

京津冀及周边地区冬季能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度和环境湿度的多元回归分析*

刘兆东^{1,2} 王宏^{1,2} 沈新勇^{1,3} 彭玥^{1,2} 施义舍^{1,2}

LIU Zhaodong^{1,2} WANG Hong^{1,2} SHEN Xinyong^{1,3} PENG Yue^{1,2} SHI Yishe^{1,2}

1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京, 210044
 2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081
 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海, 519082
 1. *Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*
 2. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*
 3. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China*
- 2019-10-24 收稿, 2020-03-09 改回.

刘兆东, 王宏, 沈新勇, 彭玥, 施义舍. 2020. 京津冀及周边地区冬季能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度和环境湿度的多元回归分析. 气象学报, 78(4): 679-690

Liu Zhaodong, Wang Hong, Shen Xinyong, Peng Yue, Shi Yishe. 2020. Multiple regression analysis of winter visibility, $PM_{2.5}$ concentration and humidity in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(4):679-690

Abstract Since 2013, low visibility events have been repeatedly observed in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions. $PM_{2.5}$ concentration and humidity are considered to be key factors leading to low visibility. Using surface meteorological data from MICAPS and $PM_{2.5}$ concentration observation data from the China Environmental Monitoring Center, the influences of $PM_{2.5}$ and humidity on visibility under different relative humidity (RH) and pollution levels are investigated. According to the differences in geographical environment and pollution degree, the study region was divided into Beijing-Tianjin and Hebei-Shandong regions. The multiple regression equations of visibility, $PM_{2.5}$ concentration, temperature and dew point temperature are established based on data of January 2017, and these equations are tested using the data of January 2015, 2016, 2018 and 2019. Results show that when $RH < 70\%$ and $PM_{2.5}$ concentration $< 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, the visibility in Beijing-Tianjin region and Hebei-Shandong region is usually higher than 10 km. The increase in $PM_{2.5}$ concentration is the dominant factor for the rapid decrease in visibility. The combination of increase in RH (70%–85%) and increase in $PM_{2.5}$ concentration (75–200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) can result in further decrease of visibility (10–5 km). The decrease in visibility (5–2 km) is mostly depended on further increase in RH (85%–95%), while the correlation between $PM_{2.5}$ concentration and visibility becomes weaker in this situation. The decrease in visibility to 2 km or even lower is mainly due to the extinction of droplets under the near saturation of water vapor ($RH > 95\%$), and has little relation with changes in $PM_{2.5}$ concentration. Compared with establishing the visibility fitting equation directly without grouping, establishing the visibility fitting equation according to the RH above or below 85% respectively can greatly optimize the multivariate regression models. The RMSEs

* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2019YFC0214601、2016YFC0203300)、国家自然科学基金项目(41590874、41790471、41530427)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100304)。

作者简介: 刘兆东, 主要从事气溶胶的气候效应研究。E-mail: liuzhaodongkk@163.com

通信作者: 沈新勇, 主要从事中尺度气象学、台风动力学及数值模拟、气溶胶的气候效应研究。E-mail: shenxy@nuist.edu.cn

for visibility fittings with $RH > 85\%$ decreases from 9.2 and 5.2 km to 0.5 and 0.7 km. The visibility in January of 2015, 2016, 2018 and 2019 are well reproduced by these fitting models. Correlation coefficients between the observed visibility and the calculated visibility all are higher than 0.91. This study provides a new visibility parameterization for the haze-fog numerical prediction system.

Key words Beijing-Tianjin-Hebei, $PM_{2.5}$ concentration, Relative humidity, Visibility, Multiple nonlinear regression

摘要 2013年至今,中国冬季与雾霾相伴的低能见度事件频发,京津冀及周边地区尤为严重。 $PM_{2.5}$ 浓度与环境湿度是导致低能见度的最关键影响因素。为了深入研究 $PM_{2.5}$ 浓度与环境湿度对大气能见度的影响,利用2017年1月京津冀及周边地区MICAPS气象数据与 $PM_{2.5}$ 观测数据,运用天气学诊断分析方法讨论了不同相对湿度下 $PM_{2.5}$ 浓度、环境湿度对冬季能见度变化的相对贡献,按照地理环境与污染程度差异将京津冀及周边地区划分为北京-天津地区与河北-山东地区,建立了 $PM_{2.5}$ 浓度与环境湿度(由露点温度、温度代表)对能见度的多元回归方程,并对2015、2016、2018、2019年冬季能见度进行了回算检验。结果显示:相对湿度低于70%、 $PM_{2.5}$ 浓度低于 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,北京-天津地区与河北-山东地区能见度多高于10 km, $PM_{2.5}$ 浓度升高是此时能见度迅速降低的主导因素;相对湿度从70%上升至85%和 $PM_{2.5}$ 浓度从 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 升高 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的共同作用导致了能见度降低到10 km至5 km;能见度进一步从5 km下降至2 km则更多依赖于相对湿度进一步从85%升高至95%, $PM_{2.5}$ 浓度与此能见度相关减弱;能见度降低至2 km甚至更低主要是由于水汽近饱和状态下(相对湿度95%以上)的雾滴消光引起,与 $PM_{2.5}$ 浓度的变化关系不大。与不分组直接拟合相比,以相对湿度85%为界线,分别拟合能见度能够很大程度优化多元回归模型,相对湿度高于85%时能见度拟合值的均方根误差从9.2和5.2 km下降至0.5和0.7 km,5 km以下拟合能见度的误差大幅度减小。按相对湿度85%将数据分组所得的拟合方程对2015、2016、2018、2019年1月能见度估算结果较好,观测值与拟合值相关系数均高于0.91,为雾-霾数值预报系统提供了新的能见度参数化算法。

关键词 京津冀, $PM_{2.5}$ 浓度, 相对湿度, 大气能见度, 多元非线性回归

中图法分类号 P427.2

1 引言

近年来,中国雾、霾污染事件频发(吴兑, 2012; Wang H, et al, 2014, 2018, 2019; Wang Y Q, 2015),与雾、霾污染紧密相关的大气能见度大幅度降低(Fu, et al, 2013; Ding, et al, 2014)。低能见度与高气溶胶颗粒物浓度不仅导致了严重环境生态问题,也对人民生活、交通运输等产生极大不利影响(吴兑等, 2006; 王纬等, 2000; Wu, et al, 2014; Wang P, et al, 2015)。

国际学者(Charlson, 1969; Stuart Naegele, et al, 1981)发现,能见度变化趋势对空气质量的变化有很好的指示作用。中国学者也进行了大量关于大气能见度时、空分布特征及其影响因子的研究。大气能见度与气溶胶污染物的消光作用有密切联系。吴兑(2012)指出,灰霾天气的本质是 $PM_{2.5}$ 空气污染,能见度与细粒子质量浓度呈很强的负相关。除了细颗粒物浓度,气象条件对于能见度变化也有至关重要的影响(王京丽等, 2006; 杨凌霄, 2008; 刘爱霞等, 2013)。由于不同气象条件下大气对污染物的稀释能力不同,相同污染源排放所造成的地面污染物浓度差别甚大(蒋维楣等, 2004)。较高环境湿度非常有利于气溶胶污染物及其前体物

吸附水汽并凝结增长,进而导致大气能见度降低(孙景群, 1985; 龚识懿等, 2012; 宋明等, 2013; 祁妙等, 2015),相对湿度对不同细颗粒物成分的影响机制也有所不同(刘爱霞等, 2013; Hu, et al, 2016)。随着相对湿度的升高,能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度的非线性关系减弱,当相对湿度上升至80%—90%时,由于气溶胶颗粒物的吸湿性增长,低 $PM_{2.5}$ 浓度也对应着小于10 km的大气能见度(Qu, et al, 2015; 白永清等, 2016; Ye, et al, 2013; Liu Z D, et al, 2019; Wang X Y, et al, 2019)。Peng等(2020)研究发现,北京、天津、河北邢台能见度在5 km甚至2 km以下时,相对湿度一般高于80%或接近饱和。

京津冀及周边地区(36° — 41.5°N , 113° — 120°E)是中国近年来雾、霾污染最为严重的地区。该地区冬季低能见度事件为稳定大气下气溶胶污染物聚积导致的霾事件与水汽近饱和状态下出现的雾事件共同作用的结果(Quan, et al, 2011; Qu, et al, 2015; Wu, et al, 2017; 周曙东等, 2017; Jia, et al, 2019)。京津冀及周边地区能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度、湿度等的回归分析研究发现,细粒子空气污染是造成北京大气能见度下降的主要原因之一(王淑英等, 2003; 王京丽等, 2006; 曹伟华等, 2013; Wang X Y, et al, 2019),相对湿度在80%以上时,能见度主

要受相对湿度的影响(姜江等, 2018)。针对京津冀、长三角或其他重污染地区能见度与影响因素的多元线性回归模型显示出较高的拟合度,但对于5 km以下能见度的计算效果不甚理想(Fu, et al, 2016; 周奕珂等, 2016; 姜江等, 2018)。樊高峰等(2016)的研究结果显示,杭州、宁波、温州3市能见度观测值与拟合计算值显示出较高的相关,相关系数分别为0.85、0.88、0.75,但对于5 km的能见度拟合效果也很差。文中针对京津冀及周边地区,选择出现大范围低能见度的2017年1月作为数据样本,细致分析了不同相对湿度下,PM_{2.5}浓度、环境湿度对能见度的相对贡献差别;建立了PM_{2.5}浓度、环境湿度对能见度的多元(非)线性回归方程,并对2015、2016、2018与2019年1月能见度进行了回算检验。深入探讨PM_{2.5}浓度和环境湿度对京津冀及周边地区能见度变化的相对贡献,所建立的多元回归方程也可为雾-霾数值预报系统提供能见度的参数化算法。

2 资料与方法

2.1 资料与研究区域

选择2015—2019年每年1月代表冬季(Wang P, et al, 2015; 李伟等, 2010)。利用中国气象局提供的位于京津冀及周边地区268个常规观测台站的能见度、温度、露点温度观测数据,每日8个时次

(02、05、08、11、14、17、20、23时;北京时,下同)。剔除降水、沙尘暴等其他天气现象的影响,得到反映空气质量和气象条件对冬季能见度影响的有效资料。PM_{2.5}站点观测数据来自151个国家空气质量监测站。

2017年1月京津冀及周边地区月平均能见度空间分布如图1a所示,图1b为研究区域地形特征及所使用污染物观测站与气象要素观测站分布。根据污染程度、地形和气象条件(风速、风向、水汽、冷空气强度等)的差异(Fu, et al, 2014; Liu Z D, et al, 2019),将京津冀及周边地区进一步划分为北京-天津地区(38.8°—40.5°N, 116°—118°E)与河北-山东地区(36°—38.7°N, 114°—118.5°E)。由图1a可见,能见度最低的区域位于太行山脉以东的河北南部,许多城市能见度月均值在5 km以下,位于燕山山脉以南的北京-天津地区能见度略高。

2.2 研究方法

低能见度可归因于低湿条件下PM_{2.5}浓度的升高、相对湿度升高引起的气溶胶吸湿增长或空气中水汽含量接近饱和时气溶胶经过活化变成雾滴3种情况(Fu, et al, 2016; Qu, et al, 2015; Wang X Y, et al, 2019)。文中利用天气学诊断分析方法分析中国京津冀及周边地区冬季主要污染区能见度特征,以相对湿度85%和95%为界,研究3种情况下PM_{2.5}浓度、环境湿度对能见度变化的贡献。基于2017

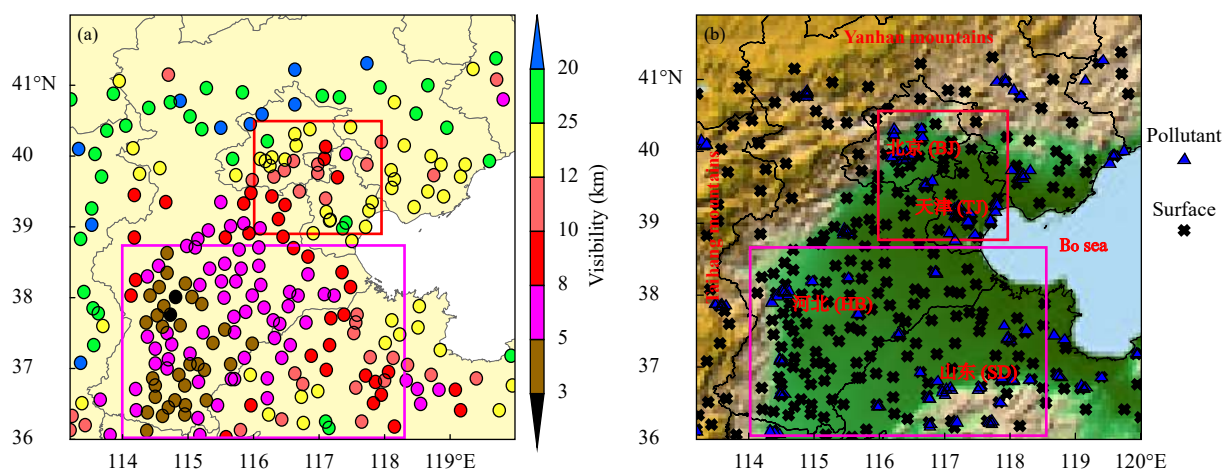


图1 (a) 2017年1月京津冀及周边地区月平均能见度空间分布, (b) 研究区域地形特征以及气象要素观测站点与污染物观测站点空间分布

Fig. 1 (a) Spatial distribution of monthly average visibility in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions in January 2017, (b) Topographic features of the study region and the distribution of pollutants observation stations and surface meteorology stations

年1月数据,按相对湿度85%将数据分组,分别建立 $PM_{2.5}$ 浓度、环境湿度(由温度、露点温度代表)对能见度的多元(非)线性回归方程。从污染物浓度、环境湿度分别讨论其对北京-天津地区与河北-山东地区能见度变化的贡献。为了检验所得拟合方程的能见度预报能力,用2015、2016、2018与2019年1月数据检验拟合方程。所使用的相对湿度(RH, %)和温度露点差($T-T_d$, $^{\circ}C$)由温度(T , $^{\circ}C$)与露点温度(T_d , $^{\circ}C$)计算得到(盛裴轩等, 2013)。

3 2017年1月能见度变化及其与 $PM_{2.5}$ 浓度和相对湿度相关分析

图2a为2017年1月北京-天津地区与河北-山东地区区域平均能见度及低能见度日数。河北-山东地区能见度月均值仅为8.9 km,能见度小于10 km的日数为20 d;北京-天津地区月平均能见度值稍高,空气质量相对较好。两地区能见度低于2 km的日数相当,分别为3与4 d。图2b为2017年1月两地区以及北京、天津、河北邢台与山东济南4站能见度日均值时间序列。可见2017年1月共观测到了3次能见度低于5 km的持续过程,分别为1月1—8日、13—18日和23—26日,能见度谷值均在2 km以下。

为了探究京津冀及周边地区低能见度成因,分

析了2017年1月北京、天津、邢台、济南在不同相对湿度下逐3 h能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度散点分布与拟合曲线(图3)。由图3可见,4个城市10 km至2 km的能见度多发生于相对湿度低于85%时,此时能见度随着 $PM_{2.5}$ 浓度升高呈指数下降,细颗粒物浓度升高是能见度降低的主导因素,相对湿度变化的影响较小。相对湿度从85%上升至95%是能见度进一步下降至2 km甚至1 km的主要原因, $PM_{2.5}$ 浓度与此时能见度下降无明显相关关系,较高湿度下某些吸水性较强的气溶胶粒子吸湿增长可能是此时能见度降低的主要原因(Ye, et al, 2013; Liu F, et al, 2019; Wang X Y, et al, 2019)。相对湿度超过95%时,能见度进一步下降至1 km以下主要是由于水汽近饱和或饱和状态下的雾滴直接消光引起(Quan, et al, 2011; Jia, et al, 2019)。相对湿度低于85%而 $PM_{2.5}$ 浓度上升至约 $250 \mu g/m^3$ 时,北京、天津能见度也会进一步下降至1 km以下,济南能见度会下降至2 km以下,而邢台能见度低于1 km则主要发生在相对湿度高于85%时,表明高环境湿度或高 $PM_{2.5}$ 浓度均会造成北京、天津、济南低能见度,而邢台的低能见度主要由高环境湿度导致。此外,北京与天津共有7个时次相对湿度低于85%、 $PM_{2.5}$ 浓度低于 $75 \mu g/m^3$,而能见度低于5 km,其中3个时次天气现象为霾,1个时次为轻雾,3个时次

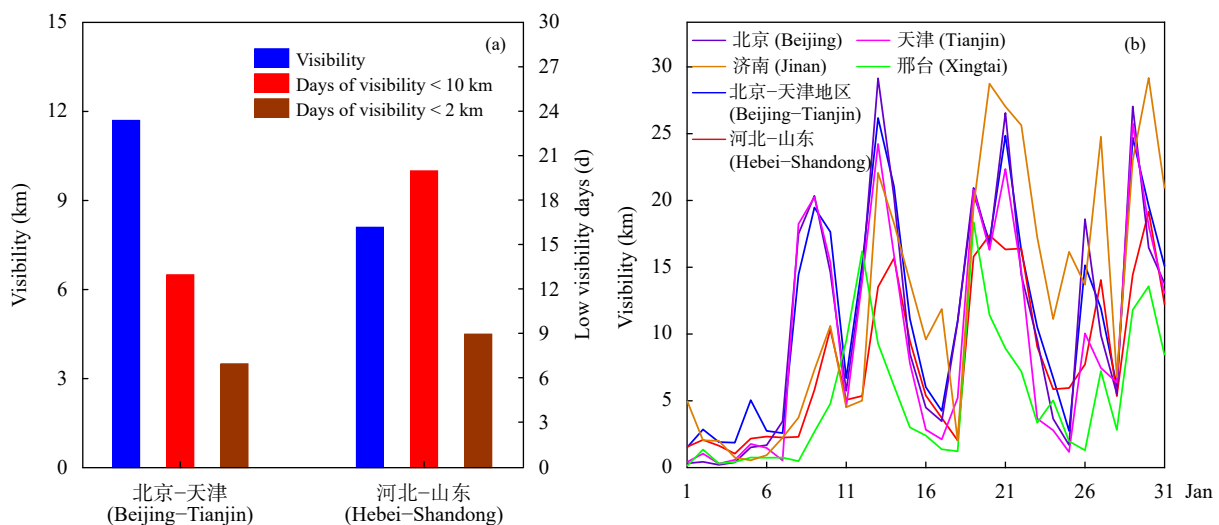


图2 (a) 2017年1月北京-天津地区与河北-山东地区区域平均能见度与能见度低于10 km与2 km日数, (b) 北京-天津地区、河北-山东地区、北京、天津、邢台与济南能见度日均值时间序列

Fig. 2 (a) Regional average visibility over Beijing-Tianjin region and Hebei-Shandong region and number of days with visibility < 10 km and < 2 km during January 2017, (b) Time series of daily average visibility in Beijing-Tianjin region, Hebei-Shandong region, Beijing, Tianjin, Xingtai and Jinan

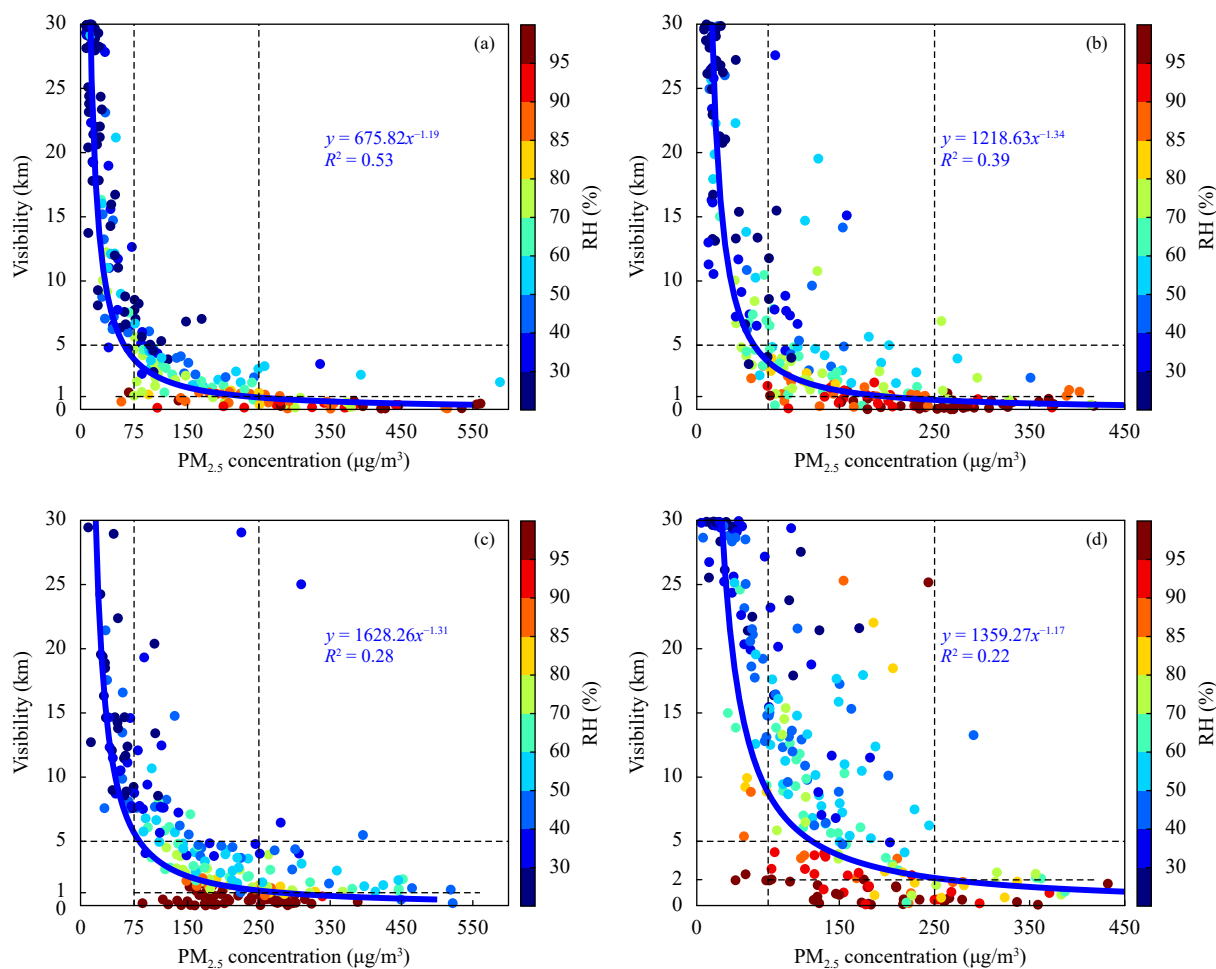


图3 2017年1月(a)北京、(b)天津、(c)邢台、(d)济南在不同相对湿度下能见度与PM_{2.5}浓度散点分布及拟合曲线

Fig. 3 Scatterplots and fittings of visibility and PM_{2.5} concentration under different relative humidity (shading) at stations in (a) Beijing, (b) Tianjin, (c) Xingtai and (d) Jinan in January 2017

无明显天气现象。

4 能见度影响因子回归分析

4.1 单因子回归分析

细颗粒物污染和大气环境湿度是影响冬季能见度的关键要素。温度露点差经常被用来分析大气湿度,其值越小表明环境湿度越大,其值小于5℃时,通常被认为是出现雾的必要湿度条件。图4为北京-天津地区与河北-山东地区区域平均能见度与PM_{2.5}浓度、温度露点差的散点分布和拟合曲线(直线)。

从图4a₁和b₁可以看出,相对湿度低于70%、PM_{2.5}浓度低于75 µg/m³时,北京-天津区域与河北-山东区域能见度多高于10 km,空气质量较好,能见度随PM_{2.5}浓度的升高迅速降低,在这个区间内,能见度的降低主要由PM_{2.5}浓度升高导致,大气湿度

对能见度的变化没有太大影响。PM_{2.5}浓度从75 µg/m³上升至约200 µg/m³时,能见度从10 km下降至约5 km,同时伴随着相对湿度从70%上升到85%左右,表明相对湿度和PM_{2.5}浓度对能见度的共同影响是能见度从10 km下降至5 km的主要原因;当PM_{2.5}浓度在此基础继续上升而相对湿度变化不大时,两个地区能见度并未进一步明显下降,而是在5 km附近波动。而相对湿度从85%上升至95%会使能见度进一步下降至2 km,这可能是空气中水汽含量较高时某些吸水性较强的气溶胶粒子(硫酸盐、硝酸盐、铵盐和部分可溶性有机气溶胶)的吸湿性增长所致(Ye, et al, 2013; Liu F, et al, 2019; Wang X Y, et al, 2019);当相对湿度超过95%时,PM_{2.5}浓度在100 µg/m³至300 µg/m³之间变化,此时北京-天津地区和河北-山东地区能见度均

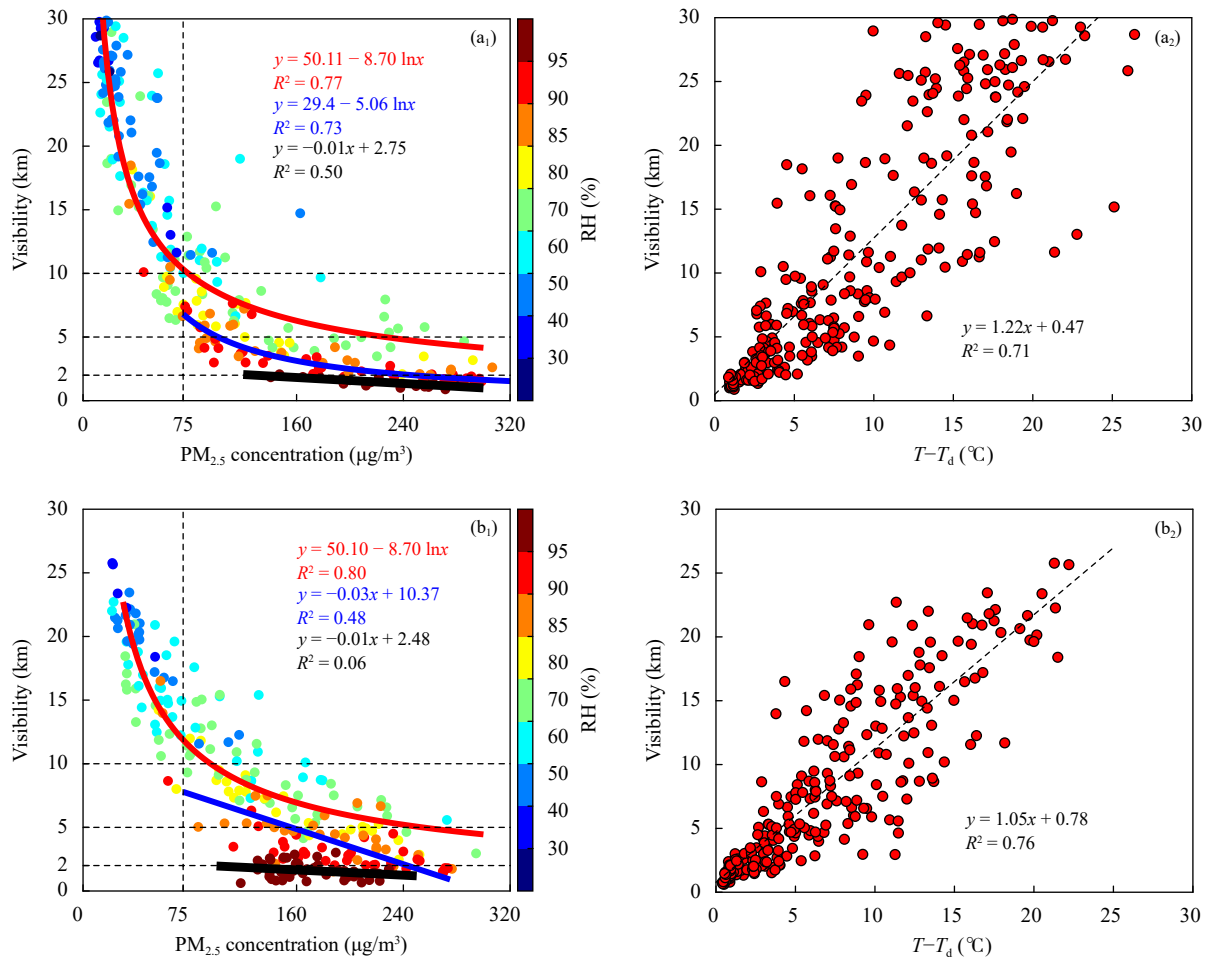


图4 2017年1月(a)北京-天津地区与(b)河北-山东地区在不同相对湿度下能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度(a_1 、 b_1)、温度露点差(a_2 、 b_2)散点分布及拟合曲线(直线)(相对湿度大于95%时为黑色拟合线,相对湿度大于85%时为蓝色拟合线,相对湿度小于85%时为红色拟合线)

Fig. 4 Scatterplots and fittings of visibility and $PM_{2.5}$ concentration (a_1 , b_1) under different relative humidity (shading), temperature dew point difference (a_2 , b_2) in (a) Beijing-Tianjin region and (b) Hebei-Shandong region in January 2017 (black lines represent the fittings when relative humidity > 95%, blue lines represent the fittings when relative humidity > 85%, red lines represent the fittings when relative humidity < 85%)

降至2 km 或者更低,表明此时能见度衰减主要由雾滴直接消光造成(Quan, et al, 2011; Jia, et al, 2019)。

图4 a_2 和 b_2 显示了温度露点差对能见度的影响。可以看出,对两个区域而言,能见度越高、温度露点差越大,二者离散度越大,表明大气湿度对高能见度没有明显的影响。而当能见度低于5 km、温度露点差小于5°C时,二者离散度显著减小,表明高湿度对5 km 以下的能见度具有明显贡献。能见度降至2 km 以下时,二者的离散度非常小,也证明了近饱和和高湿大气对极低能见度的巨大贡献。

总之, $PM_{2.5}$ 浓度升高是相对湿度低于70%时能见度降低的主导因子。随着相对湿度的升高(高

于70%), $PM_{2.5}$ 浓度对能见度变化的贡献不断下降,环境湿度对能见度变化的贡献逐渐增大,特别是对能见度下降至5 km 甚至2 km 以下至关重要。当相对湿度大于95%时,能见度衰减主要是由雾滴直接消光造成。

4.2 多元非线性回归模型

上述能见度的单因子回归分析(图4)表明,不同湿度下能见度与各因子拟合关系有显著差别。将2017年1月研究区域248组逐3 h数据按相对湿度85%划分为2组,分别进行 $PM_{2.5}$ 浓度、温度、露点温度对能见度的多元(非)线性拟合,结果如图5所示。

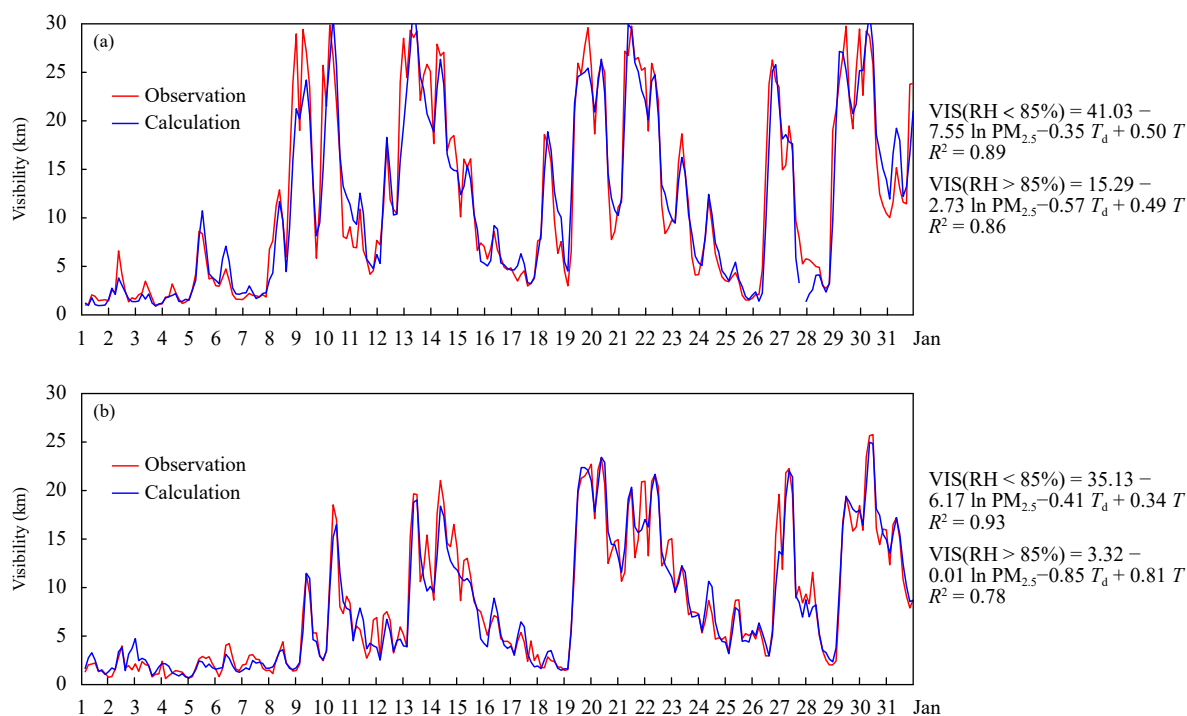


图5 2017年1月(a)北京-天津地区与(b)河北-山东地区以相对湿度85%为分界线建立的能见度拟合回归结果与区域平均能见度观测值时间序列

Fig. 5 Time series of regional averages of observed visibility and simulated visibility as well as the multivariate regression equations under RH above 85% in (a) Beijing-Tianjin region and (b) Hebei-Shandong region

由图5可见,相对湿度低于85%时,北京-天津地区与河北-山东地区能见度回归方程解释方差 R^2 值分别为0.89、0.93,能见度95%置信区间分别为 ± 4.0 、 ± 3.6 km;相对湿度高于85%时,两区域 R^2 值为0.86、0.78,能见度95%置信区间分别为 ± 1.7 、 ± 1.8 km。 $PM_{2.5}$ 浓度、温度、露点温度3项因子能解释北京-天津地区能见度变化的86%—89%和河北-山东地区能见度变化的78%—93%。能见度观测值与回归计算值的变化趋势与数值对比均体现出很好的拟合效果。

图6给出不按照相对湿度85%分组,使用相同因子所得北京-天津区域与河北-山东区域能见度拟合值与观测值序列对比。两区域能见度回归方程 R^2 值分别为0.90和0.92,置信区间分别为 ± 5.6 与 ± 3.3 km。与图5拟合结果相比,不按照相对湿度85%分组的回归方程对5 km以下能见度的估算效果很差。均方根误差被用作衡量回归方程计算值与观测值之间的偏差,其值越小表示拟合效果越好。使用图6拟合方程,计算相对湿度高于85%时两区域拟合能见度的均方根误差分别为9.19、

5.16 km;而按相对湿度85%分组拟合时(图5),相对湿度高于85%的拟合能见度RMSE值则分别为0.53、0.70 km。以往的研究(樊高峰等,2016)结果显示,杭州、宁波、温州3个城市能见度观测值与拟合计算值虽然整体展示了较高的相关,相关系数分别为0.851、0.883、0.750,但是模型对于5 km的能见度拟合效果很差;周奕珂等(2016)建立了长江三角洲地区2013年冬季能见度多元回归模型,结果显示,拟合值与计算值变化趋势一致,数值略微偏低,模型拟合优度 R^2 为0.81。从能见度变化趋势、解释方差、均方根误差来看,按相对湿度分组拟合可优化能见度拟合模型。

4.3 污染物浓度与环境湿度对能见度变化的贡献

为进一步区分 $PM_{2.5}$ 浓度与环境湿度对北京-天津地区与河北-山东地区能见度变化贡献的相对重要性,分别使用 $PM_{2.5}$ 浓度与环境湿度(温度(T)、露点温度(T_d)代表)对两区域能见度进行回归分析,结果如表1所示。

相对湿度低于85%时,北京-天津地区与河北-山东地区能见度多高于5 km,平均值分别为15.7

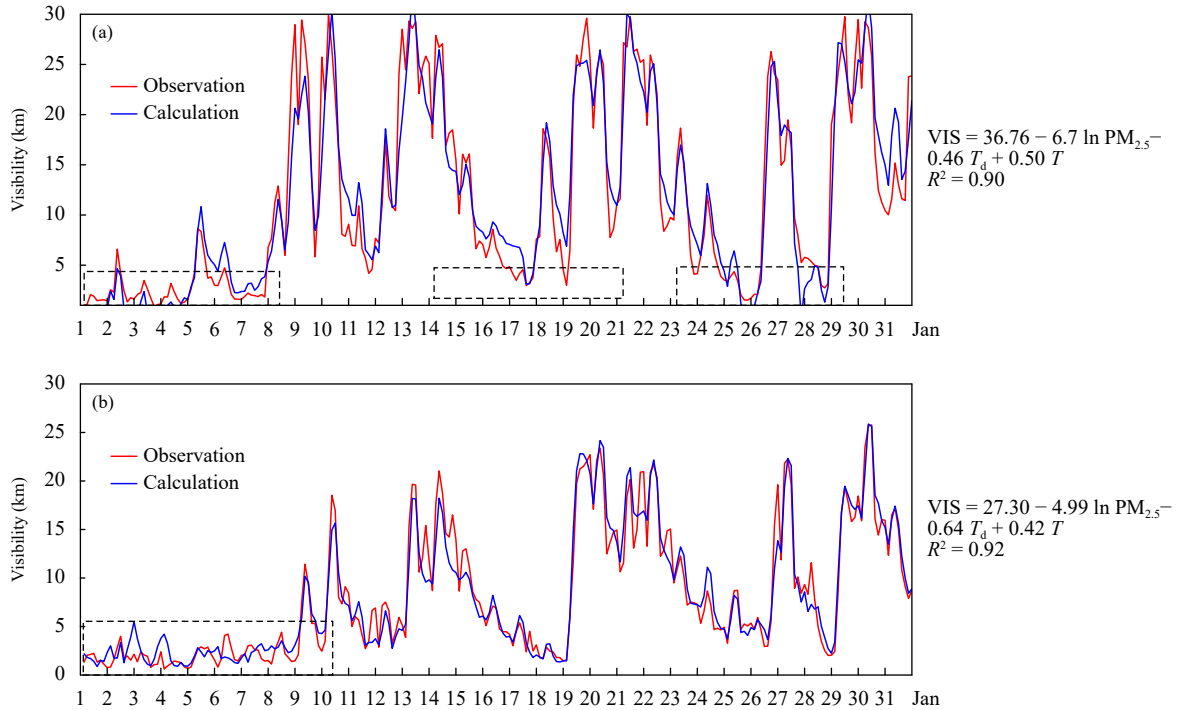


图 6 2017 年 1 月 (a) 北京-天津地区与 (b) 河北-山东地区区域平均能见度观测值与回归方程计算值时间序列
 Fig. 6 Time series of regional averages of observed visibility and simulated visibility in (a) Beijing-Tianjin region and (b) Hebei-Shandong region

表 1 北京-天津地区和河北-山东地区观测能见度平均值以及各拟合因子回归方程与拟合优度
 Table 1 Average observed visibility, regression equations and R^2 with different types of factors in Beijing-Tianjin region and Hebei-Shandong region

		能见度 (km)	拟合因子	拟合方程	R^2
北京-天津地区	RH < 85%	15.7	PM _{2.5} 浓度	VIS=50.1-8.7ln PM _{2.5}	0.77
			环境湿度	VIS=-1.5-1.2T _d +0.5T	0.65
			PM _{2.5} 浓度+环境湿度	VIS=41.0-7.6ln PM _{2.5} -0.4T _d +0.5T	0.89
	RH ≥ 85%	3.0	PM _{2.5} 浓度	VIS=20.9-3.5ln PM _{2.5}	0.67
			环境湿度	VIS=-0.2-0.9T _d +0.7T	0.41
			PM _{2.5} 浓度+环境湿度	VIS=15.3-2.7ln PM _{2.5} -0.6T _d +0.5T	0.86
河北-山东地区	RH < 85%	12.4	PM _{2.5} 浓度	VIS=50.1-8.7ln PM _{2.5}	0.80
			环境湿度	VIS=-0.7-1.1T _d +0.4T	0.76
			PM _{2.5} 浓度+环境湿度	VIS=35.1-6.2PM _{2.5} -0.4T _d +0.3T	0.93
	RH ≥ 85%	2.6	PM _{2.5} 浓度	VIS=4.4-0.01PM _{2.5}	0.06
			环境湿度	VIS=0.9-0.8T _d +0.7T	0.58
			PM _{2.5} 浓度+环境湿度	VIS=3.3-0.01PM _{2.5} -0.9T _d +0.8T	0.78

与 12.4 km。回归分析显示,北京-天津区域与河北-山东区域结果相似,能见度均随 PM_{2.5} 浓度升高呈对数降低, R^2 分别为 0.77、0.80,表明仅考虑 PM_{2.5} 浓度可以解释北京-天津区域与河北-山东区域能见度变化的 77% 和 80%;仅考虑环境湿度可以解释北京-天津区域与河北-山东区域能见度变化的 65%

和 76%。PM_{2.5} 浓度对此时能见度的贡献高于环境湿度。两者共同拟合时拟合优度并非单因子解释方差的和,最终分别为 89% 和 93%,这是两因子相互影响对能见度贡献的强、弱有别导致。

相对湿度高于 85% 时,北京-天津地区与河北-山东地区能见度多低于 5 km,平均值分别为 3.0

与 2.5 km。由于污染程度、地理环境和冬季气象条件的差异, PM_{2.5} 浓度和环境湿度对此时能见度的贡献在北京-天津地区和河北-山东地区也略有不同。回归分析显示, PM_{2.5} 浓度与环境湿度可以分别单独解释北京-天津地区能见度变化的 67% 和 41%, PM_{2.5} 污染仍然是北京-天津地区 5 km 以下能见度变化的主导因素。而对于河北-山东地区, 环境湿度可以单独解释能见度变化的 58%, PM_{2.5} 浓度仅为 6%, 两者共同拟合时拟合度为 78%。环境湿度成为河北-山东地区能见度变化的主导因子, 其贡献为 58%—72%。

5 多元回归拟合模型验证

为了检验 4.2 节所得能见度的多元(非)线性回归方程是否具有有一定的预报能力, 使用图 5 所示回归方程分别计算了 2015、2016、2018、2019 年 1 月的能见度, 并与实际观测进行了对比, 结果如图 7 所示。2015、2016、2018、2019 年 1 月能见度观测值、拟合方程计算值、观测值与拟合值相关系数及均方根误差见表 2。

可以看出, 两区域逐 3 h 能见度拟合值与观测值变化趋势基本一致。整体而言, 回归方程计算值略高于观测值, 说明基于 2017 年 1 月的能见度多元回归方程会略微高估其他年份能见度水平。能见度观测值与拟合值相关系数均达到 0.91, 通过了 0.01 水平显著性 *t* 检验。能见度观测值与拟合值的均方根误差为 2.2—3.6 km。PM_{2.5} 浓度、温度、露点温度 3 项因子能基本反映京津冀及周边地区能见度变化。

整体上, 拟合方程对河北-山东地区能见度拟合效果略优于北京-天津地区, 可能是河北-山东地

区污染更严重, 出现 5 km 以下能见度的时次更多, 拟合所用样本数据更多, 使得该地区能见度的回归方程更为合理。回归方程在不同年份的拟合精度有所不同, 两地区 2015 与 2019 年拟合效果优于 2016 与 2018 年。以往的研究(Liu Z D, et al, 2019)表明, 2015 与 2019 年 1 月高空天气形势与 2017 年 1 月接近, 以纬向环流为主, 研究区域大气较为稳定, 而 2016 和 2018 年 1 月京津冀及周边地区遭受了强经向环流导致的冷空气过程, 这可能是基于 2017 年数据所得的能见度回归方程对 2015 与 2019 年能见度的估算效果略优于 2016 与 2018 年的原因之一。

6 结论与讨论

以 2017 年 1 月的能见度、PM_{2.5} 浓度、温度和露点温度作为基础数据, 运用单因子、多因子回归分析方法, 以相对湿度 85% 和 95% 为分界线, 研究了不同相对湿度下, 京津冀及周边地区 PM_{2.5} 浓度、环境湿度对能见度变化的相对贡献。根据地形、气象条件和污染程度的差异, 将研究区域划分为北京-天津地区与河北-山东地区, 按相对湿度 85% 将数据分组, 分别建立了 PM_{2.5} 浓度、环境湿度对能见度的多元(非)线性回归方程; 使用 2015、2016、2018 与 2019 年每年 1 月数据, 从能见度趋势与数值、相关系数、均方根误差等方面检验了能见度回归方程的预报能力。结果表明:

(1) 相对湿度低于 70%、PM_{2.5} 浓度低于 75 μg/m³ 时, 北京-天津地区与河北-山东地区能见度多大于 10 km, PM_{2.5} 浓度升高是此时能见度迅速降低的主导因素; 相对湿度从 70% 升高至 85% 和 PM_{2.5} 浓度从 75 μg/m³ 升高至 200 μg/m³ 的共同作用则导致了

表 2 北京-天津地区与河北-山东地区能见度观测平均值、拟合平均值、观测值与拟合值相关系数以及均方根误差
Table 2 Average observed visibility, average simulated visibility, correlation coefficients and Root Mean Squared Errors of Beijing-Tianjin region and Hebei-Shandong region

地区	年份	观测值(km)	拟合值(km)	相关系数	均方根误差(km)
北京-天津地区	2015	11.5	12.2	0.92	3.0
	2016	13.3	14.3	0.93	3.0
	2018	16.4	17.6	0.93	2.9
	2019	14.2	16.7	0.95	3.6
河北-山东地区	2015	10.5	10.5	0.91	2.2
	2016	8.4	10.8	0.92	3.1
	2018	12.3	12.6	0.95	2.2
	2019	10.6	12.5	0.96	2.6

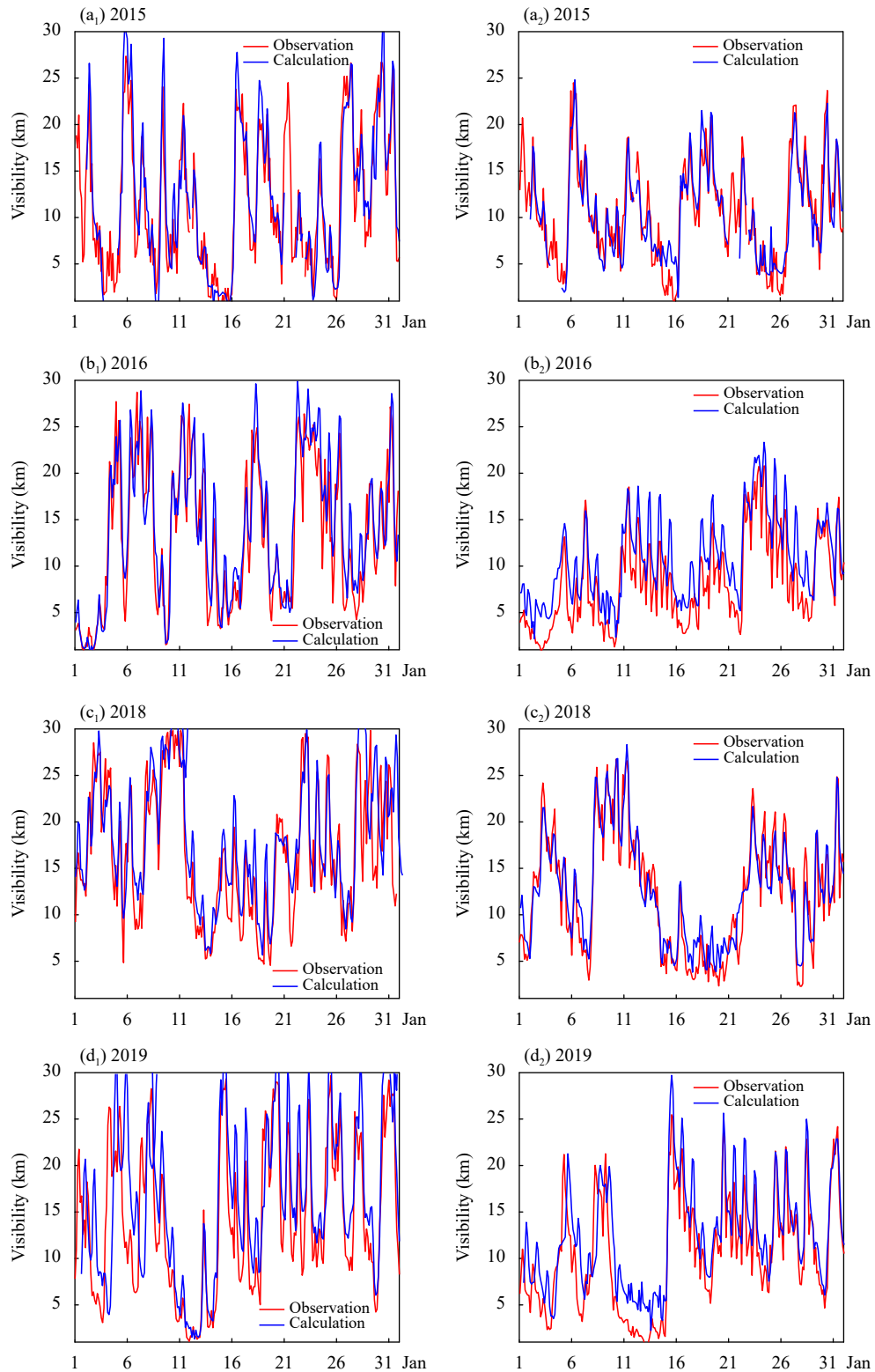


图7 2015 (a), 2016 (b), 2018 (c)与2019 (d)年1月北京-天津地区 (a₁—d₁) 与河北-山东地区 (a₂—d₂) 逐3 h 区域平均能见度观测值与回归方程计算值时间序列对比

Fig. 7 Time series of regional averages of observed visibility and simulated visibility in January of 2015 (a), 2016 (b), 2018 (c) and 2019 (d) in Beijing-Tianjin region (a₁—d₁) and Hebei-Shandong region (a₂—d₂)

能见度从 10 km 下降至 5 km; 能见度进一步从 5 km 下降至 2 km 更多依赖于相对湿度从 85% 升高至 95%, PM_{2.5} 浓度与此时间能见度相关减弱; 能见度降低至 2 km 甚至更低主要是由于水汽近饱和状态下(相对湿度高于 95%)的雾滴消光作用, 与 PM_{2.5} 浓度变化关系不大。

(2) PM_{2.5} 浓度和环境湿度对能见度变化的相对贡献在北京-天津地区和河北-山东地区略有不同。相对湿度高于 85% 时, PM_{2.5} 浓度对北京-天津地区能见度变化的贡献高于环境湿度, 而环境湿度是河北-山东地区能见度变化的主导因子, 贡献为 58%—72%。

(3) 按相对湿度 85% 将数据分组, 分别建立 PM_{2.5} 浓度、温度、露点温度对能见度的多元(非)线性回归方程会很大程度优化拟合模型。相对湿度高于 85% 时北京-天津地区和河北-山东地区能见度拟合值的均方根误差分别从 9.2 和 5.2 km 下降至 0.5 和 0.7 km, 表明按相对湿度 85% 分组的拟合方法会使 5 km 以下拟合能见度的误差大幅度减小。

(4) 按相对湿度 85% 将数据分组所得的能见度多元拟合模型能较好地估算 2015、2016、2018 与 2019 年 1 月京津冀及周边地区能见度, 观测能见度与回归能见度变化趋势较一致, 数值略微偏高, 观测值与估算值相关系数均大于 0.90, 多元回归方程为雾-霾数值预报系统提供了新的能见度参数化算法。

文中所有拟合均选用 1 月的数据, 所用拟合方法仅适用于京津冀及周边地区冬季, 春、夏、秋季由于受降水、沙尘等其他天气现象影响较多, 能见度拟合方法需做进一步验证和调整。拟合模型对河北-山东地区低于 5 km 的能见度估算结果优于北京-天津地区, 可能是前者污染更为严重, 出现 5 km 以下能见度的时次更多, 拟合可用样本数据更多造成的。后续研究将使用样本量更大的数据组, 考虑更多能见度影响因子, 进一步优化能见度拟合方程。

参考文献

白永清, 祁海霞, 刘琳等. 2016. 武汉大气能见度与 PM_{2.5} 浓度及相对湿度关系的非线性分析及能见度预报. 气象学报, 74(2): 189-199. Bai Y Q, Qi H X, Liu L, et al. 2016. Study on the nonlinear relationship among the visibility, PM_{2.5} concentration and relative humidity in Wuhan and the visibility prediction. Acta Meteor Sinica, 74(2): 189-199 (in Chinese)

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

影响因素分析. 气象学报, 71(5): 940-951. Cao W H, Liang X D, Li Q C. 2013. A study of the stageful characteristics and influencing factors of a long-lasting fog/haze event in Beijing. Acta Meteor Sinica, 71(5): 940-951 (in Chinese)

樊高峰, 马浩, 张小伟等. 2016. 相对湿度和 PM_{2.5} 浓度对大气能见度的影响研究: 基于小时资料的多站对比分析. 气象学报, 74(6): 959-973. Fan G F, Ma H, Zhang X W, et al. 2016. Impacts of relative humidity and PM_{2.5} concentration on atmospheric visibility: A comparative study of hourly observations of multiple stations. Acta Meteor Sinica, 74(6): 959-973 (in Chinese)

龚识懿, 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. Gong S Y, Feng J L. 2012. Relationships among relative humidity, PM₁₀ concentration and atmospheric visibility in Shanghai. Res Environ Sci, 25(6): 628-632 (in Chinese)

姜江, 张国平, 高金兵. 2018. 北京大气能见度的主要影响因子. 应用气象学报, 29(2): 188-199. Jiang J, Zhang G P, Gao J B. 2018. Main influencing factors of visibility in Beijing. J Appl Meteor Sci, 29(2): 188-199 (in Chinese)

蒋维楣, 孙鉴泞, 曹文俊等. 2004. 空气污染气象学教程. 2 版. 北京: 气象出版社, 310pp. Jiang W M, Sun J N, Cao W J, et al. 2004. Course in Air Pollution Meteorology. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 310pp (in Chinese)

李伟, 李书严, 王建凯等. 2010. 中国地区高空气象探测气球空间漂移分析. 气象学报, 68(3): 421-427. Li W, Li S Y, Wang J K, et al. 2010. The analysis of upper-air meteorological balloon floating in China. Acta Meteor Sinica, 68(3): 421-427 (in Chinese)

刘爱霞, 韩素芹, 姚青等. 2013. 2011 年秋冬季天津 PM_{2.5} 组分特征及其对能见度的影响. 气象与环境学报, 29(2): 42-47. Liu A X, Han S Q, Yao Q, et al. 2013. Characteristics of chemical composition of PM_{2.5} and its effect on visibility in autumn and winter of 2011 in Tianjin. J Meteor Environ, 29(2): 42-47 (in Chinese)

祁妙, 朱彬, 潘晨等. 2015. 长江三角洲冬季一次低能见度过程的地区差异和气象条件. 中国环境科学, 35(10): 2899-2907. Qi M, Zhu B, Pan C, et al. 2015. Regional differences and meteorological conditions of a low visibility procedure over the Yangtze River Delta Region in winter. China Environ Sci, 35(10): 2899-2907 (in Chinese)

盛裴轩, 毛节泰, 李建国等. 2013. 大气物理学. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 551pp. Shen P X, Mao J T, Li J G, et al. 2013. Atmospheric Physics. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 551pp (in Chinese)

宋明, 韩素芹, 张敏等. 2013. 天津大气能见度与相对湿度和 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 的关系. 气象与环境学报, 29(2): 34-41. Song M, Han S Q, Zhang M, et al. 2013. Relationship between visibility and relative humidity, PM₁₀, PM_{2.5} in Tianjin. J Meteor Environ, 29(2): 34-41 (in Chinese)

孙景群. 1985. 能见度与相对湿度的关系. 气象学报, 43(2): 230-234. Sun J Q. 1985. Relationship between visibility and relative humidity. Acta Meteor Sinica, 43(2): 230-234 (in Chinese)

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. Wang J L, Liu X L. 2006. The discuss on relationship between visibility and mass concentration of PM_{2.5} in Beijing. *Acta Meteor Sinica*, 64(2): 221-228 (in Chinese)
- 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. Wang S Y, Zhang X L, Xu X F. 2003. Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing. *Meteor Sci Technol*, 31(2): 109-114 (in Chinese)
- 王玮, 汤大刚, 刘红杰等. 2000. 中国 PM_{2.5} 污染状况和污染特征的研究. *环境科学研究*, 13(1): 1-5. Wang W, Tang D G, Liu H J, et al. 2000. Research on current pollution sataus and Pollution Characteristics of PM_{2.5} in China. *Res Environ Sci*, 13(1): 1-5 (in Chinese)
- 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. Wu D, Bi X Y, Deng X J, et al. 2006. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pearl River Delta. *Acta Meteor Sinica*, 64(4): 510-517 (in Chinese)
- 吴兑. 2012. 近十年中国灰霾天气研究综述. *环境科学学报*, 32(2): 257-269. Wu D. 2012. Hazy weather research in China in the last decade: A review. *Acta Scientiae Circum*, 32(2): 257-269 (in Chinese)
- 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 [D]. 济南: 山东大学. Yang L X. 2008. Characteristics, source apportionment and influence on visual range of PM_{2.5} in Jinan[D]. Jinan: Shandong University (in Chinese)
- 周曙东, 欧阳纬清, 葛继红. 2017. 京津冀 PM_{2.5} 的主要影响因素及内在关系研究. *中国人口·资源与环境*, 27(4): 102-109. Zhou S D, Ouyang W Q, Ge J H. 2017. Study on the main influencing factors and their intrinsic relations of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei. *China Popul, Resour Environ*, 27(4): 102-109 (in Chinese)
- 周奕珂, 朱彬, 韩志伟等. 2016. 长江三角洲地区冬季能见度特征及影响因素分析. *中国环境科学*, 36(3): 660-669. Zhou Y K, Zhu B, Han Z W, et al. 2016. Analysis of visibility characteristics and connecting factors over the Yangtze River Delta Region during winter time. *China Environ Sci*, 36(3): 660-669 (in Chinese)
- Charlson R J. 1969. Atmospheric visibility related to aerosol mass concentration: Review. *Environ Sci Technol*, 3(10): 913-918
- Ding Y H, Liu Y J. 2014. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity. *Sci China Earth Sci*, 57(1): 36-46
- Fu C B, Wu J, Gao Y C, et al. 2013. Consecutive extreme visibility events in China during 1960-2009. *Atmos Environ*, 68: 1-7
- Fu G Q, Xu W Y, Yang R F, et al. 2014. The distribution and trends of fog and haze in the North China Plain over the past 30 years. *Atmos Chem Phys*, 14(21): 11949-11958
- Fu X X, Wang X M, Hu Q H, et al. 2016. Changes in visibility with PM_{2.5} composition and relative humidity at a background site in the Pearl River Delta region. *J Environ Sci*, 40: 10-19
- Hu W, Hu M, Hu W, et al. 2016. Chemical composition, sources, and aging process of submicron aerosols in Beijing: Contrast between summer and winter. *J Geophys Res: Atmos*, 121(4): 1955-1977
- Jia X C, Quan J N, Zheng Z Y, et al. 2019. Impacts of anthropogenic aerosols on fog in North China Plain. *J Geophys Res: Atmos*, 124(1): 252-265
- Liu F, Tan Q W, Jiang X, et al. 2019. Effects of relative humidity and PM_{2.5} chemical compositions on visibility impairment in Chengdu, China. *J Environ Sci*, 86: 15-23
- Liu Z D, Wang H, Shen X Y, et al. 2019. Contribution of meteorological conditions to the variation in Winter PM_{2.5} concentrations from 2013 to 2019 in Middle-Eastern China. *Atmosphere*, 10(10): 563
- Peng Y, Wang H, Hou M L, et al. 2020. Improved method of visibility parameterization focusing on high humidity and aerosol concentrations during fog-haze events: Application in the GRAPES_CAUCE model in Jing-Jin-Ji, China. *Atmos Environ*, 222: 117139
- Qu W J, Wang J, Zhang X Y, et al. 2015. Influence of relative humidity on aerosol composition: Impacts on light extinction and visibility impairment at two sites in coastal area of China. *Atmos Res*, 153: 500-511
- Quan J, Zhang Q, He H, et al. 2011. Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP). *Atmos Chem Phys*, 11(15): 8205-8214
- Stuart Naegle P, Sellers W D. 1981. A study of visibility in eighteen cities in the Western and Southwestern United States. *Mon Wea Rev*, 109(11): 2394-2400
- Wang H, Xu J Y, Zhang M, et al. 2014. A study of the meteorological causes of a prolonged and severe haze episode in January 2013 over central-eastern China. *Atmos Environ*, 98: 146-157
- Wang H, Peng Y, Zhang X Y, et al. 2018. Contributions to the explosive growth of PM_{2.5} mass due to aerosol-radiation feedback and decrease in turbulent diffusion during a red alert heavy haze in Beijing-Tianjin-Hebei, China. *Atmos Chem Phys*, 18(23): 17717-17733
- Wang H, Li J H, Peng Y, et al. 2019. The impacts of the meteorology features on PM_{2.5} levels during a severe haze episode in Central-East China. *Atmos Environ*, 197: 177-189
- Wang P, Cao J J, Tie X X, et al. 2015. Impact of meteorological parameters and gaseous pollutants on PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentrations during 2010 in Xi'an, China. *Aerosol Air Qual Res*, 15(5): 1844-1854
- Wang X Y, Zhang R H, Yu W. 2019. The effects of PM_{2.5} concentrations and relative humidity on atmospheric visibility in Beijing. *J Geophys Res: Atmos*, 124(4): 2235-2259
- Wang Y Q, Zhang X Y, Sun J Y, et al. 2015. Spatial and temporal variations of the concentrations of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ China. *Atmos Chem Phys Discuss*, 15(11): 15319-15354
- Wu J, Luo J G, Zhang L Y, et al. 2014. Improvement of aerosol optical depth retrieval using visibility data in China during the past 50 years. *J Geophys Res: Atmos*, 119(23): 13370-13387
- Wu P, Ding Y H, Liu Y J. 2017. Atmospheric circulation and dynamic mechanism for persistent haze events in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Adv Atmos Sci*, 34(4): 429-440
- Ye X N, Tang C, Yin Z, et al. 2013. Hygroscopic growth of urban aerosol particles during the 2009 Mirage-Shanghai Campaign. *Atmos Environ*, 64: 263-269