

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.06.003

# 合肥市霾日气象要素特征分析及预报方法研究

魏春璇, 黄 鹤, 翟振芳, 张 平

( 合肥市气象局 安徽 合肥 230041 )

**摘 要:** 利用合肥国家气象观测站建站以来历史观测资料 (1952~2016 年) 及 2004~2016 年逐日地面观测资料和高空观测资料, 分析了合肥霾日及相关气象要素特征; 并结合 2004~2016 年合肥空气质量数据, 对合肥市霾的预报方法进行了研究, 初步得到了霾日和霾日能见度的预报方程; 最后利用 2017 年的气象资料和空气质量资料对预报结果进行了检验。结果表明: 合肥出现的霾以轻微霾和轻度霾为主; 全市霾日逐月分布不均, 其中 1 月和 12 月最多。霾的生消有比较明显的日变化, 霾出现的时间主要集中在每日的 11:00~20:00。霾出现的有利气象条件是: 风速  $\leq 3$  m/s, 地面主导风向为偏东风到偏南风, 有负变压, 正变温, 相对湿度在 50~70% 之间。低能见度的霾需要相对较高的相对湿度和负变压。建立的霾日及霾日能见度方程预报准确度较高, 可以为合肥市霾的预报预警提供一定参考。

**关键词:** 霾; 能见度; 气象要素; 预报

中图分类号: P427.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)06-0419-012

## Analysis of Meteorological Elements and Forecast Method of Haze Day in Hefei, China

WEI Chunxuan, HUANG He, ZHAI Zhenfang, ZHANG Ping

( Hefei Meteorological Bureau, Hefei 230041, China)

**Abstract:** Based on available observation data of Hefei Meteorological Station from 1952 to 2016 and the daily ground and altitude observation data from 2004 to 2016, the characteristics of haze day and related meteorological elements are analyzed. Then combining with the air pollution data of Hefei from 2004 to 2016, the prediction equations of haze day and the visibility in haze day are obtained preliminarily. Finally, the forecast results are verified by using the meteorological and air quality data of 2017. The results show that haze in Hefei is dominated by slight haze and mild haze, and the haze days distribute unevenly month by month, with the most haze days in January and December. The growth and elimination of haze have diurnal changes. Haze occurs mainly at 11 to 20 o'clock every day. The favorable meteorological conditions for haze day are as follows: wind speed is less than 3 m/s, the leading wind direction is easterly or southerly, with negative pressure, positive temperature and relative humidity of 50~70%. Low visibility haze requires high

**基金项目:** Supported by Project of Forecaster of Anhui Meteorological Bureau (安徽省气象局预报员专项, KY201303)

**作者简介:** 魏春璇 (1985 -), 女, 安徽合肥人, 高级工程师, 主要从事天气预报方面的研究。 **E-mail:** 33667266@qq.com

**收稿日期:** 2018-06-08; **修改日期:** 2019-03-18

relative humidity and negative pressure. It is shown that the prediction equations have high accuracy, which can provide some reference for haze forecasting in Hefei.

Key words: haze; visibility; meteorological elements; forecast

## 1 引言

霾是一种对视程造成障碍的天气现象,它是大量极细微的干尘粒等均匀浮游在空中,造成光散射,致使大气浑浊,并使水平能见度小于 10 km 的天气现象,它会使远处光亮物微带黄、红色,使黑暗物微带蓝色<sup>[1]</sup>。在上世纪,霾天气的严重程度、发生频次并不高,对人类生活和生产的影响也相对较小,故而对它的研究较少。近些年来,随着经济高速发展,人类活动和城市化进程加剧,大气污染物排放的不断增加,与之有密切联系的霾天气也越来越频繁。霾发生时,由于大气层结稳定,污染物不易扩散,严重威胁人们的健康<sup>[2]</sup>。近年来国内外对霾天气的研究,主要还是针对霾天气的观测标准、气溶胶成分和时空分布气候特征,而对霾日气象要素特征及预报方法方面的研究比较少。Schichtel 等<sup>[3]</sup>分析了美国 1980~1995 年霾的变化趋势,发现自实施干净空气行动之后,霾日数 16 年间下降了约 10%,与二氧化硫排放量的下降同步。国内研究表明,长江中下游、华北和华南是我国霾的多发区,全国平均年霾日数呈现明显的增加趋势。尤其我国中东部地区冬半年霾日数呈显著的增加趋势,本世纪初发生了明显的均值突变。同时持续性霾天气发生频率增加,持续时间长的霾天气比持续时间短的霾天气增加更为明显<sup>[4-5]</sup>。研究表明:与合肥临近的城市南京的霾以轻微和轻度为主,较严重的霾天气的发生需要较大的相对湿度条件。霾日的层结稳定度是比较稳定的,逆温层并不明显,混合层高度与霾的变化有较好的对应关系,对霾的生消预报有一定的指示意义<sup>[6-7]</sup>。

当前,随着合肥地区经济的快速发展及城市规模的急剧扩大,造成严重空气污染事件的霾现象也急剧增多,霾已经成为影响合肥城市环境质量的重要因素。研究发现,合肥近年的霾天气主要受气象因素和大气污染水平的影响,小风、高湿和偏东风条件下有利于霾的出现;霾的出现反映空气污染程度,随着空气污染加重,霾的出现频率升高<sup>[8]</sup>。但是目前对形成霾天气的具体气象条件的认识还相当缺乏,尤其对合肥地区霾的生消变化及预报方面的研究还不够,这对合肥的霾预报预警工作是相当不利的。吴兑<sup>[9]</sup>指出要制定灰霾指数和预警办法,开展灰霾天气预测预报预警方法的研究和业务平台建设,拓展气象服务领域,使环境气象产品更好地为社会公众服务,为政府实行动态调控的环保措施的决策服务。中国气象局在 2007 年把霾天气作为一项重要灾害性天气纳入气象灾害预警信号。

为此,本文利用合肥国家气象观测站建站以来的观测资料,对合肥地区能见度小于 10 km 的霾现象的特征进行了简单研究。结合 2004 年以后合肥的地面观测资料、高空观测资料和空气质量监测资料,深入分析了合肥市能见度小于 10 km 的霾现象发生时气象要素的变化规律。并基于霾发生时的各气象要素和空气质量监测的各污染物浓度变化,得到了合肥霾日预报方程,同时还实现了霾日能见度的预报。这为合肥市霾的预报预警提供了一定的科学依据,为霾的预报预警及防治提供参考。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料来源

所用资料是合肥国家气象观测站的建站以来(1952~2017 年)多年的气象观测资料,包括逐日 02:00、05:00、08:00、11:00、14:00、17:00、20:00、23:00 的天气现象、相对湿度、风向、风速、能见度、气

压、温度、露点温度、低云量、总云量、水汽压、饱和水汽压、气压变化、温度变化等气象资料。高空观测资料为 2004~2017 年的气象探空资料, 包括有高空探测业务的站点的各规定等压面和压温湿特性层的位势高度、温度、露点温度、风向、风速观测数据。主要使用的是徐州、阜阳、安庆和南京探空站各规定层高度 (700、850、925、1000 hPa 等) 的温度、露点温度、相对湿度等气象数据。空气污染物浓度资料为 2004~2017 年合肥市环境监测站空气质量监测数据。尽管近年来环境监测的污染物种类在增加, 但是各污染物的监测设备是独立的, 相互并不干扰。即使后期新增加了  $O_3$ 、 $PM_{2.5}$  等污染物浓度的监测设备, 也并不影响  $SO_2$ 、 $NO_2$  和  $PM_{10}$  数据的连续性, 保证了数据的一致性。

## 2.2 资料处理

霾天气现象从地面观测资料中逐日各时次的天气现象中获取, 也就是说以观测员的记录为准, 在此基础上进行霾日的统计分析及其气象要素的特征研究。地面观测资料直接使用合肥国家气象观测站观测数据, 选取逐日 02:00、05:00、08:00、11:00、14:00、17:00、20:00 和 23:00 共 8 个时次的观测数据。

高空观测资料使用全国逐日探空数据, 在使用过程中先使用双线性插值方法, 对徐州、阜阳、安庆和南京探空站数据进行插值处理, 得出合肥各层的气象数据。为保持数据的一致性, 合肥的经纬度使用合肥国家气象观测站的经纬度。地面观测数据和高空观测资料均经过各省气象局信息中心质量控制管理后再获取, 数据质量有效性、准确性可靠。

空气污染物浓度数据在使用时受到数据变化的影响比较大, 在 2013 年之前污染物浓度监测只有  $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{10}$  浓度,  $PM_{2.5}$ 、 $O_3$  等污染物浓度数据是在 2013 年以后才有记录, 为了保持数据的连续性, 空气质量监测数据在使用时只用  $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{10}$  的浓度。另外随着城市发展进程的加快, 合肥市空气质量监测站点逐年增加, 2007 年以前只有三里街、长江中路、琥珀山庄和董铺水库四个站点的监测数据, 2007~2012 年增加了明珠广场站点, 2013 年开始又增加了庐阳区、瑶海区、包河区、高新区和滨湖新区五个站点。因此本文使用的是全市所有监测站点经过质量控制审核后发布的各污染物浓度的逐日平均值。具体监测站点和合肥气象观测站位置如图 1 所示。

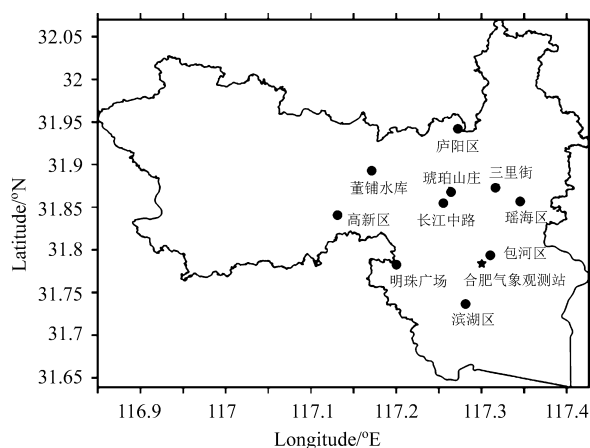


图 1 合肥市环境监测站和气象观测站站点分布

Fig.1 Geographic distribution of monitoring sites in Hefei

在霾的分析中, 根据霾日的能见度将其划分为四个等级。  $5\text{ km} \leq \text{能见度} < 10\text{ km}$  定义为轻微霾;  $3\text{ km} \leq \text{能见度} < 5\text{ km}$  定义为轻度霾;  $2\text{ km} \leq \text{能见度} < 3\text{ km}$  定义为中度霾; 能见度  $< 2\text{ km}$  定义为重度霾 (中国气象局, 2010)<sup>[10]</sup>。

### 3 合肥霾天气概况

#### 3.1 月变化

由图 2 可知: 合肥霾日逐月分布不均。其中 1 月和 12 月霾日最多, 分别占全年霾日的 14~15%, 两月霾日接近全年的三成。7 月霾最少, 仅占全年霾日的 2~3%。全年各月霾日数分布呈明显的抛物线型。霾现象日数最低值出现在 7 月, 随后霾日数略上升, 进 10 月以后霾日数维持在一个较高的水平, 进入春季后霾日数相对减少, 但至 6 月份都基本维持在一个水平 (6~9%), 其中春末夏初的 5~6 月份又是霾的一个相对高发月份。

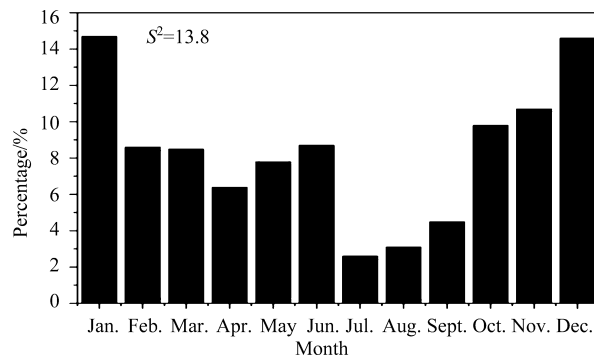


图 2 合肥霾月际分布图

Fig.2 Distribution of monthly mean of haze in Hefei

#### 3.2 日变化

从合肥逐日各时次天气现象分析来看, 霾的生消有比较明显的日变化。合肥的霾一般都出现在 08:00 之后, 出现的时间主要集中在每日的 11:00~20:00, 又以 11:00~17:00 为频率最高, 其中 11:00 最高, 占 24.4%, 14:00 次之, 占 21.8%, 17:00 占 19.1%。20:00 以后出现的频次明显减少, 夜间至次日早晨的 23:00、02:00、05:00 和 08:00 霾出现的频率仅占 3~6% 之间。

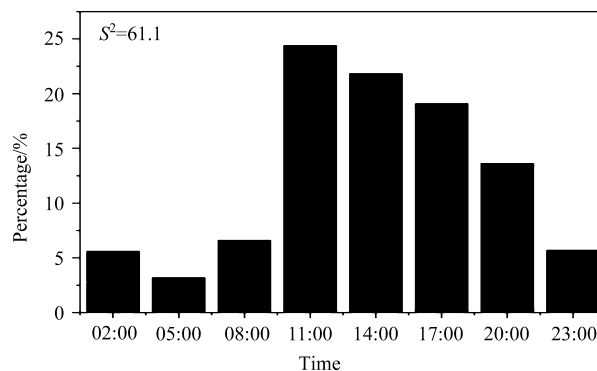


图 3 合肥霾天气的日变化

Fig.3 Diurnal variation of haze in Hefei

### 3.3 霾日持续时间变化和霾等级分布

近年来, 随着经济发展, 霾的持续时间与霾日数增长同步变化, 合肥持续长时间的霾天气过程逐渐增多。根据 1952~2016 年历史观测资料统计, 合肥霾天气持续 1~2 天的过程达 222 次, 占所有霾天气过程的 56%, 持续时间在 3~4 天的霾天气过程次数较持续 1~2 天的过程明显减少, 约 105 次, 占比在 1/4 左右。由图 4 还可看出, 合肥的霾天气最长持续时间长达 15 天, 有历史记录以来, 仅出现过两次, 均出现在 2013 年, 分别出现在 10 月和 12 月。持续时间超过 10 天的共有 10 次, 持续时间达 5 天以上的则有 68 次之多。同时, 经过分析还发现长时间持续霾天气 90% 是发生在 2008 年以后, 这也与近些年霾日增加的趋势是一致的。

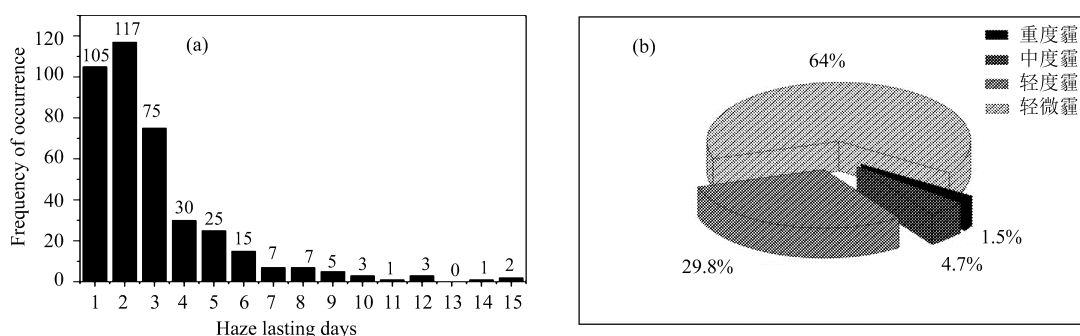


图 4 (a) 合肥霾持续时间分布; (b) 合肥各种等级霾出现的比例

Fig.4 (a) Distribution of duration of haze in Hefei; (b) haze pie chart in different levels in Hefei

根据 2010 年中国气象局制定的《霾的观测与预报等级》行业规范, 对合肥市霾天气过程按照等级进行分类, 结果表明: 合肥出现的霾以轻微霾为主, 占霾日数的 64%, 轻度霾次之, 占 30%, 重度霾出现最少, 仅占 1%。分析还发现 2002 年以来中度霾出现过 50 次, 重度霾出现过 16 次, 占 1952 年以来所有中度以上霾日的近 4 成, 这也与近些年来霾日增多, 霾加剧的趋势是相符的。

## 4 霾日气象要素特征

### 4.1 风速和风向

合肥市发生霾天气时的风速主要在 3 m/s 以下, 所占比例高达 84%, 其中风速为 2 m/s 霾出现的概率最高, 占 37%。由此可见, 当风速  $\leq 3$  m/s 时, 最有利于霾天气的形成。由图 5(a) 可见静风时 (风速为 0), 霾出现的频率也并不多, 这是因为从气候分析来看, 本身静风的天气就不多。当风速大于 3 m/s 时, 也有霾天气发生, 但随着风速的增大, 霾现象发生概率迅速减小。当风速超过 5 m/s 后, 霾天气出现概率迅速下降, 仅占所有霾日的 1.8%。风速越小, 发生霾天气的概率越大, 究其原因, 主要是因为近地层风的变化对大气污染物的传输和扩散影响显著: 近地层长时间的小风速, 有利于形成气流停滞区, 从而为雾霾的形成创造条件; 随着风速增大, 大气平流输送能力增强, 大气中污染物极易被驱散而不利于霾的形成。

合肥市出现霾天气时, 各种风向都有机会出现。从图 5(b) 可以看出, 近地面主导风向为东北偏东风 (ENE) 时, 霾日最多, 达 113 次, 占所有霾日的 11%; 南风到偏东风 (E、ESE、SE、SSE、S) 出现霾日达 435 次, 占所有霾日的 44%。偏西风出现霾日最少, 这与合肥市多年主导风向是一致的。另外, 大部分时间, 西北风常常携带冷空气南下, 风速增大, 有利于大气中污染物质的及时清除, 所以西北风条件下, 霾出现的概率不高。但近年, 西北风到偏北风影响下, 霾日有增多的趋势, 弱冷空气影响之后, 输送

北方颗粒物到本地堆积, 导致霾的发生。

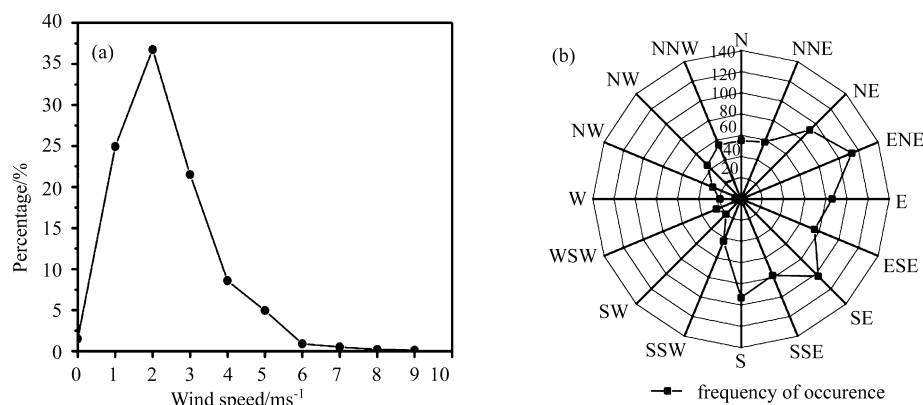


图 5 合肥霾日风速分布 (a); 合肥霾日风向变化 (b)

Fig.5 Distribution of wind speed (a) and variation of wind direction (b) in haze days in Hefei

#### 4.2 相对湿度

研究发现, 随着相对湿度的逐渐增大, 合肥市霾天气的出现几率呈先增大后减小的趋势。由表 1 可见: 当相对湿度小于 30% 时, 霾发生几率很小, 仅占 1.7%; 相对湿度增至 50~70% 区间时, 霾出现所占几率显著增大, 在相对湿度增至 60~70% 区间达到峰值, 达到 47%; 之后霾出现几率随相对湿度增大呈下降趋势, 相对湿度在 70~80% 之间时, 霾出现几率仅占 0.6%。这一结论与张浩等<sup>[8]</sup>发现的合肥霾发生时的相对湿度主要在 70% 以上并不相同。张浩等使用的是 2001~2005 年资料进行的研究分析, 而本文使用的是 2004~2016 年的资料进行的研究分析, 资料时间持续性和连续性要好于张浩等人采用的资料, 这说明了使用资料的连续性对结果的影响是非常显著的。

表 1 不同相对湿度对应的霾出现频率

Table 1 Occurrence frequencies of hazy days for each relative humidity

Parameter	Value						
relative humidity(%)	<20	20~29	30~39	40~49	50~59	60~69	70~79
occurrence frequencies of hazy days (%)	0.3	1.7	5.6	13.6	31.2	47	0.6

#### 4.3 变压和变温

变压是指气压随时间的变化, 3 h 变压和 24 h 变压是指前后两个时次的气压差。变温是指温度随时间的变化, 3 h 变温和 24 h 变温是指前后两个时次的温度差。例如 08:00 的 3 h 变压和变温是指 08:00 与 05:00 时的气压差和温度差; 08:00 的 24 h 变压和变温是指 08:00 与前一日 08:00 的气压差和温度差。研究表明: 合肥市霾的出现与海平面气压场的变化关系十分密切。无论是从 3 h 变压还是 24 h 变压来看, 负变压时最容易产生霾天气; 正变压发生霾的概率相对较少; 气压场没有变化的形势下, 霾发生的概率极低。由表 2 可知: 3 h 变压为负变压时, 霾出现概率为 53%, 较正变压时出现霾的概率高; 而气压场没有变化时, 霾发生概率仅为 2%。而 24 h 出现负变压时, 霾出现概率为 58%, 较正变压出现霾的概率高, 较 3 h 负变压霾出现的概率也有所增长, 这是因为 3 h 变压有一定的日变化特征; 而气压场没有变化时, 霾发生概率仅为 1%。

以上分析表明气压场的减弱更有利于霾的形成, 而另一方面, 变温对霾形成的影响趋势则有所不同。由表 3 可以看出, 当合肥出现正变温时, 更容易产生霾天气, 发生概率为 59%; 出现负变温时, 霾发生的概率为 40%; 而温度场没有变化时, 霾发生概率仅为 1%。这是因为暖空气中污染物质量浓度大, 容易产生霾天气。

表 2 3 h 变压和 24 h 变压对应的霾出现频率

Table 2 Occurrence frequencies of hazy days for every 3 hours pressure change and daily pressure change

Parameter	Value		
3 hours pressure change(hPa)	>0	<0	0
occurrence frequencies(%)	45	53	2
daily pressure change(hPa)	>0	<0	0
occurrence frequencies(%)	41	58	1

表 3 24 h 变温对应的霾出现频率

Table 3 Occurrence frequencies of hazy days for daily temperature change

Parameter	Value		
daily temperature change(℃)	>0	<0	0
occurrence frequencies(%)	59	40	1

由以上分析可知, 霾天气的形成主要与大气边界层特征有关。气象条件, 比如风向、风速、相对湿度、气压场、温度场等都会影响大气污染物的扩散能力。低压、微风、低湿、暖输送等均不利于大气污染物扩散稀释, 近地面的污染物就比较容易发生积聚, 从而形成霾。

## 5 霾日能见度与气象要素特征关系

### 5.1 风速

研究发现霾日风速主要集中在 1~3 m/s, 同时随着风速的增大, 霾日的能见度也随着增大。由表 4 可知: 出现低能见度的霾日, 风速在 1~2 m/s, 随着风速的增大, 霾日的能见度也增大。可以看到, 能见度在 5 km 左右时, 风速集中在 1~4 m/s, 能见度在 8 km 左右时, 风速集中在 1~5 m/s。这也表明风速的增大, 会带来能见度的升高。

### 5.2 风向

合肥霾日的各种能见度的出现与风向也有一定的关系。从表 5 可以看出, 能见度为 1 km 时, 风向主要为偏北风, 偏北风(含 N、NE、NW)出现的频次占了 60%, 西风和东南风各占 20%, 这说明低能见度的霾大部分时间还是受偏北风影响, 外地源输送到本地, 导致能见度急剧下降。随着能见度的增大, 各风向出现概率也随之增大, 但主要风向还是集中在东风到南风之间。能见度为 9 km 时, 出现的都是西南风。

表 4 不同风速对应的霾日不同能见度的出现频率

Table 4 Occurrence frequencies of different visibility in hazy days corresponding to different wind speeds

Visibility (km)	Wind speed (m/s)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	50	50	0	0	0	0	0	0	0
2	0	30	40	20	3	7	0	0	0	0
3	3	24	37	18	13	4	0	1	0	0
4	1	25	44	18	5	4	2	0	1	0
5	2	28	32	23	9	4	1	1	0	0
6	2	24	39	21	9	4	1	0	0	0
7	0	27	38	22	6	5	1	1	0	0
8	0	20	36	25	10	8	1	0	0	0
9	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0

表 5 不同风向对应的霾日不同能见度的出现频率

Table 5 Occurrence frequencies of different visibility in hazy days corresponding to different wind direction change

Visibility(km)	Wind direction							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
1	20	20	0	20	0	0	20	20
2	15.6	15.6	25	12.5	15.6	3.1	9.4	3.2
3	15.2	19	22.8	12.7	10.1	3.8	5	11.4
4	13.1	15	29.9	9.3	20.6	0	3.7	8.4
5	12.7	18.3	25.5	10.4	17.1	6.4	4	5.6
6	11.6	11.6	33.2	9.6	16.4	4.8	3.2	9.6
7	8.3	10	25	13.3	25.8	6.7	4.2	6.7
8	7.6	15.2	26.9	8.3	16.6	13.1	7.6	4.7
9	0	0	0	0	0	100	0	0

### 5.3 相对湿度

之前的研究得到：相对湿度增至 50~70% 区间时，霾出现所占几率显著增大，在相对湿度增至 60~70% 区间时达到峰值。而对于霾日的能见度，相对湿度对于它的影响也是类似的。由表 6 可见：能见度在 3~8 km 之间时才伴有低相对湿度 (30% 以下)；能见度为 1 km 和 9 km 时，相对湿度均在 60~69% 之间；同时可以看出随着能见度的上升，相对湿度在 60~69% 之间的概率呈下降趋势。这也表明，低能见度的出现更需要相对较高的相对湿度。



表 6 不同相对湿度对应的霾日不同能见度的出现频率

Table 6 Occurrence frequencies of different visibility in hazy days for each relative humidity

Visibility (km)	relative humidity						
	10~19%	20~29%	30~39%	40~49%	50~59%	60~69%	70~79%
1	0	0	0	0	0	100	0
2	0	0	6	7	30	57	0
3	0	2	3	10	38	47	0
4	0	3	6	13	33	44	1
5	0	1	6	12	34	47	0
6	0	2	6	13	28	50	1
7	1	1	4	15	29	49	1
8	0	3	7	21	28	41	0
9	0	0	0	0	0	100	0

#### 5.4 变压

之前的研究表明: 负变压时更容易产生霾天气。对于霾日的能见度来说, 不同的能见度, 变压场的形势是在变化的。由表 7 可知: 24 h 出现负变压时, 更有利于 1~4 km 能见度的霾出现, 能见度为 1km 时, 负变压出现的概率高达 75%; 能见度大于 4 km 以后, 出现正变压的概率增加, 能见度为 9 km 时, 正变压的概率为 100%。这也说明海平面气压场为低压影响时或高压影响后, 有利于低能见度霾的出现。

表 7 不同变压对应的霾日不同能见度的出现频率

Table 7 Occurrence frequencies of different visibility in hazy days for daily pressure change

Visibility(km)	Positive pressure change	Negative variable pressure
1	25	75
2	40.6	59.4
3	46.8	53.2
4	47.7	52.3
5	52.2	47.7
6	51.2	48.8
7	41.7	58.3
8	42.1	57.9
9	100	0

## 6 合肥霾的预报方法研究

由以上的分析可知, 霾天气的出现及霾日的能见度大小与气象条件(如: 气温、气压、变温、变压、相对湿度、风向、风速等)有一定的相关关系, 尽管不能说在一定的气象条件下肯定会出现霾, 但当使用长时间的连续的样本进行统计时, 不难发现在一定的气象条件下, 更有利于霾的发生发展。使用 2004 年以后的气象资料和空气质量数据, 对有利于霾的发生发展的相关因子进行分析, 以期得到在长期大量样本下, 霾及霾日能见度的多元回归预报方程, 为日常霾及霾日能见度的预报提供一定的帮助和支持。

### 6.1 霾日的预报方法研究

对 2004~2016 年观测资料数据 (地面观测和高空观测) 以及空气质量数据进行初步处理。将有霾出现记为 1, 无霾出现记为 -1。找出各相关因子, 主要包括当天地面观测各气象要素, 前一天地面观测各气象要素 (相对湿度、风向、风速、能见度、气压、温度、露点温度、低云量、总云量、水汽压、饱和水汽压、变压、变温等), 高空各层 (700、850、925、1000 hPa) 的温度、变温、逆温 (两层之间的温度差) 及 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM10 浓度等, 共 55 个因子。对于这些相关因子, 找出通过显著性检验的、相关性较高的影响因素, 进行逐步回归, 得到霾日预报方程。

霾日预报方程为

$$y = 0.933 + 7.531x_{55} - 0.11x_{12}, \quad (1)$$

式中  $y$  为霾日预报结果,  $x_{12}$  为饱和水汽压,  $x_{55}$  为 PM10 浓度 (毫克 / 立方米)。

当预报值 >0 时, 判定为一个霾日; 当预报值 <0 时, 判定为非霾日。

### 6.2 霾日能见度的预报

当霾日预报方程的预报值  $y > 0$  判定有霾出现时, 做相应的霾能见度预报。根据 2004~2016 年观测资料数据 (地面观测和高空观测) 以及空气质量数据, 当有霾出现时, 找出与霾出现时的能见度相关的各种因子, 用类似得到霾预报方程的方法得到霾日能见度的预报方程。

霾日能见度的预报方程为

$$V = 8.35 - 32.676x_{54} - 6.921x_{55} + 0.036x_{39} - 0.020x_{14} - 0.030x_8, \quad (2)$$

式中  $V$  为能见度,  $x_8$  为露点温度,  $x_{14}$  为相对湿度,  $x_{39}$  为 925 hPa 温度,  $x_{54}$  为 NO<sub>2</sub> 浓度 (毫克 / 立方米),  $x_{55}$  为 PM10 浓度 (毫克 / 立方米)。

### 6.3 预报方程效果检验

使用 2017 年的气象数据和空气质量监测数据, 对得到的霾日预报方程和霾能见度预报方程进行预报检验。霾日预报结果检验显示见表 8: 使用预报方程, 霾日的预报准确率在 2017 年达 90%, 空报率仅为 2%, 漏报率则为 8%。说明以上方法建立的霾日预报方程对提高霾预报预警准确率有十分有力的支持。

表 8 2017 年霾日预报准确率

Table 8 Accuracy of haze prediction of 2017

haze prediction	correct prediction	false prediction	missing prediction
accuracy(%)	90	2	8

霾能见度预报的结果表明见表 9: 霾能见度预报结果偏小, 结果偏小样本占 81%, 结果偏大的样本仅占 8%, 能见度预报完全正确的仅占 11%。但是能见度预报误差还在可控范围内见表 10, 能见度预报误差在 3 km 以内的预报准确率达 89%, 能见度预报误差在 2 km 以内的预报准确率达 68%, 能见度预报误差在 1 km 以内的预报准确率达 44%。说明能见度预报结果总体还是比较好的, 对提高霾预报预警准确率有一定的帮助。

表 9 2017 年霾日能见度预报准确率

Table 9 Accuracy of visibility prediction of haze of 2017

visibility prediction	smaller result	correct	bigger result
occurrence frequencies(%)	81	11	8

表 10 2017 年霾日能见度预报误差准确率

Table 10 Accuracy of visibility prediction errors of haze of 2017

visibility prediction	errors			
	<1 km	<2 km	<3 km	>3 km
accuracy(%)	44	68	89	11

## 7 结 论

全市霾日逐月分布不均, 其中 1 月和 12 月霾日最多, 7 月份最少。合肥出现的霾以轻微霾和轻度霾为主, 占所有的霾日 94%。霾的生消有比较明显的日变化, 主要出现在 11:00 ~ 17:00。

霾日出现的有利气象条件是: 风速  $\leq 3$  m/s, 地面主导风向为偏东风到偏南风, 有负变压, 正变温, 相对湿度在 50~70% 之间, 也就是说高湿小风, 暖气团影响时, 更有利于霾的出现。

低能见度的霾需要相对较高的相对湿度和负变压, 同时风速也较小, 也就是说高湿小风, 低压系统影响时, 更有利于低能见度霾的出现。

建立的霾日及霾日能见度方程预报准确较高, 其中霾日的预报准确率达到了 90%, 可以为霾的预报预警提供参考。

## 参考文献:

- [1] China Meteorological Administration. Standard for surface meteorological observation [S]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 23(in Chinese).  
中国气象局. 地面气象观测规范 [S]. 北京: 气象出版社, 2003: 23.
- [2] Bai Zhipeng, Cai Binbin, Dong Haiyan, et al. Adverse health effects caused by dust haze-a review [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2006, **28**(3): 198-200(in Chinese).  
白志鹏, 蔡斌彬, 董海燕, 等. 灰霾的健康效应 [J]. 环境污染与防治, 2006, **28**(3): 198-200.
- [3] Schichtel B A, Husara R B, Falke S R, et al. Haze trends over the United States, 1980-1995 [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(11): 5205-5210.
- [4] Hu Yadan, Zhou Zijiang. Climatic characteristics of haze in China [J]. *Meteorological Monthly*, 2009, **35**(7): 73-78(in Chinese).  
胡亚旦, 周自江. 中国霾天气的气候特征分析 [J]. 气象, 2009, **35**(7): 73-78.
- [5] Song Lianchun, Gao Rong, Li Ying, et al. Analysis of China's haze days in winter half year and climatic background during 1961-2012 [J]. *Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis*, 2013, **9**(5): 313-318(in Chinese).  
宋连春, 高荣, 李莹等. 1961-2012 年中国冬半年霾日数的变化特征及气候成因分析 [J]. 气候变化研究进展, 2013, **9**(5): 313-318.

- [6] Lin Wei, MAO Yuqing, LIU Dongqing. The Characteristics and relationship with meteorological elements of haze weather in nearly 3 years in Nanjing [J]. *Journal of Nan yang Institute of Technology*, 2012, 4(2):76-80(in Chinese).  
林 伟, 毛宇清, 刘冬晴. 近 3 年南京霾天气特征及与气象要素的关系 [J]. 南阳理工学院学报, 2012, 4(2): 76-80.
- [7] Yu jianwei, Chen qu, Yan wenlian, Analysis of haze meteorological factors and study on the forecast methods in Nanjing [C]. *The Fifth Session of the Yangtze River Delta meteorological science and Technology Forum*, Nov. 2008.  
俞剑蔚, 陈 曲, 严文莲, 南京霾日气象要素的特征分析及预报方法初探 [C]. 第五届长三角气象科技论坛论文集, 2008 年 11 月.
- [8] Zhang H, Shi C E, Qiu M Y, *et al.* Long-term variation of haze phenomena in Hefei and its impact factors [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(4): 714-721(in Chinese).  
张 浩, 石春娥, 邱明燕等. 合肥市霾天气变化特征及其影响因子 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(4): 714-721.
- [9] Wu Dui. Discussion on difference between haze and fog and warning of ash haze weather [J]. *Meteorological Monthly*, 2005, 31(4): 3-7(in Chinese).  
吴 兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论 [J]. 气象, 2005, 31(4): 3-7.
- [10] China Meteorological Administration. The Grade of Observation and Forecast of Haze [S]. China Meteorological Industry Standard. Beijing: QX/T113-2010(in Chinese).  
中国气象局. 霾的观测和预报等级 [S]. 中华人民共和国气象行业标准. 北京: QX/T113-2010.