气象学报

北京一次持续性雾霾过程的阶段性 特征及影响因子分析^{*}

曹伟华 梁旭东 李青春 CAO Weihua LIANG Xudong LI Qingchun

中国气象局北京城市气象研究所,北京,100089 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China 2012-07-05 收稿,2013-05-20 改回.

曹伟华,梁旭东,李青春.2013.北京一次持续性雾霾过程的阶段性特征及影响因子分析. 气象学报,71(5):940-951 Cao Weihua, Liang Xudong, Li Qingchun. 2013. A study of the stageful characteristics and influencing factors of a long-lasting fog/haze event in Beijing. *Acta Meteorologica Sinica*, 71(5):940-951

Abstract The meteorological influencing factors and aerosols characteristics of a long-lasting fog/haze event in Beijing during 3 -8 November 2009 were analyzed using the high resolution observations. Significant stage characteristics are revealed during the process, in which haze dominated in the early stage, then fog and haze alternated in the middle stage, and at last haze reappears and gradually dissipates with the decreasing of relative humidity (RH) and PM_{2.5} concentration. The results show that it is RH and PM_{2.5} concentration to determine visibility in the process, but the impacts of these two also show a stage characteristics. When visibility is less than 1 km, RH is an important factor to visibility. In most of the period, PM_{2.5} concentration plays an important role in reducing visibility. Calculations from the three scenarios show that the control of PM_{2.5} concentration will be crucial role in improving visibility.

Key words Fog and haze, Stage characteristics, Influencing factors, Relative humidity, PM2.5 concentration

摘 要利用北京地区高时间分辨率观测资料对 2009 年 11 月 3—8 日一次持续性雾霾天气过程中的气象因素和气溶胶演变特征进行了分析。结果表明,该次雾霾过程具有明显的阶段性特征,前期以霾为主,中期发展为雾霾交替,后期随着相对湿度减小再次转换为霾并最终消散。边界层逆温是低能见度过程形成的必要条件,但并不最终决定雾霾低能见度强度。相对湿度和 PM_{2.5}浓度是决定能见度大小的两个关键影响因子,对能见度的影响体现出阶段性特征。大部分时段 PM_{2.5}浓度是影响能见度的主要因子,当能见度小于 1 km 时,能见度变化更多受相对湿度影响。不同的情景计算表明,控制 PM_{2.5}浓度对于改善本次过程的能见度有重要作用。

关键词 雾霾过程,阶段性特征,影响因子,相对湿度,PM_{2.5}浓度 中图法分类号 P426.4 P427.1⁺22

1 引 言

城市雾霾天气过程是一种重要的城市气象灾 害,随着社会经济的逐步发展,雾霾天气的频繁发生 对城市大气环境、群众健康、交通安全、农业生产等 都带来了日益显著的影响。2011 年雾霾天气入选 中国十大天气气候事件,反映出社会公众对城市雾 霾天气关注程度的显著提高。然而,城市持续性雾 霾的形成机制复杂,目前对其形成机制认识尚未完 全明白。一方面,雾霾的形成与局地气溶胶条件和

^{*} 资助课题:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006011)、国家自然科学基金项目(41175014)、安徽省自然科学基金项目 (1308085MD55)和北京市自然基金项目(8122022)。

作者简介:曹伟华,主要从事城市气象灾害研究。E-mail:whcao@ium.cn

气象条件密切相关(孟燕军等,2000;王淑英等, 2003),分析表明,气溶胶浓度与雾霾的能见度存在 显著的相关关系(王京丽等,2006;Deng, et al, 2008;Zhang, et al, 2010b;Deng, et al, 2012),并 且,气溶胶浓度、化学成分、粒子大小、形状(Malm, et al, 1994;Pilinis, et al, 1995;Watson, 2002)以 及气溶胶吸湿性增长特征(颜鹏等,2008;毕凯等, 2012;Chen, et al, 2012)等因素都对辐射的散射和 吸收有影响,从而引起大气能见度的变化。另一方 面,雾霾过程的产生和维持也受边界层结构的影响, 李子华等(1993)、邓雪娇等(2007)、濮梅娟等 (2008)、杨军等(2010)针对重庆、南岭山地、南京等 地区雾(霾)的边界层特征进行分析,初步揭示了雾 霾过程所具有的边界层结构特征。

随着北京城市规模的不断扩大,雾霾天气在北 京频发,引起愈发广泛的关注。近年来,针对北京地 区雾霾过程的研究也逐步开展。张光智等(2005)、 刘熙明等(2010)对北京地区大雾期间边界层风场结 构特征进行了分析;周小刚等(2004)、何晖等 (2009)、Zhang等(2010a)利用不同观测资料对北京 大雾期间温度、湿度、风速及液态水含量的边界层分 布特征进行了分析和模拟;徐怀刚等(2002)通过分析 北京大雾过程的形成、维持和消散条件,揭示了大雾 对边界层污染状况的影响。这些研究在一定程度上 加深对北京地区雾霾过程的理解,但其主要侧重于典 型时次的大雾过程分析,而目前针对持续性雾霾过程 的阶段性特征以及影响因子的差异性分析尚少。

大部分严重雾霾天气过程往往具有持续性的特点,一旦形成很难快速消散(李江波等,2010),并表现出雾和霾交替混合的特点(杨军等,2010),此类持续性雾霾天气过程对城市环境和人体健康的危害尤为严重,且容易带来严重的社会负面影响。鉴于持续性雾霾天气社会影响的严重性,选取2009年11月3—8日北京地区出现的一次大范围持续性雾霾过程为研究对象,对其雾霾天气过程所表现出的阶段性特征以及各阶段影响因子的差异性特征进行分析,以期为更好地理解此类持续性雾霾天气过程的特征和形成机制提供依据。

- 2 资料与方法
- 2.1 资料

采用的观测资料包括:(1)北京海淀区北洼路宝

联体育公园内的宝联站每5 min 一次的 PM2.5 质量 浓度,观测仪器选用 TEOM 1400a 颗粒物监测仪, 仪器的样气温度加热到 50℃以保证气溶胶干燥 (Zhao, et al, 2009);(2)北京南郊观象台地基12通 道微波辐射计每1 min 一次观测的温度、相对湿度、 液态水含量数据(刘红燕,2011;何晖等,2009),微波 辐射计观测高度为 10 km,1 km 以下垂直分辨率为 100 m,1-10 km 垂首分辨率为 250 m;(3) 北京地 区维萨拉 ROSA 的 46 个道面气象站(图 1"•"符号 所示)每5 min 一次观测的能见度、相对湿度、温度、 风速和气压要素资料(Vaisala, 2002),为与 PM2.5 浓度和微波辐射计资料相互匹配,选取其中8个分 布于宝联站及南郊观象台周围的城区道面气象站 (图 1"×"符号所示)资料进行站点平均代表城区能 见度和气象条件。能见度、PM2.5浓度及地面气象条 件观测资料均处理成逐时均值数据。图1给出了各 种资料观测站点的空间分布。



Fig. 1 Locations of the meteorological stations used in this study

2.2 方 法

为便于讨论,首先对低能见度的雾霾阶段予以 界定。参考《霾的观测和预报等级》(QX/T113-2010)(中国气象局,2010)中雾霾的定义,确定的雾 和霾的界定标准是:在排除降水、沙尘暴、扬沙、浮 尘、烟幕、吹雪和雪暴等天气现象造成的视程障碍 后,对于能见度小于 10 km,空气相对湿度 \geq 95%的 天气现象定义为雾;能见度小于 10 km,相对湿度< 80%的则定义为霾;能见度小于 10 km,相对湿度为 80%一95%时,若 PM_{2.5}质量浓度大于 75 μ g/m³ 则定 义为霾,若 PM_{2.5}质量浓度不大于 75 μ g/m³ 则定 义为雾。

3 雾霾天气过程概述

2009年11月3—8日华北平原及周边辽宁、山 东一带出现了一次大范围的雾霾天气过程。3—5 日雾霾天气分布于河北中南部及北京东南部;6—7 日扩大到河北东北部、辽中半岛、山东半岛及渤海湾 地区;8日受南下冷空气影响,雾区范围在河北东北 部消散,北京雾区范围缩小并逐渐消散。

3.1 雾霾天气过程期间天气形势

2009年11月3日08时(北京时,下同),500、 700、850hPa天气形势图(图略)上,河套附近有高 空槽东移;4日08时北京受西北气流控制;5—7日 08时500hPa天气形势图上,中纬度地区处于贝加 尔湖附近低涡南部的偏西气流中,40°N以南有小 槽,北京处于40°N以南小槽前的偏南气流里;8日 08时高空槽发展东移,北京处于槽前偏南气流中。

850 hPa 形势图上,11月3—4日08时北京受 高压脊或脊前西北气流控制,有冷槽配合;5—6日 08时处于贝加尔湖附近低涡低槽底部的偏南气流 中;7日08时北部高空槽东移,河套地区有低压出 现,北京处于低压偏南气流中;8日河套地区有低涡 发展(有切变线),北京处于低涡切变线北部。此外, 3—5日08时北京处于冷温度槽中,6—8日08时北 京处于暖脊中,说明6—8日08时在对流层低层为 暖性的偏南气流。

从11月3-8日逐日08时地面天气形势图上

可见,3—6日08时42°N以北为低压带,42°N以南 为高压带,京津冀地区处于高压带北部两高压之间 的低压区中;7日08时蒙古低压向东南移动,北京 处于西北高压和东南高压之间低压区的低槽中;8 日08时北京北部有冷高压(主体偏东移动)南压,地 面出现回流形势。

3.2 地面能见度演变

北京是本次雾霾天气重点影响地区之一。11 月3日凌晨至8日晚,北京地区的能见度一直维持 在10 km 以下,整个雾霾过程约持续6 d,尤其是 1 km以下的低能见度阶段从 11 月 5 日晚开始一直 持续至8日早晨,累计持续时间60h左右。从本次 持续性雾霾过程中北京地区能见度在典型时次的空 间分布(图 2)可见,本次雾霾天气过程期间 1 km 以 下能见度的空间分布变化明显,雾霾过程于11月4 日 20 时在北京大兴东部发生,5 日 06 时扩展到北 京东南的大兴和通州东南部地区;5日20时雾霾范 围进一步扩大至北京海淀东南、石景山、丰台、朝阳 地区;6日06时其范围继续向东北部延伸,此时北 京东部大部分地区能见度均在1 km 以下;6 日 20 时,雾霾天气逐渐向西北方向推进,在房山以东、昌 平中东部、延庆东南局部、怀柔东南部地区能见度降 至1 km 以下,至7 日 06 时许,本次过程发展至全 盛,在北京东南部和东北部局部地区能见度降至 500 m 以下;随后,7 日 20 时,雾区自北京西北向东 南方向逐渐减退,能见度逐步恢复,雾霾开始逐渐消



图 2 2009 年 11 月 3—8 日的雾霾过程中北京地区典型时次能见度空间演变 Fig. 2 Spatial distribution of visibility in Beijing at the different times during the period under study

散,至8日08时,仅剩北京东南局部地区的能见度 仍保持在1km以下,其他地区的能见度都显著回 升;8日深夜以后北京地区能见度整体回升到10km 以上,本次持续性雾霾天气过程消散。

3.3 地面气象条件和气溶胶情况

地面能见度的演变受到地面气象条件和气溶胶 条件的共同影响。图3给出本次过程能见度与地面 气象因子(气压、温度、相对湿度和风速)和 PM_{2.5}浓 度的变化曲线,其中,PM_{2.5}浓度来自于宝联站(图 1),能见度、气压、温度、相对湿度和风速资料是分布 在宝联站周围的城区8个气象站资料的平均值。可 以看到,本次过程期间地面气压整体呈现由高降低 再升高的变化趋势,并且,始终维持一个较小的气压 梯度变化,相对湿度与能见度、地面温度则都保持较 好的反相位变化关系。同时,PM_{2.5}浓度整体呈先升 高后降低的变化特点,并基本保持在75 μg/m³ 以 上,在过程前期浓度持续升高,6日 20时达到 361 μ g/m³的最大值,之后 PM_{2.5}浓度随着雾霾的消散 而迅速减小。另外,本次过程中地面的平均风速偏 小(1 m/s 左右),过程风速稳定持续在 0.42— 1.43 m/s,风速的这一变化特征为本次雾霾天气过 程的持续稳定提供了有利条件。综合各地面要素的 时间演变特征表明,在持续较低的气压和较小的地 面风速的大背景下,PM_{2.5}浓度的稳定升高,以及入 夜后气温降低而相对湿度增大的地面气象条件,是 本次持续性雾霾天气过程产生和维持的重要原因。

综合能见度、相对湿度和 PM_{2.5}浓度等要素的 演变表明,本次雾霾天气过程具有明显的阶段性特 征。3 日凌晨至 6 日 00 时能见度基本小于 10 km, 相对湿度小于 95%, PM_{2.5}浓度基本在 75 µg/m³ 以 上,体现出典型的霾天气特征。6—8 日,低能见度 状况进一步得以维持,中午及午后温度较高,相对





from the eight AWSs in Beijing during 3-8 November 2009

湿度较小,能见度约1km,基本维持霾天气特征,而 在凌晨,由于温度偏低相对湿度在95%以上,能见 度平均小于500m甚至不足200m,表现为典型大 雾天气特征(具体时段为6日01—06时,6日23 时—7日08时,8日03—06时)。可见,雾和霾的交 替是本次持续性低能见度过程的一个重要特征。

为更加细致地分析本次长时间持续的雾霾交替 过程,根据上述雾和霾的定义,将本次过程在时间上 划分为3个阶段:即11月3日凌晨—6日00时的 前期霾阶段(Haze1)、6日01时—8日06时许的中 期雾霾混合阶段(Fog&Haze2),8日06时之后的后 期霾阶段(Haze3)(图3),根据能见度和相对湿度的 量值,又将雾霾混合阶段(Fog&Haze2)细分为雾过 程(Fog)和霾过程(Haze2),阶段的划分是为了更好 地理解本次过程不同发展时期的演变特征。

3.4 边界层逆温结构特征

边界层逆温是雾霾天气过程的一个重要特征,

逆温层的形成增加了边界层的大气稳定度,为雾霾 的形成和发展提供了重要的边界层条件。图 4 给出 了本次雾霾过程中由北京南郊观象台地基微波辐射 计的温度观测数据计算的近地层逆温层厚度与逆温 强度随时间变化(微波辐射计站点见图 1),其中,阴 影上边界表示逆温层顶所在高度,阴影下边界表示 逆温层底所在位置,阴影厚度即是逆温层厚度,逆温 强度是逆温层顶温度与逆温层底温度的差值与逆温 层厚度之比,在图中用不同颜色表示逆温强度大小。 可以看出,在整个雾霾过程中,能见度和贴地逆温层 具有良好的对应关系。在每日的凌晨-08时许出 现贴地逆温层,此时逆温层顶较高,对应地面能见度 往往为每日的最低值;在每日的09-18时许,受太 阳辐射对地表增温的影响,贴地逆温层消失或逐渐 抬升为不贴地逆温层,此时对应地面能见度为每日 的最大值。贴地逆温的形成与上下层气温下降速率 不同有关。在夜间,地表长波辐射冷却效应使得地



》它的影衣小连温强度(C/(100 m/);黑已曲线衣小能见)

左侧纵轴表示逆温层顶和逆温层底所在位置)



(The color shadings denote inversion intensity ($^{\circ}C/(100 \text{ m})$); The black curves denote visibility trend in this period; The height of the left y-axis represents the bottom/top position of inversion)

表气温下降速率最快、降温幅度最大,因此,贴地逆 温往往在傍晚18时以后形成,此时地面能见度从白 天的最高值逐渐下降;在每日20时以后,随着辐射 降温效应的加强,近地层逆温逐渐发展抬升形成深 厚的贴地逆温层,并持续至次日早晨,此时地面能见 度降至当日最低水平。

还可以看到,逆温强度与能见度也存在一定的 对应关系,但能见度的大小并不完全取决于逆温强 度的大小。5日凌晨的逆温在整个过程中最强,约 为1.5℃/(100 m),但此时贴地逆温层较薄,对应的 能见度约为1.5 km;而7日凌晨的逆温强度不大, <1℃/(100 m),但整个逆温层却较为深厚,维持在 800 m 左右,此时对应的能见度不足 500 m。这一 结果表明,逆温强度只是本次低能见度过程产生的 必要条件,其主要反映大气稳定程度,而并不是能见 度的决定性条件,逆温形成后,在不同阶段决定能见 度大小的影响因子应该有所不同。因此,为更好地理 解这次雾霾过程形成机制,下文将对本次过程不同阶 段中决定能见度变化的关键因子进行重点分析。

4 雾霾天气过程能见度的影响因子分析

雾霾天气过程中能见度与地面气象要素和气溶 胶浓度密切相关,为确定本次雾霾天气不同阶段的主 要影响因子,首先对整个雾霾天气过程中地面气象因 子、PM_{2.5}浓度和能见度的关系进行相关分析(表 1)。 可以看出,能见度与相对湿度、PM_{2.5}浓度以及气压、 风速都具有较强相关,并通过了 99%的信度检验。 由于整个雾霾天气过程中气压变化平稳,气压梯度较 小,风速稳定维持在 1 m/s 左右,因此,气压和风速对 能见度的影响更多地体现在为雾霾天气过程中低能 见度的形成提供一个相对稳定且水平输送较小的天 气背景场,反映出气压和风速与能见度在天气尺度上 变化的一致性。相比而言,相对湿度和 PM_{2.5}浓度与 能见度的关系则更为密切,相关系数分别为 0.75 和 0.78,这说明相对湿度和 PM_{2.5}浓度是本次雾霾过程 中直接影响能见度水平的两个主要因子。

表1 能见度与相对湿度、PM2.5浓度和风速的相关系数

ble 1	The correlation	coefficients fo	r visibility to	relative humidity,	$PM_{2.5}$	concentration and wind speed	
-------	-----------------	-----------------	-----------------	--------------------	------------	------------------------------	--

	能见度	气压	温度	相对湿度	风速	PM2.5浓度
能见度	1.00	0.72(**)	- 0. 09	-0.75(**)	0.58(**)	-0.78(**)
气压		1.00	-0.59(**)	-0.32(**)	0.19(*)	-0.87(**)
温度			1.00	-0.51(**)	0.46(**)	0.39(**)
相对湿度				1.00	-0.79(**)	0.48(**)
风速					1.00	-0.27(**)
PM2.5浓度						1.00

注:** 表示达到 99%的置信度,*达到 95%的置信度。

Ta

为更好地理解相对湿度和 PM_{2.5}浓度在不同雾 霾天气阶段与能见度的关系,图 5 分别给出了相对 湿度和 PM_{2.5}浓度在各阶段与能见度的散点分布, 其中 PM_{2.5}浓度来自于宝联站,而相对湿度和能见 度是 8 个道面自动站的站点平均值。可清楚看到, 能见度的变化与相对湿度和 PM_{2.5}浓度的变化均呈 反比关系,雾霾天气过程中能见度的变化与相对湿 度和 PM_{2.5}浓度的变化表现出良好的阶段性对应特 征。在前期霾阶段(Hazel),能见度从 8 km 以上下 降到 1 km 左右,变化幅度很大,此阶段近地面相对 湿度不大(90%以下),水汽尚未饱和,PM_{2.5}浓度处 于不断积累升高时期,能见度受相对湿度和 PM_{2.5} 浓度变化的共同影响。在中期的雾霾混合阶段 (Fog& Haze2),能见度相对较低,基本维持在 1 km 以内,PM_{2.5}浓度达到一个很高的水平,基本保持在 200 μg/m³ 以上,此时能见度与 PM_{2.5}浓度散点拟合 的斜率基本为 0,说明雾霾混合阶段(Fog&Haze2), 当空气中气溶胶粒子浓度升高到一定水平后,能见 度几乎不受 PM_{2.5}浓度变化影响,而随着相对湿度 增大能见度线性减小。后期霾阶段(Haze3)是能见 度逐渐增大的一个阶段,此时能见度分别随着相对 湿度和 PM_{2.5}浓度降低而增大,表明消散阶段能见 度的回升是由于相对湿度减小和 PM_{2.5}浓度降低共 同作用的结果。

上述分析表明本次过程相对湿度和 PM_{2.5}浓度 对能见度的影响不仅具有阶段性特征,还具有明显 的综合效应。为了深入揭示不同阶段相对湿度和 PM_{2.5}浓度对能见度影响的重要程度,图 6 给出能见 度随相对湿度和 PM_{2.5}浓度同时变化的演变曲线和 对应的能见度等值线。可以看出,当能见度在 1 km





Fig. 5 Hourly mean visibility from the eight AWSs versus relative humidity (a) and the visibility versus hourly mean PM_{2.5} concentration from Baolian station (b) during 3 – 8 November 2009





 $PM_{\rm 2.5}$ concentration during 3-8 November 2009

(The dotted lines denote the visibility contour, and the solid connecting lines represent the evolution of the positions of the scatters of relative humidity vs. $PM_{2.5}$ concentration)

以上时,主要处于前期的霾阶段(Hazel),能见度相对于 PM2.5浓度的梯度变化要明显大于随相对湿度

的梯度变化,此阶段相对湿度基本维持在 95%以下,水汽未达到饱和,相比而言,PM_{2.5}浓度对能见度

的影响要大于相对湿度的影响,此时 PM_{2.5}浓度的 增加是能见度降低的主要因素。当能见度逐渐下降 并接近1 km 以下时,主要处于中期雾霾混合阶段 (Fog&Haze2),此时能见度相对于相对湿度和 PM_{2.5}浓度的梯度逐渐发生转变,前者逐步增大而后 者逐步减小,当能见度降到1 km 以下时,能见度相 对于相对湿度的梯度超过了相对于 PM_{2.5}浓度的梯 度,反映出当相对湿度和 PM_{2.5}浓度都上升到一定 量值后,PM_{2.5}浓度的影响逐渐减弱,而相对湿度的 影响反而逐渐增强,并成为影响能见度变化的主导 因子。在后期霾阶段(Haze3),能见度随着相对湿 度和 PM_{2.5}降低迅速增大,散点轨迹几乎沿着能见 度等值线的梯度方向,表明此阶段由相对湿度降低 和 PM_{2.5}浓度减小共同作用提升了大气能见度,两 者对能见度的提升作用相当。

综合整个过程可以看出,当相对湿度不太大时 (约 90%以下),即在大部分时期 PM_{2.5}浓度对能见 度的作用要大于相对湿度,是影响能见度变化的主 要因子;而当相对湿度逐渐增大,相对湿度对能见度 的影响程度增强,以致能见度在1 km 以下时,相对 湿度是两者中影响能见度变化的主要因子;在雾霾 的消散阶段,相对湿度和 PM_{2.5}浓度对能见度的影 响程度相当。

5 霾阶段能见度的影响及计算

5.1 能见度理论计算模型

能见度与消光系数满足 Koschmieder 方程 (Kunkel,1984),基于该方程,Vaisala FD12P User's Guide(2002)给出的能见度与大气消光系数经 验关系为

$$V = \frac{3}{K_{\rm ex}} \tag{1}$$

式中,K_{ex}为大气总消光系数(km⁻¹),V为能见度 (km)。大气总消光系数由空气分子散射系数、气体 (O₃、NO₂、SO₂)吸收系数、颗粒物散射和吸收系数 组成。北京地区颗粒物散射消光对大气总消光系数 贡献最大(宋宇等,2003),其中,细粒子的散射作用 要明显大于粗粒子。

相关研究及上述分析表明,霾阶段,PM2.5浓度 和大气相对湿度是制约大气能见度的关键影响因 子。由于通常采用干、湿气溶胶的散射系数比表示 吸湿性的增长函数,因此,大气的消光系数可表示为

$$K_{\text{ex}-f} = K_{\text{ex}-\text{dry}} \times G_f \tag{2}$$

式中, K_{ex-f}和K_{ex-dry}分别表示 PM_{2.5}在相对湿度为 f 的环境大气和"干"环境大气(通常把 f < 40%作 为"干"大气, Xu, et al, 2002)的消光系数, G_f表示 气溶胶消光系数的亲水增长函数。下面分别讨论 "干"大气中的消光系数和本次过程的气溶胶消光系 数的亲水增长函数。

(1)PM_{2.5}浓度对能见度的影响

"干"大气中,气溶胶质量浓度是影响大气消光 系数的重要因素。为了探析"干"气溶胶浓度与大气 消光系数的关系,利用本次过程的逐时观测资料,提 取相对湿度小于 40%的实测样本,经统计分析得到 $PM_{2.5}浓度与大气消光系数的关系(图 7)。可以看$ $出,"干"大气中,<math>PM_{2.5}浓度与消光系数呈现正相关,$ $决定系数 <math>R^2 = 0.83$,消光系数随干 $PM_{2.5}$ 浓度 $(c_{PM_{2.5}})$ 而线性增大,导致大气能见度降低,两者拟 合关系可表示为

$$K_{\rm ex-dry} = 0.0062c_{\rm PM_{2.5}} + 0.1174 \tag{3}$$



(2)PM_{2.5}的吸湿性增长对能见度的影响

随着相对湿度增大,气溶胶中的亲水成分将导 致吸湿性增长,这将增大气溶胶的消光能力,从而致 使大气能见度降低。针对北京地区相对湿度对气溶 胶消光能力的影响,颜鹏等(2008)对北京大气气溶 胶散射系数亲水增长进行实测,得到污染型、清洁型 的散射系数亲水增长函数。本次雾霾过程 PM_{2.5}浓 度高、污染严重,在此引用颜鹏等(2008)给出的污染 型亲水增长拟合关系表示本次过程的亲水增长函数

 $G_f = 0.8513 + 0.01021(1-f)^{-1} +$

$$0.0009(1-f)^{-2} \tag{4}$$

式中, f为相对湿度。

5.2 能见度的模拟分析

对能见度的模拟是根据实际大气的气溶胶浓度 和真实相对湿度利用理论模型进行计算,反映实际 PM_{2.5}浓度及相对湿度的变化对于能见度的影响。 根据式(2)—(4)计算大气消光系数,并通过式(1)转 换为理论能见度,结果如图 8 中红虚线所示。能见 度模拟值平均为 2.6 km,而实测能见度为 2.3 km, 二者的均方根误差为 0.8 km,相关系数 R = 0.89, 模拟值与实测值整体变化趋势一致、量值接近,在入 夜至早晨相对湿度较大的时段,能见度计算值与实 测值更为接近,总体来说,模拟能见度较好地反映了 实测能见度的变化幅度和演变趋势,说明本文所构 建的能见度理论模型是可行的。

综合以上分析,可见本文所建立的能见度理论 计算模型对本次过程霾阶段大气能见度的模拟是有 效的,该模型可较好地反映出水汽尚未饱和情况下 的大气能见度水平。同时可以看出,PM2.5浓度和相 对湿度是影响大气能见度的两个重要因子,并在不 同时段有所差异。中午前后大气相对湿度较低,此 时气溶胶浓度是影响大气能见度的主要因素;傍晚 至入夜的阶段,气溶胶吸湿增长作用对能见度的影 响尤为突出,随着相对湿度增大,不仅气溶胶浓度影 响着消光能力,同时由于气溶胶中亲水性化学成分 (如硫酸盐、硝酸盐和一些有机物等)吸湿增长,造成 对大气的散射能力增强,最终综合导致能见度降至 较低水平。

5.3 不同情景的能见度计算分析

在基于理论模型模拟分析的基础上,进一步讨论两种假设情景下的能见度变化,第1种情景是假设 PM_{2.5}保持实际浓度,而相对湿度控制在40%;第2种情景则是假设 PM_{2.5}控制到较低浓度,而相对湿度保持真实大气湿度,并将两种情景下的平均能见度与实测和模拟结果进行比较(表2)。

情景 1:控制相对湿度在 40%,保持实际 PM_{2.5} 浓度。该情景反映了"干"大气条件下气溶胶对能见 度的影响。利用式(2)—(4)计算 11 月 3—8 日的大 气消光系数,并通过式(1)转化为能见度计算值(图 8 蓝色虚线)。可以看出,3—8 日情景 1 的能见度与 实测能见度及模拟能见度的演变趋势一致,整体呈 下降趋势,与实测值的相关系数 R = 0.82。从该情 景能见度相对于实测值的改变幅度来看,在入夜及 早晨阶段,能见度比实测值提高较大,而中午阶段提



(the shade represents fog period)

高相对较小(图 8 蓝色虚线),这与模拟能见度特点 恰好相反,这是由于相对湿度一直保持在 40% 而忽 略了相对湿度变化导致的结果,可见在傍晚至早晨 相对湿度是影响大气能见度的主要因素。从不同阶 段来看,本情景的过程平均能见度为 3.3 km,比实 测值提升了 1.0 km,在前期(Haze1)、中期(Haze2) 和后期(Haze3) 霾阶段分别提升了 1.1、0.7 和 1.6 km,表明控制相对湿度在不同霾阶段下的能见 度提升效果是基本相当的。

情景 2:控制 PM_{2.5}浓度,保持实际相对湿度。 真实大气的相对湿度并不容易人为改变,而 PM_{2.5} 浓度通过采取减少污染物排放等措施可以得到控 制。为了分析控制 PM_{2.5}浓度对能见度的影响,参 考环境空气污染物中 PM_{2.5}浓度的限值标准(《环境 空气质量标准》(GB3095-2012)),取 PM_{2.5}浓度的二 级限值(75 μ g/m³),并保持本次过程的实际大气相 对湿度,利用式(1)—(4)计算情景 2 的能见度(图 8 绿色实线),该情景下能见度与实测值的相关系数 R=0.62,能见度平均为 3.8 km,比实测平均提高 1.5 km,尤其是中期霾阶段(Haze2)能见度提高最 大,比实测能见度提高了 2.7 km,同时比情景 1 的 能见度提高了 2.0 km(表 2)。说明控制 PM_{2.5}浓度 对于改善大气能见度的效果明显,尤其相对湿度较 大时,抑制气溶胶浓度对大气能见度改善具有更显 著效果。同时也说明了高浓度的气溶胶条件是促使 本次低能见度过程长时间维持的一个重要原因。

表 2 不同情景的平均能见度结果比较

Table 2 Comparison of the average visibility in the different scenarios						
时段	实测(km)	模拟(km)	情景 1(km)	情景 2(km)	实测相对湿度(%)	
全过程	2.3	2.6	3.3	3.8	71	
Haze1	3.0	3.3	4.1	4.0	68	
Haze2	0.8	1.0	1.5	3.5	80	
Haze3	2.3	3.5	3.9	4.1	69	

注:"全过程"是指包括 Haze1、Haze2 和 Haze3 的霾阶段。

6 雾阶段能见度的影响及计算

本次过程部分时间呈现出雾的特征。在雾阶段 相对湿度较大(95%以上),水汽发生凝结,有大量微 小水滴悬浮于近地面的空气中,导致能见度降至 1 km以下。在雾的数值研究中,通常能见度通过液 态水含量(LWC)的经验消光公式转化而来。在不 同气象条件下此类经验公式往往存在差异(表 3), 其中,经验式(1)是 Kunkel(1984)在平流雾条件下 观测的结果,该式在北京大雾数值研究中广泛使用 (Zhang, et al, 2010a;何晖等, 2009),而经验式(2) 是基于雾霾混合过程的结果,该式的气象条件与本 次雾期间高湿且高浓度气溶胶条件更加接近。为了 便于比较,分别给出两种经验式的能见度计算结果 (图 9)以及与实测值的均方根误差(表 3),可以看 出,Pinnick等(1978)公式的均方根误差比Kunkel (1984)公式的误差要小465 m,这主要是由于本次 过程雾期间水汽饱和的同时也伴随着高浓度气溶 胶,该背景条件与Pinnick等(1978)的观测条件比 较接近,因此,采用雾霾观测条件的经验公式误差较 小。综合来看,液态水含量计算的理论能见度与实 测能见度变化趋势一致,两者误差均不很大,这说明 由于相对湿度增大、水汽发生凝结是影响本次雾阶 段大气能见度下降的重要因素。不同公式的精度差 异则反映出高浓度的气溶胶条件加重了雾阶段的能 见度恶化,是影响雾期间能见度降低的另一因素。

表 3 两种经验消光系数(β)的对比

Table 3	Comparison between the two extinction coeffici	ents
类别	表达式 过	L程 均方根误差
经验式(1)(Kunkel, 1984)	$\beta = 144.7W^{0.88}$ Ψ	流雾 655 m
经验式(2)(Pinnick, et al, 1	978) $\beta = 145W^{0.63}$ 雾霾	社程 190 m

注:W 为液态水含量。





Fig. 9 Variations of the hourly mean LWC at the 100 m height, the calculated visibility from LWC and the observed visibility (the shade represents haze period)

7 结 论

对 2009 年 11 月 3—8 日北京一次持续性雾霾 过程的气象因素、气溶胶、边界层演变特征,以及不 同阶段的影响因子进行了分析,研究发现:

(1)本次持续性雾霾天气过程具有明显的阶段 性特征。过程前期(11月3—5日)相对湿度较小, 表现为以霾为主的阶段,中期(6日至8日中午)随 着相对湿度增大,逐渐转为雾霾交替阶段,后期(8 日上午以后)随着相对湿度减小又转换为霾阶段并 逐渐消散。

(2)持续低压和较小的地面风速以及 PM_{2.5}浓 度的稳定上升和相对湿度增大为本次雾霾天气过程 的形成和发展提供了有利条件。边界层逆温的存在 是雾霾低能见度过程形成的必要条件,贴地逆温层 与地面能见度具有良好的对应关系,但并不是决定 雾霾能见度强度的决定性因素。

(3)相对湿度和 PM2.5浓度是决定能见度大小的两个关键影响因子,其对能见度的影响体现了明显的阶段性特征。当相对湿度不太大(约 90%以下)时,PM2.5浓度对能见度的作用要强于相对湿度, 是影响能见度变化的主要因子;而随着相对湿度的 增大和能见度的降低,相对湿度对能见度的影响相 对增强,当能见度降至1 km 以下时,相对湿度是两 者中影响能见度变化的主要因子,在雾霾消散阶段 两者对能见度的影响程度相当。高浓度的气溶胶条 件是促使本次过程长时间维持的一个重要原因。

(4)基于 PM_{2.5}浓度和相对湿度因子构建了霾 阶段的能见度理论计算模型,模拟结果表明,该模型 可以较好地反映大气能见度水平,并揭示 PM_{2.5}浓 度和相对湿度对霾的能见度影响规律。两种情景的 计算结果表明,在不同霾阶段控制相对湿度对于能 见度的提升程度基本相当,而在相对湿度较大条件 下,控制 PM_{2.5}浓度对改善大气能见度具有更显著 的效果。

(5)雾阶段两种气象条件下的经验公式计算结 果表明,相对湿度升高造成水汽凝结是影响本次雾 阶段大气能见度下降的重要因素,同时也揭示了气 溶胶条件加重了雾阶段的能见度恶化,是影响雾期 间能见度降低的另一因素。

致谢:感谢赵秀娟博士和刘红燕博士在气溶胶和微波 辐射计资料使用分析方面的帮助。

参考文献

毕凯,王广河,毛节泰.2012.2009年上海浦东新区能见度资料的 深度分析:兼论高时间分辨率地面观测资料的应用.气象,38 (2):220-227

- 邓雪娇,吴兑,唐浩华等.2007. 南岭山地一次锋面浓雾过程的边 界层结构分析. 高原气象,26(4):881-889
- 何晖,郭学良,刘建忠等.2009.北京一次大雾天气边界层结构特征及生消机理观测与数值模拟研究.大气科学,33(6):1174-1186
- 李子华,涂晓萍. 1993. 重庆市区冬季边界层气象要素的时空分布 及与成雾的关系. 南京气象学院学报,16(3): 329-333
- 李江波,赵玉广,孔凡超等.2010.华北平原连续性大雾的特征分 析.中国海洋大学学报,40(7):15-23
- 刘红燕. 2011. 三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度分析. 气 象学报, 69(4): 719-728
- 刘熙明,胡非,邹海波等.2010.北京地区一次典型大雾天气过程 的边界层特征分析.高原气象,29(5):1174-1182
- 孟燕军,王淑英,赵习方.2000.北京地区大雾日大气污染状况及 气象条件分析.气象,26(3):40-42
- 濮梅娟,张国正,严文莲等. 2008. 一次罕见的平流辐射雾过程的 特征. 中国科学 D辑(地球科学), 38(6): 776-783
- 宋宇,唐孝炎,方晨等. 2003. 北京市能见度下降与颗粒物污染的 关系.环境科学学报,23(4):468-471
- 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
- 徐怀刚,邓北胜,周小刚等.2002.雾对城市边界层和城市环境的 影响.应用气象学报,13(特刊):170-176
- 颜鹏, 潘小乐, 汤洁等. 2008. 北京市区大气气溶胶散射系数亲水 增长的观测研究. 气象学报, 66(1): 111-119
- 杨军,王蕾,刘端阳等.2010.一次深厚浓雾过程的边界层特征和 生消物理机制.气象学报,68(6):998-1006
- 张光智, 卞林根, 王继志等. 2005. 北京及周边地区雾形成的边界 层特征. 中国科学 D 辑(地球科学), 35(增刊): 73-83
- 中国气象局. 2010. QX/T113-2010 霾的观测和预报等级. 北京:气象出版社
- 周小刚, 王强, 邓北胜等. 2004. 北京市一次大雾过程边界层结构 的模拟研究. 气象学报, 62(4): 468-475
- Chen J, Zhao C S, Ma N, et al. 2012. A parameterization of low visibilities for hazy days in the North China Plain. Atmos Chem Phys, 12(11): 4935-4950

- Deng X J, Tie X X, Wu D, et al. 2008. Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta (PRD) region, China. Atmos Environ, 42(7): 1424-1435
- Deng X L, Shi C E, Wu B W, et al. 2012. Analysis of aerosol characteristics and their relationships with meteorological parameters over Anhui province in China. Atmos Res, 109-110, 52-63
- FD12P User's Guide. 2002. Available at: http://www.vaisala.com/Vaisala% 20Documents/User% 20Guides% 20and% 20Quick% 20Ref% 20Guides/FD12P% 20User% 20Guide% 20in%20English.pdf
- Kunkel B A. 1984. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models. J Climate Appl Meteor, 23 (1): 34-41
- Malm W C, Sisler J F, Huffman D, et al. 1994. Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States. J Geophys Res, 99(D1): 1347-1370
- Pinnick R G, Hoihjelle D L, Fernandez G, et al. 1978. Vertical structure in atmospheric fog and haze and its effects on visible and infrared extinction. J Atmos Sci, 35(10): 2020-2032
- Pilinis C S, Pandis S N, Seinfeld J H. 1995. Sensitivity of direct climate forcing by atmospheric aerosols to aerosol size and composition. J Geophys Res, 100(D9): 18739-18754
- Vaisala. 2002. Surface analyzer for roads and runways ROSA, DM32 version user's guide
- Watson J G. 2002. Visibility: Science and regulation. J Air Waste Manage Assoc, 52(6): 628-713
- Xu J, Bergin M H, Yu X, et al. 2002. Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangtze delta region of China. Atmos Environ, 36(2): 161-173
- Zhao X J, Zhang X L, Xu X F, et al. 2009. Seasonal and diurnal variations of ambient PM_{2.5} concentration in urban and rural environments in Beijing. Atmos Environ, 43(18): 2893-2900
- Zhang C L, Zhang L N, Wang B Z, et al. 2010a. Analysis and modeling of a long-lasting fog event over Beijing in February. Acta Meteor Sinica, 24(4): 426-440
- Zhang Q H, Zhang J P, Xue H W. 2010b. The challenge of improving visibility in Beijing. Atmos Chem Phys, 10(16): 7821-7827