

# The Analysis of Haze Distribution and Weather Causes in Fujian Province during the Last Three Years

Hong Wang\*, Zuxin Xie, Qiuping Zheng, Binbin Chen

Fujian Meteorological Science Institute, Fuzhou Fujian  
Email: \*wh1575@163.com

Received: Sep. 26<sup>th</sup>, 2016; accepted: Oct. 10<sup>th</sup>, 2016; published: Oct. 18<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Surface meteorological data of 9 cities in Fujian, 3 radiosonde stations' data and hourly PM<sub>2.5</sub> concentration data monitored by Environmental Monitoring Station of China from October 2014 to May 2016 were applied to investigate 17 typical haze processes in Fujian province. It compared the frequency, influence, duration, grade and weather causes during the favorable incidence of haze processes in recent 2 years (from October 2014 to May 2015, and from October 2015 to May 2016). The analysis indicated that: in the El Nio background, the frequency of haze processes had not reduced by more precipitation during October 2015 - May 2016. Rather, the frequency of haze processes had slightly increased and its duration had obvious growth. Pollution level was mainly light-moderate pollution, and the frequency of heavy pollution had increased. Beside human pollution, local accumulation haze weather accounted for about 25%, while regional transportation haze weather was about 75%. Contrary to the history (2005-2014) statistics, regional transportation had increased obviously. It has certain help to improve the prediction of haze weather by analyzing its formation, maintenance, and dissipation of the weather causes respectively, and to establish a haze weather conceptual model and prediction index.

## Keywords

Haze Process, Distribution Characteristics, Weather Causes, Fujian Province

---

\*通讯作者。

# 近三年福建省霾分布特征与天气成因分析

王宏\*, 谢祖欣, 郑秋萍, 陈彬彬

福建省气象科学研究所, 福建 福州

Email: \*wh1575@163.com

收稿日期: 2016年9月26日; 录用日期: 2016年10月10日; 发布日期: 2016年10月18日

## 摘要

本文利用2014年10月~2016年5月福建省9个设区城市常规地面气象观测资料、3个探空站资料与环境监测国控点PM<sub>2.5</sub>小时浓度资料, 综合研判了全省17次典型的霾天气过程, 并对比了近两年霾高发期2014年10月~2015年5月与2015年10月~2016年5月全省霾天气的出现次数、影响范围、持续时间、等级强度、天气成因等的不同点。结果表明: 在极强的厄尔尼诺事件背景下, 2015年10月~2016年5月福建的霾天气过程并没有因降水异常偏多而减少, 反而出现次数略有增加, 持续时间明显增长, 主要以轻度~中度为主, 重度霾发生的时次有所增加; 除人为排放外, 积累型霾天气约占25%, 区域输送型霾天气约占75%, 这与历史(2005~2014年)资料统计的比例趋势相反, 区域输送过程数明显增多。将日均相对湿度在80%以下的干霾与日均相对湿度80%~95%的湿霾天气区别分析其生成、维持、消散的天气成因, 建立霾的天气学概念模型和预报判别指标, 对提高霾天气的预报准确率有一定帮助。

## 关键词

霾天气过程, 分布特征, 天气成因, 福建省

## 1. 引言

每年入秋至冬季, “霾”这个词就会频繁的出现在公众的视线里, 持续、大范围、严重的霾天气与空气质量恶化事件, 对人体健康、交通安全、城市景观、生态环境等造成诸多负面影响[1], 而且大量的污染物会随着引导风通过远距离传输影响到下游地区[2] [3], 霾天气是已成为城市(群)特有的高影响、灾害性天气, 胡亚旦等[4]研究表明, 大中城市的霾天气较乡村明显偏多, “浊岛”现象非常明显。针对2013年1月我国中东部强霾污染天气过程气象专家开展了专题分析, 王自发等[5]利用数值模式的模拟表明, 在典型地点来自区域外跨城市群的输送和区域内的输送之和与局地污染源贡献相当, 气象-大气污染双向反馈机制对强霾的形成有非常重要影响。王思跃等[6]分析得出, 不利的气象条件和地理位置是强霾污染形成的外部条件, 一次排放的气态污染物向颗粒态的快速转化, 是此次强霾污染“爆发性”和“持续性”的内部促发因子。张人禾等[7]通过对大气环流背景场以及气象要素和诊断物理量如风速、垂直风切变、逆温、露点温度差、大气稳定度等的变化和配置分析表明此次严重雾霾的逐日演变超过2/3的方差可以由气象条件解释, 也就是说气象条件对污染的贡献率可以达到约67%。另外, 专家们还从气象角度提出了防治雾霾天气的对策和措施, 可见应对雾霾天气, 气象科学与技术大有可为[8]。

福建省总体的空气质量较好, 是我国相对清洁的一个地区[9]。2015年厦门、福州在全国74个重点城市中空气质量排名第2和第6, 在本省9个设区城市中排名第4和第7。同年, 全省各设区城市环境空气质量均达到二级标准, 达标城市比例为100%, 达标天数比例在96.1%~99.2%之间, 平均为97.9%, 出

现污染的天数为 3~13 天, 超标的污染物有  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ , 没有出现过  $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}$  超标。福建的霾日数较华北、京津冀、长三角等城市(群)少, 低能见度天气多以雾、轻雾和湿霾为主, 污染程度轻, 主要以轻度—中度为主, 比较严重的霾天气(日平均能见度在 5 km 以下)也有, 一年大概 0~8 天, 而且持续时间不长, 短的十几个小时, 长的 1~2 天。最重要的是霾的化学组分与北方和中东部地区的有较大的区别, 这主要取决于污染源的类型和排放强度。与媒体上报道的“霾天气”不同, 福建的霾天气不等于高污染天气, 前者数量远多于后者, 大部分霾天气发生时空气质量以良为主, AQI 并没有超标。霾天气与污染天气二者有交叉, 也有区别, 有交叉表现在, 霾天气有时对应着颗粒物  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  或同时浓度超标的污染日; 有区别表现在, 有些污染日不是霾天气, 主要发生在臭氧( $\text{O}_3$ )污染日, 细粒子浓度低、能见度高, 盛夏季节常见。

## 2. 资料分析与处理

本文利用 2014 年 10 月~2016 年 5 月福建省 9 个设区城市常规地面气象观测资料、3 个探空站资料与环境监测国控点  $\text{PM}_{2.5}$  小时浓度资料, 综合研判了近 3 年全省 17 个典型的霾天气过程。在开展不同天气过程霾的成因分析时, 以福州市为例, 能见度、相对湿度、风向风速、降水量等来自福州 58,847 站常规地面观测资料, 结合探空资料分析天气形势和气象要素场配置。

由于气象部门缺乏对霾天气的统一观测标准, 在进行长期资料的统计分析时不能参考基于人工观测的霾记录[10]。对霾资料的处理: 一是排除降水、沙尘暴、扬沙、浮尘、吹雪、雪暴、雾等现象对视程的影响, 出现日平均能见度 $<10$  km (2014 年及以后自动站观测的日平均能见度 $<7.5$  km), 相对湿度 $<95\%$ 的低能见度天气现象; 二是对降水发生在 14 时以后的, 14 时之前出现了霾天气, 这样的降水个例不能排除; 三是对相对湿度在 80%~95%, 要剔除 02 时相对湿度大于 90%、08 时能见度低于 10 km 且 14 时能见度大于 10 km 的雾消散的过程, 不能判定为霾日。

污染日是指  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{O}_3$  等 6 种大气常规污染物浓度日均 IAQI 的最大值超过 100, 即污染超标日。福州市  $\text{PM}_{2.5}$  小时浓度资料来自 5 个环境监测国控站点(不含鼓山清洁对照点)的平均值。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 天气形势分型

选取  $20\sim 35^\circ\text{N}$ 、 $110\sim 125^\circ\text{E}$  为关键区, 将影响福建的天气形势分为 10 种[11]: 冷高压脊、高压底部、高压后部、锋前暖区、地面倒槽、低涡切变、高空槽、副热带高压及其边缘、台风(热带辐合带)、台风(热带辐合带)外围, 通过分析各种天气形势下霾的出现率, 找出产生霾天数较多和霾出现频率较高的天气型。

#### 3.1.1. 静稳的天气形势

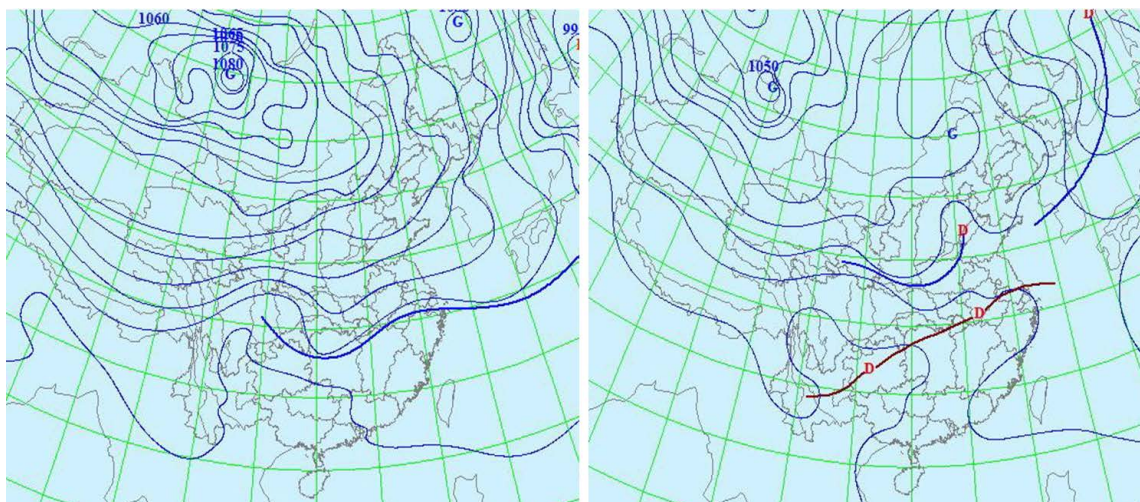
锋前暖区天气形势(图 1, 左)下发生霾天气的出现频率是最高的, 约 35%; 其次是地面倒槽暖区天气形势(图 1, 右)约 33%; 高压后部天气形势下发生霾天气次数最多, 出现频率为 19% (图略)。

#### 3.1.2. 区域输送的天气形势

就福建而言, 区域输送几乎都是大陆气团随着冷高压(冷高压脊)前的偏北气流, 将北方污染物输送南下, 直接增加本地气溶胶浓度, 形成霾天气; 输送路径有 3 条, NE→SW 向与 NW→SE 向或者北霾入海, 顺着高压底部东风回流影响福建, 特别沿海地区。

#### 3.1.3. 其他可能产生霾的天气形势

一是副热带高压及其边缘高温、强太阳辐射、长时间日照下出现的光化学烟雾事件, 能见度低时发



**Figure 1.** The weather situation map of Fujian province is located in the warm area before the front (left), surface trough warm area (right)

**图 1.** 福建省位于锋前暖区(左)、地面倒槽暖区(右)天气形势示意图

生的霾天气；二是台风(热带辐合带)外围干热的下沉气流导致边界层空气剧烈压缩、增温后形成的霾天气。这两类霾天气发生概率低，持续时间短，强度不强。

#### 3.1.4. 不产生霾的天气形势

低涡、低涡切变、高空槽、台风(热带辐合带)及其外围引发的降水天气过程。

### 3.2. 2015 年霾天气过程汇总与分析

1) 2015 年福建省平均霾日数约 25~60 天，区域分布不均匀，沿海多于内陆，南部多于北部；漳州地区霾日数最多，南平地区霾日数最少。就沿海地区而言，北部沿海受区域输送影响较多，南部沿海因天气静稳出现积累型霾天气较多；海峡中部的平潭岛霾日数(47 天)远多于南部的东山岛(5 天)，原因是易受北霾南输的影响，霾日数较多(图 2)。

2) 2015 年福建省共发生了 10 次典型的霾天气过程(表 1)，70%都集中在 1 月和 12 月，平均持续时间 1.5~3 天，主要以轻度~中度霾为主，个别时次出现重度霾，并出现重度~严重等级的污染，主要的影响范围在沿海地区。

3) 除了人为排放(如除夕夜燃放烟花爆竹，清明祭扫)外，福建省霾天气产生的原因有三点，一是积累型，发生在静稳天气下，大气扩散条件比较差，本地污染物聚集导致污染物浓度上升，能见度下降，形成霾天气；二是输送型，因大陆气团携带上游污染物输送(几乎都是北霾南输)的影响，输送通道为 NE→SW 向、NW→SE 向，或者北霾随高压入海，顺着高压底部的东风回流影响福建。与积累型霾天气相比，输送型霾天气有污染突发性强、污染程度重、影响范围广、持续时间短等特点；三是积累和输送共同作用导致的霾天气过程，这类霾天气持续时间就比较长，污染比较严重。

4) 积累型霾天气的消散主要靠降水的清除作用以及风的稀释扩散作用；输送型霾天气的消散主要取决于风场的改变，当风切断了污染的来源，则霾消散；或者当携带污染物的风速减小，携带清洁空气的风速增大都会导致霾消散。

### 3.3. 近两年霾高发期全省霾天气特征对比

对比 2014 年 10 月~2015 年 5 月与 2015 年 10 月~2016 年 5 月福建省霾高发期(10 月~翌年 5 月是福



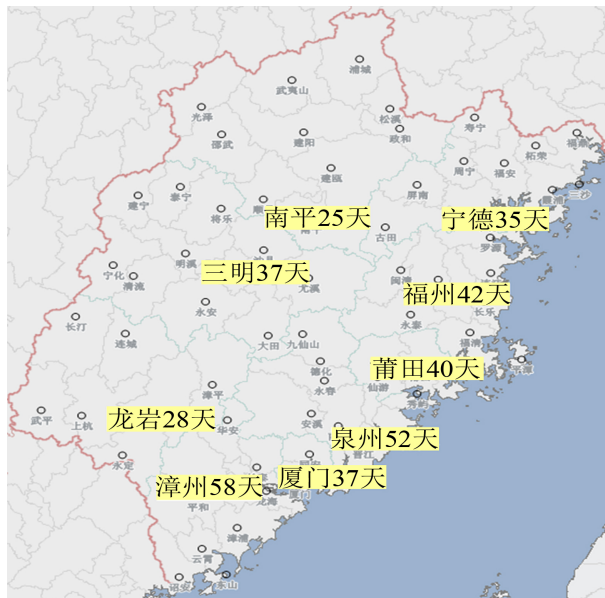


Figure 2. The distribution map of Fujian province 9 City haze days in 2015

图 2. 2015 年福建省 9 个设区城市霾日数分布图

Table 1. Fujian province haze weather process in 2015 summary

表 1. 2015 年福建省霾天气过程汇总

发生时间	持续时间(天)	影响范围	强度等级
1月 5~6 日	2	全省，南部地区比较严重	轻度~中度霾天气，局地重度霾天气
1月 9~11 日	2.5	沿海地区	轻度霾天气
1月 17~19 日	2.5	全省，沿海地区比较严重	轻度~中度霾天气
1月 26~27 日	1.5	全省，中北部沿海比较严重	轻度~中度霾天气，局地重度霾天气
4月 5~6 日	1.5	清明祭扫人为源排放多的地方	轻度~中度霾天气，局地重度霾天气
4月 17~19 日	2	中北部地区	轻度~中度霾天气
10月 27~30 日	3	全省，沿海地区明显些	轻微~轻度霾天气
12月 12~13 日	1.5	中北部沿海地区	轻度~中度霾天气
12月 15~16 日	1.5	全省，中北部地区明显些	轻微霾天气
2015 年 12 月 31 日~2016 年 1 月 4 日	4	全省，沿海地区比较严重	轻度~中度霾天气，局地重度霾天气

备注：典型的霾天气过程：日均相对湿度小于 95%，能见度小于 7.5 公里，PM<sub>2.5</sub> 平均浓度 50 微克/立方米以上，持续时间 24 小时以上，范围较大；持续时间几个至十几个小时，范围小，生、消很快的霾天气就不罗列在上表中了。

建省的冬半年，是霾的高发期，90%的霾天气以及 100%中度以上霾天气都出现在这个时段内)霾天气出现次数、影响范围、持续时间、等级强度、天气成因等的不同点。

由表 2 可见，在 2015 极强的厄尔尼诺事件背景下，福建霾天气的变化：

- 1) 2015 年 10 月~2016 年 5 月霾天气过程出现次数较上一年度略有增加，但总天数明显增加，从 14.5 天增加为 23.5 天。
- 2) 霾天气过程持续时间明显增长，从平均 1~2.5 天，增加为 1~4 天，最长的达到 6.5 天。
- 3) 污染程度以轻度~中度为主，重度霾发生的时次有所增加。

4) 区域输送过程数明显增多, 集中发生在 2015 年 12 月~2016 年 2 月。

5) 在 2015~2016 年初, 在极强的厄尔尼诺事件背景下, 福建虽然秋冬季节降水异常偏多, 且春季汛期开始时间较常年提前了 15 天, 降水频繁, 但是霾天气过程出现次数并没有减少。

由表 3、表 4 可见:

2015 年 10 月~2016 年 5 月全省经历了 9 次典型霾天气过程, 2 次静稳、6 次输送、1 次人为污染。除人为排放、积累型约占 25%、输送型约占 75%, 这与历史(2005~2014 年)资料的统计结果不同, 一般年份, 静稳天气形势下霾天气的发生频率要高于区域输送, 约占 60%~70%。

### 3.4. 干霾和湿霾生成、维持和消散的天气学成因分析

由于福建受夏季风(SW、SE)影响时间较长, 空气湿度相对较大, 低能见度天气较多, 除了雾和轻雾外, 不同天气形势, 不同湿度下产生的霾天气对应着完全不同的天气学过程, 因此将日均相对湿度在 80% 以下的, 干燥的天气下产生的霾天气称为干霾; 将日均相对湿度在 80%~95% 的, 潮湿的天气下产生的霾天气称为湿霾。以福州市为例, 选择日均能见度在 7 km 以下的典型个例(否则样本数太大), 分析干霾与湿霾的区别, 由表 5 可见:

1) 福州市干霾天气主要出现在 11 月~翌年 1 月, 秋末和冬季, 受冷空气影响, 大陆主导风为干冷的偏北风, 天气较为干燥, 雨水较少; 干霾日占总霾日数的 25%, 整体污染程度比较重, 多呈现灰霾天

**Table 2.** The haze weather process of May 2014 and October 2015 compared to October 2015 and May 2016

**表 2.** 2014 年 10 月~2015 年 5 月与 2015 年 10 月~2016 年 5 月霾天气过程对比

序号	2014 年 10 月~2015 年 5 月	持续时间(天)	2015 年 10 月~2016 年 5 月	持续时间(天)
1	2014 年 11 月 13 日	1	2015 年 10 月 27~30 日	3
2	2014 年 11 月 29~30 日	1.5	2015 年 12 月 12~13 日	1.5
3	2015 年 1 月 5~6 日	2	2015 年 12 月 15~16 日	1.5
4	2015 年 1 月 9~11 日	2.5	12 月 31 日~2016 年 1 月 4 日	4
5	2015 年 1 月 17~19 日	2.5	2016 年 1 月 19~20 日	1.5
6	2015 年 1 月 26~27 日	1.5	2016 年 2 月 7~8 日	1.5
7	2015 年 4 月 5~6 日	1.5	2016 年 2 月 20~22 日	3
8	2015 年 4 月 17~19 日	2	2016 年 2 月 29 日	1
9	/	/	2016 年 3 月 29~4 月 4 日	6.5
合计	14.5 天		23.5 天	

备注: 区域输送型(黄色阴影)、积累型(紫色阴影)、人为排放(蓝色阴影)。

**Table 3.** Analysis of accumulation type haze weather from October 2015 to May 2016

**表 3.** 2015 年 10 月~2016 年 5 月积累型霾天气特征分析

时间	影响范围	等级强度	天气成因和主要天气现象
2015 年 10 月 27~30 日	全省, 沿海地区明显些	轻微~轻度霾天气	暖区升温明显, 前期东风回流带来污染物, 后期冷空气前锋暖区, 静稳天气, 弱上升运动
2016 年 3 月 29~4 月 4 日	全省	轻度~重度霾天气	典型的暖区, 静稳天气, 天气阴沉扩散条件差, 中南部大范围的污染天气, 3 日出现降水, 西南气流, 污染更重; 4 日后期冷空气入侵, 降水, 空气质量转好

**Table 4.** Analysis of regional transport type haze weather characteristics from October 2015 to May 2016**表 4.** 2015 年 10 月~2016 年 5 月区域输送型霾天气特征分析

时间	影响范围	等级强度	天气成因和主要天气现象
2015 年 12 月 12~13 日	中北部沿海地区	轻度~中度霾天气	北霾入海, 东风回流影响福建, 且位福建处暖区扩散条件差
2015 年 12 月 15~16 日	全省, 中北部地区明显些	轻微霾天气	北霾南输, 但空气干冷, 能见度不低, 颗粒物浓度不高
2015 年 12 月 31~2016 年 1 月 4 日	全省, 沿海地区比较严重	轻度~中度霾天气, 局地重度霾天气	从 31 日下午到 1 日晚上北霾南输影响福建, 2 日转折, 3~4 日倒槽暖区, 大雾, 静稳天气, 多日无雨, 累积效应明显
2016 年 1 月 19~20 日	沿海地区	轻度~中度霾天气	北霾南输, 北部沿海中度霾, 持续了 1.5 天; 南部沿海轻度霾, 19 日夜里转好
2016 年 2 月 20~22 日	沿海地区	轻度~中度霾天气	20 日, 偏北气流很强, 一方面本地浮尘扬沙、一方面北方有沙尘输送, 从宁德开始到漳州污染物浓度逐渐升高; 21 日暖区辐合到 22 日白天, 污染持续; 22 日夜里燃放烟花爆竹

**Table 5.** The difference between dry and damp haze**表 5.** 干霾和湿霾的区别

名称(主要出现月份)	日均相对湿度	所占比例(%)	PM <sub>2.5</sub> 平均浓度(ug/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> 浓度跨度(ug/m <sup>3</sup> )
干霾(11~1月)	80%以下	25	65~75	40~250
湿霾(2~5月)	80%-95%	75	35~45	30~160

气现象, 平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度约为 65~75 ug/m<sup>3</sup>, PM<sub>2.5</sub> 小时浓度的跨度在 40~250 ug/m<sup>3</sup>, 严重的干霾天气, 空气污染峰值也可以达到重度或严重等级(个别时次)。

2) 湿霾天气主要出现在 2~5 月, 冬末和春季, 西南或东南暖湿气流逐渐代替偏北的干冷气流控制福建, 雨水也开始日渐增多; 湿霾的日数(不是过程数)较干霾多, 每年约 10~50 天, 占总霾日数的 75%, 污染程度总体低于干霾, 平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度约为 35~45 ug/m<sup>3</sup>, 多数的湿霾日 PM<sub>2.5</sub> 浓度值不高, 危害小。湿霾天气 PM<sub>2.5</sub> 小时浓度的跨度在 30~160 ug/m<sup>3</sup>, 说明湿霾严重时, 空气污染也可以达到中度量级。

### 3.4.1. 干霾天气生、消的天气成因

1) 分析干霾日(00~23 时)AQI, 发现全部出现颗粒物(PM<sub>2.5</sub> 或 PM<sub>10</sub> 或同时)超标现象(AQI 大于 100), 污染程度主要为轻度污染, 污染的峰值可达到中度~重度等级, 甚至严重等级。

2) 天气形势有静稳天气形势(倒槽暖区、锋前暖区、高压后部), 也有区域输送天气形势(大陆冷高压脊), 重要天气现象有天气晴好、干燥、无雨等。

3) 干霾的生成: 与冷空气的加强、大陆高压庞大稳定有关。积累型霾发生在高压后部或弱暖区控制下, 气压梯度较弱、地面风存在弱辐合、风速较小、持续无降水, 污染物有个聚集的、逐渐升高的过程, 当累积效应明显时, 易形成霾天气; 区域输送型霾是高压前的偏北气流, 将污染物输送南下, 增加本地气溶胶浓度, 直接形成霾天气。

4) 干霾的维持: 积累型, 比较长 2~3 天, 甚至 6~8 天。输送型, 比较短, 十几个小时左右, 有时 1~2 天。

5) 干霾的消散: 取决于风场(含风向、风速)的改变, 如携带清洁空气的风速加大或携带污染空气的风速减小, 还有风向的改变切断了污染的来源, 霾就消散了。

6) 在湿度较低, 霾比较严重的时候, 空气污染也较严重, 降水的可能性不大, 因此开展人工增雨的可能性不大。

### 3.4.2. 湿霾天气生、消的天气成因

1) 统计分析湿霾日(00~23时)发现只有1个湿霾日 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 同时超标(AQI大于100),绝大部分湿霾日空气质量等级良,但污染的峰值会达到轻度污染等级或者接近轻度污染。

2) 天气形势全部都是静稳的天气型,与输送无关,如倒槽暖区、锋前暖区、高压后部、副热带高压边缘等,重要天气现象包含西南急流、暖区降水、雾、雨雾、回暖升温、午后热雷雨等。

3) 湿霾的生成:与冷空气势力减弱,暖湿空气势力增强,且西南急流的建立有关,湿度增大,夜晨有浓雾或有弱降水形成雨雾,大气层结稳定;在降水前1~2小时,大气层结最不稳定的时候,霾最严重,空气质量最差。

4) 湿霾的维持:积累型时间较长,通常夜晨和白天霾严重,午后到傍晚下雨;第二天又循环。

5) 湿霾的消散:靠暖区强降水,或者冷空气带来的降水和大风。

6) 适时开展人工增雨作业,能有效改善城市空气质量。

## 4. 小结与讨论

1) 福建省霾天气过程一年平均9~11个左右,霾日数平均约20~70天,区域分布不均匀,沿海多于内陆,南部多于北部;因常年湿度较大,霾天气时空气质量等级以良为主,严重的霾天气主要发生在宁德、福州、厦门、漳州等沿海城市,除北霾南输的影响外,中南部沿海城市经济发达、人口密集、汽车保有量大、本地污染源排放量大也是霾天气较多的原因。

2) 在2015~2016年初,在极强的厄尔尼诺事件背景下,福建虽然秋冬季节降水异常偏多,且春季汛期开始时间较常年提前了15天,降水频繁,但是霾天气过程出现次数并没有减少,反而略有增加而且过程持续时间明显增长,污染程度有所加重,特别是2015年12月~2016年2月,因大陆气团携带上游污染物输送导致出现霾天气的数量较常年明显增多。

3) 本文从天气学角度开展了霾生成、消散的天气成因分析,构建了霾的天气概念模型,拟分析建立静稳指数、滞留指数和输送指数等霾天气预报判别指标,有利于进一步提高霾天气的预报准确率。

## 基金项目

国家自然科学基金海峡两岸科技合作联合基金(U1405235)、国家自然科学基金(41461164007)、华东区域科技创新联合项目(QYHZ201401)共同资助。

## 参考文献 (References)

- [1] 张小曳,孙俊英,王亚强,等.我国雾-霾成因及其治理的思考[J].科学通报,2013,58(13):1178-1187.
- [2] 安俊岭,李健,张伟,等.京津冀污染物跨界输送通量模拟[J].环境科学学报,2012,32(11):2684-2692.
- [3] 蒋永成,赵天良,王宏,等.福州市 $PM_{2.5}$ 污染过程中大气边界层和区域传输研究[J].中国环境科学,2015,35(2):347-355.
- [4] 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] 王自发,李杰,王哲,等.2013年1月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策[J].中国科学:地球科学,2014,44(1):3-14.
- [6] 王跃思,姚利,王莉莉,等.2013年元月我国中东部地区强霾污染成因分析[J].中国科学:地球科学,2014,44(1):15-26.
- [7] 张人禾,李强,张若楠.2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J].中国科学:地球科学,2014,44(1):27-36.
- [8] 穆穆,张人禾.应对雾霾天气:气象科学与技术大有可为[J].中国科学:地球科学,2014,44(1):1-2.



- [9] 曹国良, 张小曳, 龚山陵, 等. 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单[J]. 中国科学, 2011, 56(3): 261-268.
- [10] 赵普生, 徐晓峰, 孟伟京, 等. 津冀区域霾天气特征[J]. 中国环境科学, 2012, 32(1): 31-36.
- [11] 王宏, 林长城, 隋平, 等. 福州天气形势分型与大气污染物相关性分析[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(6): 7-11.

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ccl@hanspub.org](mailto:ccl@hanspub.org)