

刘骞, 盛立芳, 王园香, 等. 2016. 气象要素对中国大气能见度长期变化影响的定量研究 [J]. 气候与环境研究, 21 (1): 47–55. Liu Qian, Sheng Lifang, Wang Yuanxiang, et al. 2016. Quantitative study of the effect of meteorological variables on the long-term variation of visibility in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (1): 47–55, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15076.

# 气象要素对中国大气能见度长期变化影响的定量研究

刘骞<sup>1</sup> 盛立芳<sup>1,2</sup> 王园香<sup>3</sup> 曹子淇<sup>1</sup> 屈文军<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国海洋大学海洋与大气学院, 青岛 266100

<sup>2</sup> 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 青岛 266100

<sup>3</sup> 国家卫星气象中心, 北京 100081

**摘要** 近 30 年中国大气能见度整体呈下降趋势, 其中东部地区尤为明显, 为揭示复杂气象因素对能见度长期变化的影响, 利用 1980~2012 年中国 521 站地面气象观测资料, 建立了气象要素与能见度之间的多元非线性回归关系。结果表明: 相对湿度、风速和气温这 3 种气象要素对能见度的平均解释方差为 22%; 其中有 68 个站点通过了显著性检验 (显著性水平  $\alpha=0.05$ ), 平均解释方差达到 55%。这些站点中, 相对湿度影响显著的站点主要集中在东南沿海, 风速影响显著的站点分布在除新疆以外的中国大部, 而气温影响显著的站点主要位于中国中部的带状区域。3 种气象要素对能见度的影响存在着时间尺度上的不同, 相对湿度和气温对能见度的影响主要体现在线性趋势方面, 而风速对能见度长期变化的影响主要体现在年代际变化方面。中国东部地区能见度长期下降趋势主要受 70% 以上相对湿度减少趋势和 4 m/s 以下风速年代际变化的影响。

**关键词** 大气能见度 气象要素 长期变化 多元非线性回归

文章编号 1006-9585(2016)01-0047-09

中图分类号 P427.2

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15076

## Quantitative Study of the Effect of Meteorological Variables on the Long-Term Variation of Visibility in China

LIU Qian<sup>1</sup>, SHENG Lifang<sup>1,2</sup>, WANG Yuanxiang<sup>3</sup>, CAO Ziqi<sup>1</sup>, and QU Wenjun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100

<sup>2</sup> Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100

<sup>3</sup> National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081

**Abstract** There has been a decreasing trend in visibility during the most recent 30 years in China, especially in the east. To investigate the possibility of a multivariate nonlinear regression relationship between visibility and meteorological variables, surface meteorological data (1980–2012) collected from 521 stations were analyzed in this study. The results showed that the average variance of long-term visibility variation caused by relative humidity, wind speed, and temperature is 22%. The regression equation passed the significance test (significance level:  $\alpha=0.05$ ) at 68 stations (13%), with a 55% average variance. These stations were then divided into three groups according to different meteorological factors. Stations effectively influenced by relative humidity were found to be concentrated in Southeast China, while

收稿日期 2015-04-01; 网络预出版日期 2015-09-09

作者简介 刘骞, 男, 1990 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为大气环境。E-mail: liuqianouc@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41276009

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41276009)

stations effectively influenced by wind speed are spread over most areas of China, except Xinjiang, and stations where air temperature is the dominant influence are mostly located in a band across central China. Different meteorological factors show different relationships with visibility: Relative humidity and air temperature influence the linear trend of visibility, while wind speed influences the interdecadal variation. The long-term downtrend of visibility in East China is mainly dominated by the decreasing trend of relative humidity above 70%, and the interdecadal variation of wind speed below 4 m/s.

**Keywords** Visibility, Meteorological variables, Long-term variation, Multivariate nonlinear regression

## 1 引言

大气能见度是指晴空条件下人眼能够识别大型黑色目标物的最远距离 (Horvath, 1981), 在没有污染的大气中大气能见度 (以下简称能见度) 最高可达 250 km (Leavey and Sweeney, 1990)。1955~2000 年中国平均能见度在 20~30 km, 能见度在夏季最高、秋季次之、冬季最低 (张利等, 2011)。从空间分布看, 中国西北地区能见度高于东南地区 (Wu et al., 2012); 能见度长期变化趋势也存在较大空间差异, 1973~2007 年中国西部地区的能见度存在上升趋势, 东部地区能见度则有明显的下降趋势 (Che et al., 2007; Wang et al., 2009)。

能见度变化的直接原因是大气气溶胶的变化, 而气象条件对气溶胶的形成、分布、维持与变化作用显著, 尤其二次气溶胶的形成与变化受气象条件影响很大 (张小曳等, 2013)。气象条件的影响主要有两个方面, 一些研究从环流特征和天气形势进行分析, 指出西太平洋副热带高压加强会使夏季中国东部能见度降低 (Qu et al., 2013), 东亚大槽加强可使冬季中国西北能见度增加 (赵庆云等, 2003), 500 hPa 天气形势是华北低能见度预报的重要依据 (倪江波等, 2015)。更多的研究则是从局地气象要素的角度出发, 分析了不同时间尺度上能见度与气象要素的关系。年平均尺度上, 能见度与相对湿度呈负相关, 且高湿度时的相关性优于低湿度时的相关性 (张利等, 2011), 能见度与风速呈正相关 (高歌, 2008; 郝天依等, 2012), 降水增加也会导致能见度增加 (李霞和王胜利, 2012)。从月平均尺度看, 能见度同样与相对湿度呈负相关、与风速呈正相关 (Deng et al., 2011), 另外能见度还与气温有正相关关系 (Tsai, 2005)。在更短的时间尺度, 尤其是雾霾天气过程中, 能见度与相对湿度仍为负相关关系 (陈慧娴, 2011; 戴永立等, 2013), 同时低能见度现象多发生在小风速条件下

(沈家芬等, 2007)。

已有的研究基本建立了能见度与气象要素之间的对应关系, 但对于较长时间尺度的研究并不充分, 现有对全国范围能见度与气象要素关系的研究, 大多基于空间平均后的定性描述, 平均后的结果无法清楚地解释不同地区能见度长期变化与气象要素的关系, 同时也无法定量分析气象要素对能见度长期变化的影响。研究表明, 能见度与其影响因子之间存在非线性关系 (张剑等, 2011), 因此本文将选取对能见度有直接影响的风速、相对湿度和气温, 采用多元线性回归和经验正交函数分析等方法, 分析不同地区气象要素对能见度长期变化的贡献率, 并探讨不同气象要素影响能见度长期变化的物理机制。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料收集

本文数据来自于中国气象局地面常规观测资料, 选取 1980~2012 年全国 521 个站点日 4 次观测资料, 观测时间分别为 02:00 (北京时间, 下同)、08:00、14:00 和 20:00, 采用 14:00 的数据作为该日代表。这是因为 14:00 的数据最能够反映当地的能见度水平, 08:00 的观测常会受到辐射雾和近地面夜间逆温层的影响, 02:00 和 20:00 在晚上, 能见度观测的目标物与白天不同, 会造成观测资料的不一致 (Doyle and Dorling, 2002; Fu et al., 2013)。

### 2.2 数据处理方法

本文采用多元线性回归方法, 定量分析风速、相对湿度和气温这 3 种气象要素对能见度长期变化的贡献。由于气象要素与能见度之间存在一定的非线性关系, 需要对 3 种气象要素非线性化, 并加入回归方程中。当考虑多个自变量与因变量之间的非线性关系时, 需对各个自变量分别建立一元非线性回归方程, 选定非线性函数模型后对自变量作经验转换, 最终建立因变量与转换以后的自变量之间的

多元线性回归方程(胡基福, 1996)。

本文选用了 4 种常用非线性函数, 分别为幂函数、指数函数、对数函数、双曲函数。

双曲函数:

$$1/y = a + b/x, \quad (1)$$

可令  $y' = 1/y$ ,  $x' = 1/x$ , 式(1)可变为  $y' = a + bx'$ 。

幂函数:

$$y = cx^b, \quad (2)$$

可令  $y' = \lg y$ ,  $x' = \lg x$ , 式(2)可变为  $y' = a + bx'$ 。

指数函数:

$$y = ce^{bx}, \quad (3)$$

可令  $y' = \ln y$ ,  $a = \ln c$ ,  $x' = x$ , 式(3)可变为  $y' = a + bx'$ 。

对数函数:

$$y = a + b \lg x, \quad (4)$$

可令  $y' = y$ ,  $x' = \lg x$ , 式(4)可变为  $y' = a + bx'$ 。

进行上述变换之后非线性函数转换为线性函数, 非线性回归问题便可以化为线性回归来进行分析。

文章结果分析部分还使用线性趋势去除、经验正交函数(EOF)和小波分析的方法。线性趋势去除方法如下: 利用一元线性回归获取原序列的线性拟合序列, 在原序列中减去线性拟合序列所得结果即认为去除了线性趋势。经验正交函数和小波变换方法不再赘述。

### 3 结果与分析

#### 3.1 回归方程的建立

在建立回归方程之前, 首先分析能见度和相对湿度、风速、气温 3 种要素的关系, 计算了能见度与 3 种气象要素的相关系数, 发现单一气象要素对能见度的解释效果普遍较差。利用 3 种气象要素对能见度建立多元线性回归方程的效果也不理想, 所有站点平均的气象要素方差贡献为 12.9%, 通过显著性检验(显著性水平  $\alpha=0.05$ , 下同)站点的平均方差贡献为 37.3%。为了提高气象要素对能见度的解释程度, 进一步在回归方程中考虑了气象要素的非线性作用。

使用曲线函数线性化方法得到 3 种要素的幂函数、指数函数、对数函数和双曲函数形式, 将 4 种非线性形式分别代入回归方程, 计算每种函数形式下所有站点回归方程的平均复决定系数( $R^2$ )并计

算所有站点中回归方程通过显著性检验的数量, 其结果如表 1 所示。可以看出, 双曲函数形式的平均复决定系数较高, 有 68 个站点的回归方程通过了显著性检验(方差贡献超过 45%), 回归效果最好, 选作后文中的分析对象。

利用回归方程选取的研究站点只有总数的不到两成, 这是因为能见度不仅受当地气象要素的影响, 还与大气环流的变化以及人类活动造成的污染有关, 虽然能见度与气象要素的关系在理论上应该具有普遍性, 但是由于其他原因的存在不可能体现出普遍的影响, 在研究气象要素对能见度的影响时应尽量剔除其他要素的干扰, 这也是本文利用回归方程选取研究站点的创新之处, 同时也是后文分析量化影响的基础。

表 1 4 种曲线函数形式的回归效果

Table 1 The regression effect of four kinds of curve function

	平均 $R^2$	通过检验站点平均 $R^2$	通过检验的站点数
幂函数	0.209	0.566	54
指数函数	0.170	0.554	42
对数函数	0.231	0.554	66
双曲函数	0.227	0.561	68

对各种气象要素进行不同非线性形式混合的回归试验, 发现效果均不如单纯使用双曲函数形式, 最终选定双曲函数形式作为方程中非线性形式, 得到的回归方程如下:

$$V^* = \frac{R}{A_1 \times R + B_1} + C_1 \times R + \frac{W}{A_2 \times W + B_2} + C_2 \times W + \frac{T}{A_3 \times T + B_3} + C_3 \times T + D, \quad (5)$$

其中,  $V^*$  为能见度回归值,  $R$ 、 $W$  和  $T$  为相对湿度、风速和气温年平均值,  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $D$  均为回归系数。

#### 3.2 不同气象要素显著影响区域分析

图 1a 为中国 521 个地面气象站空间分布, 绿色圆点代表了 68 个回归方程效果通过显著性检验的站点。这些站点占站点总数的 13%, 主要分布在中国的东部, 其中东南沿海地区最多, 而新疆、西藏、东北和西南较少。

进一步分析气象要素和能见度的关系, 将回归方程中的回归系数乘以各回归因子的标准差, 得到各回归因子的权重系数, 要素的权重系数越高, 说明对能见度解释程度越高。分别选取相对湿度、风速和气温权重系数最大的站点, 则 68 个通过检验

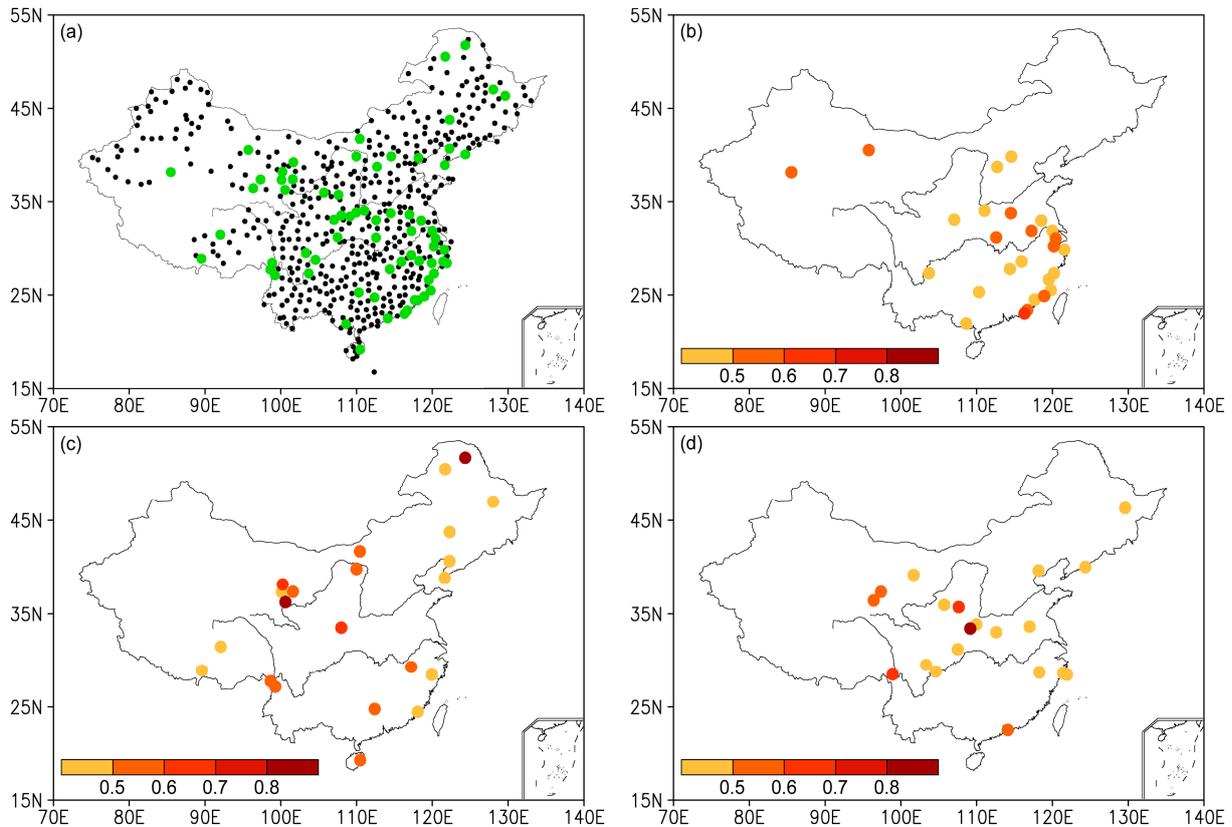


图 1 (a) 气象站点空间分布 (绿色为回归效果显著的站点); 气象要素 (b) 相对湿度、(c) 风速、(d) 气温对能见度回归效果显著的站点分布 (站点填色表示回归方程的复决定系数)

Fig. 1 (a) Spatial distribution of stations (green indicate sites with a significant regression effect); the regression effect of meteorological variables on visibility, spatial distribution of stations mainly influenced by (b) relative humidity, (c) wind speed, and (d) temperature, respectively (colored bar represents the multiple determinate coefficient at each site)

的站点可以分为 3 类。

相对湿度对能见度解释效果最好的站点共 26 个, 集中分布在中国东部地区, 尤其长江流域和东南沿海 (图 1b)。3 种气象要素对这些站点能见度长期变化的平均方差贡献为 54.1%, 方差贡献最高的站点达到 73.8%, 东南沿海、长三角及淮河流域站点的方差贡献高于其他站点。

风速对能见度解释效果最好的站点共 22 个, 在 3 类站点中空间分布最为广泛 (图 1c), 遍布于除新疆和西北地区西部以外的全国各地, 说明风速与能见度之间的关系较为普遍。站点分布中没有新疆的原因在于新疆的能见度受沙尘天气影响巨大 (全林生等, 2011), 本研究提取能见度时去除了沙尘天气的影响, 故而在分析风速对能见度的影响时没有用到新疆等沙漠化地区的站点。3 种要素对这些站点能见度长期变化的平均方差贡献为

60.2%, 是 3 类站点中气象要素对能见度变化总体解释程度最高的, 方差贡献最高的站点达到 89.8%, 总体而言, 中西部站点的解释方差高于东部。

气温对能见度解释效果最好的站点共 20 个, 主要分布在 27°N~40°N 地带, 尤其是秦岭淮河一带 (图 1d)。这些站点气象要素的平均方差贡献为 54.2%, 方差贡献最高的站点为 87.6%。

### 3.3 气象要素对能见度长期变化的影响

通过显著性检验的 68 个站点, 气象要素对能见度的平均解释方差超过 50%, 远高于全部站点 23% 的平均解释方差, 可以认为气象要素是这些站点能见度长期变化的最主要影响因素。利用这 68 个站点来分析能见度与气象要素的关系, 比以往研究中对所有站点进行分析准确性更高。而能见度与气象要素之间的关系十分复杂, 除了气象要素本身的作用, 还包括多个气象要素之间的协同作用, 本

文只考虑单一要素对能见度长期变化的影响, 突出某一特定气象要素在能见度长期变化中的作用, 因此分析时只选择该要素作为主要影响因子的站点, 即该要素对能见度作用最显著的地区。此外, 本文所指的能见度长期变化特征由两个部分组成: 能见度的线性趋势和波动特征 (年际、年代际变化)。

相对湿度为主要影响因子的 26 个站点 (图 1b) 中, 19 个站点能见度与相对湿度的相关系数通过显著性检验, 且相关系数均为正值, 平均相关系数为 0.558。图 2a 为所选站点能见度和相对湿度的线性趋势, 全部站点的能见度趋势均通过了显著性检验, 有 24 个站点呈下降趋势; 22 个相对湿度趋势通过检验的站点中有 20 个站的相对湿度呈下降趋势; 可见两者在趋势变化上较为一致。利用经验正交函数 (EOF) 方法分析去除线性趋势后得到能见度和相对湿度波动特征 (后文分析风速和气温时做相同处理), 图 2b 为能见度与相对湿度 EOF 第一模

态时间系数, 两者方差贡献分别为 26.8% 和 35.8%, 均通过了显著性检验, 借助小波分析 (图略, 下同) 可看出能见度以年代际变化为主, 相对湿度主要表现为年际变化, 两者在波动特征上没有较好对应关系。

为进一步探究不同湿度条件对能见度长期变化的影响, 将相对湿度等分成 10 个湿度区间。分析 1980~2012 年不同湿度出现天数可以发现, 各站点一年中相对湿度小于 10% 的天数变化不大; 相对湿度 10%~60% 的天数有明显的增加趋势; 相对湿度 60%~70% 的天数各站点有增有减; 相对湿度大于 70% 的天数呈明显减少趋势, 与能见度趋势相同。

从近 50 年雾和霾的长期变化趋势来看, 我国年霾日呈明显上升趋势, 相反雾日自 1990 年后呈减少趋势 (丁一汇和柳艳菊, 2014), 近几十年东亚夏季风活动的减弱 (Ding et al., 2008) 是造成这

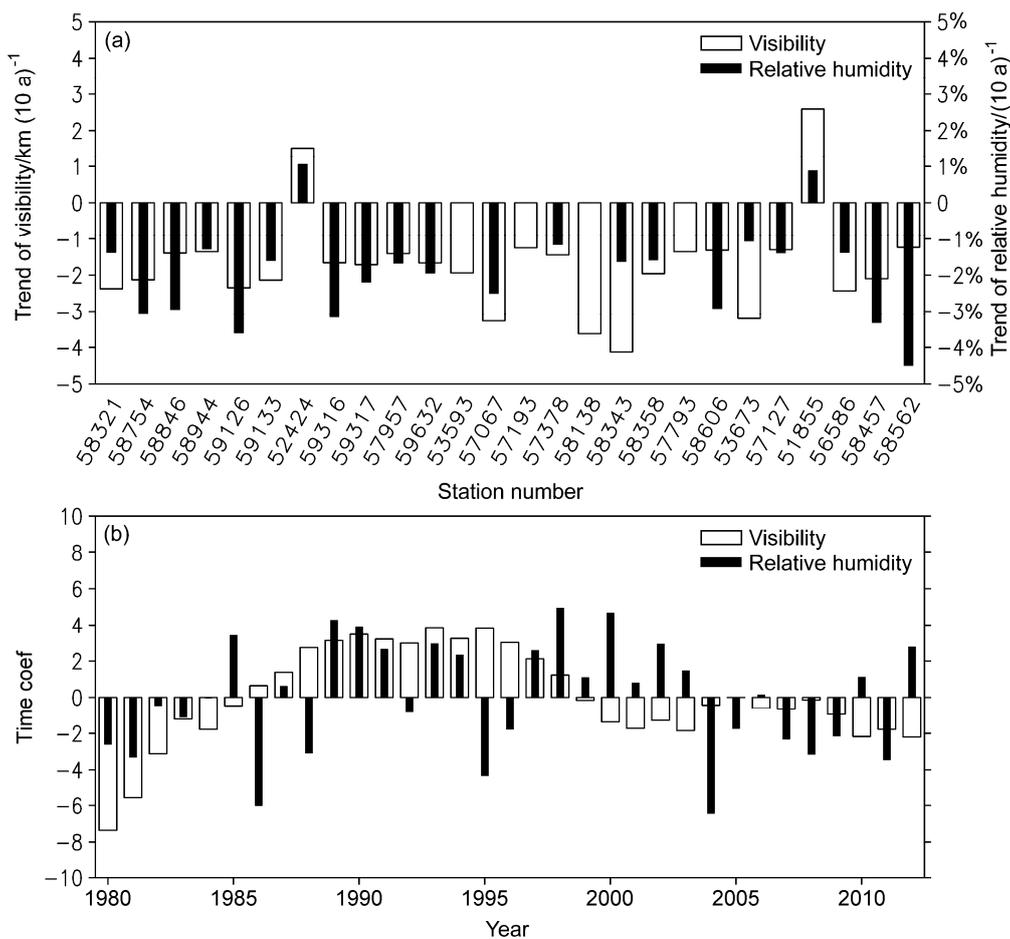


图 2 (a) 能见度与相对湿度通过检验的线性趋势; (b) 能见度与相对湿度 EOF 第一模态时间系数

Fig. 2 (a) Linear trends of visibility and relative humidity passing the significance test; (b) time series of the first EOF (Empirical Orthogonal Function) mode of visibility and relative humidity

些变化的气候原因。水汽作为降水的物质来源之一，对降水有很大影响，降水场和相对湿度场互为因果（李宪之，1987），在夏季风减弱的背景下，1980年以后中国大部分地区的雨日呈减少趋势（王颖等，2006），尤其在中国的东部和南部下降趋势更为显著（冯新灵等，2009）。利用本文数据计算发现，相对湿度影响显著的26个站点中有25个存在雨日减少的趋势（ $-3.8 \text{ d}/10 \text{ a}$ ），雨日的减少有利于气溶胶在大气中存留，使得能见度降低（高歌，2008）。本文的研究进一步表明，中国东部地区能见度长期下降趋势是与相对湿度减少相关的，而对应低能见度天气的雾霾事件中霾的增加则是由70%以上相对湿度呈减少趋势所引起的。

这一部分得到了相对湿度与能见度在长期趋势上一致的结论，这一结论与引言中前人多数认为的相对湿度与能见度负相关的结果有所不同。从物理机制的角度来看，前人的研究多从微物理过程出发，认为相对湿度增加使气溶胶吸湿增长，消光能

力增加进而导致能见度下降；本文的研究针对长时间尺度，从天气过程的角度出发，指出相对湿度可通过改变降雨频率来影响能见度长期变化。

风速为主要影响因子的22个站点中（图1c），有15个站点能见度与风速的相关系数通过了显著性检验，其中12个站点呈正相关，通过检验站点的平均相关系数为0.604。由图3a可知20个站点能见度的线性趋势通过了显著性检验，但这些站点并没有一致的趋势，风速线性趋势通过显著性检验的站点只有10个，可认为风速与能见度的趋势无明显对应关系。利用EOF分析能见度和风速的波动特征，两者EOF第一模态时间系数如图3b所示，两者方差贡献分别为49.5%和65.9%，均通过了显著性检验，借助小波分析可以看出这些站点能见度的主模态为年代际波动，而风速的主模态也是年代际波动，两者在波动特征上有较好对应关系。

探究不同风速条件对能见度的影响，将风速也分为不同的区间。计算1980~2012年不同风速出

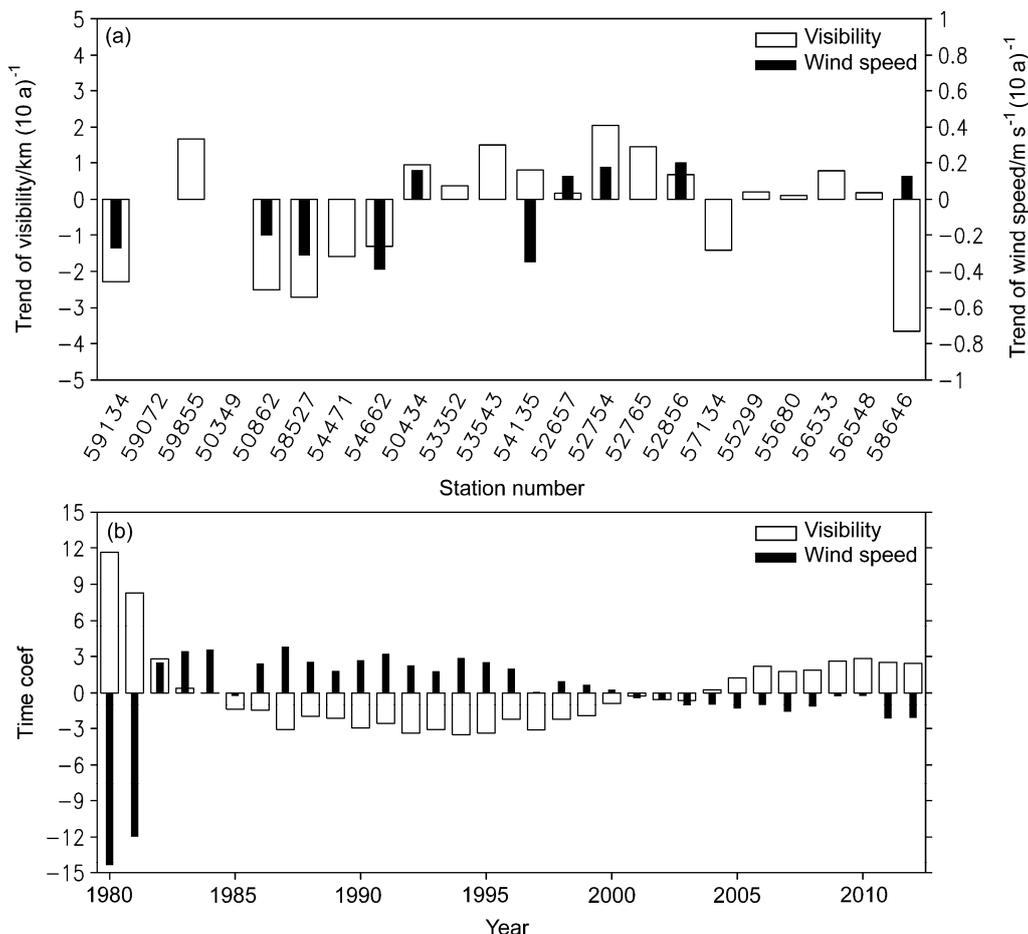


图3 (a) 能见度与风速通过检验的线性趋势；(b) 能见度与风速 EOF 第一模态时间系数

Fig. 3 (a) Linear trends of visibility and wind speed passing the significance test; (b) time series of the first EOF mode of visibility and wind speed

现的天数可以得到, 风速小于 2 m/s 和大于 6 m/s 的天数减少, 风速介于 2 m/s 和 6 m/s 之间的天数增加, 但这与能见度的趋势无明确对应关系。研究表明中国中东部风速变化的主要模态是年代际变化 (Fu et al., 2011), 对不同风速的出现天数进行 EOF 分析发现, 不同大小风速的出现天数和能见度的主模态均为年代际变化, 其中 0~2 m/s 和 2~4 m/s 低风速区间的天数与能见度相关系数高达 0.88 和 0.92。程叙耕 (2013) 的研究表明中国能见度与地面风速的关系呈“东正西负”, 在受沙尘气溶胶输送影响较小的广大中东部, 风速与能见度正相关。中国中东部又是灰霾的多发区, 尤其是秋冬季节, 风速小时不利于灰霾的驱散, 对能见度和空气质量的改善起到负作用 (胡亚旦和周自江, 2009; 史军, 2010)。以上表明, 小风速的年代际变化是中国中东部能见度长期变化的一个重要影响因素。

气温为主要影响因子的 20 个站点中 (图 1d), 有 17 个站点的能见度与气温的相关系数通过了显

著性检验, 其中有 13 个站点呈正相关。通过检验的站点平均相关系数为 0.640, 为 3 类站点中最高。这些站点能见度与气温的线性趋势如图 4a 所示, 14 个能见度与气温线性趋势均通过显著性检验的站点中, 11 个站点的能见度和气温同时呈上升趋势。气温升高可以使湍流活动加强、边界层高度增加, 能见度也随之上升 (Tsai et al., 2007)。受气温影响显著站点多分布在秦岭淮河一带, 这一地区的高温日数 (高荣等, 2008) 和平均气温 (韩翠华等, 2013) 在 1980 年后均有增加趋势, 说明该区域的大气垂直扩散能力增加趋势导致了能见度的增加, 尤其是冬季的增温明显 (王珂清等, 2012), 易使灰霾发生的不利扩散条件减弱。另外, 能见度的变化也会反过来影响气温, Vautard et al. (2009) 对欧洲地区的研究表明, 随着污染减少、能见度增加, 到达地面的太阳辐射增多, 使地面气温整体升高。

通过 EOF 分析得到能见度与气温 EOF 第一模态时间系数, 如图 4b 所示, 两者第一模态方差贡

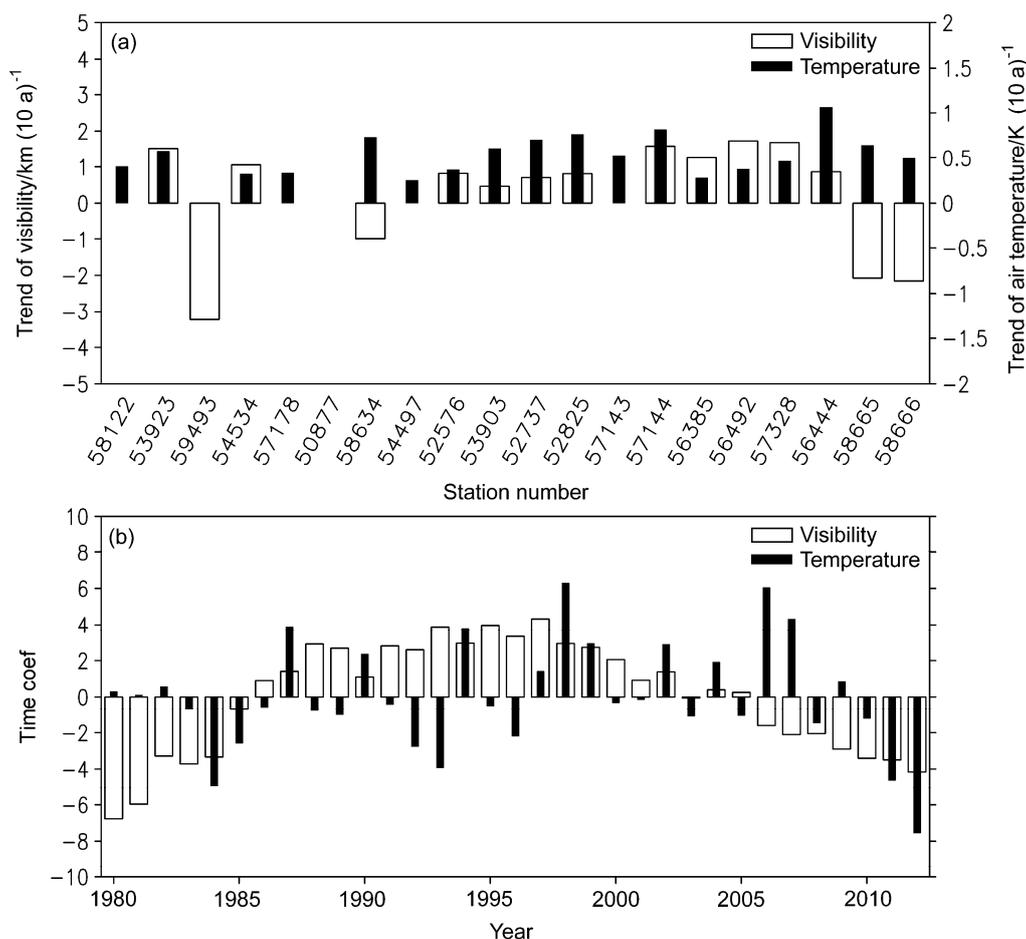


图 4 (a) 能见度与气温通过检验的线性趋势; (b) 能见度与气温 EOF 第一模态时间系数

Fig. 4 (a) Linear trends of visibility and air temperature passing the significance test; (b) time series of the first EOF mode of visibility and air temperature

献分别为 46.2%和 45.7%，均通过显著性检验，小波分析发现能见度的主模态为年代际波动，而气温的主模态则是年际波动，两者相关性并不好。其原因在于能见度长期变化是多因素共同作用的结果，这一地区能见度主模态的年代际特征如前文所述，可能需要结合风速或者其他要素来解释。

## 4 结论与讨论

利用曲线函数线性化和多元线性回归，发现相对湿度、风速、气温在中国部分站点与能见度长期变化有较好的关系，平均解释方差超过 50%。气象要素与能见度存在线性与非线性函数关系，其中非线性关系由双曲函数表征最好。

能见度回归效果较好的 68 个站点占全国站点总数的 13%，东部的站点多于西部，说明东部地区气象要素与能见度在长期变化特征上存在更加普遍且紧密的联系。长江流域和东南沿海地区的能见度受相对湿度影响较大；秦岭淮河一带能见度受气温的影响较大；除新疆以外的广大中东部地区都受到风速变化的影响。

相对湿度、风速和气温 3 种要素对能见度长期变化影响最大的是相对湿度，其次是风速，影响最小的是气温。相对湿度对能见度的影响主要体现在线性趋势，相对湿度下降使得雨日减少，有利于气溶胶在大气中存留，能见度也随之降低，尤其是当 70%以上相对湿度出现次数减少时能见度呈下降趋势；气温对能见度长期变化的影响也表现在线性趋势方面，气温升高使得边界层厚度增加，大气扩散能力增强使能见度呈增加趋势，在不考虑光化学反应的情况下，气温与能见度还可能存在正反馈作用；风速对能见度的影响则主要体现在年代际变化，平均风速以及 0~4 m/s 风速发生日数的变化可以用来解释中国大部分地区能见度的年代际变化，小风速偏少时能见度偏高。

本文利用多元线性回归的方法，选取与气象要素关系显著的站点，并分类对其进行分析，使气象要素对能见度长期变化的影响更明确合理，但回归方程的结果显示有相当多站点能见度与气象要素关系并不显著，其原因可能是气象要素在不同季节对能见度影响形式和程度并不完全相同，年平均结果无法体现其主要特征，使得回归方程的显著率偏低，本文的研究样本偏少。在进一步的工作中将考

虑分季节的讨论气象要素对能见度长期变化的影响，使之更加准确。

## 参考文献 (References)

- Che H Z, Zhang X Y, Li Y, et al. 2007. Horizontal visibility trends in China 1981–2005 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L24706, doi: 10.1029/2007GL031450.
- 陈慧娴. 2011. 近 10 年佛山市大气能见度变化特征及气象影响因子 [J]. *广东气象*, 33 (1): 32–34. Chen Huixian. 2011. Characteristics of visibility and meteorological factors in Foshan during recent 10 years [J]. *Guangdong Meteorology (in Chinese)*, 33 (1): 32–34.
- 程叙耕, 何金海, 车慧正, 等. 2013. 1980~2010 年中国区域地面风速对能见度影响的地理分布特征 [J]. *中国沙漠*, 33 (6): 1832–1839. Cheng Xugeng, He Jinhai, Che Huizheng, et al. 2013. Impact of surface wind speed on atmospheric visibility and its geographic pattern over China in 1980–2010 [J]. *Journal of Desert Research (in Chinese)*, 33 (6): 1832–1839.
- 戴永立, 陶俊, 林泽建, 等. 2013. 2006~2009 年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析 [J]. *环境科学*, 34 (8): 2925–2932. Dai Yongli, Tao Jun, Lin Zejian, et al. 2013. Characteristics of haze and its impact factors in four megacities in China during 2006–2009 [J]. *Environmental Science (in Chinese)*, 34 (8): 2925–2932.
- Deng J J, Wang T J, Jiang Z Q, et al. 2011. Characterization of visibility and its affecting factors over Nanjing, China [J]. *Atmospheric Research*, 101: 681–691, doi: 10.1016/j.atmosres.2011.04.016.
- Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. *International Journal of Climatology*, 28 (9): 1139–1161, doi: 10.1002/joc.1615.
- 丁一汇, 柳艳菊. 2014. 近 50 年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系 [J]. *中国科学: 地球科学*, 44 (1): 37–48. Ding Yihui, Liu Yanju. 2014. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity [J]. *Science China Earth Science*, 57 (1): 36–46, doi: 10.1007/s11430-013-4792-1.
- Doyle M, Dorling S. 2002. Visibility trends in the UK 1950–1997 [J]. *Atmos. Environ.*, 36: 3161–3172, doi: 10.1016/S1352-2310(02)00248-0.
- 冯新灵, 罗隆诚, 冯自立, 等. 2009. 中国雨日变化趋势的分形研究 [J]. *自然灾害学报*, 18 (6): 112–117. Feng Xinling, Luo Longcheng, Feng Zili, et al. 2009. Fractal research on rainy day change trend in China [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 18 (6): 112–117.
- Fu G B, Yu J J, Zhang Y C, et al. 2011. Temporal variation of wind speed in China for 1961–2007 [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 104: 313–324, doi: 10.1007/s00704-010-0348-x.
- Fu C B, Wu J, Gao Y C, et al. 2013. Consecutive extreme visibility events in China during 1960–2009 [J]. *Atmos. Environ.*, 68: 1–7, doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.11.035.
- 高歌. 2008. 1961~2005 年中国霾日气候特征及变化分析 [J]. *地理学报*, 63 (7): 761–768. Gao Ge. 2008. The climatic characteristics and change of haze days over China during 1961–2005 [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 63 (7): 761–768.

- 高荣, 王凌, 高歌. 2008. 1956~2006 年中国高温日数的变化趋势 [J]. 气候变化研究进展, 4 (3): 177-181. Gao Rong, Wang Ling, Gao Ge. 2008. The trend of variation in high temperature days during 1956-2006 in China [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 4 (3): 177-181.
- 韩翠华, 郝志新, 郑景云. 2013. 1951~2010 年中国气温变化分区及其区域特征 [J]. 地理科学进展, 32 (6): 888-896. Han Cuihua, Hao Zhixin, Zheng Jingyun. 2013. Regionalization of temperature changes in China and characteristics of temperature in different regions during 1951-2010 [J]. Progress in Geography (in Chinese), 32 (6): 888-896.
- 郝天依, 王式功, 尚可政, 等. 2012. 环渤海地区大气低能见度气候特征及影响因素分析 [J]. 气象, 38 (9): 1087-1095. Hao Tianyi, Wang Shigong, Shang Kezheng, et al. 2012. Analysis on climatic characteristics of poor atmospheric visibility and its influencing factors in Bohai Rim [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38 (9): 1087-1095.
- Horvath H. 1981. Atmospheric visibility [J]. Atmos. Environ., 15: 1785-1796, doi: 10.1016/0004-6981 (81) 90214-6.
- 胡基福. 1996. 气象统计原理与方法 [M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 66-69. Hu Jifu. 1996. The Principle and Method of Meteorological Statistics (in Chinese) [M]. Qingdao: Ocean University of Qingdao Press, 66-69.
- 胡亚旦, 周自江. 2009. 中国霾天气的气候特征分析 [J]. 气象, 35 (7): 73-78. Hu Yadan, Zhou Zijiang. 2009. Climatic characteristics of haze in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35 (7): 73-78.
- Leavey M, Sweeney J. 1990. The influence of long-range transport of air pollutants on summer visibility at Dublin [J]. International Journal of Climatology, 10 (2): 191-201, doi: 10.1002/joc.3370100206.
- 李霞, 王胜利. 2012. 1980~2007 年新疆地区能见度的变化特征及其影响因素研究 [J]. 沙漠与绿洲气象, 6 (3): 14-20. Li Xia, Wang Shengli. 2012. Variation characteristics in atmospheric visibility and their effective factors in Xinjiang during 1980-2007 [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 6 (3): 14-20.
- 李宪之. 1987. 降水问题 [M]. 北京: 海洋出版社, 161. Li Xianzhi. 1987. The Problem of Precipitation (in Chinese) [M]. Beijing: Ocean Press, 161.
- 倪江波, 李文才, 尚可政, 等. 2015. 华北区域性低能见度天气的自动识别及预报 [J]. 干旱气象, 33 (1): 174-179. Ni Jiangbo, Li Wencai, Shang Kezheng, et al. 2001. Automatic identification and prediction of low visibility weather in North China [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 33 (1): 174-179.
- Qu W J, Wang J, Gao S H, et al. 2013. Effect of the strengthened western Pacific subtropical high on summer visibility decrease over eastern China since 1973 [J]. J. Geophys. Res., 118 (13): 7142-7156, doi: 10.1002/jgrd.50535.
- 全林生, 时少英, 朱亚芬, 等. 2001. 中国沙尘天气变化的时空特征及其气候原因 [J]. 地理学报, 56 (4): 477-485. Quan Linsheng, Shi Shaoying, Zhu Yafen, et al. 2001. Temporal-spatial distribution characteristics and causes of dust-day in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 56 (4): 477-485.
- 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.
- 史军, 崔林丽, 贺千山, 等. 2010. 华东雾和霾日数的变化特征及成因分析 [J]. 地理学报, 65 (5): 533-542. Shi Jun, Cui Linli, He Qianshan, et al. 2010. The changes and causes of fog and haze days in eastern China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 65 (5): 533-542.
- Tsai Y I. 2005. Atmospheric visibility trends in an urban area in Taiwan 1961-2003 [J]. Atmos. Environ., 39: 5555-5567, doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.06.012.
- Tsai Y I, Kuo S C, Lee W J, et al. 2007. Long-term visibility trends in one highly urbanized, one highly industrialized, and two Rural areas of Taiwan [J]. Science of the Total Environment, 382: 324-341, doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.04.048.
- Vautard R, Yiou P, van Oldenborgh G J. 2009. Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years [J]. Nature Geoscience, 2: 115-119, doi: 10.1038/ngeo414.
- Wang K C, Dickinson R E, Liang S L. 2009. Clear sky visibility has decreased over land globally from 1973-2007 [J]. Science, 323: 1468-1470, doi: 10.1126/science.1167549.
- 王珂清, 曾燕, 谢志清, 等. 2012. 1961~2008 年淮河流域气温和降水变化趋势 [J]. 气象科学, 32 (6): 671-677. Wang Keqing, Zeng Yan, Xie Zhiqing, et al. 2012. Change trend of temperature and precipitation in Huaihe River basin from 1961 to 2008 [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 32 (6): 671-677.
- 王颖, 施能, 顾骏强, 等. 2006. 中国雨日的气候变化 [J]. 大气科学, 30 (1): 162-170. Wang Ying, Shi Neng, Gu Junqiang, et al. 2006. Climatic variations of wet days in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (1): 162-170.
- Wu J, Fu C B, Zhang L Y, et al. 2012. Trends of visibility on sunny days in China in the recent 50 years [J]. Atmos. Environ., 55: 339-346, doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.03.037.
- 张剑, 刘红年, 唐丽娟, 等. 2011. 苏州城区能见度与颗粒物浓度和气象要素的相关分析 [J]. 环境科学研究, 24 (9): 982-987. Zhang Jian, Liu Hongnian, Tang Lijuan, et al. 2011. Correlation analysis between atmospheric visibility and particulate mass concentration as well as meteorological factors over Suzhou urban area [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 24 (9): 982-987.
- 张利, 吴润, 张武. 2011. 1955~2000 年中国能见度变化趋势分析 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 47 (6): 46-55. Zhang Li, Wu Jian, Zhang Wu. 2011. Analysis of visibility variations in China from 1955 to 2000 [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 47 (6): 46-55.
- 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 2013. 我国雾-霾成因及其治理的思考 [J]. 科学通报, 58 (13): 1178-1187. Zhang Xiaoye, Sun Junying, Wang Yaqiang, et al. 2013. Factors contributing to haze and fog in China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 58 (13): 1178-1187.
- 赵庆云, 张武, 王式功. 2003. 空气污染与大气能见度及环流特征的研究 [J]. 高原气象, 22 (4): 393-396. Zhao Qingyun, Zhang Wu, Wang Shigong. 2003. A study on air pollution, visibility and general circulation feature [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (4): 393-396.