

# The Classification Study of the Persistent Haze in Ningbo

Guoqiang Xue<sup>1\*</sup>, Shiqiang Sun<sup>2</sup>, Wendian Wang<sup>3</sup>, Shanshan Wang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ningbo Meteorological Service Center, Ningbo Zhejiang

<sup>2</sup>Ningbo Meteorological Observatory, Ningbo Zhejiang

<sup>3</sup>Yuyao Meteorological Bureau, Ningbo Zhejiang

Email: \*xueguoqiang88@163.com

Received: Dec. 17<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jan. 2<sup>nd</sup>, 2020; published: Jan. 9<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Based on the ground weather observation data, sounding data, and air quality data, the haze situation of Ningbo City in 2010-2018 was analyzed. The results show that: since the "Air Pollution Control Regulations" were promulgated, the number of haze days in Ningbo has been significantly reduced, and the persistent haze process usually lasts about 4 days. The surface pressure field which causes continuous haze can be divided into three main types: high pressure field, equal pressure field, and cold air slow diffusion field, which account for 72%, 11%, and 17% of the total, respectively. And the high-altitude situation in the haze process can be mainly straight westerly and sub-tropic high control. Low-altitude wind shear and ground wind speed have a positive correlation with visibility during the control period of the high-pressure field, but the correlation is not obvious when controlled by the weak-cold air diffusion field. The larger the K value or  $T_{925-850}$  is, the more conducive it is to the vertical diffusion and dilution of pollutants, so the visibility can be improved, and conversely, haze will be aggravated.

## Keywords

Ningbo, Persistent Haze, Weather Classification, Meteorological Factor

---

# 宁波持续型霾的天气分型研究

薛国强<sup>1\*</sup>, 孙仕强<sup>2</sup>, 王文典<sup>3</sup>, 王珊珊<sup>3</sup>

<sup>1</sup>宁波市气象服务中心, 浙江 宁波

<sup>2</sup>宁波市气象台, 浙江 宁波

<sup>3</sup>余姚市气象局, 浙江 宁波

Email: \*xueguoqiang88@163.com

---

\*通讯作者。

收稿日期：2019年12月17日；录用日期：2020年1月2日；发布日期：2020年1月9日

## 摘要

利用常规气象站地面观测资料，探空资料和空气质量数据，分析了宁波市2010~2018年霾情况，结果表明，《大气污染防治条例》颁布以来，宁波市霾日数明显减少，持续型霾过程一般持续4天左右。造成持续型霾的地面气压场可分为高压场，均压场，冷空气缓慢扩散场三种主要类型，分别占总数的72%，11%，17%。霾过程的高空形势主要有平直西风型和副高控制型。低空风切变和地面风速与能见度在高压场控制期成正相关，而在弱冷空气扩散场控制时相关性不明显。K值或 $T_{925-850}$ 越大，则越利于污染物垂直扩散稀释，提高能见度，反之会导致霾加重。

## 关键词

宁波，持续型霾，天气分型，气象因子

Copyright © 2020 by author(s) 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

## 1. 引言

气象条件经常成为影响污染程度的重要因素[1][2]，发生霾天气形势的行星尺度环流背景已知的有中阻塞型，南支槽型，纬向型环流[3]。张人禾，刘梅[4][5]等分析了我国大范围典型持续性雾霾的气象条件，提出地面弱风场和弱垂直风切变的抑制作用。宁波市东临东海，北临杭州湾，西部和南部分别为四明山脉和天台山脉，地形复杂，且同时受大陆气团和海洋气团影响，其霾污染特征与内陆有一定差异[6]。霾污染物有本地源和外地输送源，俞科爱等[7]认为宁波霾天气与边界层有一定关系，宁波秋冬季输送霾轨迹路径主要来自华北，黄海南部和东海。

霾的发展程度与天气形势密切相关，合适的形势场可以造成霾污染的加重，戴竹君[8]等分析了江苏省秋冬季霾，根据地面形势分为均压型、冷锋前部型、低压倒槽型。廖晓农[9]等分析指出北京市冬季持续型霾常对应高空西北气流和低层短波，夏季持续型霾出现在副高长期控制下，低层风向和温湿层结对霾变化有直接作用。于庚康[10]等分析指出高空形势变化平稳、中低空暖平流配合稳定少动的地面气压场为持续型雾-霾提供有力环流形势。以上文献将高低空进行分别陈述，并都指出高空平稳形势和地面静稳场是霾形成的主要天气形势。但各地区由于霾的排放源差异和地理地形不同，影响霾的天气分型也应有所区别。

2013年《大气污染防治行动计划》(国十条)出台后，各地均采取了有效措施控制污染排放，需要研究国十条出台后这几年的霾污染的变化情况，分析该背景下宁波地区霾预报的新方法。本文旨在分析国十条颁布前后几年霾日数变化情况，对造成宁波地区持续型霾过程的天气形势进行分型，并分析气象条件对霾污染的影响。

## 2. 资料与方法

地面气象资料使用鄞州国家基本气象站(站号 58562)逐小时地面观测能见度和相对湿度(RH)资料，日平均能见度为当日24小时逐小时能见度的平均值，日平均相对湿度为当日24小时逐小时相对湿度的平

均值。空气质量数据使用宁波环境监测总站公布的逐日  $PM_{2.5}$  浓度资料。

使用日平均能见度和日平均相对湿度, 日平均  $PM_{2.5}$  浓度这三个要素, 根据 QXT113-2010《霾的观测和预报等级》进行霾判定, 当能见度  $< 10$  km, 并且  $RH < 80\%$ , 为霾; 或者当能见度  $< 10$  km,  $RH$  在  $80\% \sim 95\%$  之间, 并且  $PM_{2.5}$  浓度  $\geq 75 \mu g/m^3$ , 为霾。霾的等级根据能见度分为轻微霾 ( $5.0 \leq V < 10.0$ ), 轻度霾 ( $3.0 \leq V < 5.0$ ), 中度霾 ( $2.0 \leq V < 3.0$ ), 重度霾 ( $V < 2.0$ ), 共四个等级。根据以上判定规则, 对宁波市 2010~2018 年霾日情况进行分析, 并厘清持续型霾过程。

使用 MICAPS 基本资料, 分析霾过程中高低空天气形势场特征, 对持续型霾过程的天气形势进行分型, 并根据常规探空气象资料分析气象动力和热力因子与霾能见度之间的关系, 探空资料使用杭州站(站号 58457)和洪家站(站号 58665)探空资料的平均, 探空资料每日 08 时和 20 时各一次, 计算霾过程前后高空(850~500 hPa)水平风垂直切变( $\sqrt{(u_{500} - u_{850})^2 + (v_{500} - v_{850})^2}$ ), 以及低空(地面~850 hPa)水平风垂直切变( $\sqrt{(u_{850} - u_{1000})^2 + (v_{850} - v_{1000})^2}$ )的变化, 同时计算 K 指数, Si 指数, 低空温度层结等热力参数, 并分析这些动力热力参数在霾演变过程中的作用。

### 3. 《大气污染防治行动计划》颁布前后霾日变化

使用鄞州国家气象站(站号 58562)地面观测能见度和相对湿度(RH)资料, 和宁波环保站公布的逐日  $PM_{2.5}$  浓度资料, 日平均能见度为当日 24 小时逐小时能见度的平均值, 日平均相对湿度为当日 24 小时逐小时相对湿度的平均值。使用日平均能见度和日平均相对湿度, 日平均  $PM_{2.5}$  浓度这三个要素, 根据 QXT113-2010《霾的观测和预报等级》[11]进行霾判定。

2013 年 9 月 10 日, 国务院印发《大气污染防治行动计划》(又称国十条), 以此时间节点为界, 分析 2010~2013 年和 2014~2018 年霾日情况。发现 2010~2013 年霾日数较多(图 1), 均在 140 天以上, 重度霾, 中度霾日数 2013 年之前每年都可达 10 天以上。从 2014 年起, 宁波霾日数成明显下降态势, 且降幅很大, 到 2018 年, 年累计霾日数仅 17 天, 创下新低。2014 年以来重度霾和中度霾日数均跌至个位数。轻度霾日数也称明显的减少趋势。可见《大气污染防治条例》颁布以来, 空气污染治理取得了明显效果。

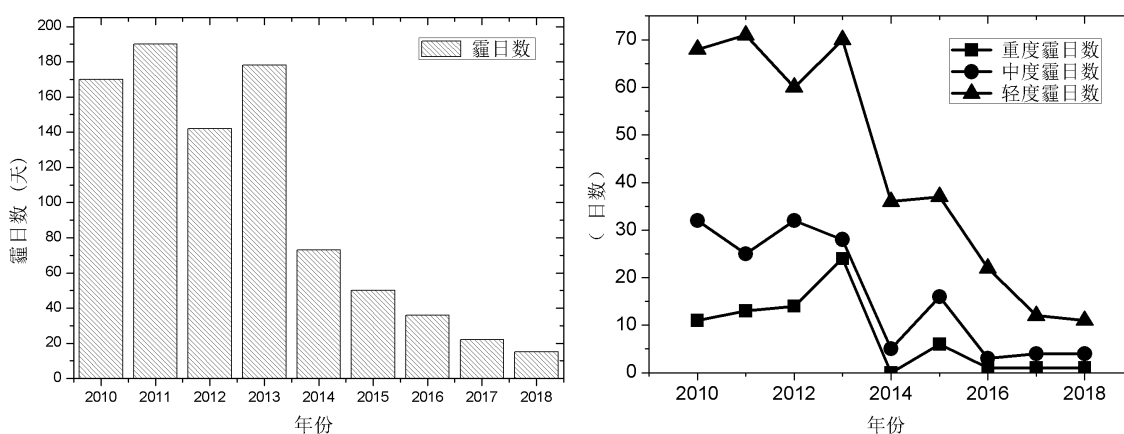


Figure 1. Number of haze days from 2010 to 2018

图 1. 2010~2018 年霾日数逐年变化情况

## 4. 持续型霾过程情况统计分析和天气分型

### 4.1. 宁波地区持续型霾过程情况统计

天气系统的发展演变具有一定周期性, 有利的天气形势可以造成霾污染物的积累和霾天气的持续,

较重的霾污染也常发生在持续型霾过程中。本文以持续三天达到轻微以上级别霾为一次持续型霾过程。

2010~2013年,持续型霾过程频发,重度霾也频发,有一半以上的霾过程持续达7天以上,持续最长的有2011年出现过持续19天霾日,2013年出现过持续17天霾日。长期持续型霾一方面是由于大气环流异常造成静稳天气持续,一方面在霾污染物排放量大的情况下,即使天气条件好转也难以将污染物输送扩散稀释。

《大气污染防治行动计划》出台后,2014年到2018年共出现18次持续型霾过程(表1),其中达到中度以上级别的过程有2次,分别出现在2014年1月和2015年12月底,达到轻度级别的6次,其余10次过程为轻微霾。2014年以来,持续型霾过程一般持续3~4天,仅有一次过程持续5天,不再出现2013年以前那种持续一周以上的污染情况。霾持续时间与天气过程的发展,天气系统的转换有很大关系,也说明在污染物排放源减少的情况下,适当的天气形势即可将霾驱散,霾日的形成跟天气形势的关联更加密切。

**Table 1.** Persistent haze from 2014 to 2018 in Ningbo  
**表 1.** 2014~2018年宁波持续型霾过程情况

2014年	1月18~20日	中度霾 2~3 km	冷高压控制
	2月20~23日	轻微到轻度, 4~9 km	冷高压控制
	3月9~11日	轻微到轻度, 4~8 km	冷高压控制
	6月4~7日	轻微, 5~8 km	均压场
	6月12~14日	轻微, 7~10 km	均压场
	11月17~19日	轻微到轻度, 5~9 km	冷高压控制
	12月10~13日	轻微, 7~9 km	冷空气缓慢扩散
	12月19~21日	轻微, 6~9 km	冷空气缓慢扩散, 冷高压控制
2015年	1月8~11日	轻微到轻度, 4~8 km	冷高压控制
	1月15~19日	轻微, 5~8 km	冷高压, 副冷锋扩散
	2月16~18日	轻微到轻度, 3~9 km	冷高压控制
	10月11~13日	轻微, 7~9 km	冷高压控制
2016年	12月29日至1月1日	轻微到中度, 2~7 km	冷高压控制, 弱冷空气缓慢扩散
	1月7~9日	轻微, 5~7 km	冷高压控制
	1月13~16日	轻微, 5~7 km	冷高压控制
	12月7~9日	轻微到轻度, 4~8 km	冷高压控制
	12月22~24日	轻微, 5~7 km	冷高压控制, 弱冷空气缓慢扩散
2017年	无持续型霾		
2018年	2月6~8日	轻微, 6~9 km	冷高压控制

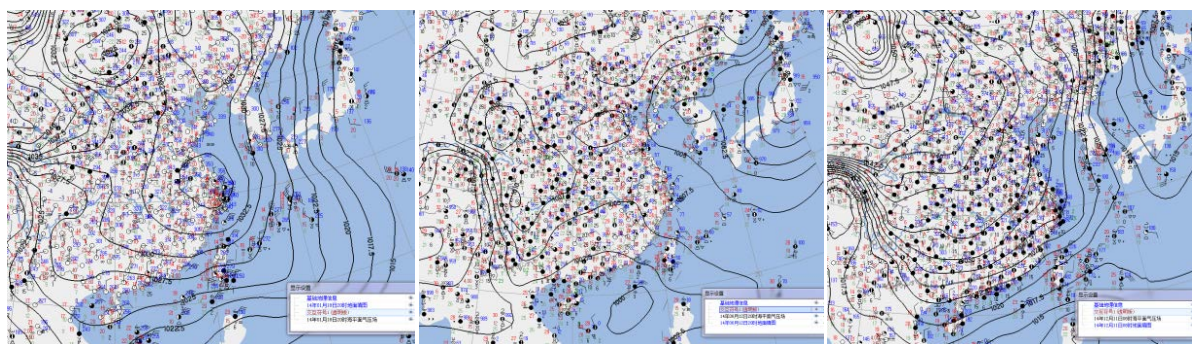
## 4.2. 造成持续型霾过程的天气分型

### 4.2.1. 持续型霾过程的地面形势场特征

分析MICPAS资料中的地面形势场,可将持续型霾污染的天气形势分为高压场,均压场,冷空气缓慢扩散场三种主要类型(图2)。其中高压场造成的持续型霾过程占总过程次数的72%,均压场占11%,冷空气缓慢扩散场占17%(表1)。1) 高压场霾过程一般出现在冷空气过后,或者出现在副高西伸加强时,高压中心以下沉气流为主,不利于污染物在垂直方向扩散,中心水平风力较小,不利于污染物水平方式

输送扩散,若高压场维持三天或更久,则易出现霾污染逐渐加重的现象。2) 均压场,一般发生在高空平直西风气流下,或者 500 hPa 副高加强西伸并在华东上空有副高中心,地面也会出现均压场或弱气压场,均压场风速较小,水平扩散能力较差,若同时高空形势不利于垂直对流,则霾污染易积累持续。3) 冷空气缓慢扩散场,一般发生在冷空气强度较弱的时候,锋区伴有等温层或弱逆温,冷空气南下速度慢,风力小,一方面弱风场配合逆温稳定导致扩散条件较差,一方面可将北方污染物输送至宁波。

分析发现,有时持续型霾过程并非由上述一种形势场造成,而是上述两种或三种形势场交替出现。相应的霾过程的消散对应以下地面场:1) 高压入海,宁波处于高压底部或底后部,东北风或东南风加强,偏东分量利于海上清洁大气向陆地输送。2) 发生新冷空气过程,这种新冷空气过程一般为较强冷空气,伴随冷空气南下速度较快,且风力较大,清除作用明显。



**Figure 2.** Three typical ground situations that cause persistent haze (from left to right: high pressure field, pressure equalizing field, and cold air slow diffusion field)

**图 2.** 造成持续霾三种典型的地面形势(从左到右: 高压场, 均压场, 冷空气缓慢扩散场)

#### 4.2.2. 持续型霾过程的高空形势场特征

分析各次持续型霾过程的 500 hPa 高空形势,宁波发生持续型霾过程时,最常见的是 500 hPa 上平直西风或西北偏西气流,即以纬向环流为主导,在持续型霾过程结束时 500 hPa 常有新的槽脊发展过境,环流的经向度明显加大。

夏季和初秋也有副高控制时 500 hPa 弱风场造成持续型霾天气,副高加强西伸至华中,浙江位于副高中心,高低空均为高压中心弱风场,由于副高中心呈系统性下沉气流,低层 925~850 hPa 之间多数时间有下沉逆温层或者温度递减率较小层存在,对应着较稳定的大气层结,地面为均压场或弱气压场,不利于污染物垂直扩散。当副高减弱东退至海上,低空和地面转东南气流,则霾污染减弱消散。

#### 4.2.3. 典型霾过程的形势分析

2014 年以来有两次持续型霾过程达到中度以上级别,分别为 2014 年 1 月 18~20 日霾过程和 2015 年 12 月 29 日至 2016 年 1 月 1 日霾过程,两次过程高空均为平直西风型,地面为冷高压控制型。

以 2015 年 12 月 29 至 2016 年 1 月 1 日霾过程为例(图 3),霾发生前,1 月 27 日浙江处于高空槽后西北气流引导较强冷空气影响,到 28 日高空槽逐渐过境,冷空气逐渐结束地面渐转冷高压控制,29 日 500 hPa 东亚上空盛行西风气流,浙江地面为冷高压控制,30 日高空平直西风中有一较浅的波动,引导很弱的副冷锋南下,地面转为弱冷空气扩散场,31 日和 1 日重新转为高空平直西风和地面冷高压控制。1 月 2 日,南北两支高空槽发展并同相位叠加,地面冷高压入海,宁波地区转为高压底部偏东风,霾污染减弱消散。

霾过程发生在西风大槽过境结束之后,新的西风大槽尚未形成之前,此时高空盛行平直西风气流控制时,使中纬度具有一定正压性,高空无明显涡度平流,所以地面无明显天气系统发展,地面和低空为

较弱的风压场控制，无明显的冷暖平流，则高空形势也无明显发展，因此高空平直西风和地面稳定形势场都得以维持较长时间，容易出现持续型的霾天气。

霾消散前高空形势先发生改变，南北两支锋区均有发展，形成新的槽脊并逐渐东移发展，或者出现南北波动同位相叠加，霾的消散也得益于新的西风大槽的发展，可以认为持续型霾一般发生在长波调整完成之后的稳定形势场中，而新的一次长波调整过程可使形势场发生转换，驱使霾消散。

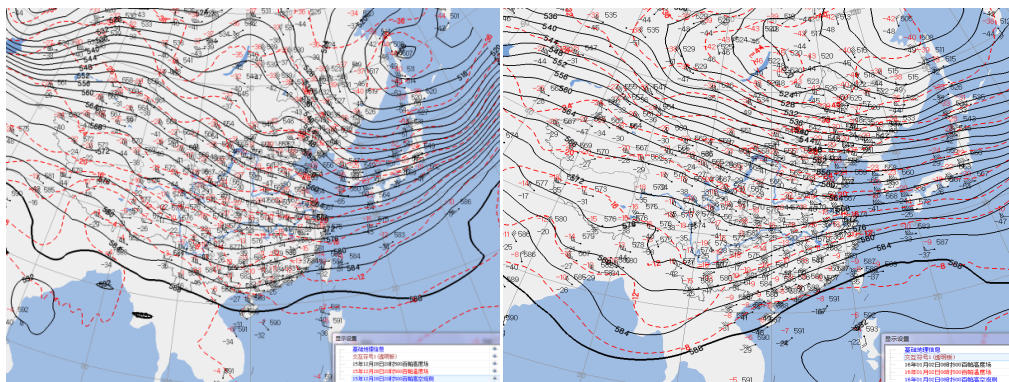


Figure 3. Circulation situation in 500 hPa in December 28, 2015 and January 2, 2016

图3. 2015年12月28日500 hPa和2016年1月2日500 hPa环流形势

## 5. 霾过程中的气象动力和热力因子

### 5.1. 霾过程中的动力因子

前面的分析表明，高低空形势分布会影响霾生消变化。合适的风压场通过改变大气动力结构和垂直输送强度和湍流强度，影响霾污染程度。

选取2015年12月29日至2016年1月1日霾过程，利用杭州站和洪家站探空资料，探空资料每日08时和20时各一次，计算霾过程前后高空(850~500 hPa)水平风垂直切变( $\sqrt{(u_{500} - u_{850})^2 + (v_{500} - v_{850})^2}$ )的变化，以及低空(地面~850 hPa)水平风垂直切变( $\sqrt{(u_{850} - u_{1000})^2 + (v_{850} - v_{1000})^2}$ )的变化。

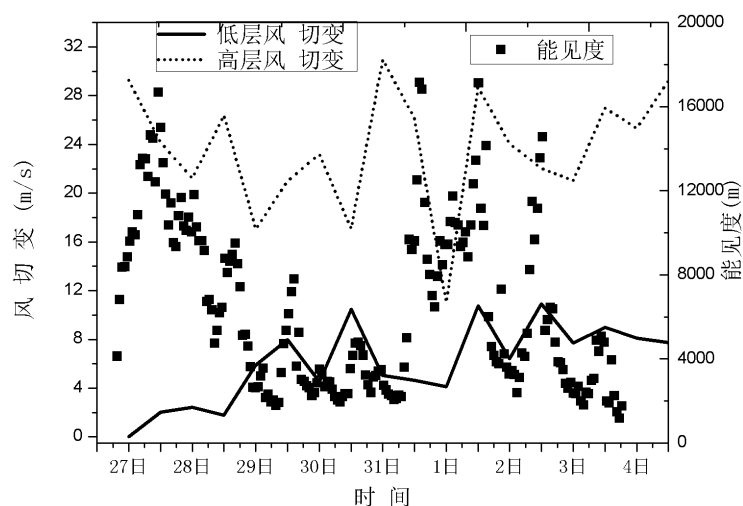
先看低空风切变在冷空气扩散场和高压控制场下的情况。27日、28日、30日为冷空气扩散场，地面和850 hPa同为西北风，且风速相近，低空风垂直切变很弱(图4)，尤其27日在低空风切变较弱的情况下能见度亦然较好，说明在冷空气扩散阶段低空风切变与能见度相关性不明显。而在冷高压控制阶段，地面为静风，850 hPa仍有一定风速，因此低空风切变有些增大，但切变值仍在10 m/s以下。且可看出，在高压控制时段，地面能见度与低空风切变有一定正相关性，当低空风切变增大时，动力湍流增强，有利于污染物在垂直方向扩散稀释，则地面能见度升高。

能见度与高空风切变没有明显相关性，甚至出现负相关，原因在于高空500 hPa为稳定的西风，而当850 hPa也为高压控制呈静风状态时，计算出的高空风切变较大，而此时低层稳定层更深厚，更不利于污染物扩散，导致地面能见度变差。27日高层西南风或偏西风较强，且与850 hPa风向差异大，使得高空风切变较大，此时能见度都在10 km以上。也说明当高压场越深厚，越有利于霾污染物的积累，能见度的降低。

在高压场控制时，没有明显的外部输送条件，霾污染物来源主要是本地源的积累[8]，地面风速与 $PM_{2.5}$ 浓度呈明显负相关(图5)，与能见度呈正相关，地面风速越大，则 $PM_{2.5}$ 浓度越小，能见度越高；反之地面风速越小，则 $PM_{2.5}$ 浓度越大，能见度越低。且在冷高压控制时段， $PM_{2.5}$ 浓度有明显的增加趋势，而1月1日 $PM_{2.5}$ 浓度有短暂下降，这是因为高压变性，宁波地面有短暂转东南风，海上清洁气流所致。而

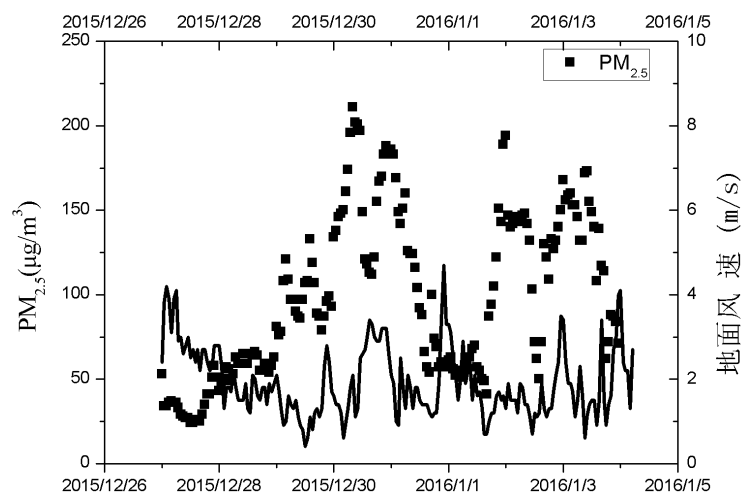
在弱冷空气扩散过程中,地面风速与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度没有表现出相关性,可能原因一方面该形势下污染物来源属于本地源和外来输送源的叠加。另一方面风速脉动和湍流脉动,也使风速与  $\text{PM}_{2.5}$  没有表现出某些相关性。

综上所述,在高压控制期间,低空风切变和地面风速均与能见度有明显正相关性,低空风切变越大,地面风速越大,则能见度会转好,反之能见度降低,而在弱冷空气扩散场中,这种相关性不明显。高空风切变在大多情况下都与能见度无明显相关,所以霾日变化受低空动力因子影响较大,而与高空风切变无直接关联,但与高空形势场仍有一定关系。



**Figure 4.** High-altitude wind shear, low-altitude wind shear, and visibility from December 27, 2015 to January 4, 2016

**图 4.** 2015 年 12 月 27 至 2016 年 1 月 4 日高低空风切变和能见度



**Figure 5.** Ground wind speed and  $\text{PM}_{2.5}$  concentration from December 27, 2015 to January 4, 2016

**图 5.** 2015 年 12 月 27 至 2016 年 1 月 4 日地面风速与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度

## 5.2. 霾过程中的热力因子

选取 2015 年 12 月 29 至 2016 年 1 月 1 日霾过程,利用鄞州站地面观测资料,杭州站和洪家站探空资料进行分析。结果表明,地面最小能见度与温度露点差成明显正相关,相关系数达 0.585,与相对湿度

成明显负相关, 相关系数达 0.574, 与  $PM_{2.5}$  浓度成明显负相关, 相关系数达 0.750。  $PM_{2.5}$  浓度与相对湿度成正相关, 相关系数达 0.328, 以上相关系数计算均通过了 0.01 置信水平检验。可见较高的相对湿度条件有利于二次污染物生成[12], 使  $PM_{2.5}$  浓度增加,  $PM_{2.5}$  颗粒物的消光系数较大, 导致能见度降低。当地面温度露点差越小, 则空气中水汽越接近饱和, 有利于水汽凝结形成雾, 造成能见度下降, 而雾粒子可以作为  $PM_{2.5}$  形成的载体, 促进二次污染物的生成[13], 导致  $PM_{2.5}$  浓度的增加, 导致能见度进一步降低。

在此次霾过程中, K 指数与能见度表现出明显正相关(图 6), K 值越大, 层结越不稳定, 上下对流作用增强, 促进了污染物垂直方向扩散稀释, 有利于提高能见度, 反之 K 值越低则能见度也会下降。

$T_{925-850}$  反映了 925 hPa 与 850 hPa 之间的低层温度垂直递减率。霾日出现明显逆温或者等温层。28 日到 30 日为逆温状态, 该时段  $PM_{2.5}$  浓度不断上升, 能见度也持续下降, 说明低层逆温状态下, 十分有利于局地性霾污染物的积聚。31 日到 1 日  $T_{925-850}$  约等于 0, 近似一个等温层状态, 此间能见度继续维持在较低水平, 2 日  $T_{925-850}$  变大, 能见度也有所好转。

Si 指数均为正值, Si 的变化和高空风切变的变化一致, Si 指数反映的是 850 hPa 到 500 hPa 之间的热力情况, 本次过程 Si 指数与能见度无明显的直接相关性。

综上所述, 较大的地面湿度可以使霾污染加重, 能见度降低。K 指数和低层温度层结  $T_{925-850}$  对能见度有明显的影响, K 值越大或  $T_{925-850}$  越大, 则越利于对流扩散, 有利于提高能见度, 反之 K 值越小或  $T_{925-850}$  越小, 越有利于污染物积累, 能见度降低。而 Si 指数对霾日的指示意义不明显。

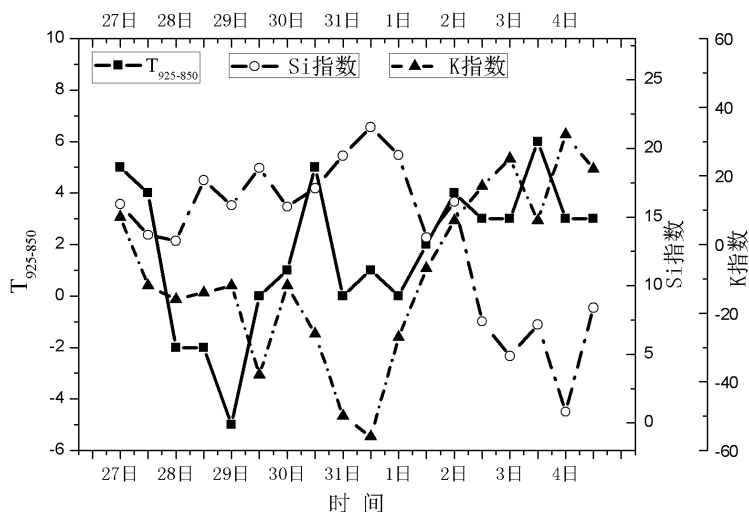


Figure 6. Thermal lamination parameter from December 27, 2015 to January 4, 2016

图 6. 2015 年 12 月 27 至 2016 年 1 月 4 日热力层结参数

## 6. 总结与讨论

### 6.1. 总结

本文统计了 2010~2018 年宁波市霾日数情况, 对持续型霾过程进行了天气分型, 并分析了气象动力因子和热力因子在霾演变过程中的作用。主要结论如下:

1) 自 2013 年底《大气污染防治条例》颁布以来, 宁波市霾污染状况明显减轻, 霾日数, 中度和重度以上霾污染日数都明显减少, 持续型霾过程持续时长一般在 4 天左右, 不再出现持续一周以上的长期



持续霾过程。

2) 持续型霾过程对应地面气压场可分为高压场, 均压场, 冷空气缓慢扩散场三种主要类型, 其中高压场造成的持续型霾过程占总次数的 72%, 均压场占 11%, 冷空气缓慢扩散场占 17%。造成持续型霾过程的高空形势主要有平直西风型和副高控制型。长波稳定时有利于霾积累, 而长波调整过程有利于霾消散。

3) 在高压控制期间, 低空风切变和地面风速均与能见度有明显正相关性, 低空风切变或地面风速越大, 则霾易扩散减弱, 能见度升高, 反之则霾加重, 能见度降低。而在冷空气缓慢扩散期间, 霾的来源复杂, 低空风切变对能见度没有明显相关性。由于霾污染主要在低层, 高空风切变与地面能见度无直接相关。

4) K 指数和低层温度层结  $T_{925-850}$  与能见度有明显正相关, K 值越大或  $T_{925-850}$  越大, 则越利于对流扩散, 有利于提高能见度。而 Si 指数对霾日的指示意义不明显。

## 6.2. 讨论

重度以上的霾大多出现在持续型霾过程中, 这是因为静稳天气对霾污染有明显积累作用。地面高压场是最常见的导致持续型霾过程的形势, 但均压场和弱冷空气扩散场也在持续型霾过程中占据一定比例。

冷空气扩散速度的快慢对霾污染的作用很不同, 较缓慢的冷空气扩散场可造成输入性霾, 并配合锋面稳定层结造成霾污染加重, 而快速南下的冷空气配合冷锋大风可对霾污染起到良好的清除作用。

本文分析了气象动力和热力因子在霾过程中的作用, 并发现在高压场和冷空气扩散场控制下, 气象动力和热力因子的作用表现还是有一定区别, 说明这些因子在预报时有一定参考性, 但还要根据具体情况分析。

## 基金项目

宁波市气象局一般项目(NBQX2018004B), 宁波市气象局一般项目(NBQX2017005B), 宁波市气象局青年项目(NBQX2017003C)。

## 参考文献

- [1] 王跃思, 张军科, 王莉莉, 等. 京津冀区域大气霾污染研究意义现状及展望[J]. 地球科学进展, 2014, 29(3): 388-396.
- [2] 张浩月, 王雪松, 陆克定, 等. 珠江三角洲秋季典型气象条件对  $O_3$  和  $PM_{10}$  污染的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(3): 565-576.
- [3] 周宁方, 李峰, 饶晓琴, 等. 2006 年冬半年我国霾天气特征分析[J]. 气象, 2008, 34(6): 81-88.
- [4] 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), 44(1): 27-36.
- [5] 刘梅, 严文莲, 张备, 等. 2013 年 1 月江苏雾霾天气持续和增强机制分析[J]. 气象, 2014, 40(7): 835-843.
- [6] 牛彘文, 顾骏强, 浦静娇, 等. 浙江城市区域灰霾天气的长期变化[J]. 热带气象学报, 2010, 26(6): 807-812.
- [7] 俞科爱, 徐宏辉, 黄旋旋, 等. 宁波秋冬季空气污染变化特征及污染物后向轨迹分析[J]. 浙江气象, 2015, 36(1): 27-31.
- [8] 戴竹君, 刘端阳, 王宏斌, 等. 江苏秋冬季重度霾的分型研究[J]. 气象学报, 2016, 74(1): 133-148.
- [9] 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 北京地区冬夏季持续性雾 - 霾发生的环境气象条件对比分析[J]. 环境科学, 2014, 35(6): 2031-2043.
- [10] 于庚康, 王博妮, 陈鹏, 等. 2013 年初江苏连续性雾 - 霾天气的特征分析[J]. 气象, 2015, 41(5): 622-629.
- [11] 中国气象局. QX/T 113-2010 霾的观测和预报等级[S]. 北京: 中国气象局, 2010.

- [12] Ge, X.L., Zhang, Q., Sun, Y.L., *et al.* (2012) Effect of Aqueous-Phase Processing on Aerosol Chemistry and Size Distributions in Fresno, California, during Wintertime. *Environmental Chemistry*, **9**, 221-235.
- [13] Sun, Y.L., Wang, Z.F., Fu, P.Q., *et al.* (2013) The Impact of Relative Humidity on Aerosol Composition and Evolution Processes during Wintertime in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, **77**, 927-934.