

王晓敏,韩军彩,陈静,等. 石家庄地区能见度变化特征及其与相对湿度和颗粒物浓度的关系[J]. 干旱气象,2016,34(4):648-655. [WANG Xiaomin, HAN Juncai, CHEN Jing, et al. Variation Characteristics of Atmospheric Visibility and Their Relationship with Relative Humidity and Particle Concentration in Shijiazhuang of Hebei[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(4):648-655], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-04-0648

石家庄地区能见度变化特征及其与相对湿度和颗粒物浓度的关系

王晓敏,韩军彩,陈静,铃伟妙,岳艳霞

(河北省石家庄市气象局,河北 石家庄 050081)

摘要:利用1980—2013年石家庄地区12个气象台站能见度资料,结合相对湿度和 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度数据,分析了石家庄地区能见度的时空分布特征,通过研究能见度与相对湿度和 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度的关系,建立大气能见度的多元非线性预报模型。结果表明:(1)1980年以来石家庄地区年平均能见度以 $-1.0\text{ km}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 的速率呈下降趋势,夏季下降趋势最明显,春季下降趋势最小;(2)1998年前后石家庄地区能见度变化较大,1999—2013年平均能见度较1980—1998年下降了15.3%,且空间变化也较明显,1998年之前分别在中北部和中南部存在2个高值中心,在市区和赵县存在2个低值中心,1998年之后则呈由东向西逐渐递减的分布形势;(3)能见度与相对湿度存在显著的指数函数关系,而与 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度均呈幂函数关系。据此建立的能见度与相对湿度和 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度的多元非线性拟合模型能较好地反映能见度的变化规律,并对能见度具有一定的预报能力。

关键词:能见度;相对湿度;颗粒物浓度;时空特征;非线性拟合

文章编号:1006-7639(2016)-04-0648-08 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-04-0648

中图分类号:P427.2

文献标识码:A

引言

能见度是大气透明度的表征^[1],可以反映城市的大气环境质量^[2]。随着经济的发展,城市大气污染越来越严重,能见度也随之发生显著变化^[3]。影响大气能见度的因素包括自然因素和人为活动,自然因素主要指降水、雾、霾、扬尘等天气现象,而人为活动包括煤炭、化工等工业生产的烟气排放、汽车尾气、焚烧等^[4]。由于能见度观测记录开始较早,资料时间序列较长,可以通过分析能见度的长期变化趋势来研究空气质量的变化^[5]。早在1960年代,国外学者开展了能见度变化趋势的研究,提出了累积百分率、Ridit分析法等研究方法^[6-7]。国内大量学者也相继对能见度及其影响因子展开研究^[8-20]:付桂琴等^[17]分析了河北低能见度的区域分布和变化趋势特征,认为相对湿度与能见度呈显著负相关;刘宁微等^[18]对辽宁中部城市群夏季大气能见度变化

特征进行分析,并讨论了细颗粒物、水汽和风速等要素对能见度的影响;吴兑等^[19]分析指出造成广州低能见度年代际变化的主要原因是人类活动产生的细颗粒物;蔡子颖等^[20]分析表明,相对湿度、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度与能见度关系密切,并尝试利用大气化学模式和拟合公式对能见度进行等级模拟和预报。华北地区是中国四大灰霾污染严重区域之一^[21],石家庄由于其特殊的地理位置和地形地貌,成为华北地区大气污染严重、雾霾等低能见度事件多发的典型代表性城市^[22]。前人研究主要集中在能见度变化特征及与气象条件之间的关系,以及基于模式的等级预报,由于拟合公式和相对湿度模拟的误差,能见度等级预报准确率仍有待提高。本文利用近30 a石家庄地区能见度资料,分析能见度的时空变化特征,通过探讨相对湿度、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度与能见度的关系,利用较复杂的非线性方法进行量化分析和拟合,从而进行能见度预报预测,可为大

收稿日期:2016-01-14;改回日期:2016-04-04

基金项目:石家庄市科学技术研究与发展计划“重污染天气前兆‘强信号’及预警调控气象评估技术研究”(151550083A)和石家庄科技计划项目“石家庄雾霾天气监测预警技术研究”(131550363A)共同资助

作者简介:王晓敏(1986-),女,硕士,工程师,主要从事环境气象预报及应用方面研究。E-mail:imistar@hotmail.com

气能见度的业务化定量预报提供方法和参考。

1 资料与方法

1980年以前能见度观测采用0~9的等级记录方法,自1980年开始按照《地面气象观测规范(1979年版)》规定,以km为记录单位。2014年之后,行唐、高邑、元氏、鹿泉4个气象站的能见度改为自动在线连续观测,观测方法与之前不同。为便于分析,资料选取时段为1980—2013年,区域为石家庄地区,剔除该时段能见度资料缺测较多的5个站点,共选取了12个站点(图1)。能见度采用人工每天08:00、14:00、20:00(北京时,下同)3个时次的观测数据,日能见度为3个时次的算术平均,区域能见度为12个站点的算术平均。另外,还使用了2014—2015年石家庄市气象站能见度和相对湿度逐时数据(2014年石家庄市国家基本气象站改为自动观测)。

PM_{2.5}和PM₁₀浓度数据来源于2014年1月—2015年8月石家庄市环境监测站逐时监测数据,为市区国控点数据经过质量控制后的平均值。利用1980—2013年河北省能源消耗总量和煤炭占能源消耗总量百分比的逐年数据(由河北省统计局提供)和2000—2010年每5a统计的工业源废弃物总排放量和污染物总排放效率数据(来源于河北省统计年鉴),以及石家庄市统计局提供的1980—2010年每5a统计的3大产业占比数据。冷空气发生次数采用1980—2013年石家庄地区12个气象观测站(与能见度站点一致)逐日气温资料,区域冷空气发生次数为12个站点的算术平均。

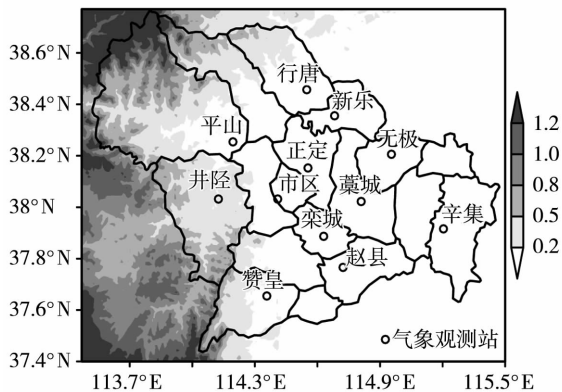


图1 石家庄地区12个气象观测站分布(阴影为地形高度,单位:km)

Fig. 1 Distribution of 12 meteorological stations in Shijiazhuang of Hebei Province (The shaded for terrain height, Unit: km)

2 能见度时空变化特征

2.1 时间分布

图2给出1980—2013年石家庄地区平均能见度的年变化,可以看出,石家庄地区年均能见度气候值(1981—2010年)为11.9 km,1980年以来平均能见度整体呈显著下降趋势(通过 $\alpha = 0.001$ 的显著性检验),变化率为 $-1.02 \text{ km} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,从3a滑动平均来看,能见度的变化具有一定的阶段性,1980—1990年代能见度持续下降明显,2000—2007年波动变化,无明显趋势,而后呈上升趋势。四季平均能见度也均呈下降趋势(图略),其中夏季下降趋势最明显,趋势变化率为 $-1.3 \text{ km} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,秋季次之,春季下降趋势最小,为 $-0.5 \text{ km} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

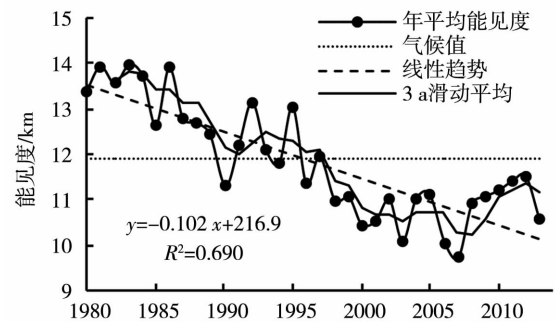


图2 1980—2013年石家庄地区平均能见度的年变化
Fig. 2 The annual variation of average visibility in Shijiazhuang of Hebei Province from 1980 to 2013

1—5月随着气温回暖,大气湍流活动增强,石家庄地区能见度逐渐增大(图3),5月达到全年最大值(平均13.6 km);6—8月随着雨季的来临,空气湿度增大,能见度下降,8月平均值降至11.2 km;

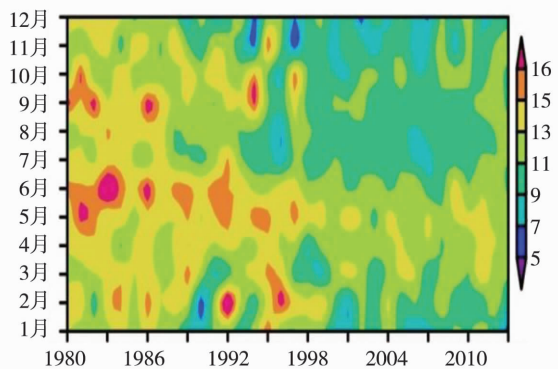


图3 1980—2013年石家庄地区各月平均能见度的年变化(单位:km)

Fig. 3 The annual variation of average visibility from January to December in Shijiazhuang of Hebei Province during 1980 - 2013 (Unit: km)

9月降水明显减弱,空气湿度下降,能见度稍有上升(平均12.2 km);10—12月气温下降,大气层结较稳定,能见度下降,12月降至全年最低值(平均10.4 km)。另外,1998年前后能见度变化较大,1998年之前各月平均能见度均 ≥ 11 km,1980—1998年平均能见度达12.7 km;1998年之后能见度明显下降,1999—2013年平均能见度为10.8 km,较前期下降了15.3%,其中7月—翌年2月能见度 < 10 km。

2.2 空间分布

从1980—2013年平均能见度空间分布来看(图4a),石家庄地区平均能见度基本在12 km左右,其中在正定县和新乐县交界、赞皇县分别存在2个高

值中心,平均能见度分别为14 km和13.3 km;而在鹿泉市和市区交界、赵县分别有2个低值中心,平均能见度仅9.8 km。四季平均能见度的空间分布与年平均能见度基本相似(图略),均在正定县和新乐县交界处、赞皇县存在2个高值中心,而在市区与鹿泉市交界处、赵县存在2个低值中心。不同的是,从春季到冬季平均能见度逐渐降低,高值中心范围逐渐缩小,冬季赞皇县的高值中心基本消失;低值中心的范围逐渐扩大,秋、冬季赵县的低值中心已扩大至赵县、藁城市、无极县及以东地区,而冬季鹿泉市与市区交界的低值中心也扩大至平山、灵寿、栾城、井陘等县(市)区。

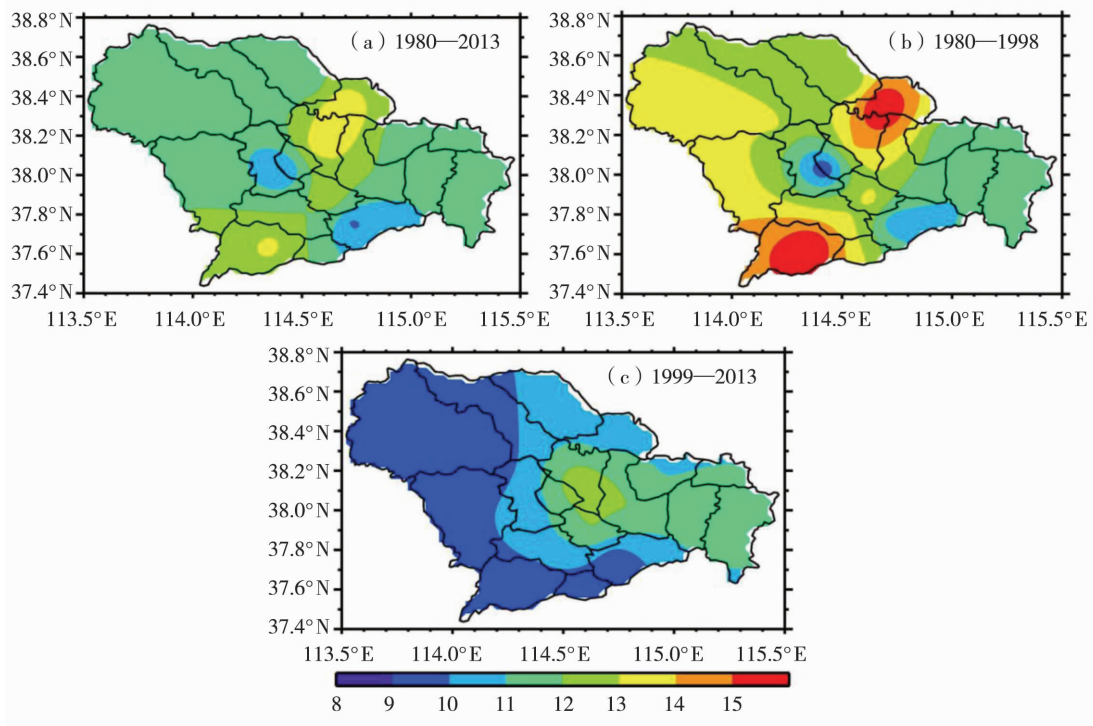


图4 1980—2013年石家庄地区不同时期平均能见度空间分布(单位:km)

Fig. 4 The spatial distribution of annual average visibility at different periods during 1980—2013 in Shijiazhuang of Hebei Province (Unit: km)

由前面分析可知,1998年前后石家庄地区能见度发生明显变化,因此以1998年为界分析1980—1998年(图4b)和1999—2013年(图4c)平均能见度空间分布。发现,1980—1998年与1980—2013年整个时段平均能见度的空间分布较相似,也在正定县和新乐县交界、赞皇县分别存在2个高值中心,平均能见度分别达16.8 km和16.1 km;而在鹿泉市与市区交界、赵县分别为2个低值中心,平均能见度分别为9 km和10.3 km。不同之处是,1980—1998年在井陘县和平山县能见度也较高,平均能见度为13 km(图4b)。1998年之后,除东部地区无变

化和市区与鹿泉市交界处略增加外,其余地区平均能见度均较前期有所减少,且能见度由东向西逐渐递减,西部灵寿、平山、井陘、赞皇等县(市)区平均能见度仅9 km,而东部县(市)区平均能见度在12 km左右,在市区和正定县交界处有一大值中心,平均能见度为13 km,变化最大的是赞皇县(图4c)。

3 能见度变化成因

王喜全等^[23]认为,能见度变化是多方面因素综合造成的结果,不仅与经济发展相伴随的污染物排放增加有关,近年来冷空气活动减弱也是一个不容

忽视的自然因素。研究表明^[24-25],石家庄地区属煤烟型污染,PM_{2.5}和PM₁₀粒子的主要来源为燃煤。由河北省能源消耗总量及产业结构可以看出(图5a),1980年以来,河北省能源消耗总量呈持续上升趋势,尤其在2000年之后增速明显;煤炭在能源消耗总量的比例在90%附近波动,2000年以前相对较

低,均在90%以下,且1985—1999年期间较稳定,而后波动增加,至2009年开始持续减小。石家庄地区能见度迅速下降与同期煤炭比重增加密切相关,2010年之后随着能源消耗结构的调整,煤炭比重明显下降,这一时期的能见度也有所回升。

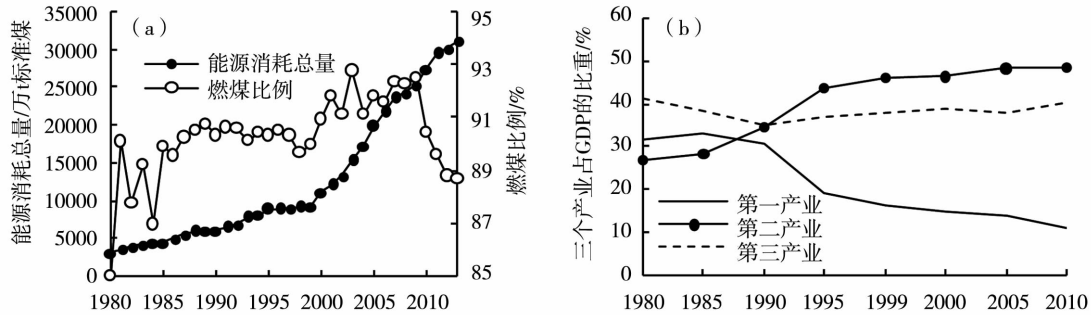


图5 1980—2013年河北省能源消耗总量和煤炭占能源消耗总量的比重(a)及石家庄3大产业所占比重(b)变化

Fig. 5 The annual changes of energy consumption and ratio of coal to total energy consumption in Hebei (a), and the proportion of three major industries in Shijiazhuang of Hebei (b) during 1980 - 2013

由图5b可以看出,1980—1990年代中期石家庄第二产业的比重迅速增加,而后持续缓慢增加;第一产业比重在1990年代以前变化不大,而后持续减小;第三产业比重波动不大。第二产业比重的持续增加和第一产业比重的持续减小,使得2000年之后工业源废弃物和污染物排放效率明显增多(表1)^[26],对石家庄地区空气质量产生较大影响。能见度空间分布形势的改变与城市化和工业化发展有很大关系。由于石家庄地区特殊的地形特征,西北部的山区地带,在1990年代之前人烟稀少,工业化水平较低,而市区人口密度大,经济发展较快^[5],因此在1998年之前山区能见度较高,而市区能见度偏低;1990年代之后随着经济和人口的迅速发展,西北部县市矿山开采日益增加(图6),且能源消耗增大,环境污染加重^[27],形成了能见度东高西低的分布形势。

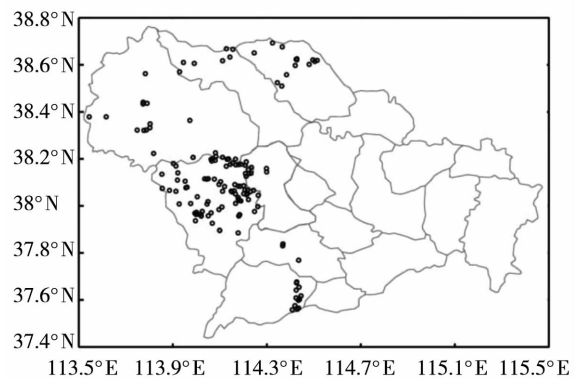


图6 石家庄地区露天矿山区域分布

Fig. 6 The spatial distribution of surface mines in Shijiazhuang of Hebei Province

表1 2000年以来石家庄工业源废弃物及污染物排放效率

Tab. 1 The industrial waste and pollutant emission efficiency in Shijiazhuang of Hebei since 2000

年份	工业源废弃物/万t	污染物总排放效率/万元·t ⁻¹
2000	25.42	3.12
2005	43.26	4.18
2010	100.34	5.06

按照《中华人民共和国国家标准(GB/T 20484-2006):冷空气等级》,统计了1980—2013年石家庄地区发生中等强度以上冷空气的次数。从空间分布来看(图7a),石家庄地区中等强度以上冷空气发生次数的空间分布以市区—平山一带为中心分别向东北、西南、东南方向逐渐增加,东部辛集也存在一低值区,总体来看,石家庄外围地区冷空气活动相对频繁。其中,新乐—正定—市区—赞皇一带冷空气发生次数的分布形势与该地区能见度空间分布(图4a)一致,市区为冷空气活动最差,平均能见度为低值中心,由市区分别向正定—新乐和赞皇方向冷空

气活动加强,平均能见度也呈增加趋势。由图 7b 可看出,1980 年以来石家庄地区中等强度以上冷空气发生次数整体呈显著下降趋势(通过 $\alpha = 0.001$ 的

显著性检验),与能见度的整体变化特征一致,表明冷空气活动减少不利于污染物的排放和稀释,致使大气能见度降低。

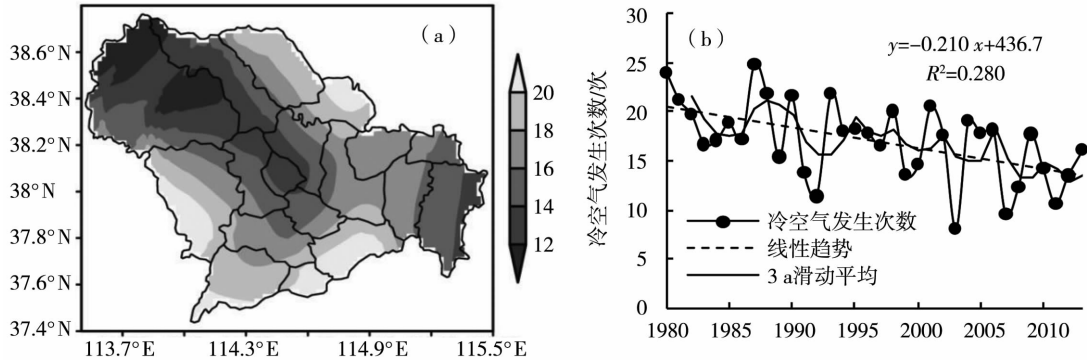


图 7 1980—2013 年石家庄地区中等强度以上冷空气平均发生次数的空间分布(a, 单位:次)及年际变化(b)

Fig. 7 The spatial distribution (a, Unit:times) and annual variation (b) of average occurrence frequency of cold air above moderate intensity in Shijiazhuang of Hebei during 1980 - 2013

综上所述,石家庄地区能见度的时空变化与工业发展和污染物排放密切相关,同时也受冷空气活动的影响,具体哪类因素占主要地位,还需通过数值模拟等方法进行更加深入的分析。

4 能见度与相对湿度和颗粒物浓度的相关模型

研究表明,当大气能见度较差时,大气中的气溶胶和相对湿度对能见度的影响比重较大^[13]。相对湿度较低时,粒径 $< 2 \mu\text{m}$ 的细粒子对大气能见度作用明显^[28],但随着相对湿度的增大,气溶胶粒子吸湿增长,使得粒径 $> 2 \mu\text{m}$ 的粗粒子对能见度影响的贡献逐渐增大^[29]。因此,需同时考虑 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和相对湿度对大气能见度的影响,建立能见度预报模型。图 8 给出 2014 年石家庄市逐时能见度与相对湿度和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、 PM_{10} 浓度的散点图(样本数共 8 731 个),并进行了一元非线性拟合。发现,能见度与相对湿度呈指数函数关系,而与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、 PM_{10} 浓度呈幂函数关系,回归方程分别为:

$$\begin{cases} y_1 = 25.927 \exp(-0.0269 x_1) \\ y_2 = 0.4927 x_2^{-1.0287} \\ y_3 = 0.8653 x_3^{-1.0832} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 分别为相对湿度(%), $\text{PM}_{2.5}$ 浓度($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)和 PM_{10} 浓度($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), y_1 、 y_2 、 y_3 为能见度(km)。其中,能见度与相对湿度、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及 PM_{10} 浓度的相关系数 R 分别为 -0.54 、 -0.71 和 -0.48 ,均通过 $\alpha = 0.001$ 的显著性检验。可见,能见度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的相关性更高。

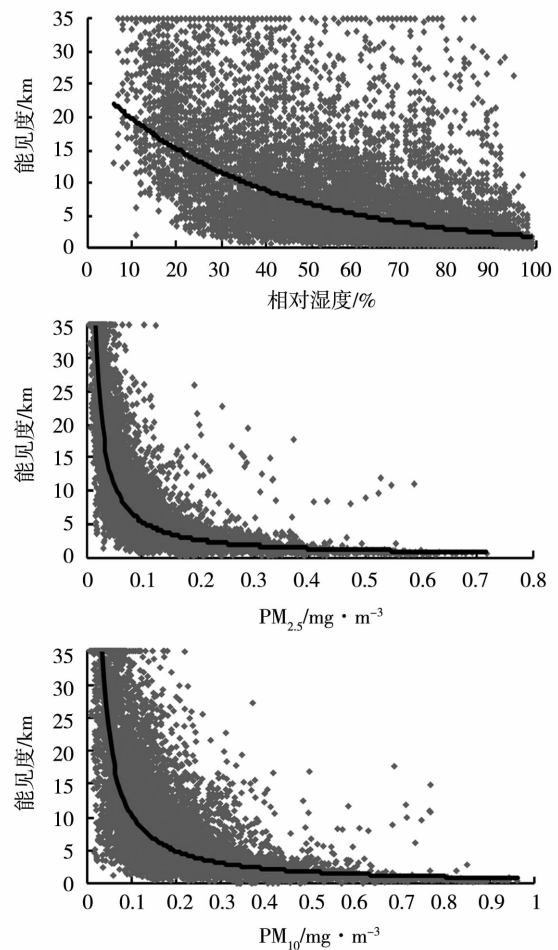


图 8 2014 年石家庄市逐时能见度与相对湿度、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、 PM_{10} 浓度的拟合关系

Fig. 8 The fitting relation between hourly visibility and relative humidity, concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in Shijiazhuang of Hebei in 2014

基于以上分析结果,利用1stOpt软件对石家庄大气能见度进行多元非线性拟合,拟合公式如下:

$$y = a + bx_1^c + dx_2^e + f \exp(gx_3) \quad (2)$$

式(2)中, y 为大气能见度(km), x_1 、 x_2 分别表示 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 质量浓度($mg \cdot m^{-3}$), x_3 为相对湿度

(%), $a \sim g$ 为系数。由于不同相对湿度条件下, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度对能见度影响的贡献不同,表2给出不同相对湿度条件下模型的拟合参数及均方差(RMSE)、相关系数(R),相关系数均通过 $\alpha = 0.001$ 的显著性检验。

表2 不同相对湿度下大气能见度与相对湿度、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的非线性拟合系数

Tab.2 The nonlinear fitting coefficients between visibility and relative humidity, concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in different relative humidity conditions in Shijiazhuang of Hebei Province

相对湿度/%	a	b	c	d	e	f	g	RMSE	R
$RH \leq 20$	700.382	23.570	-0.077	-723.171	0.012	-0.642	0.111	5.834	0.764
$20 < RH \leq 40$	-39.917	7.428	-0.360	7.424	-0.222	26.417	-0.006	4.973	0.855
$40 < RH \leq 60$	-10.350	7.095	-0.412	5.106	2.026	-0.010	0.0818	3.617	0.854
$60 < RH \leq 80$	-20.049	12.219	0.313	9.298	0.947	-0.003	0.081	2.919	0.887
$RH > 80$	17.226	0.593	-0.718	0.120	-1.115	-6.763	0.011	2.523	0.853

为验证公式(2)大气能见度拟合的合理性,利用2014年1月(代表冬季)和7月(代表夏季)相对湿度、 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 质量浓度逐时数据(样本数均为744个),根据表2中的系数,对大气能见度拟合,并结合同期逐时能见度资料,进行拟合值与实测值的对比分析(图9)。可以看出,2014年1月能见度拟合值与实测值随时间变化吻合较好,拟合值大都比实测值偏高,且能见度越低误差相对越小(图9a、图9b),拟合值与实测值相关系数达0.85(通过 $\alpha =$

0.001的显著性检验),均方差为3.1 km,均方差与观测值比值为0.79。7月能见度拟合值与实测值随时间变化吻合也较好(图9c、图9d),拟合值大部分比实测值偏低,但能见度 < 10 km的拟合值大部分比实测值偏高,其相关系数为0.91(通过 $\alpha = 0.001$ 的显著性检验),均方差为4.9 km,均方差与观测值比值为0.41,误差较1月略大。总体而言,(2)式对石家庄大气能见度有一定的模拟能力,可利用 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 浓度及相对湿度对大气能见度进行预报预测。

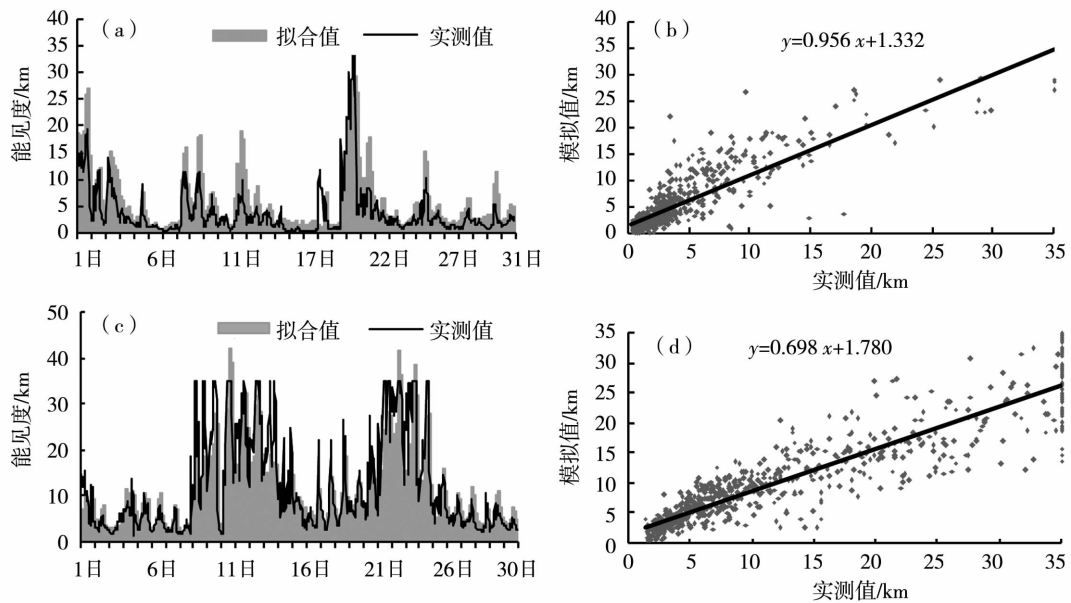


图9 2014年1月(a,b)、7月(c,d)石家庄能见度的拟合值和实测值的时间演变(a,c)及二者散点图(b,d)

Fig.9 The evolution (a, c) of observed and simulated visibility and their correlation (b, d) in January (a, b) and July (c, d) of 2014 in Shijiazhuang of Hebei Province

为提高能见度的业务预报水平,将上述建立的石家庄能见度多元非线性拟合公式应用到业务预报工作中。 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度采用本地建立的动态多元回归模型的预报值,该模型采用多元线性逐步回归方法,基于前期 30 d 的地面气象观测资料和污染物浓度数据建立模型,对未来 7 d 污染物浓度进行预测。该模型可根据不同天气形势或者季节变化不定地修订,使污染物预报值与实测值更接近。相对湿度采用 T639 预报的 2 m 相对湿度, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度和相对湿度每日预报时次为 02:00、05:00、08:00、11:00、14:00、17:00、20:00、23:00,间隔为 3 h。下面以 2015 年 8 月 16—18 日个例来评估公式(2)的预报准确性。

2015 年 8 月 16—18 日石家庄市空气质量逐渐变差,能见度也逐渐随之下降,其中 16 日为轻度污染,17—18 日为中度污染,18 日下午 14:00 开始地面风速增大到 $1.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,18:00 开始出现降雨,空气质量好转,能见度也随之升高。图 10 是 2015 年 8 月 16—18 日石家庄能见度的预报值与实测值对比结果,可以看出预报值与实测值变化趋势基本一致,二者相关系数达 0.93(通过 $\alpha = 0.001$ 的显著性检验),但大部分预报值比实测值偏低,尤其是能见度较高时段二者差异明显偏大,总体上该模型对能见度具有一定的预报能力。

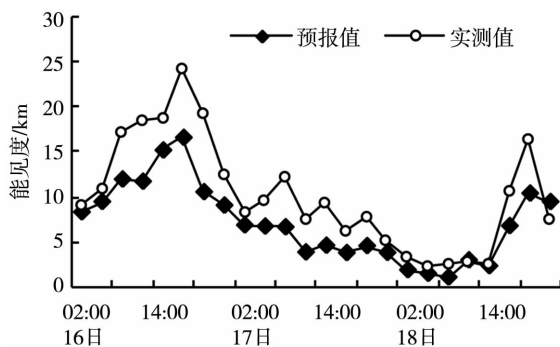


图 10 2015 年 8 月 16—18 日石家庄市逐 3 h 能见度预报值与实测值对比

Fig. 10 The comparison between 3 hourly forecasted and observed visibility from 16 to 18 August 2015 in shijiazhuang of Hebei

5 结论

(1)1980—2013 年,石家庄地区年均可见度为 11.9 km,总体上以 $-1.0 \text{ km} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率呈下降趋势。四季平均能见度也均呈下降趋势,其中夏季下降趋势最明显,春季下降趋势最小。5 月平均

能见度为全年最大值(13.6 km),12 月最小(10.4 km)。1998 年前后能见度变化较大,1998 年之前各月平均能见度均 $> 11 \text{ km}$,之后明显下降。

(2)石家庄地区平均能见度在正定县和新乐县交界、赞皇县分别存在 2 个高值中心,而在鹿泉市和市区交界、赵县分别有 2 个低值中心。从春季到冬季平均能见度逐渐降低,高值中心范围逐渐缩小,低值中心范围逐渐扩大。

(3)石家庄地区相对湿度对能见度的影响较大,二者存在显著指数函数关系,而 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度与能见度存在显著幂函数关系。因此,构建了能见度与相对湿度和 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度的多元非线性拟合模型,并获得不同相对湿度下模型的拟合系数。经检验,该模型能够反映石家庄能见度的变化规律,对能见度具有一定的预报能力。

参考文献

- [1] 秦世广,石广玉,陈林,等. 利用地面水平能见度估算并分析中国地区气溶胶光学厚度长期变化特征[J]. 大气科学,2010,34(2):449-456.
- [2] 白爱娟,钟文婷,华兰,等. 成都市大气能见度变化特征及影响因素研究[J]. 中国环境监测,2014,30(2):21-25.
- [3] 周书华,倪长健,刘陪川,等. 成都市 1980~2010 年能见度的变化趋势分析[J]. 成都信息工程学院学报,2014,29(1):91-96.
- [4] 张浩,石春娥,谢伟,等. 安徽省 1955-2005 年城市大气能见度变化趋势[J]. 气象科学,2008,28(5):515-520.
- [5] 范引琪,李春强. 1980-2013 年京、津、冀地区大气能见度变化趋势研究[J]. 高原气象,2008,27(6):1392-1400.
- [6] Doyle M, Dorling S. Visibility trends in the UK 1950-1997[J]. Atmos Environ, 2002,36(19):3161-3172.
- [7] Ghim Y S, Moon K C, Lee S, et al. Visibility trends in Korea during the past two decades[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2005,55(1):73-82.
- [8] 张智,陈玉华,周红. 宁夏雾日和霾日的变化趋势分析[J]. 干旱气象,2013,31(4):714-719.
- [9] 江文华,刘德,陈勇航,等. 1980-2012 年重庆地区霾日时空变化特征[J]. 干旱气象,2015,33(4):602-606.
- [10] 邵振平. 郑州机场能见度变化特征及雾的成因分析[J]. 气象与环境科学,2014,37(1):75-82.
- [11] 脱宇峰,潘攀,张丽娟,等. 济源市能见度特征及其影响因素分析[J]. 气象与环境科学,2012,35(1):56-61.
- [12] 周巧兰,束炯,王坚捍. 上海地区低能见度特征分析[J]. 气象与环境科学,2009,32(2):26-29.
- [13] 刘和平,代佩玲,张青珍,等. 郑州市大气能见度变化特征及与空气污染的关系[J]. 气象与环境科学,2008,31(4):44-46.
- [14] 田密,陈军,张剑秋. 川西机场一次平流雾影响能见度过程的成因分析[J]. 高原山地气象研究,2013,33(3):77-82.
- [15] 赵清越,刘小渝,李昕翼. 成都市民航气象行业标准的低能见度时空分布特征研究[J]. 高原山地气象研究,2014,34(1):57-61.

- [16] 李霞,王胜利. 1980—2007年新疆地区能见度的变化特征及其影响因子研究[J]. 沙漠与绿洲气象,2012,6(3):14-20.
- [17] 付桂琴,张迎新,张庆红,等. 河北省低能见度事件特征分析[J]. 气象,2013,39(8):1042-1049.
- [18] 刘宁微,马雁军,王扬锋. 辽宁中部城市群夏季大气能见度的观测研究[J]. 气象学报,2012,70(4):815-820.
- [19] 吴兑,邓雪娇,毕雪岩,等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降[J]. 热带气象学报,2007,23(1):1-6.
- [20] 蔡子颖,刘爱霞,韩素芹,等. 天津低能见度特征初探[J]. 气象,2014,40(1):114-118.
- [21] 张素敏,王赞红,张荣英,等. 石家庄市大气能见度变化特征及其与大气颗粒物碳成分的关系[J]. 河北师范大学学报,2008,32(6):825-833.
- [22] 李良玉,任爱玲,梁银英. 石家庄市颗粒物质量浓度及粒度随高度变化规律[J]. 环境科学与管理,2007,32(1):61-64.
- [23] 王喜全,孙明生,杨婷,等. 京津冀平原地区灰霾天气的年代变化[J]. 气候与环境研究,2013,18(2):165-170.
- [24] 周静博,张涛,李治国,等. 利用 SPAMS 构建石家庄市 $PM_{2.5}$ 固定排放源成分谱库[J]. 河北工业科技,2015,32(5):443-450.
- [25] 戴春岭,齐堃,康苏花,等. 石家庄市大气 PM_{10} 单颗粒形貌成分分析与来源识别[J]. 河北工业科技,2015,32(5):451-457.
- [26] 牛子宁. 河北省污染物排放的区域比较研究[D]. 石家庄:河北师范大学,2014.
- [27] 常中阳,徐振川,许权贵,等. 石家庄地区燃煤污染与防治分析[J]. 能源与环境,2001(7):30-34.
- [28] 宋明,韩素芹,张敏,等. 天津大气能见度与相对湿度和 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 的关系[J]. 气象与环境学报,2013,29(2):34-41.
- [29] 林俊,刘卫,李燕,等. 大气气溶胶粒径分布特征与气象条件的相关性分析[J]. 气象与环境学报,2009,25(1):1-5.

Variation Characteristics of Atmospheric Visibility and Their Relationship with Relative Humidity and Particle Concentration in Shijiazhuang of Hebei

WANG Xiaomin, HAN Juncai, CHEN Jing, QIAN Weimiao, YUE Yanxia

(Shijiazhuang Meteorological Bureau of Hebei Province, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Based on the visibility of 12 meteorological stations in Shijiazhuang of Hebei Province from 1980 to 2015 and the hourly relative humidity and $PM_{2.5}$, PM_{10} concentration from 2014 to 2015, the spatial and temporal distributions of visibility were analyzed in Shijiazhuang during 1980-2013, firstly. Then, the relationships between visibility and relative humidity as well as $PM_{2.5}$, PM_{10} concentration were studied, and on this basis, the multiple nonlinear forecast model of visibility was further established. The results are as follows: (1) The annual average visibility significantly decreased with rate of $-1.0 \text{ km} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ in Shijiazhuang since 1980, and the decreasing trend of average visibility in summer was most obvious, while it was smallest in spring. (2) By comparison of the visibility before and after 1998, the average visibility decreased by 15.3% in Shijiazhuang of Hebei. In space, there were two high centers in the north-central and south-central of Shijiazhuang and two low centers in the urban district of Shijiazhuang and Zhaoxian before 1998, while the visibility gradually decreased from east to west after 1998. (3) The relation of visibility with relative humidity was an exponential function, while the relationships of visibility with $PM_{2.5}$, PM_{10} concentration were power functions. Therefore, the multiple nonlinear fitting model of visibility was established based on relative humidity, $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentration, the model was able to simulate and forecast the visibility in Shijiazhuang to some extent by testing of the observation.

Key words: visibility; relative humidity; particle concentration; temporal and spatial features; nonlinear fitting