 月高 15%，而垂直下沉速度小一些，大气相对比 2005 年 1 月稳定，并且 t 检验结果表明 2 个月的能见度差异是非常大的，比湿和 850 hPa 垂直速度的差异也很大，只有稳定度的差异没有通过 t 检验。也就是

表 2 2005 年 1 月和 2006 年 1 月的平均能见度以及比湿、850 hPa 垂直速度和稳定度的对比分析

Table 2 Comparison of the average visibility, humidity, the vertical velocity at 850 hPa and the atmospheric stability in Jan 2005 and 2006

	能见度/m		比湿/%		850 hPa 垂直速度/ Pa · s ⁻¹	稳定度
	五元桥	温榆河	观象台站	昌平站		
2005 年 1 月	9250.7	8653.9	40.540	33.395	0.30253	−25.26
2006 年 1 月	4191.7	3995.7	56.282	48.048	0.14264	−24.61
t 检验	56.067	52.7	−5.8348	−6.845	4.1682	−1.265

表 3 2006 年 1 月能见度等级与对应气象要素的特征

Table 3 Classification of the visibility and the characteristic of the corresponding meteorological factors in Jan 2006

能见度等级		湿度		风速		温度	
		区间/%	频率/%	区间/m · s ⁻¹	频率/%	区间/℃	频率/%
1	$V<50\text{ m}$	100	100	0.3~1	100	−7~−3.5	100
2	$50\text{ m}\leq V<200\text{ m}$	100	100	0.5~1	100	−7~−4	83
3	$200\text{ m}\leq V<1000\text{ m}$	75~100	68	0.3~1	73	−5~−0.5	69
4	$1000\text{ m}\leq V<4000\text{ m}$	35~80	70	0.5~1.5	81	−5~−1.5	69
5	$4000\text{ m}\leq V<10000\text{ m}$	15~55	73	0.5~1.5	72	−4~4	68
6	$10000\text{ m}\leq V<20000\text{ m}$	14~25	73	1~2.5	73	−6~5.5	70
7	$V\geq 20000\text{ m}$	14~20	84	1~2.5	80	−3~6	72

说，造成 2005 年 1 月和 2006 年 1 月能见度差异的主要原因是垂直速度和水汽的差异，即垂直下沉运动时，水汽易干燥，比湿较小，能见度较高，故 2005 年 1 月能见度比 2006 年 1 月高。

5 2006 年 1 月能见度的分析

鉴于低能见度的发生对人类经济和社会活动有更为重要的影响，下面针对 2006 年 1 月不同能见度等级下的气象要素特征进行分析。

5.1 不同能见度分级和对应气象要素的区间分布及其物理分析

根据国内外经验和高速公路管理部门提供的资料，并综合考虑了气象部门对能见度的划分：文献 [23] 把高速公路能见度分为 7 个等级（见表 3），其中 1~3 级为低能见度，4~6 级为中能见度，7 级为高能见度。当大气能见度在 50 m 以内时，高速公路关闭；能见度在 50 m 以外、200 m 以内时车辆可照常行驶，但需对车辆进行限速（时速不超过 20 km）。因此 200 m 以下的能见度在实际工作中，是我们最为关注的。而在研究工作中，各种等级的能见度都很重要，因为通过对较高能见度出现时的特征及影响因子分析与较低

能见度出现时的影响因子的对比,能够在实际工作中更好地预报出低能见度。

通过对月平均能见度最低月 2006 年 1 月的能见度资料分析,我们得出了不同能见度等级对应的气象要素的区间分布。其中区间表示在不同级别的能见度下,各个气象要素主要集中的范围,而频率则是在所划分的气象要素区间内,各级能见度出现的比例,该表的物理意义以 3 级能见度情况下的湿度为例来说明,200~1 000 m 的能见度有 68%集中在湿度为 75%~100%区间,也即说明 3 级能见度主要是在 75%~100%这个湿度区间发生。

分析表 3 可以看到,1 和 2 级能见度的浓雾,其湿度为 100%,对应的温度都是低值,风速也较小;3 级能见度,湿度的主要分布区间为 75%~100%,影响它的不仅有雾,可能还有霾(霾的发

生对湿度的要求不是很高),并且其对应的温度有 69%是在 0℃以下,风速也较小;而 4 级以上的能见度对应的湿度都较低,温度既有 0℃以下的,也有 0℃以上的,风速也相对较大。

以上结果揭示了不同能见度的分布,与湿度、温度和风速几个气象因素存在着密切关系,下面就物理意义解释它们是如何影响能见度的。一般而言,当相对湿度大于 90%时,水汽发生凝结,边界层上容易形成雾,从而使得能见度减小;相反,当相对湿度降低到 70%以下时,一般凝结就不会发生,故能见度相对较高。而温度对于冬季低能见度的影响是由于当大气温度降低到 0℃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 e ,在 0℃以下时,会发生相对于冰面饱和而水面不饱和的情况,即 Bergeon 三相过程^[24] $E_i \leq e < E_w$ 。如果发生上述

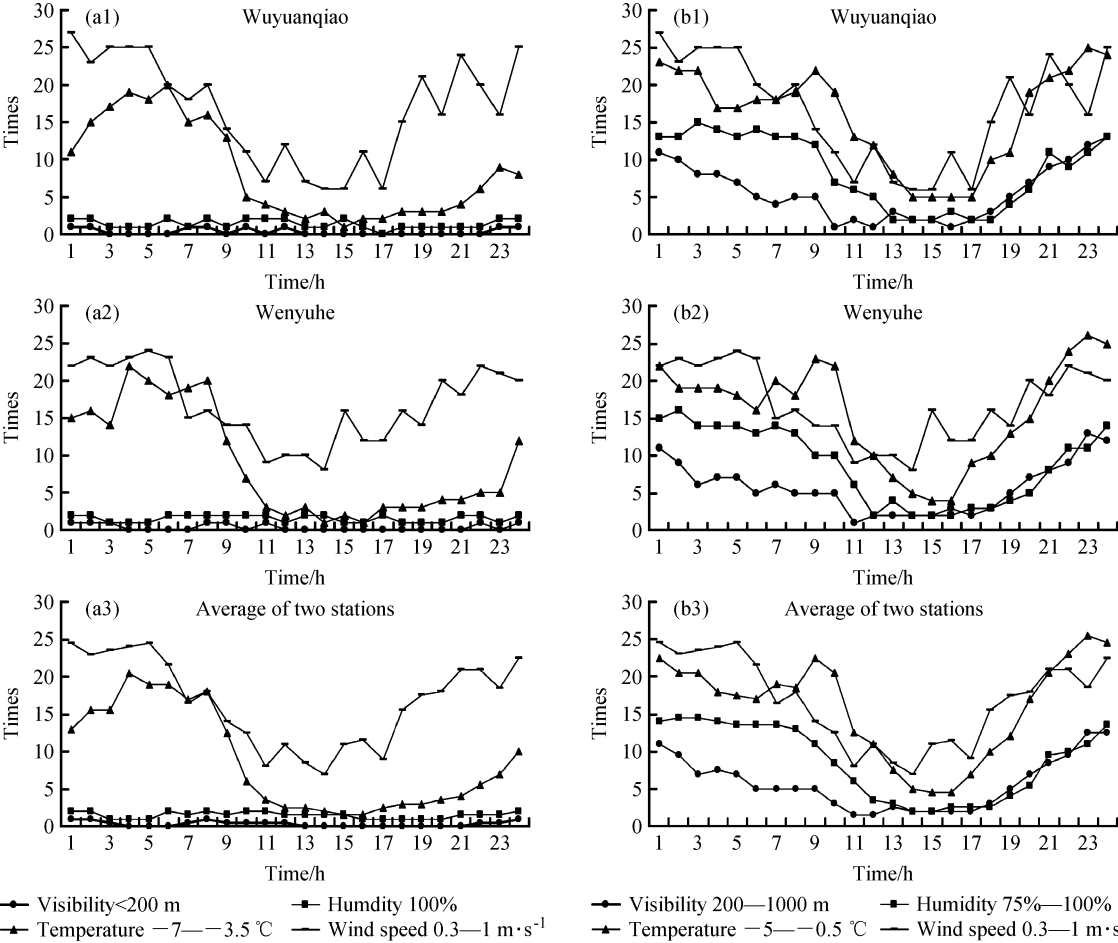


图 8 (a) 0~200 m 和 (b) 200~1 000 m 低能见度与对应气象要素出现的次数
Fig. 8 Times of the low visibility 0—200 m (a), 200—1 000 m (b) and the times of their corresponding meteorological factors

情况，则水汽会形成冷雾（冰晶雾），因此在冬季 0℃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。

最后讨论能见度与风速的关系：当风速小时，边界层中各种大气气溶胶不易扩散，使得能见度降低；反之，风速相对较大时，有利于雾和气溶胶的扩散；但应该注意，当超过临界风速时，风又能吹起空气中的污染物，反而会使得能见度降低。

5.2 2006 年 1 月各级能见度与对应气象要素出现的次数

由于单个月份上 1 和 2 级能见度出现的次数较少，因此我们把这两个等级的能见度合并在一起分析。从图 8 可以看出能见度小于 200 m 时都为浓雾，但低温和微风出现的频数要远大于低能见度出现的频数。低温、高湿和微风在 1 月经常出现，并且夜间出现频数较多，但要在其他条件的共同配合

下，才能有浓雾的产生。200~1 000 m 的低能见度出现次数与 3 个气象要素出现次数的变化非常一致，都呈 U 型分布，此时的能见度基本上是对应着高湿、低温和微风。并且 3 级能见度在 10~17 时这段时间出现次数最少，即在下午 6 时到第 2 天上午的 9 时左右经常出现，而在中午这段时间很少出现。这是由于夜间到凌晨温度较低，并且冬季易产生逆温层，逆温层的稳定层结，使得大气中的污染物聚集于低空难以扩散出去，如果再加上高湿、微风（从图中可以看到夜间和凌晨高湿、低温和微风出现的频数明显较白天多）等条件易产生雾，使得能见度较低；而日出以后随着太阳辐射的加强，空气湿度相对减小，逆温层遭到了破坏，风速比夜间大，对流加强，污染物可以得到及时的扩散，因此 3 级低能见度的日变化呈 U 型分布。

从图 9a 可以看到，4 级能见度在 9~11 时和

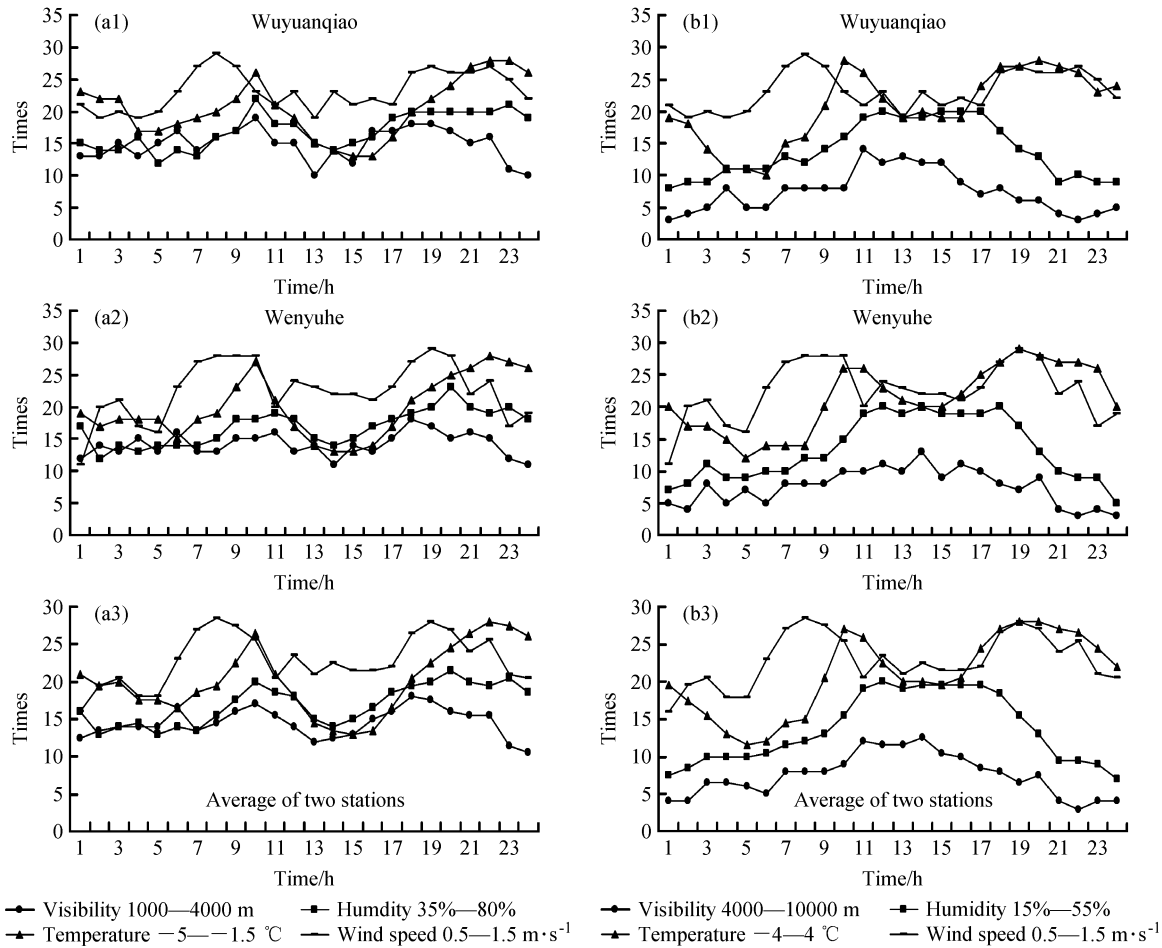


图 9 (a) 1 000~4 000 m 和 (b) 4 000~10 000 m 的能见度与对应气象要素出现的次数
Fig. 9 Times of the middle visibility 1 000—4 000 m (a), 4 000—10 000 m (b) and the times of their corresponding meteorological factors

17~20 时出现频数比较多,中午和凌晨比较少。能见度与 3 个气象要素的变化也是特别一致,变化相对比较平稳。

5 级能见度(见图 9b)与湿度出现次数比较一致,而风速和温度却不是很好,然而它们两个出现的次数比较一致。5 级能见度在中午 11 时至下午 4 时出现比较多,刚好与 3 级能见度的分布相反,是一个拱形分布,这与太阳辐射强度的日变化相同。

而对于 6 级能见度,从图 10 中可以看到湿度、风速与能见度出现次数变化比较一致,也就是能见度状况比较好时,对应的湿度也较低,风速也相对较大,此时能见度出现频数在白天的变化大致可以看作是呈拱型分布。

分析图 9 和 10 可以看到,大于 4 000 m 的较高

能见度在 11~17 时出现比较多,说明这一时段的能见度相对较高,这与太阳辐射在同期最强,大气易于流动和扩散有关,也与午后风速一般较大,污染物易扩散有关。

对于 20 000 m 以上的高能见度,由于 2006 年 1 月出现的较少,并且没有研究的实际意义,因此本文不做分析。

总体来看,对于 2006 年 1 月,在 200~4 000 m,能见度与各种气象要素的对应都比较好,集中出现在早晚,很少出现在中午,而 5、6 级相对较高的能见度则主要出现在中午(能见度>10 km)。

6 结论

本文从资料诊断和物理分析角度,揭示了北京高速路上的大气能见度演变与大尺度动力热力场的关系,并分析了各级能见度条件下对应的主要气象要素特征,对其做了初步的物理分析,研究指出:

(1) 在低频时间尺度,大气能见度的低频变化有如下的规律:850 hPa 垂直速度与能见度呈现同位相关系,其通过垂直速度影响水汽变化,进而通过水汽 Rayleigh 散射与水粒子 Mie 散射来影响大气能见度的变化,反映了大尺度动力因子与水汽共同作用影响了大气能见度变化。500~850 hPa 之间的位温差与能见度的反位相关系,反映了大气稳定度控制了大气边界层的分子扩散和湍流扩散,即通过热力因子影响大气能见度。但要注意,能见度的变化并不是由某一个单因子所决定的,必须综合考虑动力、热力和水汽等多个因子的相互制约。

(2) 造成 2005 年 1 月和 2006 年 1 月能见度差异的主要原因是两个月的垂直速度和水汽的差异,即垂直下沉运动时,水汽易干燥,比湿较小,能见度较高,故 2005 年 1 月能见度比 2006 年 1 月高。

(3) 对于 2006 年 1 月,200 m 以下能见度,其湿度为 100% 的浓雾,对应的温度都是低值,风速也较小;3 级能见度,湿度的主要分布区间为 75%~100%,并且其对应的温度有 69% 是在 0℃ 以下,这时水汽易发生相变,凝结成雾,由于还有一部分过程没有伴随水汽的相变,因此影响 200~1 000 m 低能见度的主要为雾,还有一部分可能是霾造成的结果;而 4 级以上的能见度对应的湿度都较低,温度既有在 0℃ 以下的,也有 0℃ 以上的,说明此时

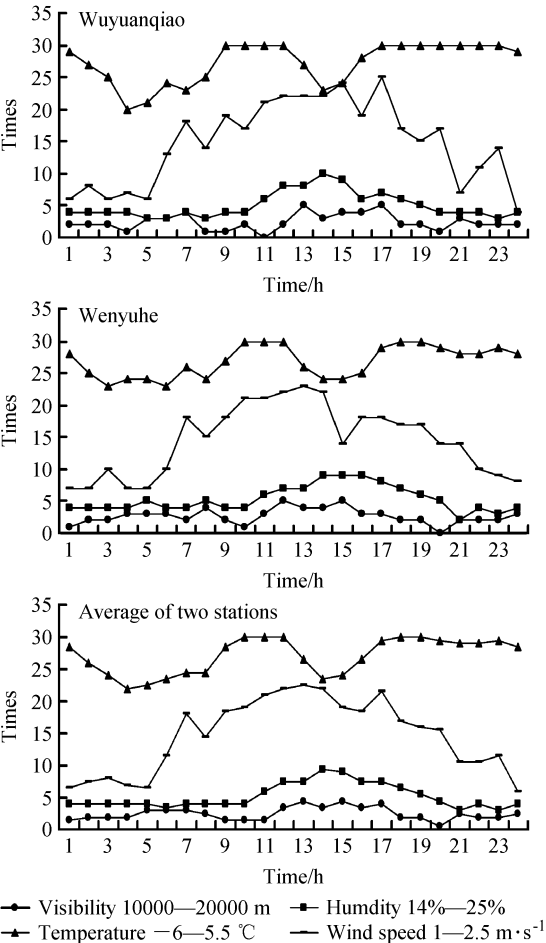


图 10 10 000~20 000 m 的能见度与对应气象要素出现的次数
Fig. 10 Times of the middle visibility 10 000—20 000 m and the corresponding meteorological factors

影响能见度的不仅有轻雾, 还有霾和空气污染物等。

(4) 2006 年 1 月, 200~1 000 m 低能见度的日变化呈 U 型分布, 并且 1 000 m 以下的低能见度一定对应了低温、高湿和微风, 但这只是必要条件, 并不是其发生的充分条件, 尤其是 200 m 以下的浓雾。而对于大于 4 000 m 的较高能见度, 其出现频数的日变化呈拱形分布, 这与太阳辐射强度的日变化有密切的关系。

致 谢 本文是在曾庆存院士的悉心指导下完成的, 在此向曾庆存院士致以深深的谢意。

参考文献 (References)

- [1] Naegle 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
- [2] Lee D O. Trends in summer visibility in London and southern England. *Atmos. Environ.*, 1983, **17**: 151~159
- [3] Lee D O. The choice of visibility statistics in the analysis of long term visibility trends in southern England. *Weather*, 1988, **43**: 332~338
- [4] 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
- [5] 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 Wei-han, Zhang Qi-peng, Shen Ji, et al. The relationship between visibility and air pollution in Beijing. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1986, **10** (2): 138~144
- [6] 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. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1986, **10** (4): 437~442
- [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* (in Chinese). Shanghai: East China Normal University Press, 1989
- [8] 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
- [9] Doyle M, Dorling S. Visibility trends in the UK 1950 — 1997. *Atmos. Environ.*, 2002, **36**: 3161~3172
- [10] 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
- [11] Tsai Y I. Atmospheric visibility trends in an urban area in Taiwan 1961 — 2003. *Atmos. Environ.*, 2005, **39**: 5555~5567
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 刘新强, 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
- [15] Crevier L P, Delage Y. Metro: a new model for road condition forecasting in Canada. *J. Appl. Meteor.*, 2001, **40**: 2026~2037
- [16] 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
- [17] 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
- [18] 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
- [19] 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
- [20] VAISALA. Surface analyzer for roads and runways ROSA, DM32 version user's guide. 2002
- [21] Hoskins B J, Pearce R P. *Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere*. New York: Academic Press, 1983. 56

~69

[22] Liou K N. *An Introduction to Atmospheric Radiation*. New York : Academic Press, 1980. 73~83

[23] 孟燕军, 赵习方, 王淑英, 等. 北京地区高速公路能见度气候特征. 气象科技, 2001, 4: 27~32

Meng Yanjun, Zhao Xifang, Wang Shuying, et al. The climatic characteristic of the visibility in Beijing expressway. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2001, 4: 27~32

[24] Mason B J. *The Physics of Clouds*. London: Oxford University Press, 1971. 1~20