

陈婧, 马志强, 胡天洁, 等. 2019. 华北背景地区大气能见度变化特征及影响因素分析 [J]. 气候与环境研究, 24 (2): 277–288. Chen Jing, Ma Zhiqiang, Hu Tianjie, et al. 2019. Variation characteristics of atmospheric visibility and its influence factors in the background area of North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24 (2): 277–288, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18085.

华北背景地区大气能见度变化特征及影响因素分析

陈婧¹ 马志强² 胡天洁¹ 卢俐¹ 林润生¹

¹ 北京市气象信息中心, 北京 100089

² 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089

摘 要 基于 1980~2014 年上甸子国家级地面气象台站人工观测的大气水平能见度数据和大气成分站资料, 采用 Mann-Kendall 趋势分析及突变检验法对大气能见度进行分析, 并结合气象和污染要素进行相关性检验, 以了解华北背景地区大气能见度的变化趋势及其影响因素。结果表明: 上甸子地区年均能见度呈下降趋势, 能见度最大和最小变率出现在夏季和春季, 分别为 $3.4 \text{ km} (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $1.7 \text{ km} (10 \text{ a})^{-1}$; 冬季能见度 (38.1 km) 最高, 秋季 (36.2 km) 次之, 春季 (32.8 km) 和夏季 (31.4 km) 较低; 突变分析表明上甸子地区的年均能见度未出现明显突变。能见度受各类气象因子的综合影响。根据 Person 相关和偏相关的统计结果, 能见度与相对湿度和风速均呈明显负相关; 与气压呈明显的正相关; 而与气温的相关系数时正时负, 表明气温对能见度的影响具有两面性。能见度下降的主要原因为大气污染, 能见度随着大气细颗粒物增加呈幂指数降低 (决定系数 $R^2=0.98$, 显著性水平 $p<0.01$); 能见度为 10 km 时对应的细颗粒物 (PM_{2.5}) 的边界浓度为 $74 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 在现行的国家环境空气质量标准二级标准 ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 下, 可以使华北背景地区保持较高的大气能见度 ($\geq 10 \text{ km}$)。

关键词 能见度 变化趋势 Mann-Kendall 方法 气象要素 细颗粒物 (PM_{2.5})

文章编号 1006-9585 (2019) 02-0277-12

中图分类号 P49

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18085

Variation Characteristics of Atmospheric Visibility and Its Influence Factors in the background area of North China

CHEN Jing¹, MA Zhiqiang², HU Tianjie¹, LU Li¹, and LIN Runsheng¹

¹ Beijing Meteorological Information Center, Beijing 100089

² Beijing-Tianjin-Hebei Prediction and Early Warning Center for Environmental Meteorology, Beijing 100089

Abstract In virtue of Mann-Kendall rank statistics, the trends and the abrupt variations of visibility were analyzed using the data of manual air horizontal visibility at the Shangdianzi meteorological station, Beijing from 1980 to 2014. In addition, factors affecting the trend of visibility were analyzed by exploring the relationships between visibility and meteorological elements, as well as atmospheric pollutants, at the background area of North China. The results showed that annual means of visibility experienced a significant decrease, the maximum and the minimum trends of the annual mean visibility were $3.4 \text{ km} (10 \text{ a})^{-1}$ in summer and $1.7 \text{ km} (10 \text{ a})^{-1}$ in spring, respectively. The best visibility appeared in winter (38.1 km), and then in autumn (36.2 km). The worst values were observed in spring (32.8 km) and summer (31.4 km). The annual mean visibility showed no significant abrupt changes. In this analysis, the visibility had a negative correlation with relative humidity and wind speed, and a positive correlation with pressure, and a positive or negative

收稿日期 2018-06-30; **网络预出版日期** 2018-11-09

作者简介 陈婧, 女, 1984 年出生, 博士, 主要研究方向为气象资料应用。E-mail: chenjinn@hotmail.com

资助项目 北京市自然科学基金项目 8194063, 国家自然科学基金项目 41475135, 北京市科技新星计划 xx2017079

Funded by Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant 8194063), National Natural Science Foundation of China (Grant 41475135), Beijing New-star Plan of Science and Technology (Grant xx2017079)

correlation with temperature, which indicated that the influence of temperature on visibility has two sides. The further study pointed out that the degradation of visibility was mainly caused by the high concentration of aerosol particles ($\text{PM}_{2.5}$) ($R^2=0.98$, $p<0.01$), which suggested that the concentration of $\text{PM}_{2.5}$ should be controlled below $74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to make a good visibility ($\geq 10 \text{ km}$) in Shangdianzi. Keeping the $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration equal or below the secondary standards of the National Ambient Air Quality Standard ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) is expected to perform good visibility ($\geq 10 \text{ km}$) in the background area of North China.

Keywords Visibility, Trend, Mann-Kendall method, Meteorological element, $\text{PM}_{2.5}$

1 引言

能见度是大气透明度的表征,可较好反映近地面大气的洁净程度,是空气质量的重要指标(Zhang et al., 2010),其恶劣程度与交通运输、人民生活 and 人体健康密切相关(Huang et al., 2009; Thach et al., 2010)。能见度与大气环境质量密切相关,同时其资料观测序列相对较长。因此,可将能见度作为空气质量监测资料的替代资料,用以研究空气质量的长期变化趋势(Liu et al., 2017)。20 世纪 60 年代,国外学者已开始研究能见度变化趋势,采用的方法主要有累积百分率法、Ridit 法和“非常好能见度”出现频率等分析方法(Sloane, 1982a, 1982b; Doyle and Dorling, 2002)。国内利用上述方法分别对北京、广州等重点城市和地区的能见度变化趋势进行了分析(张运英等, 2009; 彭艳等, 2011; 余予等, 2013; 郭晓梅等, 2014)。此外,吕建华等(2016)研究了济南市大气能见度变化特征及其与空气污染和相对湿度的关系。郭军等(2016)利用环渤海地区 365 个地面气象站逐日能见度观测资料,统计分析该地区 1980~2012 年能见度的变化特征以及不同等级能见度的主要影响因子,结果表明人为空气污染导致城市大气能见度显著下降。

华北地区是中国的政治中心和经济重心,人口稠密。近年来,由于经济发展迅速,城市化进程加快,该区域已经成为全国乃至全世界空气污染最为严重的地区(Cheng et al., 2016)。因此,对华北地区大气能见度的趋势变化及影响因素的分析就显得至关重要。已有的关于该地区大气能见度趋势的研究多采用简单统计分析,且研究范围仅局限于其大中城市(范引琪和李春强, 2008),缺乏对原始资料进行细致地辨别和筛选,得到的结论多为能见度变化是气象条件和人为因素综合影响的结果。这并不能客观地反映人为空气污染对大气环境的影响。此外,华北地区城市密集,各个城市的能见度长期

变化趋势和季节变化差异较大。因此,迫切需要对背景地区的能见度变化特征进行研究,从而获得华北地区的特征值。

本文利用 1980~2014 年上甸子国家级地面气象台站人工观测的大气水平能见度数据和大气成分站资料,采用 Mann-Kendall 趋势分析突变检验法,对华北背景地区大气能见度的变化趋势和突变性进行分析。同时结合气象要素和大气污染物数据对影响该区域能见度变化的主要贡献因子进行研究。以深入了解华北背景地区大气能见度的变化趋势及其影响因素,为提高该地区大气能见度的方案制定提供参考。

2 数据与方法

2.1 资料来源

北京上甸子区域大气本底站($40^{\circ}39'N$, $117^{\circ}07'E$)(海拔 293 m)是世界气象组织区域大气本底观测站之一。该站位于北京市东北部的密云县高岭镇上甸子村,距北京市区约 120 km,距离天津约 210 km,距离石家庄约 520 km。该站地处暖温带半湿润季风气候区,春、秋季节较短,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,周边 30 km 内没有密集的工业区和人群,主要土地覆被类型为林地和农田等。该站主要受当地盛行风向影响,春夏季主导风向是“西南西”,秋冬季主导风向是“东北东”(程已阳等, 2015)。该地大气污染物浓度以及能见度水平代表京津冀的区域背景状况。

本文采用的气象资料包括 1980~2014 年上甸子地面定时水平能见度,相应时次地面气象站观测的常规气象要素(相对湿度、气温、气压和 10 m 风速),以及人工观测天气现象日值。上述数据均经过严格的“台站级—省级—国家级”三级质控(任芝花和熊安元, 2007)。天气现象日值经过“台站级—省级”两级质控。水平能见度为每天 3 次人工定时观测,依次为 08:00(北京时间,下同)、14:00

和 20:00。本文仅使用 14:00 观测资料。原因是 20:00 为夜间或傍晚观测, 所选的目标物与白天目标物不同, 易造成观测资料的不一致性; 08:00 的能见度易受辐射雾影响, 且夜间形成、尚未被破坏的接地逆温也可能导致该时段的大气中颗粒物浓度升高, 能见度降低, 但一般都会在中午消散(赵普生等, 2011)。除空气污染条件外, 能见度还主要受气象因素的影响, 如降水、雾、大风、沙尘暴、扬沙和高湿(相对湿度 $>90\%$)等天气现象可导致大气能见度明显下降。因此, 为了更准确地得到人为排放等因素对能见度的影响, 必须首先剔除天气现象的影响。轻雾与霾的观测经常容易混淆, 因此基于当空气相对湿度 $<90\%$ 时, 雾难以形成的原理, 资料筛选时只保留相对湿度 $<90\%$ 的能见度数据, 这样就既可把轻雾中被误报的霾保留下来, 又可以把霾中被误报的轻雾去掉(Che et al., 2007)。根据上述资料筛选的原则, 本文对数据做以下处理: 1) 以 14:00 的能见度值代表该日的观测数据; 2) 剔除 14:00 出现降水、雾、大风、扬尘和沙尘暴这 5 种天气现象的能见度观测数据; 3) 剔除高湿度条件下(相对湿度 $\geq 90\%$)的能见度观测数据。

本文选取的资料还包括 2006~2014 年上旬子大气细颗粒物(PM_{2.5})观测数据。观测仪器为美国 TEOM 公司生产的 1400 a 振荡天平颗粒物采样仪(唐宜西等, 2016), 测量范围为 0.0~5.0 mg/m³, 观测精度 0.1 μg/m³。

2.2 研究方法

本研究采用最小二乘法和 Mann-Kendall (M-K 检验) 非参数秩次统计检验法对年能见度序列的变化趋势进行估计(Wang and Fu, 1992; 魏凤英, 2007)。在用最小二乘法进行分析时, 若 x_i 为样本数量为 n 的某一气候变量, t_i 为 x_i 所对应的时间, 则可建立一元线性回归方程:

$$x_i = a + bt_i, \quad (1)$$

其中, a 为回归常数, b 为回归系数。 a 、 b 值通过最小二乘法估计。 b 的符号表示变量 x 的趋势倾向, 其数值大小反映变化速率。

M-K 法为评估气候要素时间序列趋势的检验方法, 其特点是不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 更适用于类型变量和顺序变量, 适用范围广、人为性少、定量化程度高。在用 M-K 检验进行趋势分析时, 假设 H_0 表示时间序列 ($x_1, x_2, \dots, x_n$) 是数据样本独立同分布, 不存在

趋势; 备择假设 H_1 是双边检验, 对于所有的 i 和 j , 均小于等于 n , 且 $i \neq j$; x_i 和 x_j 的分布是不相同。检验的统计变量 S 按下式计算:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i), \quad (2)$$

其中, sign 为符号函数。当 $x_j - x_i$ 小于、等于或大于 0 时, $\text{sign}(x_j - x_i)$ 分别为 -1、0 或 1。序列的变化趋势 (Z) 分别为:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}, & (S > 0) \\ 0, & (S = 0) \\ (S+1)/\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}, & (S < 0) \end{cases} \quad (3)$$

其中, 当 Z 为正值时, 表示增加趋势; 为负值时, 表示减少趋势。 Z 的绝对值在大于等于 1.28、1.64、2.32 时分别表示其通过了置信度为 90%、95%、99% 的显著性检验。

除用于趋势分析外, M-K 法还可用于突变检验。对于具有 n 个样本量的时间序列 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 构建一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n), \quad (4)$$

其中, 当 $x_i > x_j$ 时, $r_i = +1$, 当 $x_i \leq x_j$ 时, $r_i = 0$ ($j = 1, 2, \dots, i$)。在时间序列随机独立的假定下, 定义统计量为:

$$U_{Fk} = (S_k - \bar{S}_k) / \sqrt{\text{Var}(S_k)} \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (5)$$

其中, 当 $k = 1$ 时, $U_{F1} = 0$ 。 $\text{Var}(S_k)$ 和 S_k 分别表示累计量 S_k 的方差和均值, 在 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 相互独立, 且有相同连续分布时, 可由下式算出:

$$\bar{S}_k = n(n+1)/4, \quad (6)$$

$$\text{Var}(S_k) = n(n-1)(2n-5)/2, \quad (7)$$

U_{Fk} 为标准正态分布, 是按时间序列 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 计算出的统计量序列, 给定显著性水平 α , 若 $U_{Fk} > \alpha$, 则表明序列有明显的趋势变化。按时间序列 x 逆序 $x_n, \dots, x_2, x_1$, 再重复上述过程, 同时使 $U_{Fk} = -U_{Bk}$ ($k = n, n-1, \dots, 1$), $U_{B1} = 0$ 。分析绘出 U_{Fk} 、 U_{Bk} 曲线。当 U_{Fk} 或 U_{Bk} 的值大于 0, 表明序列呈上升趋势, 小于 0 则表明呈下降趋势; 当 U_{Fk} 或 U_{Bk} 的值超过临界线, 表明上升或下降趋势显著。如果 U_{Fk} 和 U_{Bk} 两条曲线出现交点, 且交点在临界线之间, 那么交点对应的值便是突变开始的时间。

运用 SPSS 9.0 对能见度数值与气象要素观测

值作简单相关和偏相关分析, 计算其相关系数。相关性分析前对数据进行正态分布检验。按照张宏等 (2011) 建议的方法, 运用 Minitab 14.0 分析软件中 Box-Cox 变换的自然对数转换, 将非正态分布数据转换为正态分布。

3 结果与分析

3.1 能见度变化趋势及突变分析

3.1.1 趋势分析

1980~2014 年上甸子地区的年均能见度变化如图 1a 所示。从图中可以看出, 上甸子能见度的年均变化可分为 3 个阶段: 第一个阶段为 1980~1988 年, 能见度呈上升趋势; 第二个阶段为 1988~1998 年, 能见度出现较为长期的快速下降趋势; 第三阶段为 1998~2014 年, 能见度呈缓慢下降趋势。在 35 年间, 上甸子地区能见度呈波动式的变化, 但整体上呈下降趋势, 递减率为 $2.1 \text{ km} (10 \text{ a})^{-1}$ ($p < 0.001$)。余予等 (2013) 分析北京地区能见度变化后指出, 海淀和石景山站点观测的能见度整体呈下降趋势, 递减率分别为 $1.38 \text{ km} (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $2.36 \text{ km} (10 \text{ a})^{-1}$ 。这与本文的研究结果较为接近, 说明华北地区能见度的下降趋势具有区域一致性的特征。

从上甸子能见度变化的季节特征来看, 夏季能见度下降的幅度最大, 达到了 $3.4 \text{ km} (10 \text{ a})^{-1}$; 其次为秋季和冬季, 分别为 $2.4 \text{ km} (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $1.8 \text{ km} (10 \text{ a})^{-1}$; 春季能见度下降的幅度最低, 为 $1.7 \text{ km} (10 \text{ a})^{-1}$ 。表 1 为利用 M-K 法获得的上甸子地区年均和季节平均的气象要素 (相对湿度、气温、气压和风速) 变化趋势检验统计值。由表 1 可以看出, 气压的年均和季节均值均出现下降的趋势, 且其变化趋势均通过了 99% 的显著性检验; 相对湿度年均值呈上升趋势, 并且主要出现在秋季和冬季, 均通过了 90% 的显著性检验。而气温和风速的变化幅度较小, 呈现微弱的上升趋势, 但未通过显著性检验。从气象要素的趋势分析来看, 变化幅度最为显著的是气压和相对湿度, 说明这两个气象因子可能是影响能见度变化的主要气象因素。通常情况下, 当地面受高压控制时, 天气晴好, 太阳辐射强, 热力对流强, 有利于污染物垂直扩散, 因此能见度较好。35 年间, 上甸子地区的气压显著下降 (表 1), 说明该地受低压控制的天气条件相对增加。在此天气条件下, 受大气下沉气流影响, 热力对流减弱, 并常伴有强辐

射逆温, 大气扩散条件差, 污染物浓度高, 进而导致能见度较差。大气相对湿度较大时, 空气中的悬浮颗粒物易附着在水汽上凝结, 形成大量小液滴 (沈家芬等, 2007)。同时颗粒物吸收水汽越多, 造成颗粒物直径增大, 使得消光系数变大, 从而大气能见度变小。相对湿度对大气能见度的影响主要体现在影响消光系数 (Lin et al., 2013)。

表 1 全年和不同季节气象要素的 M-K 趋势分析方法的统计检验值

Table 1 Results of the M-K analysis on annual and seasonal trends of changes in meteorological elements

气象要素	统计检验值				
	全年	春季	夏季	秋季	冬季
相对湿度	0.108*	-0.013	0.056	0.118*	0.183**
气温	0.012	0.018	0.019	-0.004	0.023
气压	-0.082***	-0.094***	-0.070***	-0.062***	-0.083***
风速	0.000	-0.001	0.002	0.002	-0.001

注: *表示通过 90%置信度检验; **表示通过 95%置信度检验; ***表示通过 99%置信度检验。

本文参考 Doyle and Dorling (2002) 的等级能见度分析方法, 并结合上甸子能见度观测数据的监测精度, 选择 5 个区间的能见度 ($< 2.0 \text{ km}$ 、 $2.0 \sim 10.0 \text{ km}$ 、 $10.0 \sim 20.0 \text{ km}$ 、 $20.0 \sim 40.0 \text{ km}$ 和 $> 40.0 \text{ km}$), 对上甸子地区每 10 年和 35 年的能见度日值分布进行统计 (图 2)。不同年代际低能见度 ($< 2.0 \text{ km}$) 出现的比例均较低 (图 2a), 观测期间仅出现 2 d, 分别出现在 20 世纪 90 年代和 2001~2010 年; $2.0 \sim 10.0 \text{ km}$ 能见度的出现比例逐步上升, 从 20 世纪 80 年代的 2.0% 迅速增长至最近 4 年的 15.1%; 而较好能见度 ($20.0 \sim 40.0 \text{ km}$) 以及极好能见度 ($> 40.0 \text{ km}$) 的出现比例则逐步下降, 分别由 20 世纪 80 年代的 26.2% 和 62.2% 下降至 2011~2014 年的 19.6% 和 45.1%。需要指出的是, 不同能见度区间在不同年代际的平均值的变化也存在差异 (图 2b)。以 $2.0 \sim 10.0 \text{ km}$ 能见度为例, 其在 1980~1990 年的平均值为 6.7 km , 而最近 4 年的平均值为 5.3 km , 下降幅度达到 1.4 km ; 与此相反, $> 40.0 \text{ km}$ 能见度在不同年际间均值的变化幅度较小, 2011~2014 年的均值 (48.6 km) 甚至略高于 20 世纪 80 年代 (48.2 km)。上述结果说明, 上甸子地区低能见度天气在不断恶化, 而较好能见度则影响较小, 这可能与人为污染和区域污染输送的加剧有关。一般认为, 当相对湿度 (RH) 小于 90% 且能见度小于 10 km 时, 出现灰霾 (吴兑, 2005)。2011~2014 年上甸子

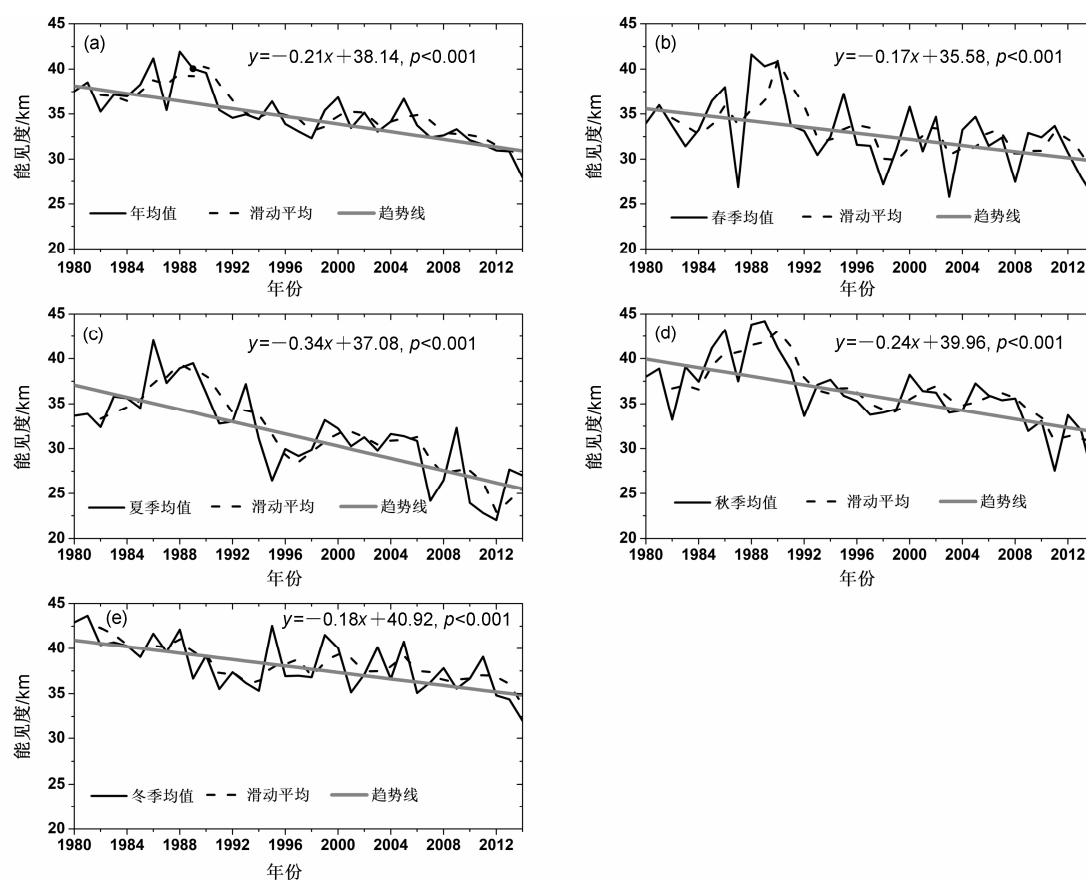


图1 能见度 (a) 年平均和 (b-e) 季节平均变化

Fig. 1 Variations of (a) annual and (b-e) seasonal mean visibility

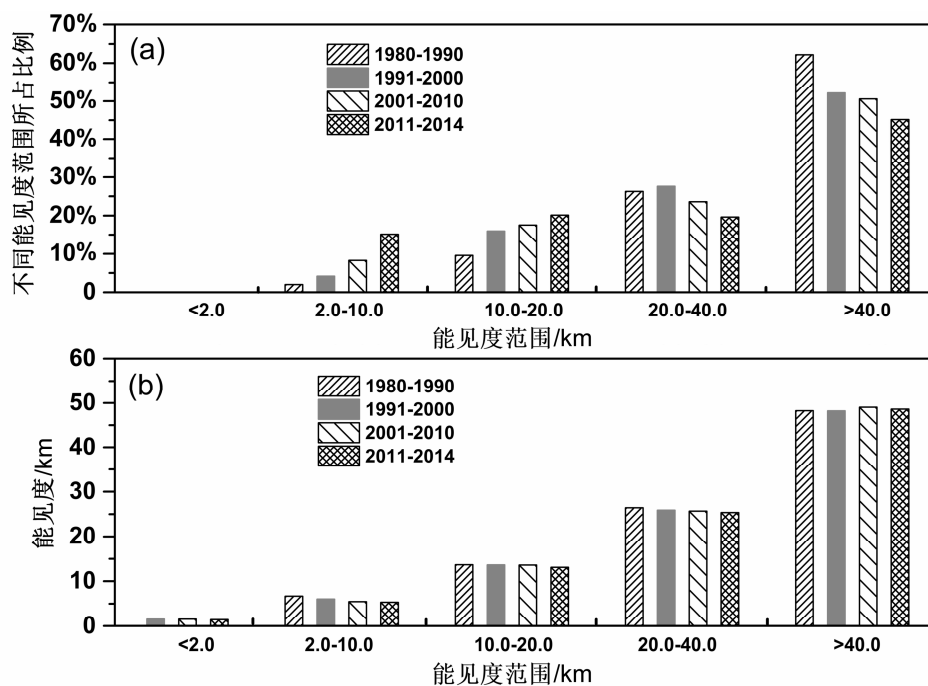


图2 能见度区间的 (a) 百分比分布和 (b) 平均值年际分布

Fig. 2 Histograms of (a) percentages and (b) averages of visibility ranges during four periods

地区灰霾和较好能见度的出现比例分别为 15.1% 和 64.7%，而 1980~1990 年二者的出现比例相应分别为 2.0% 和 88.4%。因此，35 年间上甸子地区能见度逐步下降，大气环境质量不断恶化，并且 2010 年后较好和极好能见度的比例较以往大幅减少。

上甸子地区能见度的上述变化特征，与整个华北地区大气环境质量的变化状况密切相关。上甸子处于燕山山脉的迎风坡。以往的研究指出，华北地区能见度呈显著下降的区域呈现带状分布，其中一条分布在太行山—燕山的迎风坡，该区域从河南的邯郸开始，一直沿着邢台、石家庄延伸至北京北部和遵化一带（郭军等, 2016）。上述区域也是华北平原地区大气污染物的重要输送通道。牟福生等（2016）通过车载差分光学吸收光谱技术（DOAS）对华北平原进行走航观测后发现，在西南稳定风场下，石家庄—保定—北京方向为一条污染物输送通道，而西南风带流经的上述地区是华北平原主要污染源排放区。改革开放以来，尤其是近 10 年来经济的快速增长，化石燃料大量消耗，使得大气污染物的排放急剧增加。这也意味着上述污染高排放地区对华北背景地区污染输送的强度也在逐年增加。颗粒物和气体污染物的影响可能是上甸子地区能见度逐年下降的主导因素。本文将在 3.3 节结合大气污染物的数据详细讨论。

3.1.2 突变分析

本文利用 M-K 突变检验方法对上甸子地区 1980~2014 年的年均能见度进行突变分析。从对气候突变的定义来看，可将突变归纳为均值突变、变率突变、转折突变和跷跷板突变 4 类（符淙斌和王强, 1992）。从图 3 可以看出，上甸子地区能见度的 M-K 突变检验的 UF 统计量在 1996 年超越信度线，但是 UF 统计量和 UB 统计量的交点在信度线之外，因此该地区的能见度在年均尺度上未出现显著的突变。

3.2 能见度季节特征

分析 1980~2014 年上甸子地区各个季节（春季 3~5 月、夏季 6~8 月、秋季 9~11 月、冬季 12 月至 2 月）能见度的平均结果表明：冬季能见度（38.1 km）最高，秋季（36.2 km）次之，春季（32.8 km）和夏季（31.4 km）较低。同为区域背景地区，位于长三角的临安站表现出与上甸子完全相反的季节分布（浦静姣等, 2017），其能见度夏季最大，而冬季最低，并且其季节均值均低于 10 km，远远

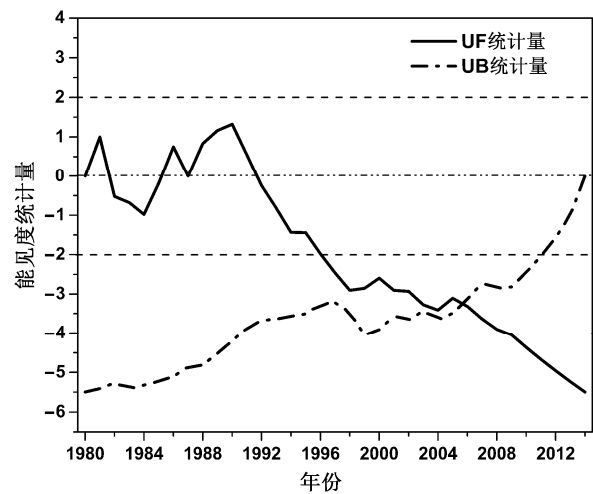


图 3 年平均能见度 M-K 突变检验

Fig. 3 The M-K analysis of the annual mean visibility

低于同时期上甸子的能见度均值，这可能与两个地区的气候条件以及大气污染物季节分布规律不一样有关。与此相反，上甸子地区能见度的季节分布特征与同区域城市地区的结果较为一致。王淑英等（2003）和张宏等（2011）分别对 1999~2000 年以及 2005~2009 年北京城区能见度的季节变化进行统计，发现春季最高，冬季次之，夏季最低。可能的原因是冬春季气温较低，冷空气活动频繁，平均风速较大，有利于污染物的清除；同时春季也是华北地区沙尘天气出现频率最高的季节，沙尘天气会显著降低能见度。尽管在数据处理过程中已剔除沙尘天的数据，但是沙尘天过后仍有大量的沙尘颗粒悬浮，并且这部分沙尘颗粒通常为粒径较小的细粒子（Fang et al., 2016），从而造成消光引起能见度降低。夏季能见度降低可能与夏季易出现高温高湿的天气有关，较高的空气湿度和气温有利于二次气溶胶粒子如硫酸盐的形成，颗粒物的光散射系数增强，从而降低大气能见度。同时，华北地区的降水事件主要集中在夏季。表 2 显示了不同季节能见度数据的有效样本量及其所占的比例，总体来看夏季能见度有效样本量的比例低于 60%。这可能是上甸子地区及同区域的其他城市地区表现出夏季能见度较低的另外一个原因。

图 4 为各月能见度平均值的变化特征。从图中可以看出，1 月能见度平均值最高，达到 39.5 km，并且“极好”能见度出现的比例最高（67%）；7 月能见度平均值最低，仅为 29.7 km，同时“较差”能见度出现的比例最高（13%）。基于上文的分析可

表 2 不同季节能见度数据的有效样本量及其所占的比例
Table 2 Sample sizes of visibility data and their percentages in total samples in each season

时间段	春季		夏季		秋季		冬季	
	有效 样本	所占 比例	有效 样本	所占 比例	有效 样本	所占 比例	有效 样本	所占 比例
1980~1990 年	731	72.2%	576	56.9%	804	80.3%	885	89.2%
1991~2000 年	741	80.5%	528	57.4%	725	79.7%	834	92.4%
2001~2010 年	693	75.3%	552	60.0%	745	81.9%	839	93.0%
2011~2014 年	300	81.5%	220	59.8%	294	80.8%	329	91.1%
合计	2465	76.6%	1876	58.3%	2568	80.6%	2887	91.4%

知较高的平均风速和较低的相对湿度有利于能见度升高。然而，图 4a 显示，平均风速最高的月份为 4 月，但其平均能见度却比平均风速最低的 8 月低，说明 4 月更频繁出现的沙尘天气带来的沙尘颗粒物对能见度降低的影响不容忽视。需要指出的是，与 7 月相比，8 月的平均风速更低并且相对湿度更高，然而 8 月平均能见度高出 7 月 12%。上述结果说明气象要素，如风速和相对湿度，可能不是影响能见度变化的主要原因。

3.3 能见度的影响因素分析

3.3.1 气象要素对能见度的影响

为了确定地面气象要素对大气能见度的影响，对 1980~2014 年间每日 14:00 观测的能见度数值与

同时段的气象要素观测值作相关分析。简单相关结果（表 3）显示，大气能见度与相对湿度、气温和风速均呈现显著的负相关，而与气压呈显著正相关。Pearson 相关分析不仅显示两个变量之间相互影响（包括直接和间接影响）的程度，而且包含了其它相关变量的影响。因此要单独考察两个变量间的相关程度时，需要控制其他变量的影响，此时需要进行偏相关分析。偏相关分析的结果（表 3）显示，在不受其他因素影响的情况下，大气能见度仍与相对湿度呈显著负相关，相关系数为-0.567。空气中水蒸气较丰富时，容易发生凝结而生成大量的小液滴，从而降低能见度（沈家芬等，2007）。

表 3 大气能见度与气象要素间的简单相关与偏相关分析
Table 3 Pearson and partial correlation coefficients between visibility and meteorological elements

	Pearson 相关			偏相关		
	相关系数	概率 p	样本数	偏相关系数	概率 p	样本数
相对湿度	-0.574	0.000	9795	-0.567	0.000	9517
气温	-0.188	0.000	9767	0.154	0.000	9517
气压	0.298	0.000	9796	0.193	0.000	9517
风速	-0.208	0.000	9549	-0.260	0.000	9517

在排除其他因素影响的情况下，大气能见度仍与风速呈显著负相关，相关系数为-0.260。随着风

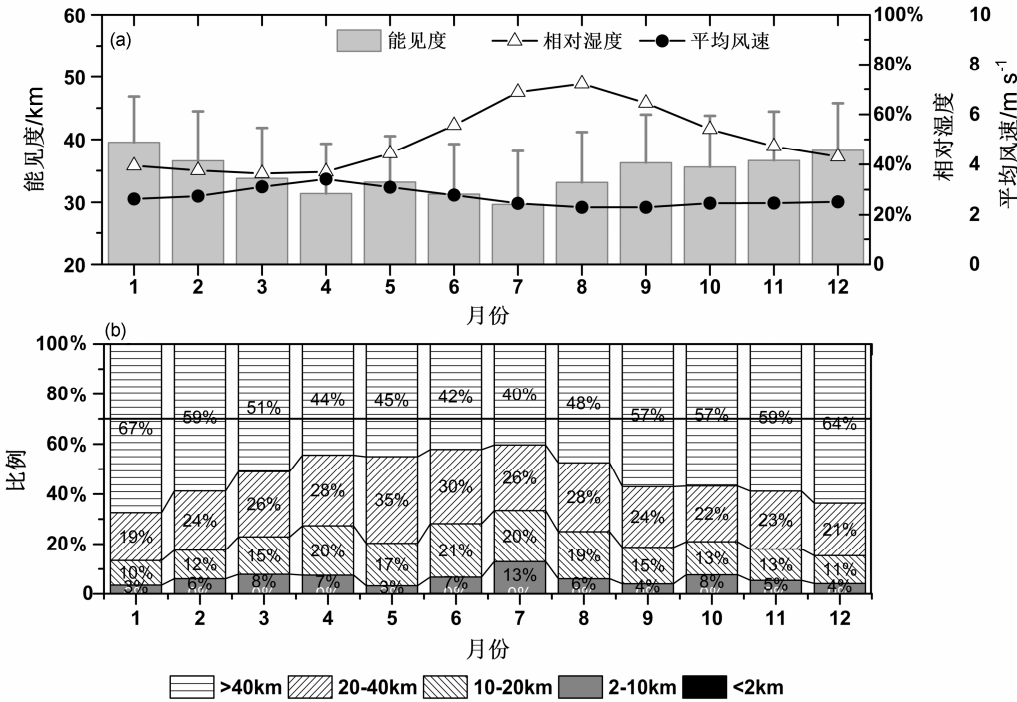


图 4 (a) 能见度以及气象要素和 (b) 不同区间能见度百分比的月变化
Fig. 4 Monthly changes in (a) visibility and meteorological elements, and (b) percentages of visibility within four ranges

速的增强,有利于雾和气溶胶的扩散,大气能见度理应升高。上甸子地区能见度与风速的负相关关系,可能与上甸子所处位置有关。作为区域背景站,外来气团特别是来自上甸子西南方向(京津冀城市群)的气团输送,不仅不会清除污染物,反而会带来污染物,从而影响上甸子的能见度。通过统计了观测期间(1980~2014年)上甸子站点不同风向出现的频率(图5a)发现,来自西南风出现的频率最高,并且较大风速($>5\text{ m/s}$)所占的比例也较高;与此同时,对各个风向上能见度的统计结果显示,西南风对应的能见度数值通常低于其他风向的平均值。因此,能见度与风速的这种负相关关系,主要受到西南气流污染物输送的影响,即占主导的西南风风速越大,带来的上风向(京津冀城市群)区域的污染物越多,从而导致该风向上的能见度值越低。在排除其他因素影响的情况下,气温与大气能见度的相关关系由显著负相关转变为呈显著正相关,表明气温对能见度的影响是两方面的。首先气温的升高有利于大气中二次化学反应的增强,二次气溶胶尤其是消光作用强的硫酸盐和硝酸盐的产生量增加,使得气溶胶的消光作用进一步增强从而降低能见度;与此同时,气温的升高,也意味着大气对流活动增强,有利于污染物的扩散,从而提高能见度。在不受其他因素影响的条件下,气压与大气能见度间仍然存在显著的正相关关系,但是相关系数下降为0.193。当大气处于低压控制时,大气稳定度偏向于稳定状态,大气易于下沉,抑制低层大气污染物向上扩散,甚至形成下沉逆温或辐射逆温,造成近地面大气污染物积累,从而造成能见度

降低。而当大气处于高压控制时,大气稳定度偏向于中性或不稳定状态,在这种天气系统控制下,太阳辐射强,热力对流强,低空大气在外力干扰下易于携带近地面污染物加速上升,在中、高空混合、扩散、稀释,从而降低近地面大气污染物浓度,能见度从而上升。需要指出的是,大范围的高压天气系统下也可能造成污染物的累积。吴国雄等(2002)、陶诗言和卫捷(2006)的早期研究指出夏季西风带高压与西太平洋副高经常并合,使副热带高压产生西进或北跳,在我国华北地区常形成严重的大气污染过程。任阵海等(2008)进一步分析夏秋季节天气系统对污染物浓度分布的研究指出,夏秋季节副热带高压下形成的高压均压场,对污染物有累积效应,从而出现污染物的汇聚,并且其周边流场对区域污染物有输送作用。因此,对于能见度与气压和天气系统的关系仍需要进一步的深入研究。

3.3.2 大气污染对能见度的影响

上甸子地区从2006年开始观测PM_{2.5}。将该数据与同时期能见度进行比较,用以评价大气污染对能见度的影响。由于能见度的观测采用人工的等级观测方式,而PM_{2.5}的观测采用自动仪器,因此将PM_{2.5}的数据按照能见度等级进行平均处理,以增强数据的可比性。同时,为了与能见度数据匹配,选取能见度同时段观测(14:00)的PM_{2.5}数据,并且与能见度数据的处理方式一样,也剔除了降水、雾、大风、扬尘等天气事件及高湿度数据。相关分析结果显示,观测期间大气能见度与PM_{2.5}存在显著的幂指数关系($R^2=0.98$, $p<0.001$,图6a)。

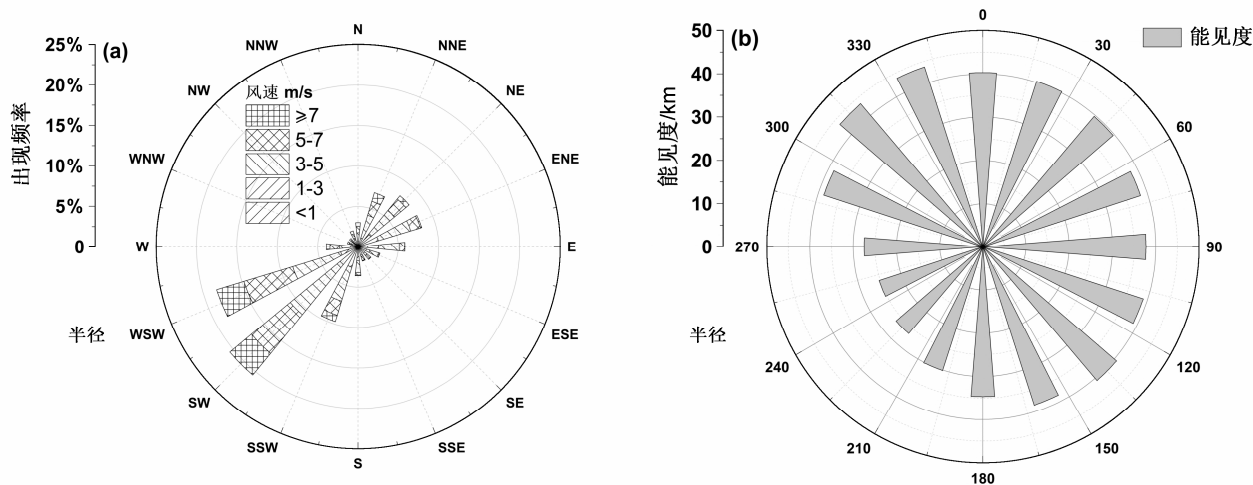


图5 (a) 观测期间的风玫瑰图和 (b) 不同风向下的能见度值统计

Fig. 5 (a) Wind rose during the observational period and (b) average visibility at different wind directions

从该图可以看出,能见度为 10 km 时对应的 PM_{2.5} 质量浓度约为 74.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。因此可以认为,当 PM_{2.5} 质量浓度大于边界浓度 (74.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 时,上甸子地区就有可能处于较低的大气能见度 (≤ 10 km)。本文所得出的 PM_{2.5} 边界浓度远高于华北地区城市站点的观测结果。例如, Luan et al. (2018) 的研究结果指出,当 PM_{2.5} 的浓度超过 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,北京城市地区就可能处于较低的大气能见度。但是本文所得出的 PM_{2.5} 边界浓度与四川盆地较清洁地区的观测结果较为一致。例如 Li et al. (2018) 在四川雅安的研究结果表明,大气能见度为 10 km 对应的 PM_{2.5} 质量浓度为 81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。气溶胶对大气的消光作用,不仅与其质量浓度有关,还与其化学成分有关 (Tao et al., 2009)。上甸子地区 PM_{2.5} 较大的边界浓度说明其 PM_{2.5} 化学成分与北京城市地区存在明显的差异。Zhao et al. (2013) 研究结果表明,上甸子地区气溶胶中消光作用更强的硫酸铵、硝酸铵等二次气溶胶的浓度显著低于北京城市地区,分别低 28% 和 40% 左右,并且从成分组成来看,消光组分所占的比例相对较低,这可能是两个地区 PM_{2.5} 边界浓度差异的主要原因。值得注意的是,气溶胶吸湿增长所导致的消光作用增强现象在上甸子地区并不明显。在相对干燥的条件下 ($\text{RH} < 40\%$), PM_{2.5} 的边界浓度与非干燥环境相比,并没有明显降低 (图 6b), 仅为 72.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 与气候湿润的广东和四川盆地等南方地区的观测结果存在明显差异 (Tao et al., 2009; Li et al., 2018), 但是与气候干燥的关中平原—西安的观测结果一致 (Cao et

al., 2012)。这一方面与上甸子地区气候相对干燥有关,例如观测期间平均相对湿度为 48.5%,而数据拟合时间段 (14:00) 的平均相对湿度仅为 25.6%,干燥天 ($\text{RH} < 40\%$) 出现的比例高达 72%; 另一方面也与上甸子地区气溶胶中吸湿组分的比例相对较低,不利于气溶胶吸湿增长有关。需要指出的是,如果选取相对湿度更高的时间段进行分析,上甸子地区 PM_{2.5} 的边界浓度可能会与干燥状态不一样,这需要以后的工作进一步完善。

本文观测时间段获取的上甸子地区大气能见度与 PM_{2.5} 的非线性关系表明,当 PM_{2.5} 较高时,能见度对 PM_{2.5} 的响应较弱,例如当 PM_{2.5} 由 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 增加至 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,能见度由 5.6 km 降至 3.1 km; 而当 PM_{2.5} 较低时,能见度对 PM_{2.5} 的响应较强,例如当 PM_{2.5} 由 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 增加至 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,能见度由 31.0 km 迅速下降至 9.8 km。能见度与 PM_{2.5} 的这种非线性关系对于制定提高地区性大气能见度的策略具有重要的指导意义。本文的研究结果提示提高华北区域背景地区的大气能见度可以分为两步:首先是制定 PM_{2.5} 指导标准,在现行的国家环境空气质量标准二级标准 (75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 下,可以使上甸子地区保持较高的大气能见度 (≥ 10 km); 其次对 PM_{2.5} 的进一步控制将显著提高区域大气能见度。观测期间 (2006~2014 年) 的 PM_{2.5} 平均浓度为 46.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 并且以 1.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ a}^{-1}$ 的速度不断降低。然而从 3.1 节的分析可知,上甸子地区年均能见度正在逐年降低,这与 PM_{2.5} 逐年下降的趋势相矛盾。上述结果说明在 PM_{2.5} 下降的

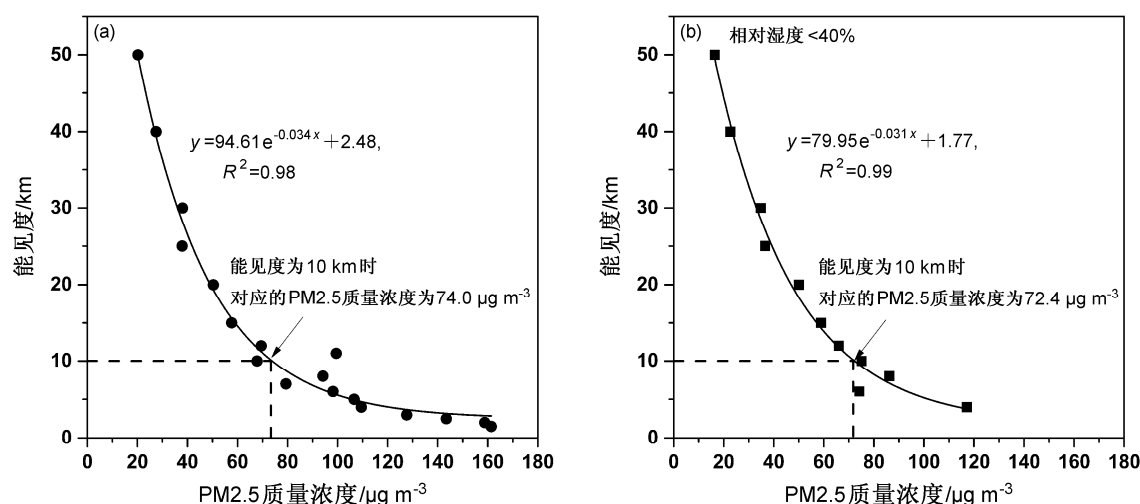


图 6 (a) 实际大气环境下和 (b) 干燥条件下大气能见度和 PM_{2.5} 质量浓度的相关性分析

Fig. 6 Correlations between visibility and aerosol concentration of PM_{2.5} during (a) the ambient atmosphere and (b) the dry condition

情况下,其化学成分构成可能发生了改变,消光作用更强的硫酸铵和硝酸铵等组分比例可能在逐年升高,未来的研究工作需要关注该地区 PM_{2.5} 化学组分与大气能见度之间的关系。

4 小结与讨论

(1) 1980~2014 年上甸子地区的年均能见度整体呈显著下降趋势,为 $2.1 \text{ km } (10 \text{ a})^{-1}$; Mann-Kendall 突变检验结果表明,上甸子地区的年均能见度未出现显著突变。较差能见度 ($<10.0 \text{ km}$) 的出现比例逐年上升,而较好能见度 ($>20.0 \text{ km}$) 的出现比例则逐年下降,灰霾天出现比例较 1980~1990 年增加近 7 倍,表明华北地区大气环境质量在不断恶化。

(2) 上甸子地区能见度呈现明显的季节特征。冬季能见度 (38.1 km) 最高,秋季 (36.2 km) 次之,春季 (32.8 km) 和夏季 (31.4 km) 较低。夏季能见度下降的幅度最大,达到了 $3.4 \text{ km } (10 \text{ a})^{-1}$; 其次为秋季和冬季,分别为 2.4 和 $1.8 \text{ km } (10 \text{ a})^{-1}$; 春季能见度下降的幅度最低,为 $1.7 \text{ km } (10 \text{ a})^{-1}$ 。能见度受各类气象因子的综合影响。根据 Person 相关和偏相关的统计结果,能见度与相对湿度和风速呈明显负相关;与气压呈明显的正相关;而与气温的相关系数时正时负,表明气温对能见度的影响具有两面性。

(3) 上甸子地区能见度下降受颗粒物质量浓度变化影响较大。能见度随着大气细颗粒物增加呈幂指数降低,能见度为 10 km 时对应的 PM_{2.5} 的边界浓度为 $74 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 在现行的国家环境空气质量标准二级标准 ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 下,可以使上甸子地区保持较高的大气能见度 ($\geq 10 \text{ km}$)。

虽然本文研究对上甸子地区 1980~2014 年能见度的变化趋势和气象要素进行了分析,并与该地区同步观测的细颗粒物质量浓度求取了拟合关系,相关性显著,可部分解释影响上甸子地区能见度变化的原因。但受目前获取的数据局限,还不能对细颗粒物与能见度变化趋势存在差异的原因进行更深入的分析,这都有待于下一步的工作。

参考文献 (References)

- Cao J J, Wang Q Y, Chow J C, et al. 2012. Impacts of aerosol compositions on visibility impairment in Xi'an, China [J]. Atmos. Environ., 59: 559–566, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.05.036.
- Che H Z, Zhang X Y, Li Y, et al. 2007. Horizontal visibility trends in China 1981–2005 [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (24): L24706, doi:10.1029/2007GL031450.
- 程已阳, 安兴琴, 周凌曦, 等. 2015. 北京上甸子大气本底站 CO₂ 浓度的源汇区域代表性研究 [J]. 中国环境科学, 35 (9): 2576–2584. Cheng Siyang, An Xingqin, Zhou Lingxi, et al. 2015. CO₂ concentration representation of source and sink area at Shangdianzi atmospheric background station in Beijing [J]. China Environmental Science (in Chinese), 35 (9): 2576–2584, doi:10.3969/j.issn.1000-6923.2015.09.003.
- Cheng Z, Luo L N, Wang S X, et al. 2016. Status and characteristics of ambient PM_{2.5} pollution in global megacities [J]. Environment International, 89–90: 212–221, doi:10.1016/j.envint.2016.02.003.
- Doyle M, Dorling S. 2002. Visibility trends in the UK 1950–1997 [J]. Atmos. Environ., 36(19): 3161–3172, doi:10.1016/S1352-2310(02)00248-0.
- 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 [J]. 高原气象, 27 (6): 1392–1400. Fan Yinqi, Li Chunqiang. 2008. Visibility trends in Beijing, Tianjin and Hebei Province during 1980–2003 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (6): 1392–1400.
- Fang L, Wang S P, Yu T, et al. 2016. Changes in aerosol optical and microphysical properties over Northeast Asia from a severe dust storm in April 2014 [J]. Remote Sensing, 8 (5): 394, doi: 10.3390/rs8050394.
- 符淙斌, 王强. 1992. 气候突变的定义和检测方法 [J]. 大气科学, 16 (4): 482–493. Fu Congbin, Wang Qiang. 1992. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 16 (4): 482–493, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1992.04.11.
- 郭军, 任雨, 傅宁, 等. 2016. 环渤海地区 1980~2012 年能见度变化特征 [J]. 气象科技, 44 (3): 416–422. Guo Jun, Ren Yu, Fu Ning, et al. 2016. Variation characteristics of visibility in Bohai rim region from 1980 to 2012 [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 44 (3): 416–422, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2016.03.012.
- 郭晓梅, 周成霞, 赵天良, 等. 2014. 四川盆地 1961~2010 年大气能见度变化趋势及其影响因素 [J]. 中国科学院大学学报, 31 (3): 418–425. Guo Xiaomei, Zhou Chengxia, Zhao Tianliang, et al. 2014. Variation trends in atmospheric visibility and influence factors in Sichuan basin over 1961–2010 period [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 31 (3): 418–425, doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2014.03.018.
- Huang W, Tan J G, Kan H D, et al. 2009. Visibility, air quality and daily mortality in Shanghai, China [J]. Science of the Total Environment, 407 (10): 3295–3300, doi:10.1016/j.scitotenv.2009.02.019.
- Li Y C, Shu M, Ho S S H, et al. 2018. Effects of chemical composition of PM_{2.5} on visibility in a semi-rural city of Sichuan basin [J]. Aerosol and Air Quality Research, 18 (4): 957–968, doi:10.4209/aaqr.2017.08.0264.
- Lin Z J, Tao J, Chai F H, et al. 2013. Impact of relative humidity and particles number size distribution on aerosol light extinction in the urban area of Guangzhou [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 13 (3): 1115–1128, doi:10.5194/acp-13-1115-2013.
- Liu M M, Bi J, Ma Z W. 2017. Visibility-based PM_{2.5} concentrations in China: 1957–1964 and 1973–2014 [J]. Environ. Sci. Technol., 51 (22): 13161–13169, doi:10.1021/acs.est.7b03468.
- Luan T, Guo X L, Guo L J, et al. 2018. Quantifying the relationship between

- PM_{2.5} concentration, visibility and planetary boundary layer height for long-lasting haze and fog-haze mixed events in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18 (1): 203–225, doi:10.5194/acp-18-203-2018.
- 吕建华, 彭岩波, 谢刚. 2016. 2013 年济南市大气能见度与相对湿度和 PM₁₀、PM_{2.5} 的关系 [J]. *气象与环境科学*, 39 (4): 93–97. Lü Jianhua, Peng Yanbo, Xie Gang. 2016. Relationship between visibility and relative humidity, PM₁₀, PM_{2.5} in Jinan in 2013 [J]. *Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese)*, 39 (4): 93–97, doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2016.04.015.
- 牟福生, 李昂, 谢品华, 等. 2016. 华北平原污染气体区域分布的车载 DOAS 遥测研究 [J]. *光学学报*, 36 (4): 0401001. Mou Fusheng, Li Ang, Xie Pinhua, et al. 2016. Study on regional distribution of air pollutants in North China plain by mobile DOAS [J]. *Acta Optica Sinica (in Chinese)*, 36 (4): 0401001.
- 彭艳, 王钊, 李星敏, 等. 2011. 近 60a 陕西关中城市群大气能见度变化趋势与大气污染研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 25 (9): 149–155. Peng Yan, Wang Zhao, Li Xingmin, et al. 2011. Variation trends of atmospheric visibility and air pollution in cities of Guanzhong, Shaanxi Province in recent 60 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese)*, 25 (9): 149–155, doi:10.13448/j.cnki.jalre.2011.09.023.
- 浦静姣, 徐宏辉, 马千里. 2017. 长江三角洲背景地区大气污染对能见度的影响 [J]. *中国环境科学*, 37 (12): 4435–4441. Pu Jingjiao, Xu Honghui, Ma Qianli. 2017. Impacts of atmospheric pollution on visibility in the background area of Yangtze River Delta, China [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 37 (12): 4435–4441, doi:10.3969/j.issn.1000-6923.2017.12.004.
- 任阵海, 苏福庆, 陈朝晖, 等. 2008. 夏秋季节天气系统对边界层内大气中 PM₁₀ 浓度分布和演变过程的影响 [J]. *大气科学*, 32 (4): 741–751. Ren Zhenhai, Su Fuqing, Chen Zhaohui, et al. 2008. Influence of synoptic systems on the distribution and evolution process of PM₁₀ concentration in the boundary layer in summer and autumn [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 741–751, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.04.
- 任芝花, 熊安元. 2007. 地面自动站观测资料三级质量控制业务系统的研制 [J]. *气象*, 33 (1): 19–24. Ren Zhihua, Xiong Anyuan. 2007. Operational system development on three step quality control of observations from AWS [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 33 (1): 19–24, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2007.01.003.
- 沈家芬, 冯建军, 谢利, 等. 2007. 广州市大气能见度的特征及其影响因素分析 [J]. *生态环境*, 16 (4): 1199–1204. Shen Jiafen, Feng Jianjun, Xie Li, et al. 2007. Characterization of visibility and its effect factors in Guangzhou [J]. *Ecology and Environment (in Chinese)*, 16 (4): 1199–1204, doi:10.3969/j.issn.1674-5906.2007.04.026.
- Sloane C S. 1982a. Visibility trends—I. Methods of analysis [J]. *Atmos. Environ.*, 16 (1): 41–51, doi:10.1016/0004-6981(82)90312-2.
- Sloane C S. 1982b. Visibility trends—II. Mideastern United States 1948–1978 [J]. *Atmos. Environ.*, 16 (10): 2309–2321, doi:10.1016/0004-6981(82)90117-2.
- 唐宜西, 张小玲, 徐敬, 等. 2016. 北京城区和郊区本底站大气污染物浓度的多时间尺度变化特征 [J]. *环境科学学报*, 36 (8): 2783–2793. Tang Yixi, Zhang Xiaoling, Xu Jing, et al. 2016. Multi-temporal scale variations of atmospheric pollutants concentrations in rural and urban areas of Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 36 (8): 2783–2793, doi:10.13671/j.hjkxxb.2016.0003.
- Tao J, Ho K F, Chen L G, et al. 2009. Effect of chemical composition of PM_{2.5} on visibility in Guangzhou, China, 2007 spring [J]. *Particuology*, 7 (1): 68–75, doi:10.1016/j.partic.2008.11.002.
- 陶诗言, 卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳 [J]. *应用气象学报*, 17 (5): 513–525. Tao Shiyan, Wei Jie. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 17 (5): 513–525, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.05.001.
- Thach T Q, Wong C M, Chan K P, et al. 2010. Daily visibility and mortality: Assessment of health benefits from improved visibility in Hong Kong [J]. *Environ. Res.*, 110 (6): 617–623, doi:10.1016/j.envres.2010.05.005.
- Wang Q, Fu C B. 1992. The detection of climate abrupt change with Mann-Kendall rank statistics [J]. *Acta Meteorological Sinica*, 6 (2): 254–260.
- 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素统计分析 [J]. *气象科技*, 31 (2): 109–114. Wang Shuying, Zhang Xiaoling, Xu Xiaofeng. 2003. Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 31 (2): 109–114, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2003.02.009.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 (2 版) [M]. 北京: 气象出版社, 1269pp. Wei Fengying. 2007. *Statistical Diagnosis and Prediction Technology for Modern Climate (2nd ed.) (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1269pp.
- 吴兑. 2005. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论 [J]. *气象*, 31 (4): 3–7. Wu Dui. 2005. A discussion on difference between haze and fog and warning of ash haze weather [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 31 (4): 3–7, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2005.04.001.
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 2002. 副热带高压形成和变异的动力学问题 [M]. 北京: 气象出版社, 314pp. Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. 2002. *Dynamics of the Formation and Variation of Subtropical Anticyclones (in Chinese)* [M]. Beijing: Meteorological Press, 314pp.
- 余予, 孟晓艳, 张欣. 2013. 1980~2011 年北京城区能见度变化趋势及突变分析 [J]. *环境科学研究*, 26 (2): 129–136. Yu Yu, Meng Xiaoyan, Zhang Xin. 2013. Trends and abruption analysis on the visibility in the urban area of Beijing City during 1980–2011 [J]. *Research of Environmental Sciences (in Chinese)*, 26 (2): 129–136, doi:10.13198/j.res.2013.02.18.yuy.006.
- 张宏, 刘子锐, 胡波, 等. 2011. 北京能见度变化趋势及冬季一次典型污染过程分析 [J]. *气候与环境研究*, 16 (5): 620–628. Zhang Hong, Liu Zirui, Hu Bo, et al. 2011. Analysis of trends of visibility and its characters during air seriously polluted days in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16 (5): 620–628, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.05.08.
- Zhang Q H, Zhang J P, Xue H W. 2010. The challenge of improving visibility in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10 (16): 7821–7827, doi:10.5194/acp-10-7821-2010.
- 张运英, 黄菲, 杜鹃, 等. 2009. 广东雾霾天气能见度时空特征分析——年际年代际变化 [J]. *热带地理*, 29 (4): 324–328. Zhang Yunying,

- Huang Fei, Du Juan, et al. 2009. Spatial and temporal distribution of visibility under fog and haze conditions in Guangdong Province: Annual and inter-annual change [J]. *Tropical Geography* (in Chinese), 29 (4): 324–328, doi:10.3969/j.issn.1001-5221.2009.04.004.
- 赵普生, 张小玲, 徐晓峰. 2011. 利用日均及 14 时气象数据进行霾日判定的比较分析 [J]. *环境科学学报*, 31 (4): 704–708. Zhao Pusheng, Zhang Xiaoling, Xu Xiaofeng. 2011. Comparison between two methods of distinguishing haze days with daily mean and 14 o'clock meteorological data [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 31 (4): 704–708, doi:10.13671/j.hjkxxb.2011.04.005.
- Zhao P S, Dong F, He D, et al. 2013. Characteristics of concentrations and chemical compositions for PM_{2.5} in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13 (9): 4631–4644, doi:10.5194/acp-13-4631-2013.