

蔡子颖,刘爱霞,韩素芹,等. 2014. 天津低能见度特征初探. 气象,40(1):114-118.

天津低能见度特征初探^{*}

蔡子颖 刘爱霞 韩素芹 姚青 王佳

天津市气象科学研究所,天津 300074

提 要: 本文通过对天津气象站历史能见度资料和边界层观测站能见度、相对湿度、气溶胶观测资料进行分析,获取天津低能见度基本特征,在此基础上,基于 WRF-Chem 大气化学模式模拟了 2010 年 10 月和 2011 年 1 月天津地区大气水平能见度。结果表明:天津地区低能见度事件主要发生在每年 11 月至次年 1 月,在获取 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度、相对湿度的基础上可较好地推算大气水平能见度,利用 WRF-Chem 大气化学模式和拟合公式,可以有效的进行能见度等级模拟和预报。

关键词: 天津,能见度,数值模式

中图分类号: P427

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.01.014

Research of Characteristics on Low Visibility in Tianjin

CAI Ziyang LIU Aixia HAN Suqing YAO Qin WANG Jia

Tianjin Meteorology Institute, Tianjin 300074

Abstract: Based on historic visibility data of 12 stations and observed data of visibility, relative humidity, and aerosol during 2009—2011 in Tianjin, the basic characteristics of low visibility is analyzed. In addition, the atmospheric chemical model of WRF-Chem is used to simulate the atmospheric horizontal visibility from October 2010 to January 2011 in Tianjin. The results show that low visibility mainly happens in every November to the next January. The atmospheric horizontal visibility can be better calculated on the basis of acquisition of PM_{2.5}, PM₁₀ and the relative humidity. And the use of WRF-Chem atmospheric chemical model and fitting formula, the visibility can be effectively simulated and forecasted.

Key words: Tianjin, visibility, numerical model

引 言

大气能见度是环境空气质量的一种显示(吴兑等,2007;赵习方等,2002),直接影响人们工作、生活及交通活动正常进行(孟燕军等,2001;袁成松等,2003)。近年大气低能见度已被看作城市大气环境问题之一(毛节泰等,2002;陶俊等,2007;宋宇等,2003;王淑英等,2003;刘爱军等,2004;付桂琴等,2013;王晓芙等,2013),在国内外广受关注。大气低能见度的形成原因复杂,且存在明显的地域性和季

节性,其对应的天气现象有雾、霾、沙尘和降水等(刘宁微等,2012;吴兑,2005)。雾过程中,能见度的大小与雾滴液态含水量和雾滴尺度密切相关,常用 K84 方案进行表达(周鑫等,2009;王佳等,2012);霾过程中,能见度与气溶胶、相对湿度密切相关,其贡献达到大气消光的 85% 以上(龚识懿等,2012;梁永贤等,2012;姚青等,2012a;2012b;边海等,2012);降水过程产生低能见度,主要来自雨滴的消光作用,其与雨强和雨滴的形态密切相关(刘西川等,2010)。关于能见度模拟和预测的方法,主要有三种,一是潜势预报,主要是根据历史数据,设计一些关键的指

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106001)、国家自然科学基金项目(41075004)、公益性行业(环保)科研专项(201009001)和天津市气象局局课题(201301)共同资助

2012 年 11 月 15 日收稿; 2013 年 6 月 21 日收修定稿

第一作者:蔡子颖,主要从事大气物理与大气环境方面研究. Email:120078030@163.com

标,当这些关键指标发生时,将会有对应的能见度产生,如唐亚平等(2012)在沈阳的研究,认为12 h内露点温度差大于 2°C ,大雾将变为轻雾,露点温度大于 4°C ,雾将消散。二是统计预报,其主要方法是收集历史相关数据,通过因子选择和回归分析等统计方法建立方程进行预报,其中近年引入的神经网络方法也是统计预报的一种(李沛等,2012)。三是数值预报和参数方程结合进行模拟,典型代表是MM5模式和WRF模式通过液态水含量和K84方案模拟雾过程中能见度变化;CMAQ模式和IMPROVE公式结合,模拟霾过程中的能见度。

天津地区位于渤海西岸,是我国北方最大的港口城市,也是欧亚大陆桥的东端起点,其与华北、西北等内陆地区局地最短的特殊地理位置,决定了其交通要道的地位。近年,受工业发展和环境变化的影响,天津能见度呈持续下降趋势(范引琪等,2005;2008),低能见度成为困扰人们日常生活和出行的一个重要问题。本文通过历史资料分析和试验观测,获取天津地区低能见度分布基本特征,研究能见度、气溶胶质量浓度和相对湿度之间基本规律。搭建WRF-Chem大气化学模式平台,进行能见度等级预报初探,为今后开展能见度、尤其是低能见度模拟和预报业务做好前期工作。

1 材料与方法

本文使用资料包括两部分:(1)能见度历史资料来自天津地区12个气象观测站1980—2010年的地面观测;(2)相对湿度、气溶胶质量浓度和能见度关系研究,使用资料取自天津城区边界层观测站2009—2012年观测数据,其中能见度资料取自Bel-

ford model6000前向散射能见度仪,PM_{2.5}、PM₁₀资料取自Thermo公司RP1400颗粒物监测仪,相对湿度资料取自自动站,所有资料在使用前均经过严格质量控制。

能见度数值预报研究使用WRF-Chem模式,该模式为由美国大气研究中心(NCAR)、美国太平洋西北国家实验室(PNNL)及美国国家海洋及大气管理局(NOAA)共同开发完成,在北美、我国京津冀地区(Tie et al,2007;Yerramilli et al,2011;韩素芹等,2008;马欣等,2012)、珠江三角洲地区及长江三角洲地区(李伟铨等,2009)均有一定的运用。模式模拟时间为2010年10月和2011年1月,在模拟过程中,利用前1 d模拟污染场作为后1 d模拟的初始条件,模式设置东西南北方向网格数各为50,格距30 km,垂直方向划分30个垂直层,顶层压力为5000 Pa。模拟所需气象输入数据采用美国国家环境预测中心发布(NCEP)再分析数据,网格分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$,时间分辨率为6 h。污染源排放清单采样INTEX-B计划发布的亚洲地区污染排放清单,此清单包括电力、工业、交通、居民4大类人为排放的SO₂、NO_x、CO、PM₁₀、PM_{2.5}、BC、OC、VOCS 8大类污染物,空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。

2 结果

2.1 低能见度的分布

根据一般认知和实际使用需要,设定能见度低于3 km为一个低能见度时段。图1显示天津地区低能见度一般发生在08时,此时边界层高度相对较低,相对湿度也较高,易形成低能见度天气。观测资

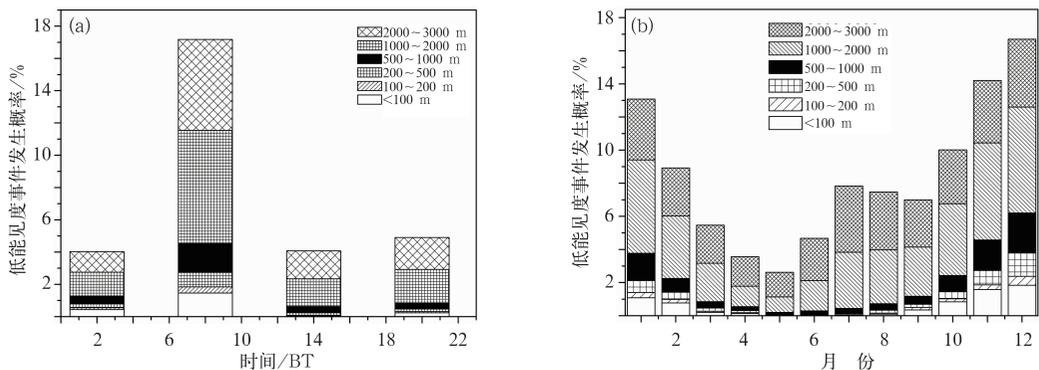


图1 天津低能见度日变化(a)及季节变化(b)的分布

Fig. 1 Distribution of daily (a) and seasonal (b) variations of low visibility in Tianjin

料显示天津地区 08 时发生低能见度事件的概率为 17%，02、14 和 20 时分别均在 5% 以内。由于受季风气候和水汽分布的影响，天津地区水平能见度分布一般呈现夏低冬高的格局(图 1b)，但低能见度却相反，受天气系统影响，秋冬季节气温日较差大，边界层多逆温，是雾霾的高发期，每年 10 月下旬至次年春季起风前，低能见度事件频发，尤其每年 11 月至次年 1 月，发生低能见度的概率为 13~17%，其中 1/3 左右低于 1 km，对交通产生重要影响的能见度低于 500 m 的天气，每年大概发生 4~5 d 左右，有 2/3 的概率发生在 11 月至次年 1 月之间。

2.2 气溶胶、相对湿度和能见度的关系

统计 2009 年 1 月至 2011 年 8 月间天津边界层观测站能见度、相对湿度、降水、PM₁₀ 质量浓度、PM_{2.5} 质量浓度数据，共计 22519 次(逐小时)，剔除降水日和有观测要素缺失的时刻，有效样本 16481。统计显示能见度低于 3 km 时，PM₁₀ 平均值 260 μg·m⁻³，由高到低排序，80% 集中在 145.9 μg·m⁻³ 以上，接近空气二级质量标准；PM_{2.5} 平均值 155 μg·m⁻³，由高到低排序，80% 集中在 80 μg·m⁻³；风速均值 0.8 m·s⁻¹，最大风速 4.7 m·s⁻¹，由低到高排序，80% 集中在 1.3 m·s⁻¹ 以下，超过 95% 发生在 2 m·s⁻¹ 的低风速条件；相对湿度平均值 77%，但分布较广，由高到低排序，80% 集中在相对湿度 69% 以上，相对湿度低于 50% 出现 57 次，占不到 3%(表略)。

基于气溶胶、相对湿度和能见度三者之间的关系，建立拟合方程。考虑水汽饱和后产生的消光影响明显有别于气溶胶吸湿增长产生的消光作用，首先剔除相对湿度大于 95% 的样本，其次参考 IMPROVE 公式，利用 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度差的 0.6 倍表述大粒子的消光作用，利用 WMO 推荐的方法将能见度转化为消光系数($\sigma = 3912/vis$ ，其中 σ 为大气消光系数， vis 为能见度，单位 km)，对公式进行拟合，得出拟合公式，并通过 2012 年 1—12 月观测数据对拟合方程进行检验：其中统计样本数 16481，相关系数 0.895，统计样本与观测样本相对误差 28.9%；检验样本 5411，相关系数 0.914，相对误差 22%(图 2)。

$$\sigma = 6.742 \times PM_{2.5}^{0.891} \times (1 - RH)^{-0.838RH} + 0.6 \times (PM_{10} - PM_{2.5}) \quad (1)$$

$$Vis = \frac{3912}{\sigma} \quad (2)$$

式中，PM_{2.5}、PM₁₀ 分别为 PM_{2.5}、PM₁₀ 质量浓度，RH 为相对湿度；以 0~1 km 为 1 级；1~2 km 为 2 级；2~3 km 为 3 级；3~5 km 为 4 级；5~10 km 为 5 级；10 km 以上为 6 级划分能见度等级，基于拟合公式计算能见度与观测值同等级占有所有样本的 65%，相差一个等级占 33.1%，仅有 0.37% 相差大于两个等级。由此显示，如果能很好地预报 PM_{2.5}、PM₁₀ 质量浓度和相对湿度，并基于前期的观测掌握当地气溶胶、相对湿度和能见度之间的关系，就能有效的进行非雾过程的能见度模拟和等级预报。

按照 PM_{2.5} 质量浓度将样本划分为 10 档(每 20 μg·m⁻³ 一档，图 3)，其中横坐标为相对湿度，纵坐标为消光系数，由图 3 显示粒子吸湿增长的拐点大约发生在相对湿度为 70%~80% 时，当相对湿度超过 80% 后，大气消光系数随着湿度的增加明显增长，粒子浓度越高，消光系数越高。即可理解为当相对湿度超过 70%，大气 PM_{2.5} 质量浓度超过 145 μg·m⁻³ 时，将有较大可能发生低能见度(低于 3 km)事件；当相对湿度超过 80% 时，大气 PM_{2.5} 质量浓度只要超过 100 μg·m⁻³，能见度就有较大概率低于 3 km；当相对湿度超过 90%，PM_{2.5} 只要超过 65 μg·m⁻³，能见度将低于 3 km；当相对湿度达到 90% 左右，PM_{2.5} 达到 200 μg·m⁻³ 左右，通过气溶胶的吸湿增长也可以使能见度低于 1 km，而不一定非要水汽过饱和后产生雾滴。这样的事件发生概率并不低，在 2009—2011 年，天津城区一共发生 131 h 能见度低于 1 km 的情况，其中相对湿度大于 95% 的仅 15 h，相对湿度在 91%~95% 之间的共有 41 h，另有大量观测显示，相对湿度不到 90%，仍然有低

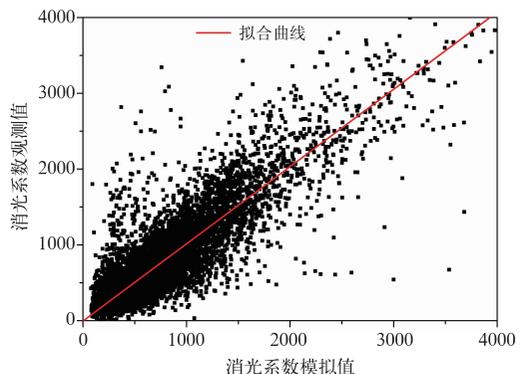


图 2 拟合的消光系数和实际的消光系数比较
Fig. 2 Comparison of the fitting extinction coefficient and the actual extinction coefficient

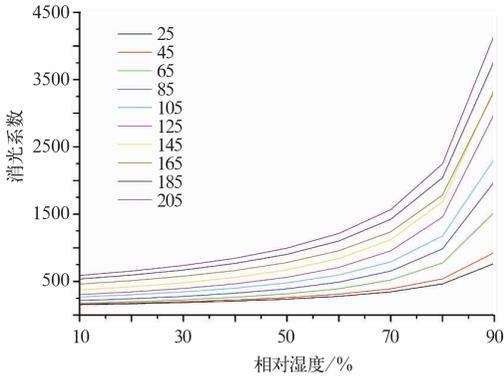


图 3 相对湿度、 $PM_{2.5}$ 和消光系数的关系
Fig. 3 Relation of relative humidity, $PM_{2.5}$ and extinction coefficient

能见度形成,其关键点就在于大气高负载气溶胶的吸湿增长,其中相对湿度低于 91% 的 74 h 样本中, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 平均浓度分别为 467 和 $282 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。但小于 500 m 的超低能见度,一般和水汽的饱和凝结密切相关,在 3 年的观测中,仅发生 4 次相对湿度不超过 91%、能见度低于 500 m 的情况,占有低能见度事件(小于 500 m)的 16%(表略)。

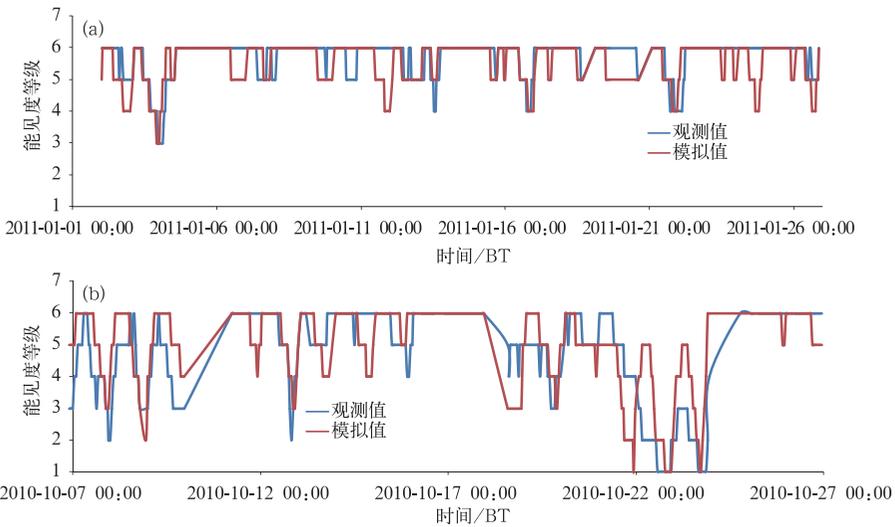


图 4 2011 年 1 月(a)和 2010 年 10 月(b)天津地区能见度等级数值模拟和观测值的比较
Fig. 4 Comparison of numerical simulation and observed value of visibility in Tianjin Region
(a) January 2011, (b) October 2010

通过同化地基水汽观测来改进模式对相对湿度的预报能力;三是来自气溶胶模拟的误差,利用模式提供的相对湿度和气溶胶质量浓度进行拟合,模拟值与观测值同等级占有所有样本的 60.5%,平均相差 0.5 级。对比气溶胶质量浓度的观测值和模拟值,两者有较好的一致性,其中 $PM_{2.5}$ 相关系数 0.57, PM_{10}

2.3 能见度数值预报初探

基于 WRF-Chem 大气化学模式,模拟天津城区 2010 年 10 月和 2011 年 1 月逐时的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和相对湿度。同时,基于式(1)和式(2),进行能见度模拟,模拟结果和观测结果对比显示(图 4):模拟值与观测值同等级占有所有样本的 60.5%,相差一个等级占 30%,相差两个等级占 8.1%,两个等级以上的占 1.4%。利用数值模式可以较好地进行能见度等级预报。在低能见度段(表略):当观测值在 3 km 以下,模拟值在 3 km 以下的占 35%,3~5 km 之间的占 30%,超过 10 km 的占 3%,利用数值模式模拟低能见度仍有一定的误差,需要进一步的提高。

分析误差来源,一方面来自拟合公式的误差,使用观测的气溶胶质量浓度资料和相对湿度资料进行模拟,92% 的数据模拟能见度和观测能见度等级相同,平均相差 0.14 级;二是来自相对湿度模拟的误差,利用观测的气溶胶质量浓度和模拟的相对湿度进行拟合,82% 的数据模拟能见度和观测能见度等级相同,平均相差 0.19 级,在进一步研究中,需要

相关系数 0.48,样本数 1044。 $PM_{2.5}$ 模拟均值 $69 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 与观测值 $63 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 接近, PM_{10} 模拟,由于忽略了自然源的排放,模拟均值明显低于观测值,分别为 91 和 $137 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,在进一步研究中,需要细调排放源提高气溶胶质量浓度模拟的精度,来提高能见度等级预报能力。

3 结 论

(1) 天津地区低能见度(小于 3 km)主要发生在每年的 11 月至次年 1 月,发生概率在 13%~17%,其中每年会产生 4~5 d 对道路交通产生重要影响的超低能见度(小于 500 m)天气。

(2) 相对湿度、PM_{2.5}、PM₁₀ 质量浓度和能见度密切相关,基于三者的观测,可以很好地推算出当时大气水平能见度。

(3) 基于 WRF-Chem 大气化学数值模式和拟合公式,可以进行能见度等级模拟和预报,正确率约为 60.5%,误差一个等级约为 30%,对于低能见度的预报,精度还需要进一步研究提高。

参考文献

边海,韩素芹,张裕芬,等. 2012. 天津市大气能见度与颗粒物污染的关系. 中国环境科学, 32(3):406-410.

范引琪,李春强. 2008. 1980—2003 年京、津、冀地区大气能见度变化趋势研究. 高原气象, 27(6):1392-1400.

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):527-535.

付桂琴,张迎新,张庆红,等. 2013. 河北省低能见度事件特征分析. 气象, 39(8):1042-1049.

龚志懿,冯加良. 2012. 上海地区大气相对湿度与 PM₁₀ 浓度和大气能见度的相关性分析. 环境科学研究, 25(6):628-632.

韩素芹,冯银厂,边海,等. 2008. 天津大气污染物日变化特征的 WRF-Chem 数值模拟. 中国环境科学, 28(9):828-832.

李沛,王式功,尚可政,等. 2012. 基于神经网络逐级分类建模的北京地区能见度预报. 48(3):52-57.

李伟铿,王雪梅,张毅强,等. 2009. 珠江三角洲地区工业排放变化对 SO₂ 和 NO_x 及其二次污染物浓度的影响. 环境科学研, 22(2):207-214.

梁永贤,尹魁浩,颜敏,等. 2012. 深圳市大气能见度影响因子研究, 31(4):79-82.

刘爱君,杜尧东,王惠英. 2004. 广州灰霾天气的气候特征分析. 气象, 30(12):68-71.

刘宁微,马雁军,王扬锋. 2012. 辽宁中部城市群夏季大气能见度的观测研究. 气象学报, 70(4):814-820.

刘西川,高太长,刘磊,等. 2010. 降水现象对大气消光系数和能见度

的影响. 应用气象学报, 21(4):433-441.

马欣,陈东升,高庆先,等. 2012. 应用 WRF-chem 模式模拟京津冀地区气溶胶污染对夏季气象条件的影响. 资源科学, 34(8):1408-1415.

毛节泰,张军华,王美华,等. 2002. 中国大气气溶胶研究综述. 气象学报, 60(5):625-634.

孟燕军,赵习方,王淑英,等. 2001. 北京地区高速公路能见度气候特征. 气象科技, 29(4):27-32.

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.

唐亚平,张晋广,张凯,等. 2012. 北方公路交通气象环境识别及安全策略研究. 气象科学, 32(4):466-471.

陶俊,谢文彰,许振成,等. 2007. 冬季广州大气能见度影响因子分析. 城市环境与城市生态, 20(1):17-20.

王佳,缪启龙,严明良,等. 2012. 采用不同参数化方案对沪宁高速公路浓雾过程的模拟试验. 气象与减灾研究, 35(1):29-35.

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.

王晓芙,林长城,陈晓秋,等. 2003. 闽南沿海地区低能见度事件变化特征分析. 气象, 39(4):453-459.

吴兑. 2005. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论. 气象, 31(4):3-7.

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.

姚青,蔡子颖,韩素芹,等. 2012a. 2009 年秋冬季天津低能见度天气下气溶胶污染特征. 气象, 38(9):1096-1102.

姚青,韩素芹,蔡子颖,等. 2012b. 天津城区春季大气气溶胶消光特性研究. 中国环境科学, 32(5):795-802.

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.

赵习方,徐晓峰,王淑英,等. 2002. 北京地区低能见度区域分布初. 气象, 28(11):55-57-65.

周鑫,丁菊丽,田伟,等. 2009. 能见度参数化方案概述. 气象研究与应用, 30(3):20-23.

Tie X, Madronich S, Li G, et al. 2007. Characterizations of chemical oxidants in Mexico City: A regional chemical/dynamical model (WRF-Chem) study. Atmospheric Environment, 41(9):1989-2008.

Yerramilli A, Dadla V B, et al. 2011. Air quality modeling for the urban Jackson, Mississippi region using a high resolution WRF-Chem Model. International Journal of Environmental Research and Public Health, 8(6):2470-2490.