

文章编号:2096-5389(2022)03-0108-06

2015—2019 年防城港市空气污染气象条件综合分析

林文桦, 赵胜男, 陈绍河, 黄 滢

(广西壮族自治区防城港市气象局, 广西 防城港 538001)

摘 要: 对防城港市影响最大的首要空气污染物为 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 , 空气污染日主要集中在秋冬季。空气污染按 500 hPa 环流形势可分为西北气流型、偏西气流型及西南气流型; 按地面气压场可分为冷高压脊型、均压型、高压后部低压前部型。在无境外输入的情况下, $\text{PM}_{2.5}$ 产生在风速小、气温较低、能见度小、湿度较大并且无降雨或降雨不明显的天气环境里, 而 O_3 产生在高温、低湿、日照充足、风速较大和能见度好的天气环境里。在垂直运动方面, 中低层的下沉气流利于空气污染物累积。在温度层结分布方面, 700 ~ 850 hPa 的低层存在的逆温层对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增加非常重要, 近地面的逆温层对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增加的作用要比低层弱, 而近地面的逆温层对 O_3 浓度的增加非常重要, 但是低层的逆温却不重要。

关键词: 空气污染; 气象分析; 天气分型; 相关系数

中图分类号: X511 **文献标识码:** B

Comprehensive Analysis of Meteorological Conditions for Air Pollution in Fangchenggang City from 2015 to 2019

LIN Wenhua, ZHAO Shengnan, CHEN Shaohe, HUANG Ying

(Fangchenggang Meteorological Bureau of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Fangchenggang 538001, China)

Abstract: $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 are the most important air pollutants in Fangchenggang City, and the air pollution days are mainly occurred in autumn and winter. According to 500 hPa circulation pattern, air pollution can be divided into northwest air flow pattern, westerly air flow pattern and southwest air flow pattern, and according to the surface pressure field, it can be divided into the cold high-pressure ridge type, uniform pressure field type, high pressure rear and low pressure front type. In the absence of overseas input, $\text{PM}_{2.5}$ is produced in the weather environment with low wind speed, low temperature, low visibility, high humidity and no rainfall or no obvious rainfall, while O_3 is produced in the weather environment with high temperature, low humidity, sufficient sunshine, high wind speed and good visibility. In terms of vertical movement, the downdraft in the middle and low levels is conducive to the accumulation of air pollutants. In terms of temperature stratification distribution, the inversion layer at 700 ~ 850 hPa is very important for the increase of $\text{PM}_{2.5}$ concentration. The effect of inversion layer near the ground on the increase of $\text{PM}_{2.5}$ concentration is weaker than that of the low layer. The inversion layer near the ground is very important for the increase of O_3 concentration, but the inversion layer at the low layer is not important.

Key words: air pollution; meteorological analysis; weather typing; correlation coefficient

0 引言

随着经济社会快速发展和城市化进程加快, 空

气质量影响人们的身体健康, 我国大部分城市的空气污染倍受关注^[1]。污染源排放是大气污染的内因, 而气象条件又是影响其稀释、扩散和清除的外

收稿日期: 2021-04-20

第一作者简介: 林文桦 (1987—), 女, 工程师, 主要从事短期天气预报与服务工作, E-mail: 704491392@qq.com。

通讯作者简介: 黄滢 (1981—), 女, 高工, 主要从事暴雨和空气污染研究工作, E-mail: huangying100@sina.com。

资助项目: 广西区气象局青年人才培养项目 (桂气科[2022]QN02); 防城港近地面臭氧浓度与气象条件关系研究。

因^[2]。在污染源排放相对稳定的情况下,空气质量的预报决定于气象条件的预报。

近年来,关于空气污染与天气条件关系的研究较多,主要从几个角度进行分析:一是从空气污染与气象要素之间的关系进行分析^[3-8];二是从污染天气分型角度分析^[1,9-11,15];三是用数值模拟的方式模拟边界层结构和流场特征对污染物浓度变化影响和污染物成因分析^[12,16-18]。污染天气的研究主要集中在京津冀及四川盆地一带,而两广一带的研究较少,主要以个例分析为主^[13-14],缺少对两广污染天气特征的总结分析。本文对地处广西沿海防城港市的污染天气进行概括性的总结分析,以丰富对两广污染天气的研究。

本文归纳总结了防城港市空气污染的天气形势类型特征及首要污染物浓度与各类气象要素之间的关系,旨在为今后预报员预报本地污染天气情

况提供参考依据,为气象部门与环保部门制定大气污染防治对策提供技术支持。

1 数据资料和研究方法

使用 1°×1° 6 h 时间间隔的 FNL 全球客观分析资料、2015—2019 年高空及地面观测资料、防城港国家地面站小时观测数据等气象常规观测资料。环境监测数据来源于防城港市环境监测中心自动站资料,并根据 2015—2019 年防城港市 3 个国控点逐时和逐日的污染物浓度观测资料,筛选出 20 次轻度污染及以上的污染过程进行分析,如表 1。本文将轻度污染及以上的污染日统称为空气污染日。

文中 AQI 等级采用了中国环境监测总站发布的等级划分为 6 级:优(1~50)、良(51~100)、轻度污染(101~150)、中度污染(151~200)、重度污染(201~300)、严重污染(>300)。

表 1 本文研究的 20 次空气污染过程
Tab. 1 20 air pollution processes studied in this paper

污染过程	首要污染物	污染过程	首要污染物
2015-01-01—04	细颗粒物	2017-12-23	细颗粒物
2015-01-17—23	细颗粒物	2017-12-26—27	细颗粒物
2015-02-06—13	细颗粒物	2018-1-20—23	细颗粒物
2016-02-19	细颗粒物	2018-02-12—13	细颗粒物
2017-01-01—03	细颗粒物	2018-03-10	细颗粒物
2017-02-02	细颗粒物	2018-10-02—07	臭氧
2017-05-28	臭氧	2018-11-02—03	臭氧
2017-10-25—11-06	臭氧、细颗粒物	2019-1-24—27	细颗粒物、臭氧
2017-12-07	细颗粒物	2019-09-23—10-01	臭氧
2017-12-10—12	细颗粒物	2019-12-29	细颗粒物

天气形势从根本上决定了气象要素的分布和变化,从而决定了大气的扩散能力和大气的稳定程度^[11],进而决定了空气质量等级。参考喻谦花等^[9]和李霞等^[15]对天气分型的划分,500 hPa 环流形势分型采用的高空观测资料时间为:污染过程中首要污染日前 1 d 20 时,结束为污染过程最后 1 个污染日 20 时,时间间隔为 12 h。地面分型资料采用了污染日当天整点地面天气图 02—23 时的资料,时间间隔为 3 h。探空资料选择污染日当天 08 时和 20 时的资料。天气分型的重点分析区域为 20~30°N, 100~110°E。

用数理统计分析方法分析各类气象要素的特征,如温度范围分布、逆温层出现的百分率和逆温梯度等。利用统计软件 SPSS 对气象要素与首要污染物之间的相关系数进行分析。

2 结果与分析

2.1 空气污染基本情况分析

2015—2019 年防城港市空气质量首要污染物出现比例如图 1,空气质量为优的天数比例为 60.9%(无污染物),首要污染物为 PM_{2.5} 的比例为 18.7%,首要污染物为 O₃ 的比例为 11.3%,首要污染物为 PM₁₀ 的比例为 9%。PM_{2.5} 是出现最多的首要污染物,其次是 O₃ 和 PM₁₀。

分析污染日数的逐月变化(图 2)可知,9 月—次年 2 月是空气污染日发生的主要时段,3—8 月出现的污染日数较少。2015—2019 年共出现轻度污染及以上累计天数为 86 d,年平均污染日数为 17.2 d,其中 2016 年只有 2 d,其它年份 17~26 d。86 个空气污染日中的首要污染物只有 PM_{2.5} 和 O₃ 2 种。

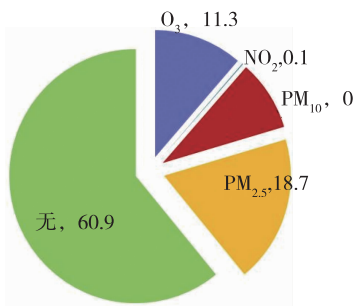


图 1 2015—2019 年防城港市空气
首要污染物百分比(单位:%)

Fig. 1 Percentage of primary air pollutants in
Fangchenggang City from 2015 to 2019 (unit:%)

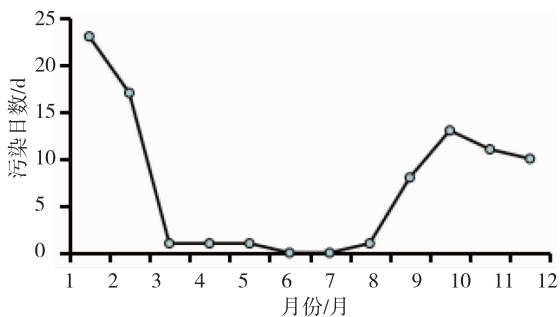


图 2 2015—2019 年空气污染
累计日数的逐月分布

Fig. 2 Monthly distribution of cumulative
days of air pollution from 2015 to 2019

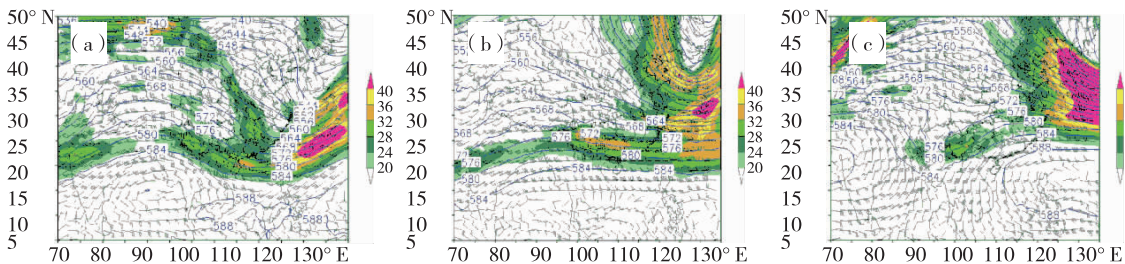


图 3 2015—2019 年防城港市轻度污染及以上污染日 500 hPa 天气分型(填色区为风速值)2015 年 1 月 22 日 08 时
槽后西北气流型(a), 2015 年 2 月 8 日 08 时偏西气流型(b), 2017 年 12 月 27 日 08 时西南气流型(c)

Fig. 3 Synoptic patterns in 500 hPa concerning light and above pollution days from 2015 to 2019(The color filling area is the wind
velocity) at 08:00 on January 22, 2015, northwest air current type in the rear of a high - level trough (a) at 08:00 on
February 8, 2015, west air current type (b) at 08:00 on December 27, 2017, southwest air current type(c)

按地面气压场形势可分为:冷高压脊型、均压型和高压后部低压前部型(图 4), 占比例分别为 66%、29% 和 5%。

冷高压脊型可分为变性冷高压脊(冷空气开始减弱)和冷高压脊(冷空气正南下加强)。该类型出现时,冷空气前锋一般已南压至防城港市南部北部

2.2 防城港市空气污染过程的天气概念模型分析

按 500 hPa 环流形势分型,可分为西北气流型、偏西气流型及西南气流型(图 3)。这 3 种类型占比分别为 37%、24% 和 22%,其他形势占比为 17% (由于不典型,这里不再赘述)。

西北气流主要为槽后西北气流。槽后西北下沉气流一方面不利于降雨,不利于污染物稀释,另一方面下沉气流阻碍污染物向上扩散,从而使得污染物在近地面积累而浓度升高。偏西气流类型中副高偏弱偏南,防城港市附近为偏西气流或西偏北气流,这种形势利于静稳天气形成。西南气流主要为副高边缘及南支槽前共同作用下的西南气流。南支槽线一般位于 100°E 以西,位置偏西,槽前动力抬升不足,不利于降雨,而西南气流却又给防城港市提供一定水汽,高湿无降雨天气利于污染物浓度增加。

首要污染物为 $PM_{2.5}$ 过程中,925 hPa 一般是偏北气流与弱的偏南气流 ($\leq 6m \cdot s^{-1}$) 的轮流转换中,即干冷和暖湿气流不断交互演变环境中。这种变化形势下的干冷气流使得气温不至于升得太高,暖湿气流使得湿度增大,进而使污染物浓度容易增加。首要污染物为 O_3 过程中,925 hPa 一般是稳定的偏北干燥气流控制,利于 O_3 的生成。

湾海面上,并且这种形势出现最多。一般冷高压脊均不强,多数为弱冷空气,中等强度冷空气较少。

均压型形成于冷高压东移出海后气压场减弱或是中西路冷空气南下后气压场减弱的形势。前者水汽较为丰富,多以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的过程,后者相对干燥,多以 O_3 为首要污染物的过程。

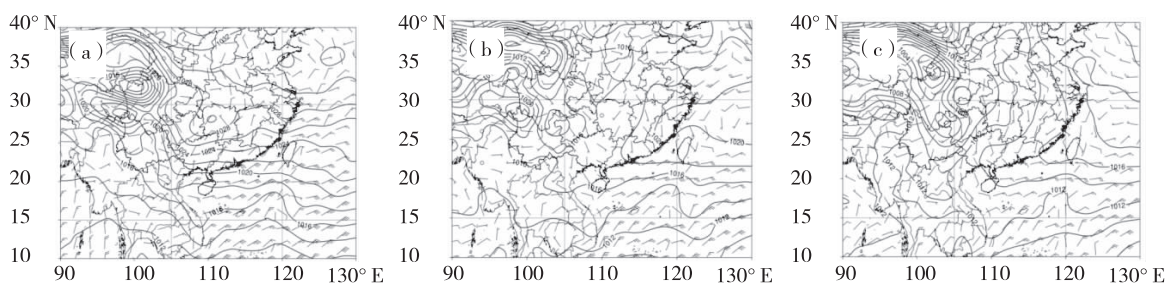


图4 2015—2019 年防城港市轻度污染及以上污染日地面天气分型,2017 年 1 月 17 日 08 时冷高压脊型(a),2015 年 1 月 4 日 02 时均压型(b),2015 年 1 月 4 日 14 时高压后部低压前部型(c)

Fig. 4 Synoptic patterns in surface concerning light and above pollution days from 2015 to 2019 at 08:00 on January 17, 2017, cold anticyclone type (a) at 02:00 on January 4, 2015, uniform pressure field type (b) at 14:00 on January 4, 2015, high pressure rear and low pressure front type (c)

高压后部低压前部型主要受云贵一带发展的低压前部及出海冷高压后部共同作用下的偏南气流影响,利于把海上水汽向防城港市输送,湿度增大,通常造成 $PM_{2.5}$ 浓度增大,多为以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的污染过程形势。这种类型出现较少,因为当暖低压继续发展并南下至云桂交界时,防城港西南

风力加大,污染过程快速结束。

2.3 污染日首要污染物与气象要素的关系

2.3.1 首要污染物 $PM_{2.5}$ 浓度与气象要素的关系

16 次以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的空气污染过程中, $PM_{2.5}$ 浓度与气象要素的相关性分析如表 2。

表 2 首要污染物 $PM_{2.5}$ 浓度与气象要素的 Pearson 相关分析

Tab.2 Pearson correlation analysis of primary pollutant $PM_{2.5}$ concentration and meteorological elements

污染过程	极大风速	气温	相对湿度	最小能见度
2015 -01 -01—04	-0.58 ***	-0.72 ***	0.71 ***	-0.74 ***
2015 -01 -17—23	-0.36 ***	-0.42 ***	0.52 ***	-0.69 ***
2015 -02 -06—13	-0.13	-0.25 ***	0.5 ***	-0.76 ***
2016 -02 -19	-0.20	-0.24	0.50 *	-0.66 ***
2017 -01 -01—03	-0.34 **	-0.38 ***	0.31 **	-0.74 ***
2017 -02 -02	0.11	-0.68 ***	0.92 ***	-0.82 ***
2017 -10 -25—11 -06	-0.49 ***	-0.31 ***	0.60 ***	-0.83 ***
2017 -12 -07(境外输入)	0.29	-0.37	0.45 *	-0.63 ***
2017 -12 -10—12	0.04	0.10	-0.08 降雨影响	-0.24 *
2017 -12 -23(境外输入)	0.87 ***	0.4 *	-0.26	-0.7 ***
2017 -12 -26—27(有境外输入)	0.60 ***	0.29 *	-0.05 降雨影响	-0.64 ***
2018 -01 -20—23	-0.04	-0.20 *	0.15 降雨影响	-0.54 ***
2018 -02 -12—13	0.11	-0.52 ***	0.27	-0.48 ***
2018 -03 -10	-0.63 ***	-0.57 **	0.65 ***	-0.76 ***
2019 -01 -24—26	-0.07	-0.49 ***	0.27 *	-0.61 ***
2019 -12 -29	-0.26	-0.67 ***	0.22	-0.71 ***

注:*** 为通过 0.001 的显著性检验,** 为通过 0.01 的显著性检验,* 为通过 0.05 的显著性检验(下同)

$PM_{2.5}$ 浓度与风速的关系较为复杂。一方面风力加大利于污染物扩散,如表 2 中多数过程的 $PM_{2.5}$ 浓度与风速呈负相关;另一方面冷空气大风的天气易携带污染物从境外输入,例如 2017 年 12 月 26—27 日和 2017 年 12 月 23 日空气污染过程中,冷空气影响时风力虽然加大,但冷空气影响前上游有污染,污染物随气流输入,造成 $PM_{2.5}$ 浓度增大,此时 $PM_{2.5}$ 浓度与风速呈正相关。另外,通过分析有境外

输入的个例发现,轻度污染及以上污染日中的冷空气强度不强,冷高压中心值为 1040 hPa 左右。

在无境外输入的情况下, $PM_{2.5}$ 浓度与气温主要呈负相关,气温越高, $PM_{2.5}$ 浓度越小,反之,越大,这一结论与防城港市空气污染主要出现在秋冬季这一实况一致。日平均气温基本在 10~20℃ 之间,超过 20℃ 的很少。由于防城港市地处低纬度,气温较高,日平均气温低于 10℃ 的空气污染情况缺乏实况

数据支撑,这里暂不讨论。

在无降雨情况下,PM_{2.5}浓度与相对湿度主要呈正相关,但是在有降雨时会导致污染物浓度下降而相对湿度增大,这种情况下 PM_{2.5}浓度与相对湿度就会出现负相关或相关性不强。污染期间日平均相对湿度主要在 50% ~ 80% 之间,占总数的 92%,相对湿度低于 50% 的几乎没有,相对湿度高于 90% 的仅占总数的 7%。

PM_{2.5}浓度与一天中最小能见度有很强的负相关,相关系数在 -0.5 ~ -0.8 之间,说明能见度越好,空气质量越好,PM_{2.5}浓度越小,反之,越大。最小能见度一般小于 7 km,主要出现在夜间到次日 09 时。

污染日一般伴随着轻雾、雾、霾、微量降雨等低能见度天气。以 PM_{2.5}为首要污染物的 16 次污染过程中,有 10 次过程结束时有降雨天气,通过统计分析,日降雨量在 1 mm 以上的雨量对 PM_{2.5}污染物的

稀释比较有利,而 1 mm 以内的降雨量对污染物的稀释是短暂性的。

2.3.2 首要污染物 O₃ 浓度与气象要素的关系
O₃ 浓度与各类气象要素的关系比 PM_{2.5}浓度与气象要素的关系简单。如表 3, O₃ 浓度与风速、气温、能见度呈强的正相关,相关系数范围多分布在 0.5 ~ 0.9 之间。O₃ 与湿度呈强的负相关,相关系数范围多分布在 -0.7 ~ -0.9 之间。以 O₃ 为首的污染过程中,日照充足,日照时数在 7 h 以上。即 O₃ 产生在高温、低湿、日照充足、风速较大和能见度好的天气环境里。O₃ 浓度最大值一般出现在 14—18 时,少数出现在 19—20 时。

另外通过分析表 3 中的 6 个个例,首要污染物为 O₃ 的污染过程中,日最高气温均高于 23 ℃,日平均最小能见度均在 10 km 以上,14 时相对湿度基本为 35% ~ 60%,这些指标也可作为今后 O₃ 浓度预报的一个重要参考。

表 3 首要污染物 O₃ 浓度与气象要素的 Pearson 相关分析

Tab. 3 Pearson correlation analysis of primary pollutant O₃ concentration and meteorological elements

污染过程	极大风速	气温	能见度	相对湿度	日照时数/h
2017 - 05 - 28	0.77 ***	0.92 ***	0.68 ***	-0.83 ***	11.1
2017 - 10 - 25—11 - 06	0.45 ***	0.69 ***	0.51 ***	-0.79 ***	7.1 ~ 10.1
2018 - 10 - 02—07	0.71 ***	0.90 ***	0.50 ***	-0.86 ***	8.1 ~ 10.9
2018 - 11 - 02—03	0.36 *	0.87 ***	0.55 ***	-0.69 ***	7.6 ~ 8.8
2019 - 01 - 27	0.85 ***	0.95 ***	0.86 ***	-0.90 ***	8
2019 - 09 - 23—10 - 01	0.71 ***	0.88 ***	0.65 ***	-0.81 ***	8.6 ~ 11

2.4 垂直速度分布特征

空气污染过程中,中低层以下沉气流为主(如图 5),近地面为 0 ~ -1 × 10⁻³ hPa · s⁻¹ 的微弱上升气流,这种形势利于污染物在近地面累积。下沉气流中心值范围在 4 ~ 31 × 10⁻³ hPa · s⁻¹ 之间,平均下沉气流中心值为 12 × 10⁻³ hPa · s⁻¹。

2.5 逆温层分布特征

由于防城港市本站无探空资料,而北海市距离防城港市较近,纬度基本一致且同等位于广西海岸线,故本文用北海探空图资料来近似代替防城港市气象要素高空变化情况。

通过分析以 PM_{2.5}为首要污染物的污染过程中的探空图发现,700 ~ 850 hPa 之间几乎都有明显逆温层存在,逆温梯度为 520 ℃/100 hPa,而近地面存在等温层或逆温层概率为 61% (逆温梯度为 0 ~ 3 ℃/100m),近地面无逆温或无等温层占比为 39% (图 6a)。

以 O₃ 为首要污染物过程中的逆温层特征为:近地面存在逆温概率大,达 92% (逆温梯度 0 ~

2 ℃/100m),700 ~ 850 hPa 的逆温不明显(图 6b)。

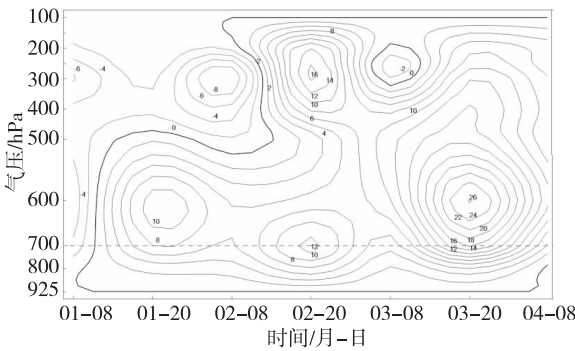


图 5 2015 年 1 月 1—4 日以 PM_{2.5}为首要污染物的污染过程垂直速度时间剖面图(实线表示下沉速度,虚线表示上升速度)(单位:10⁻³hPa · s⁻¹)

Fig. 5 Vertical velocity time profile of pollution process with PM_{2.5} as the primary pollutant from January 1 to 4, 2015 (solid line indicates sinking velocity and dotted line indicates rising velocity) (unit: 10⁻³hPa · s⁻¹)

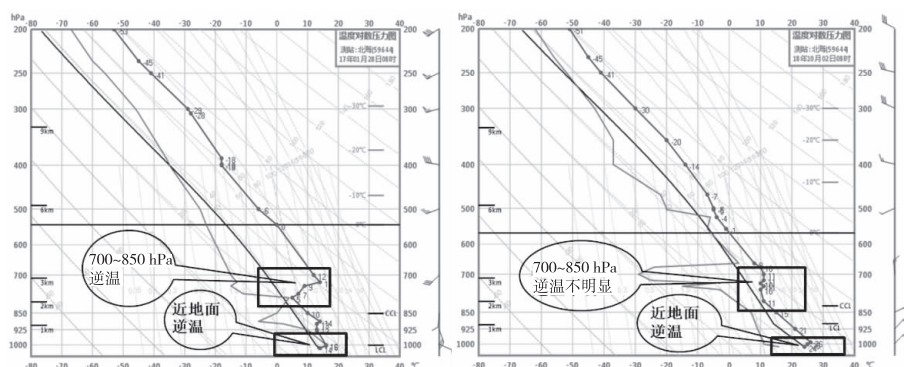


图6 北海探空图的逆温层分布特征:2017年1月28日08时以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的污染过程(a);2018年10月2日08时以 O_3 为首要污染物的污染过程(b)

Fig. 6 Distribution characteristics of inversion layer in Sounding map of Beihai: Characteristics of inversion layer in pollution process with $PM_{2.5}$ as the primary pollutant at 08:00 on January 28, 2017 (a) Characteristics of inversion layer in pollution process with O_3 as the primary pollutant at 08:00 on October 2, 2018 (b)

3 结论

本文通过对防城港市2015—2019年的空气质量及筛选出的20个污染过程进行分析,得出以下结论:

①防城港市空气污染日主要集中在秋冬季, $PM_{2.5}$ 和 O_3 是影响最大的首要空气污染物。

②空气污染过程按500 hPa环流形势可分为西北气流型、偏西气流型及西南气流型。按地面气压场形势可分为冷高压脊型、均压型、高压后部低压前部型,冷高压脊型出现最多。

③无境外输入的情况下, $PM_{2.5}$ 产生在风速小、气温较低、能见度小、湿度较大并且无降雨或降雨不明显的天气环境里。而 O_3 产生在高温、低湿、日照充足、风速较大和能见度好的天气环境里。

④空气污染过程中,中低层以下沉气流为主,近地面层有微弱上升气流。

⑤以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物过程中,700~850 hPa之间几乎都有明显逆温层,近地面不一定有逆温。以 O_3 为首要污染物过程中,近地面存在逆温概率达92%,而低层逆温不明显。说明低层的逆温层对 $PM_{2.5}$ 浓度增加非常重要,近地面的逆温层对 $PM_{2.5}$ 浓度增加的作用要比低层弱,而近地面的逆温层对 O_3 浓度的增加非常重要,但是低层的逆温却不重要。

参考文献

- [1] 张莹,王式功,倪长健,等.成都冬季 $PM_{2.5}$ 污染天气形势的客观分型研究[J].环境科学与技术,2020,43(5):139-144.
- [2] 李霞,贾健.复杂地形多尺度气流对城市大气污染影响的研究进展[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(6):1-10.
- [3] 周晗,宋晓萌,李福林,等.瑞丽市空气污染状况与气象条件的关联性研究[J].科学技术创新,2020,34:1-4.
- [4] 王钟,王静,何光义,等.浏阳市城区环境空气污染特征及其与气象因素相关性分析[J].环境科学导刊,2020,39(1):28-32.
- [5] 龙柯吉,陈朝平,冯汉中,等.2012年成都市 PM_{10} 污染与地面气象条件的相关性分析[J].成都信息工程学院学报,2014,29(增刊):149-153.
- [6] 康邵钧.商丘市气象要素对空气质量的影响[J].河南科学,2018,36(3):404-407.
- [7] 郭勇涛,余峰,王式功,等.兰州市空气质量状况及与常规气象条件的关系[J].干旱区资源与环境,2011,25(11):100-105.
- [8] 尚子澂,程一帆,康延臻,等.全国10个代表性城市空气污染指数与气象条件的关系[J].兰州大学学报(自然科学版),2018,54(1):98-103.
- [9] 喻谦花,闵晓桐.2014—2016年开封市空气污染特征及重污染过程气象成因分析[J].气象与环境科学,2020,43(1):114-122.
- [10] 张珺,薛敏,宋晓辉.河北省中南部典型重污染天气特征分析[J].生物灾害科学,2020,43(4):397-404.
- [11] 段宇辉,景华.河北省夏季空气污染过程气象条件[J].气象科技,2010,38(6):715-720.
- [12] 唐子珺,陈龙,覃军,等.武汉市一次污染过程的局地流场和边界层结构的数值模拟[J].长江流域资源与环境,2018,27(11):2540-2547.
- [13] 黄春华,许文龙.防城港市一次空气污染状况及气象条件分析[J].中低纬山地气象,2019,43(3):51-55.
- [14] 唐凯.广东两次空气污染过程对比分析[J].环境研究与监测,2020,33:29-37.
- [15] 李霞,杨静,麻军,等.乌鲁木齐重污染日的天气分型和边界层结构特征研究[J].高原气象,2012,31(5):1414-1423.
- [16] 黄树元,唐晓,陈科艺,等.武汉冬季典型月份 $PM_{2.5}$ 浓度变化的观测分析与模拟追因[J].环境科学学报,2021,41(3):842-852.
- [17] 李佳霖,张美根.北京冬季不同污染情况下 $PM_{2.5}$ 传输特征模拟研究[J].高原气象,2021,网络首发:1-8.
- [18] 卢苗苗,唐晓,王自发,等.武汉地区细颗粒物重污染成因的数值模拟研究[D].北京:中国科学院大学.