

2016年11月四川省一次大气污染过程分析

李 蒙, 曾胜兰*

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

Email: lime_ade@163.com, *denlan1228@163.com

收稿日期: 2020年11月20日; 录用日期: 2020年12月16日; 发布日期: 2020年12月23日

摘 要

2016年11月28日至2016年12月13日, 四川盆地发生了一次持续时间长, 涉及范围广, 污染程度重的大气污染过程。本文利用中华人民共和国环境保护部大气质量资料和同期各气象站的观测资料, 对四川盆地三个区域本次污染过程的空气质量、污染物变化特征、气象条件进行了分析。结果表明: 1) 本次污染过程, 成都平原的污染最严重, 其次是川南地区, 然后是川东北地区, 具体而言, 成都平原PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、O₃污染最为严重, 川东北地区CO污染最严重, 川南地区SO₂污染最严重; 主要污染物为PM_{2.5}, 其次是PM₁₀污染最严重, 然后是NO₂。2) 亚欧中高纬环流形势经历了从纬向型到一槽一脊型到两槽一脊型到纬向型到两槽一脊型演变, 四川盆地大多处于槽的后部, 受下沉气流控制, 大气比较稳定, 不利于污染物的扩散。3) 污染期间, 各城市的地面风速都较小, 各城市的日平均风速都小于3 m/s, 累计降水量较少, 从11月28日至12月11日, 大部分城市的累计降水量都小于3 mm, 对污染物的清除作用较小; 底层大气存在逆温, 混合层高度较小, 整体上小于900 m, 大气层结比较稳定, 污染物难以扩散。4) 在12月11日至13日, 盆地内城市出现不同程度降水, 污染物浓度下降, 污染过程逐渐结束。

关键词

AQI, 大气污染, 首要污染物, 相关分析

Analysis of an Air Pollution Process in Sichuan Province in November 2016

Meng Li, Shenglan Zeng*

College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Email: lime_ade@163.com, *denlan1228@163.com

Received: Nov. 20th, 2020; accepted: Dec. 16th, 2020; published: Dec. 23rd, 2020

*通讯作者。

文章引用: 李蒙, 曾胜兰. 2016年11月四川省一次大气污染过程分析[J]. 环境保护前沿, 2020, 10(6): 869-886.
DOI: 10.12677/aep.2020.106105

Abstract

From November 28, 2016 to December 13, 2016, a heavy air pollution process with a long duration and wide range occurs in the Sichuan Basin. In this paper, the air quality data of the Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China and the observation data of the meteorological stations during the same period are used to analyze the air quality, pollutant change characteristics, and meteorological conditions of this pollution process in three regions of the Sichuan Basin. 1) In this pollution process, the Chengdu Plain has the most serious pollution, followed by the South Sichuan area, then the Northeast Sichuan area. Specifically, the Chengdu Plain has the most severe PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, O₃ pollution, and the Northeast Sichuan area has the most severe CO pollution, with the most serious SO₂ pollution in southern Sichuan; the main pollutant is PM_{2.5}, followed by PM₁₀, then NO₂. 2) The circulation situation in middle and high latitudes in Asia and Europe undergoes evolution from zonal circulation pattern to one trough and one ridge to two troughs and one ridge to zonal circulation pattern to two troughs and one ridge. The Sichuan Basin is often at the rear of the trough, controlled by the sinking airflow, and the atmosphere is relatively stable, which is not conducive to the diffusion of pollutants. 3) During the pollution period, the surface wind speeds of all cities are small, and the average daily wind speed of each city is less than 3 m/s. From November 28 to December 11, the cumulative precipitation in most cities is less than 3 mm, which has little effect on the removal of pollutants. There is inversion in the lower atmosphere, the height of the mixed layer is small, less than 900 m as a whole, the atmosphere is relatively stable, and it is difficult for pollutants to diffuse. 4) From December 11th to 13th, cities in the basin experience varying degrees of precipitation, the concentration of pollutants decreases, and the pollution process gradually ends.

Keywords

AQI, Air Pollution, Primary Pollutant, Correlation Analysis

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

近些年来随着中国经济的迅速发展, 工厂排放和汽车排放的污染物也迅速增加, 中国大气环境面临的形势尤其严峻, 大气污染物排放总量居高不下。如何防治大气污染, 减轻其危害的影响, 是中国环保工作重要的课题。

1.2. 研究现状

气象条件分析研究对整治大气污染十分关键。Boettger, *et al.* [1]在研究空气污染预报时指出了, 大气层结稳定性和风速与空气污染的关系。Guest, *et al.* [2]指出边界层内的气溶胶浓度与边界层内的通风条件和垂直混合率有密切联系。徐晓峰等[3]认为持续重污染过程是由本地的污染源和大尺度的天气背景与局地气象条件共同造成的。张蓬勃等[4]发现 AQI 与逆温层高度存在显著负相关关系。王珊等[5]发现, 城市污染加重热岛效应、热岛效应反过来通过热岛环流改变城市污染物传播扩散规律并加重污染, 二者相互

作用、互为增强条件。王媛林等[6]对2014年10月珠三角地区污染期间的天气形势及气象特征进行了分析发现高温等气象条件会影响光化学反应,加重珠江三角洲的空气污染,表现了该地区大气复合污染的特性。曾胜兰等[7]基于2013年1月至2014年12月高空及地面天气形势对成都市天气类型进行划分,发现高空500 hpa在两槽一脊型和槽脊同位相型控制下空气质量最差,地面为高压型、高压底部型、高压后部型控制下的空气质量最差。李培荣等[8]发现成都地区出现较强东北风时,可能会有沙尘污染物的输入。吴明[9]分析成都2017年1月一次污染过程发现,污染是由本地排放的一次污染物和盆地区域传输的二次污染物共同造成。

1.3. 研究意义

目前已有不少研究揭示了中国关键大气污染地区致霾原因和发展趋势,但主要集中在京津冀、珠江三角洲、长江三角洲地区。四川盆地地势起伏较大,常年静风频率高、风速小,随着西部大开发的推进,盆地内空气质量日益恶化。在污染源基本稳定的前提下,空气质量的优劣主要由气象条件决定。2016年11月28日到12月13日,四川盆地出现了一次严重的污染过程。本次过程具有以下三个特点:1)持续时间长,共持续了16天之久;2)涉及范围广,盆地内17个城市全部出现了不同程度的污染状况;3)污染程度重,盆地内城市以轻度到中度污染为主,故对此次污染过程进行研究。希望通过此次研究增加对四川盆地空气污染特征及气象成因的认识,为污染天气的预报、治理提供更多的科学依据。

2. 资料与方法

2.1. 数据来源

研究中使用的资料为2016年11月28日~12月13日中华人民共和国环境保护部大气质量资料、中国气象局提供的各气象站观测资料。大气质量资料包括PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃、CO的逐日质量浓度资料,地面观测资料包括每日02、05、08、11、14、17、20、23时的10 m风速(m/s)、气温(°C)、24小时变温(°C)、露点(°C)、气压(hpa)、24小时变压(hpa)、总云量,低云量,大气能见度(m)等。高空观测资料为温江站每日08时和20时的探空资料。

2.2. 研究方法

2.2.1. 区域划分

综合考虑人为影响、地理影响等因素,将四川盆地内的17个城市分成3个地区,成都平原地区,包括成都市、德阳市、绵阳市、乐山市、眉山市、资阳市、遂宁市、雅安市;川东北地区,包括广元市、南充市、广安市、达州市、巴中市;川南地区,包括自贡市、泸州市、内江市、宜宾市。其中成都平原选择绵阳市,遂宁市,成都市,雅安市,乐山市来研究,川东北地区选择达州市,南充市,广元市,巴中市,川南地区选择内江市,宜宾市,泸州市来研究。

2.2.2. 各大气污染物的空间分布和时间变化

根据中华人民共和国环境保护部提供的PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃、CO的逐日质量浓度资料,计算出各个城市大气污染物的IAQI,作出IAQI的时间变化图分析此次过程的污染物的分布和随时间的变化特征,IAQI的计算如下:

$$IAQI_p = \frac{IAQI_{HI} - IAQI_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}} \times (C_p - BP_{LO}) + IAQI_{LO}$$

式中:IAQI_p为污染物P的空气质量分指数;C_p为污染物P的质量浓度值;BP_{HI}为与C_p相近的污染物浓

度限值的高位值; BP_{LO} 为与 C_p 相近的污染物浓度限值的低位值; $IAQI_{HI}$ 为与 BP_{HI} 对应的空气质量分指数; $IAQI_{LO}$ 为与 BP_{LO} 对应的空气质量分指数。

Table 1. Air quality sub-index and corresponding pollutant item concentration limit
表 1. 空气质量分指数及对应的污染物项目浓度限值

空气质量分指数 IAQI	污染度浓度限值					
	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO	O ₃
	24 h	24 h	24 h	24 h	24 h	8 h
0	0	0	0	0	0	0
50	50	40	50	35	2	100
100	150	80	150	75	4	160
150	475	180	250	115	14	215
200	800	280	350	150	24	365
300	1600	565	420	250	36	800
400	2100	750	500	350	48	1000
500	2620	940	600	500	60	1200

注: 表 1 中浓度限值除 CO 单位为 mg/m^3 , 其余均为 $\mu g/m^3$ 。

结合表 1 以及公式(1), 可以把各个污染物 P 的空气质量分指数 $IAQI_p$ 计算出来, 同时取计算出的所有污染物的空气质量分指数中的最大值作为当日的空气质量指数 AQI。如果当日 $AQI \geq 101$, 则将对应空气质量分指数取最大值时的污染物作为当日的的首要污染物, 否则当日的的首要污染物记为“无”。

2.2.3. 相关分析

利用中国气象局提供的每日 02、05、08、11、14、17、20、23 时的地面气象要素资料, 使用 NCL 的函数 `escorc` 计算出日平均 10 m 风速、日平均混合层高度、日平均相对湿度、日平均大气能见度、日平均温度、日平均气压、日平均 24 h 变压、日平均 24 h 变温这些气象要素与日平均 AQI 的相关系数, 借助 NCL 的函数 `student_t` 进行相关性检验; 利用温江站每日两次(08 时和 20 时)的高空探空资料, 计算出逆温层的厚度, 然后使用 NCL 的 `escorc` 函数计算出及其与对应时次 AQI 的相关系数, 用 `student_t` 进行相关性检验。混合层高度采用罗氏计算公式计算:

$$L = \frac{121}{6}(6-P)(T-T_d) + \frac{0.169(U_z + 0.257)}{12f * \ln(z/z_0)}$$

式中: L (m)高度; P 为 Pasquill 大气稳定度级别; T ($^{\circ}C$)为温度; T_d 为露点温度; U_z ($m \cdot s^{-1}$)为 Z (m)高度处观测的平均风速; Z_0 (m)为地面粗糙度; f 为地转参数。

逆温层厚度使用气压 - 高度公式来计算, 公式为:

$$z_2 - z_1 = \int_{p_2}^{p_1} \frac{T_V}{g} d \ln p$$

式中: z_1, z_2 (m)表示逆温层底部和顶部的高度, R_d 为干空气的比气体常数等于 $287.05 J/(kg \cdot K)$, $T_v(K)$ 为虚温, g 为重力加速度取 $9.8 m/s^2$, p_1, p_2 (hpa)表示逆温层底部和顶部的气压。

2.2.4. 降水量分析

利用中国气象局提供的地面气象要素中每日 08 时的 24 小时雨量资料, 计算各个城市从 2016 年 11

月 28 日到 12 月 13 日的累计降水量, 作出柱状图, 分析污染过程中各个城市的降水特征。

2.2.5. 高空环流形势分析

使用 MICAPS (气象信息综合分析处理系统)分析此次污染过程的高空 500 hpa 环流形势。

3. 研究结果

3.1. 污染天气过程特征

3.1.1. 空气质量分析

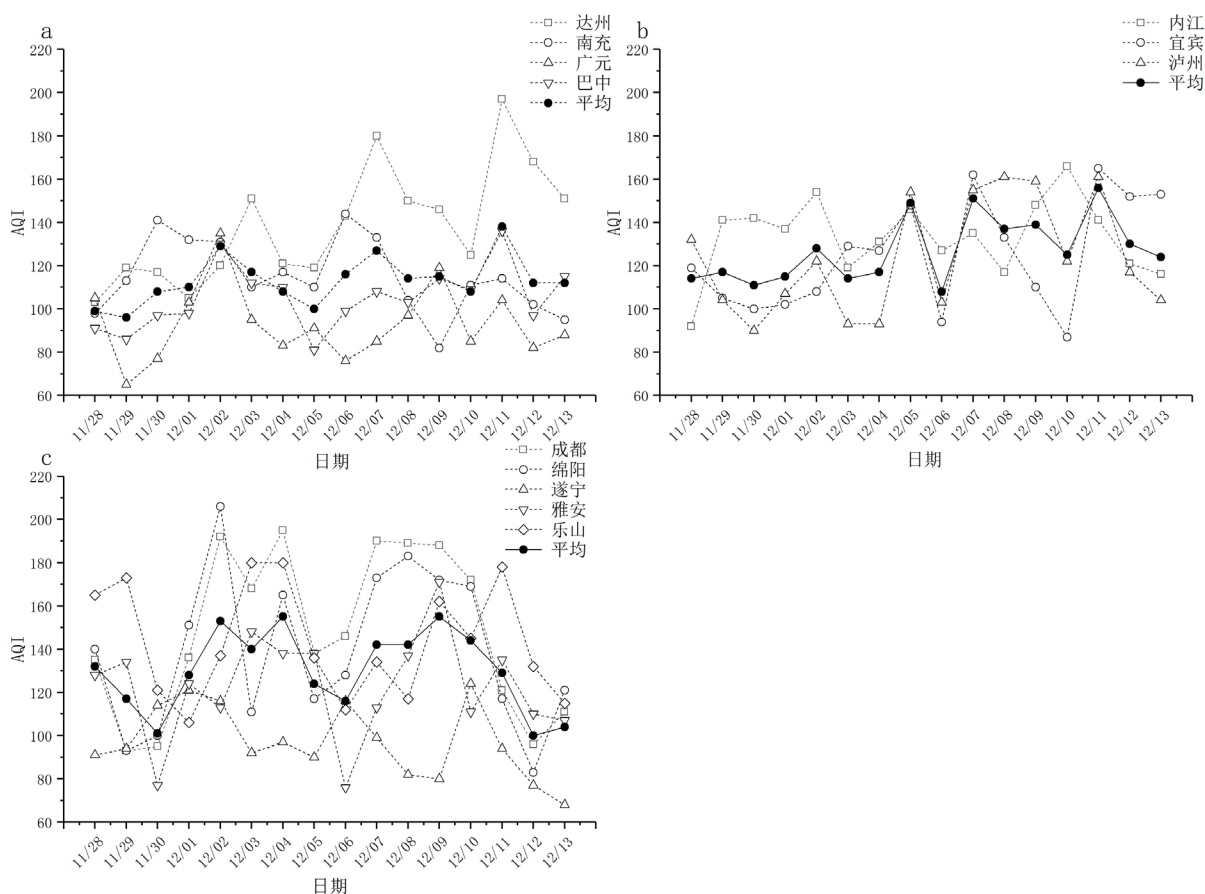


Figure 1. The daily changes of AQI (Figure a is the northeastern Sichuan region, Figure b is the southern Sichuan region, and Figure c is the Chengdu plain region)

图 1. AQI 逐日变化(图 a 为川东北地区, 图 b 为川南地区, 图 c 为成都平原地区)

由图 1 中的图 a 可以见, 川东北的几个城市平均 AQI 逐日变化幅度较小, 在 95 和 140 之间波动, 在 12 月 2 日、7 日、11 日去的极大值, 分别为 129, 127, 138。从图 b 可以看出, 川南的几个城市平均 AQI 在 11 月 28 日到 12 月 4 日之间起伏不大, 在 5 日至 7 日起伏较大, 并在 5 日和 7 日分别取得极大值 149 和 151, 随后减小, 到 11 日增大为 156, 随后 AQI 下降, 空气质量逐渐转好。成都平原所选的几个城市平均 AQI 污染期间起伏比较大, 污染开始至 11 月 30 日, AQI 一直减小至 101, 随后有所增长, 在 12 月 2 日, 4 日取得极大值 153 和 155, 从 4 日开始到 9 日 AQI 先是有所减小, 随后增大, 在 6 日取得极小值 116, 9 日取得极大值 155, 9 日后 AQI 边逐渐降低, 空气质量渐渐转好。总的来说本此污染过程成都平原的污染最严重, 其次是川南地区, 然后是川东北地区。

3.1.2. PM_{2.5} 特征分析

从图 2 的图 a 可见, 成都平原所选的城市平均 PM_{2.5} 的 IAQI 先从 11 月 28 日的 130 降到了 30 日的 100, 随后有所上升, 在 12 月 2 日和 4 日取得极大值分别为 153 和 155, 随后上下波动, 在 6 日和 8 日分别取得极小值 114 和 139, 在 9 日取得极大值 154 后便不断下降。由图 b 可见, 川东北 IAQI 逐日变化幅度不大, 在污染刚开始 IAQI 稍微降低, 随后便逐渐上升, 到 12 月 2 日, 达到 127, 随后一直降低至 5 日的 91, 随后不断上下波动, 在 7 日、9 日和 11 日分别取得极大值 125、114 和 138, 11 日之后又逐渐降低。由图 c 可以看出, 川南地区所选的几个城市污染前期 PM_{2.5} 的 IAQI 波动较小, 12 月 04 日后波动较大, 在 5 日、7 日和 11 日取得极大值分别为 148、149 和 155, 在 6 日、10 日取得极小值 107 和 124。总体而言, 此次污染过程中, 成都平原的 PM_{2.5} 污染最严重。

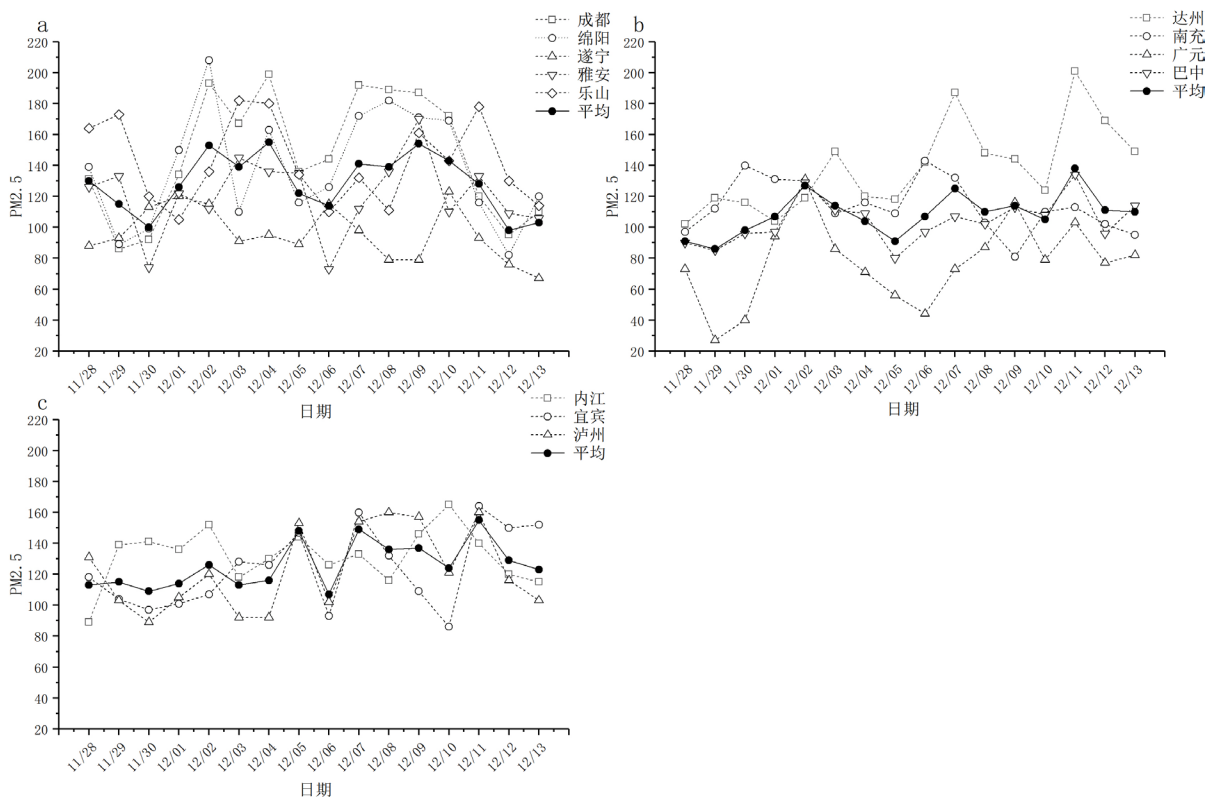


Figure 2. The daily change of IAQI of PM_{2.5} (Figure a is the Chengdu plain area, Figure b is the northeastern Sichuan region, and Figure c is the southern Sichuan region)

图 2. PM_{2.5} 的 IAQI 逐日变化(图 a 为成都平原地区, 图 b 为川东北地区, 图 c 为川南地区)

3.1.3. PM₁₀ 分析

图 3 的图 a 所示, 成都平原地区的城市平均 PM₁₀ 的 IAQI 在污染开始, 先是从 11 月 28 日的 112 开始下降到 30 日的 88, 随后在 12 月 4 日回升到 116, 在 6 日降到 91 后缓慢上升, 在 9 日为 114, 9 日开始 IAQI 便不断下降, 空气质量渐渐变好。由图 b 可以看到川东北地区城市平均 IAQI 变化幅度比较小, 在 80 到 105 之间波动, 于 11 月 29 日, 12 月 5 日、8 日、10 日和 12 日取得极小值分别为 82、82、90、83 和 84, 在 12 月 2 日、7 日、9 日和 11 日取得极大值分别为 102、99、91 和 96。由图 c 所示, 四川南部地区城市平均 PM₁₀ 的 IAQI 从 11 月 28 日至 12 月 5 日围绕 90 上下波动, 之后波动幅度增大, 在 6 日达最小值 80, 10 日取极小值 89, 在 7 日和 11 日取得极大值 103 和 108。总体而言, 此次污染过程成都平原 PM₁₀ 污染最严重。

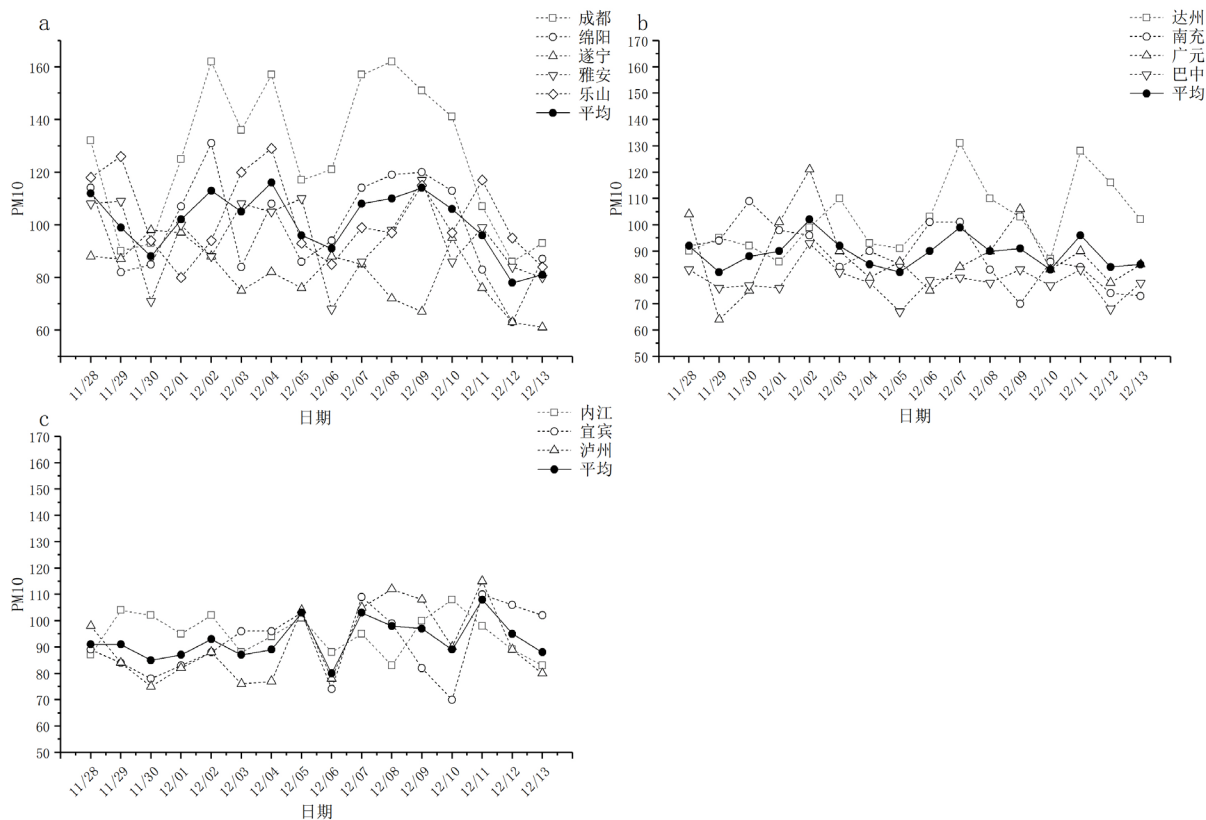
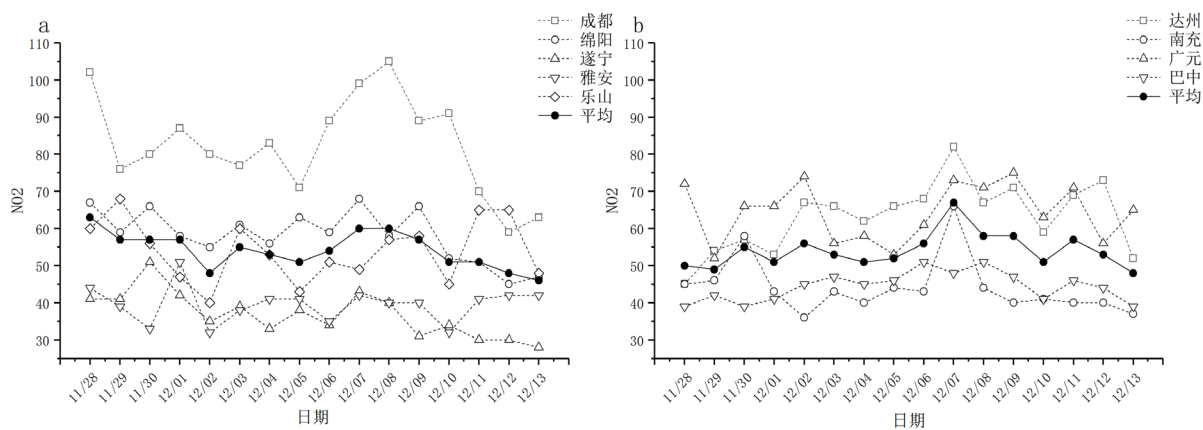


Figure 3. The daily change of IAQI of PM₁₀ (Figure a is the Chengdu plain area, Figure b is the northeastern Sichuan region, and Figure c is the southern Sichuan region)

图 3. PM₁₀ 的 IAQI 逐日变化(图 a 为成都平原地区, 图 b 为川东北地区, 图 c 为川南地区)

3.1.4. NO₂ 分析

从图 4 中的图 a 可见, 成都平原几个城市平均 NO₂ 的 IAQI 变化幅度较小, 在污染刚开始为 57, 经过几天波动之后到 12 月 8 日为 60, 随后缓慢降低, 到 13 日为 46。由图 b 可见, 川东北地区平均 NO₂ 的 IAQI 从污染刚开始波动增加, 到 12 月 7 日为 67, 随后有所减小, 到 13 日为 48。由图 c 可见, 川南地区几个城市的平均 NO₂ 的 IAQI 值先是不断减小, 从 11 月 28 日的 56 减小到 12 月 6 日的 42, 在 7 日上升到极大值 56 随后不断波动, 在 10 日和 12 日为两个极大值, 46 和 45。总的来说, 成都平原 NO₂ 污染最严重。



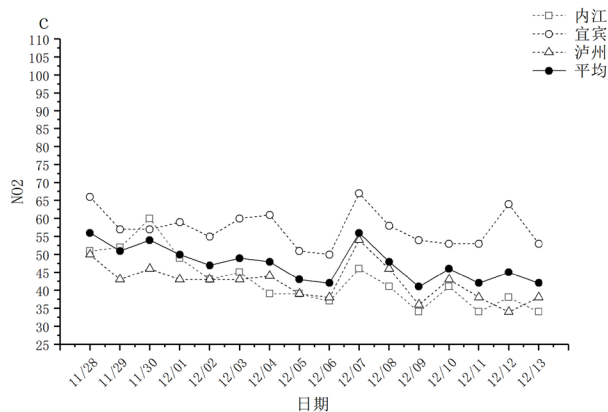


Figure 4. The daily change of IAQI of NO₂ (Figure a is the Chengdu plain area, Figure b is the northeastern Sichuan region, and Figure c is the southern Sichuan region)

图 4. NO₂ 的 IAQI 逐日变化(图 a 为成都平原地区, 图 b 为川东北地区, 图 c 为川南地区)

3.1.5. CO 分析

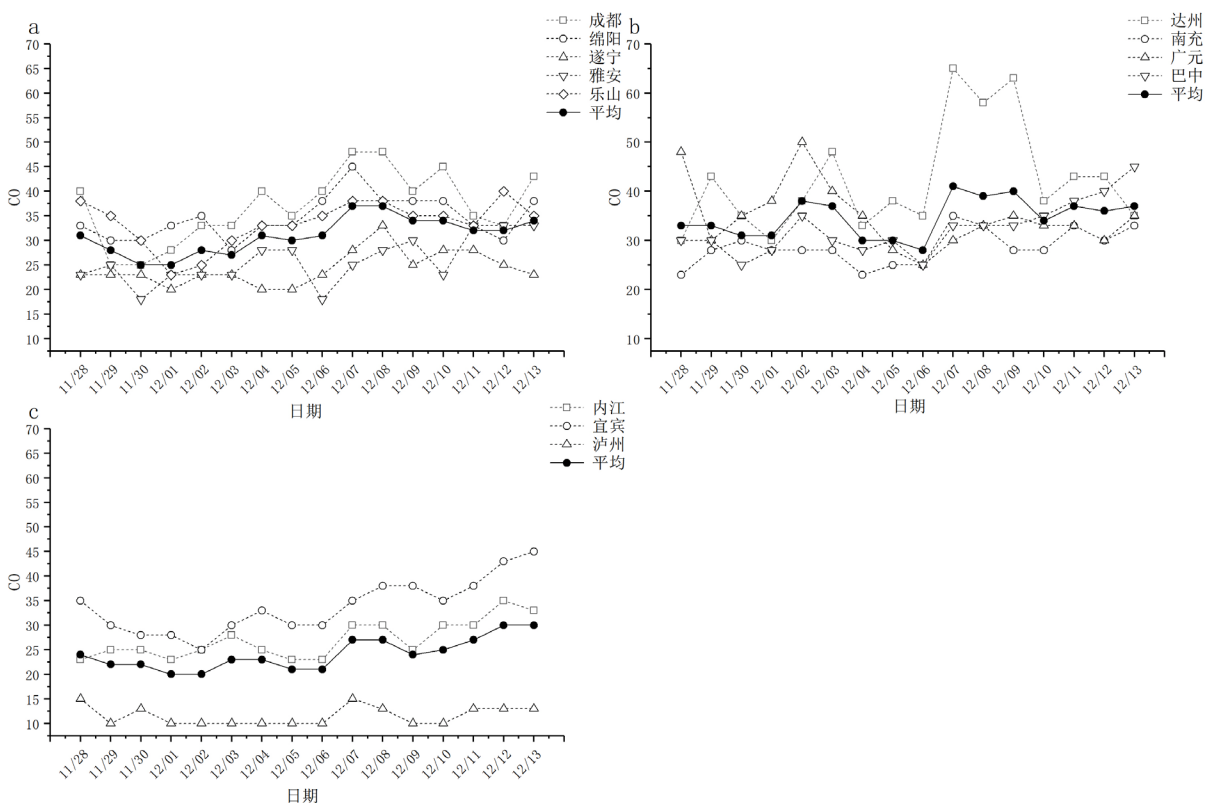


Figure 5. The daily change of CO's IAQI (Figure a is the Chengdu plain area, Figure b is the northeastern Sichuan region, and Figure c is the southern Sichuan region)

图 5. CO 的 IAQI 逐日变化(图 a 为成都平原地区, 图 b 为川东北地区, 图 c 为川南地区)

从图 5 中图 a 可见, 成都平原所选的几个城市平均 CO 的 IAQI, 变化幅度不大, 在 25 和 40 之间波动。由图 b 可见, 川东北地区所选的个个城市在污染刚开始 CO 的 IAQI 值比较稳定, 在 31 左右, 随后有所上升, 在 12 月 2 日取得极大值 38 后一直减小, 到 6 日为 28, 7 日增加到 41 后, IAQI 值围绕 38

上下波动。由图 c 可见, 川南地区平均 IAQI 变化幅度较小, 从污染开始到 12 月 6 日一直在 22 上下波动, 随后波动式上升到 13 日的 30。总的来说, 这次污染过程中川东北 CO 污染最严重。

3.1.6. O₃ 分析

由图 6 中的图 a 可以看到, 成都平原所选的几个城市的 O₃ 的 IAQI 平均值, 从 11 月 28 日的 13 增加到 29 日的 17, 从 11 月 29 日到 12 月 4 日变化比较小, 都在 17 左右, 随后不断波动, 在 12 月 8 日和 11 日取得极小值 14 和 13, 在 9 日和 12 日取得极大值 23 和 15。由图 b 可以看到川东北地区 O₃ 的 IAQI 由 11 月 28 日的 9 缓慢上升到 30 日的 13, 然后缓慢下降, 在 12 月 2 日取得极小值 8 后, 一直缓慢增加早 6 日达到最大值 17, 随后一直缓慢下降, 到 12 日下降到 9。由图 c 可以看到, 川南地区 O₃ 的 IAQI 从污染刚开始一直上下波动, 在 11 月 29 日、12 月 6 日、10 日取得极大值, 分别为 15、20 和 20, 在 12 月 3 日、8 日和 12 日取得极小值分别为 5、10 和 6。总的来说成都平原的 O₃ 污染最严重。

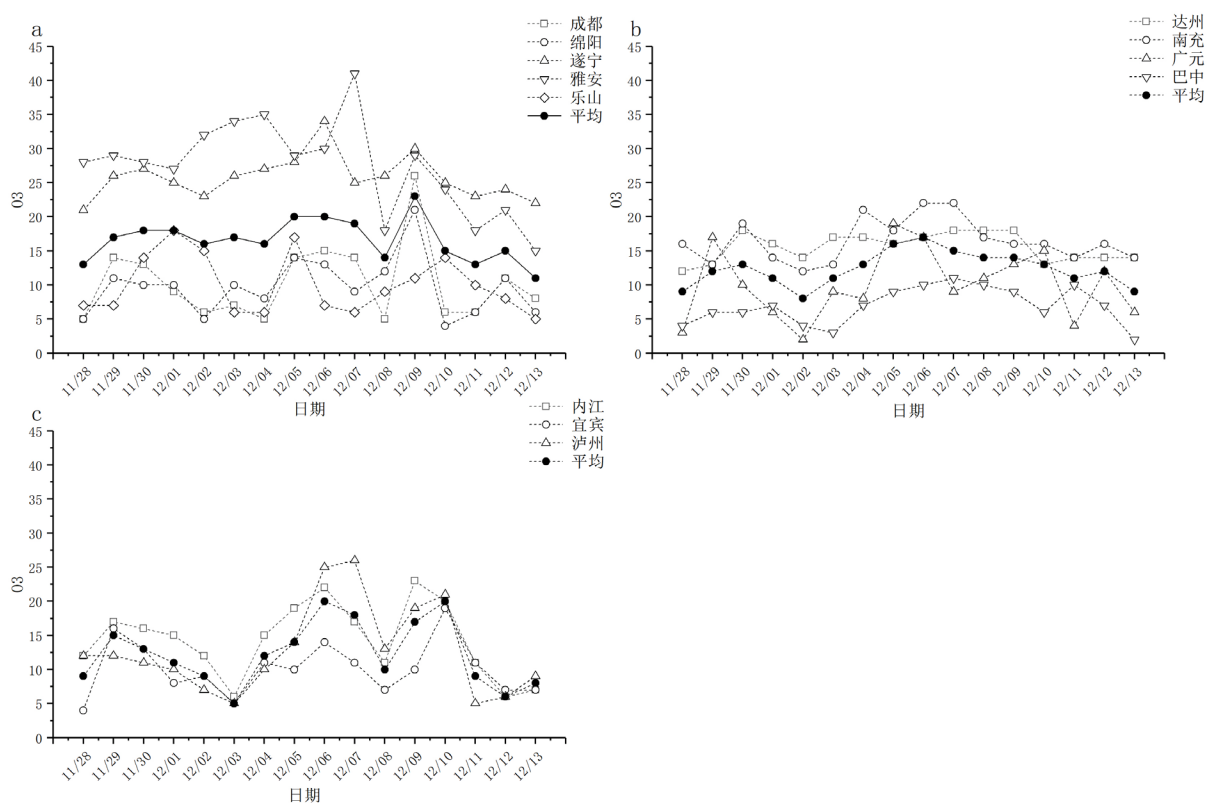


Figure 6. The daily change of the IAQI of O₃ (Figure a is the Chengdu plain area, Figure b is the northeastern Sichuan region, and Figure c is the southern Sichuan region)

图 6. O₃ 的 IAQI 逐日变化(图 a 为成都平原地区, 图 b 为川东北地区, 图 c 为川南地区)

3.1.7. SO₂ 分析

从图 7 中的图 a 可以看出, 成都平原地区的几个城市平均 SO₂ 的 IAQI 在 12 和 20 之间波动, 变化幅度较小。图 b 可见川东北地区 SO₂ 的 IAQI 在污染刚开始, 有所上升, 到 11 月 30 日为 19, 随后变化幅度很小, 到 12 月 6 日都维持在 15 左右, 在 7 日小有上升之后便开始降低, 到 11 日将为 9, 最后在 11 日和 12 日稍微上升。由图 c 可以看到川南地区, SO₂ 的 IAQI 从 11 月 28 日的 30 波动下降, 降到 12 月 9 日的 16, 随后有所上升, 到 13 日为 26。总的来说川南地区 SO₂ 污染最严重。

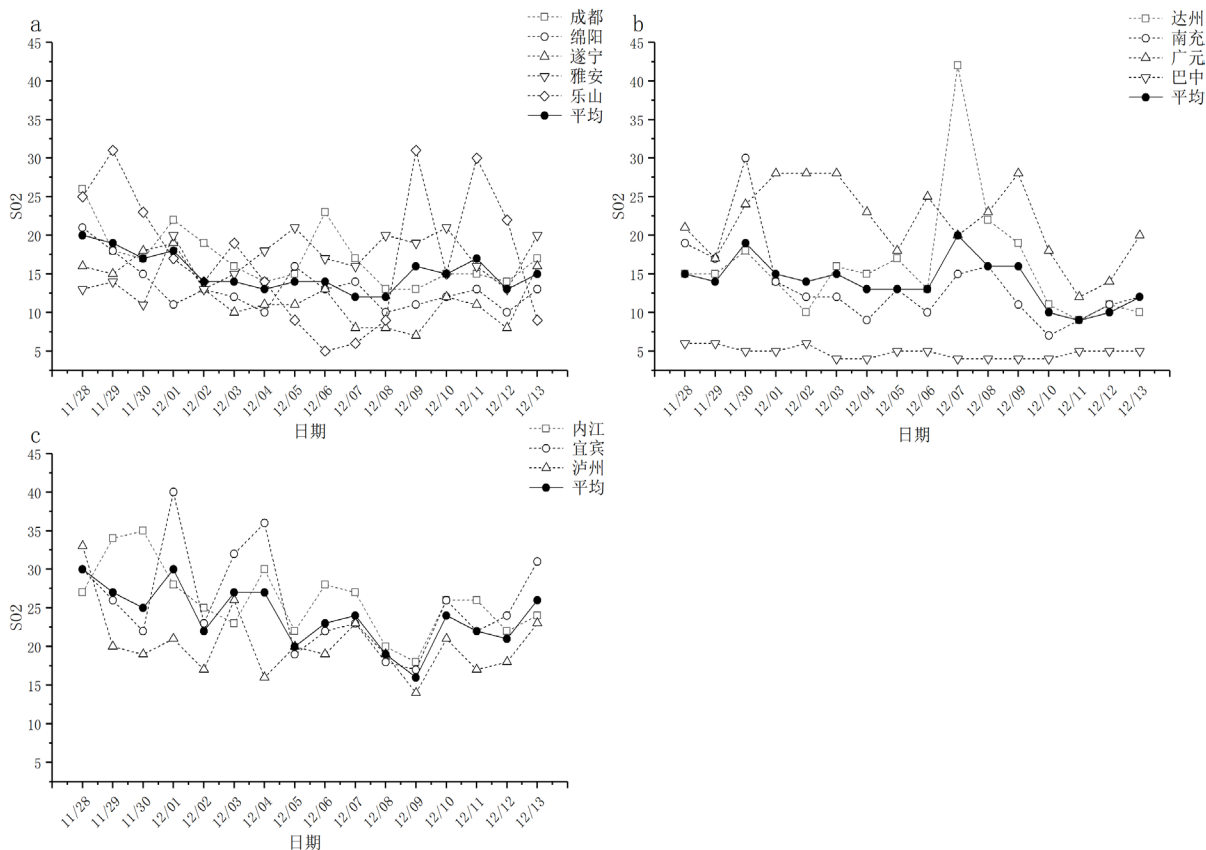


Figure 7. The daily change of the IAQI of SO₂ (Figure a is the Chengdu plain area, Figure b is the northeastern Sichuan region, and Figure c is the southern Sichuan region)
图 7. SO₂ 的 IAQI 逐日变化(图 a 为成都平原地区, 图 b 为川东北地区, 图 c 为川南地区)

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定》，IAQI 大于 100 的为超标污染物，AQI 大于 50 时，IAQI 最大的为首要污染物，综合以上几种污染物来看，本次污染过程的主要污染物为 PM_{2.5}，其次是 PM₁₀ 污染最严重，然后是 NO₂，而 SO₂、CO 和 O₃ 均未超标。就地区而言，成都平原的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 及 NO₂ 污染都比川东北地区 and 川南地区严重，因此成都平原在本次污染过程中受污染最严重。

3.2. 污染天气过程特征

3.2.1. 10 m 风速

Table 2. Correlation coefficient between AQI and 10 m wind speed from November 28, 2016 to December 13, 2016
表 2. 2016 年 11 月 28 日到 2016 年 12 月 13 日 AQI 与 10 m 风速的相关系数

区域	城市	相关系数
成都平原地区	成都	-0.623*
	绵阳	-0.272
	遂宁	0.032
	雅安	-0.532
	乐山	-0.470
川东北地区	达州	-0.277

Continued

	南充	-0.205
	广元	-0.312
	巴中	-0.570*
川南地区	内江	-0.141
	宜宾	-0.347
	泸州	-0.312

注: *代表通过显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的相关性检验。

风是大气污染物扩散的重要气象参数之一, 风的作用是整体的输送和对污染物的冲淡稀释作用, 是利于颗粒物疏散的良好条件[10]。通常, 风速越大, 越有利于污染物的水平扩散[11], 相应的浓度越低, 空气质量越好, 反之, 浓度越高, 空气质量越差。由表 2 可见, 除遂宁地区, 其他的地区风速与 AQI 均呈负相关, 即风速越大, AQI 越小。但就本次污染过程来说, 各区域的日平均风速都小于 2 m/s (如图 8), 风对污染物的冲淡稀释效果不明显, 风速和 AQI 相关性较弱。

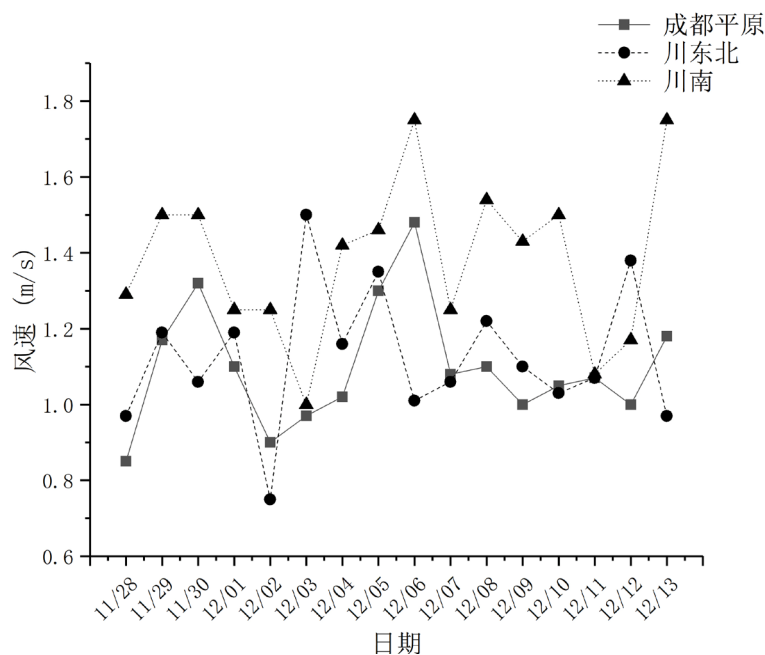


Figure 8. 10 m wind speed changes with time

图 8. 10 m 风速随时间变化

3.2.2. 混合层高度

Table 3. The correlation coefficient between AQI and the height of the mixed layer from November 28, 2016 to December 13, 2016

表 3. 2016 年 11 月 28 日到 2016 年 12 月 13 日 AQI 与混合层高度的相关系数

区域	城市	相关系数
成都平原地区	成都	-0.666*
	绵阳	-0.590*

Continued

	遂宁	0.196
	雅安	-0.547*
	乐山	-0.014
川东北地区	达州	-0.303
	南充	-0.223
	广元	-0.410
	巴中	-0.558*
川南地区	内江	0.062
	宜宾	-0.595*
	泸州	-0.380

注: *代表通过显著性水平 $\alpha=0.05$ 的相关性检验。

混合层高度约束了地面发射的空气污染物的垂直传播范围和传播率, 反映了对污染物垂直扩散的能力, 是影响空气污染的重要气象因子之一[12]。由表 3 可见, 本次污染过程除了遂宁和内江, 其他地区的混合层高度与 AQI 均呈负相关, 相关性一般, 即混合层高度越小, AQI 值越大, 污染越严重。由图 9 所示, 混合层高度在 11 月 30 日和 12 月 5 日附近出现了峰值, 混合层高度值较大, 12 月 7 日往后, 混合层高度都较小, 大体上都小于 700 m, 不利于污染物扩散。

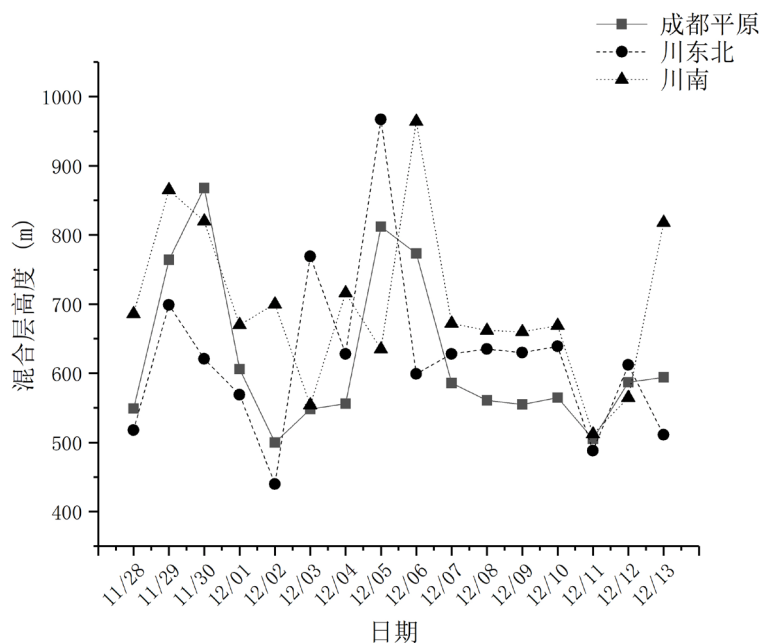


Figure 9. Changes in the height of the mixed layer with time
图 9. 混合层高度的随时间变化

3.2.3. 逆温层厚度

低层温度层结的分布决定大气静力稳定度, 逆温是大气某一高度范围内气温随高度升高而升高或不不变的现象[13], 逆温层会抑制大气垂直运动的发展, 不利于污染物的垂直扩散。研究发现, 本次污染过程中, 低层大气既存在接地逆温又存在脱地逆温, 且逆温层存在多层, 本文选取底部逆温层进行分析。采

用温江 08 时和 20 时探空资料及大气质量资料进行分析, 作出图 10。由图 10 可以看出 AQI 与逆温层厚度变化较为一致, 两者的相关系数为 0.426, 通过了 0.05 的显著性检验。

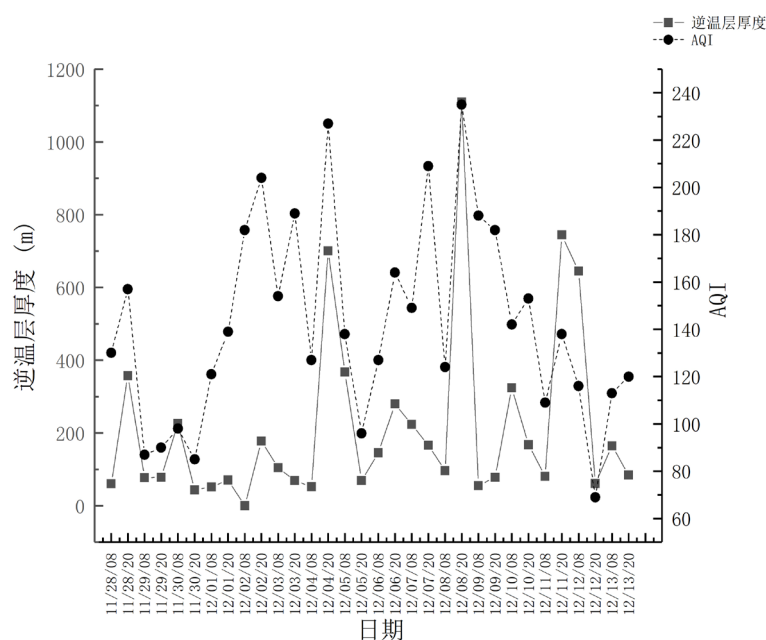


Figure 10. The thickness and AQI of the temperature inversion layer at Wenjiang station change with time

图 10. 温江站逆温层厚度和 AQI 随时间变化

3.2.4. 相对湿度

Table 4. Correlation coefficient between AQI and relative humidity from November 28, 2016 to December 13, 2016

表 4. 2016 年 11 月 28 日到 2016 年 12 月 13 日 AQI 与相对湿度的相关系数

区域	城市	相关系数
成都平原地区	成都	0.785*
	绵阳	0.657*
	遂宁	-0.333
	雅安	0.660*
	乐山	-0.115
川东北地区	达州	0.379
	南充	0.224
	广元	0.654*
	巴中	0.561*
川南地区	内江	-0.016
	宜宾	0.788*
	泸州	0.407

注: *代表通过显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的相关性检验。

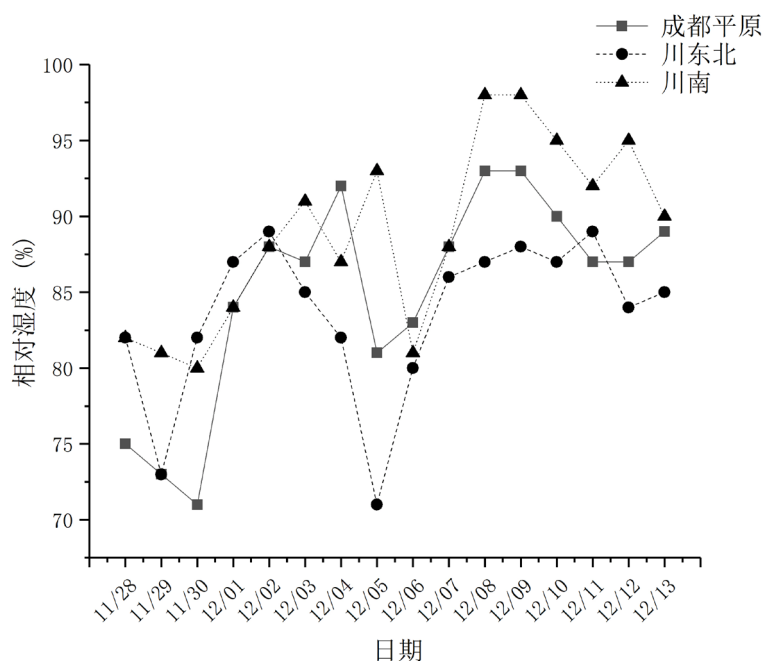


Figure 11. Relative humidity changes with time

图 11. 相对湿度随时间变化

相对湿度反映了空气中水汽含量, 相对湿度低时空气干燥, 反之, 空气湿润。高相对湿度下气溶胶吸湿增长会加速二次污染物的生成, 从而导致雾霾加重[14], 空气湿度大时常伴有逆温层, 不易扩散[15]。由表 4 可见, 除了遂宁、乐山和内江, 其他地区相对湿度与 AQI 均呈正相关(相关性一般), 即相对湿度越大 AQI 越大, 空气质量越差。在污染期间, 各地区的相对湿度都较高, 都在 70%以上(图 11)。

3.2.5. 能见度

Table 5. Correlation coefficient between AQI and visibility from November 28, 2016 to December 13, 2016

表 5. 2016 年 11 月 28 日到 2016 年 12 月 13 日 AQI 与能见度的相关系数

区域	城市	相关系数
成都平原地区	成都	-0.851*
	绵阳	-0.797*
	遂宁	0.121
	雅安	-0.753*
	乐山	-0.190
川东北地区	达州	-0.702*
	南充	-0.345
	广元	-0.614*
	巴中	-0.691*
川南地区	内江	-0.470
	宜宾	-0.818*
	泸州	-0.692*

注: *代表通过显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的相关性检验。

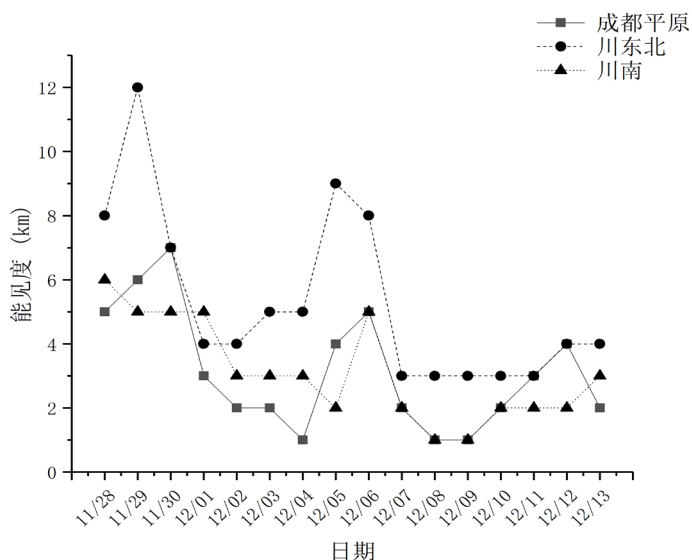


Figure 12. Visibility changes over time

图 12. 能见度随时间变化

能见度是指视力正常的人能将目标物从背景中识别出来的最大距离, 通常由于大气污染以及湿气而有所降低。由表 5 可见, 除遂宁地区以外, 能见度与 AQI 呈负相关, 且相关性很好。由图 12 可见, 各地区在污染刚开始和 12 月 6 日左右以及在污染末期能见度较大, 其他时候相对较小。

3.2.6. 降水量

降水的清除作用是降低大气中污染物浓度最快速有效的因子, 有研究表明有降水时的年均大气污染物浓度比无降水时低近 20% [16]。由图 13 可见, 除了泸州和雅安, 本次污染过程中大部分城市的累计降水量都很小, 小于 3 mm。乐山虽然累计降水量达 10 mm, 但是其在污染快结束(12 月 13 日)前累计降水量仅为 1 mm。大部分的城市降水都集中在污染最后三天(12 月 11 日至 13 日), 结合图 1 可以看到, 最后三日, 大部分城市的 AQI 数值开始显著减小, 空气质量开始转好。

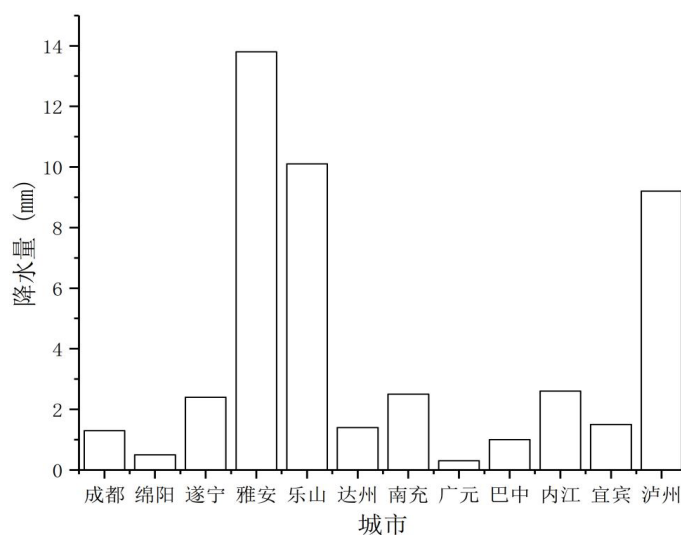


Figure 13. Cumulative precipitation from November 28 to December 13, 2016

图 13. 2016 年 11 月 28 日到 12 月 13 日累计降水量

3.2.7. 高空环流形势

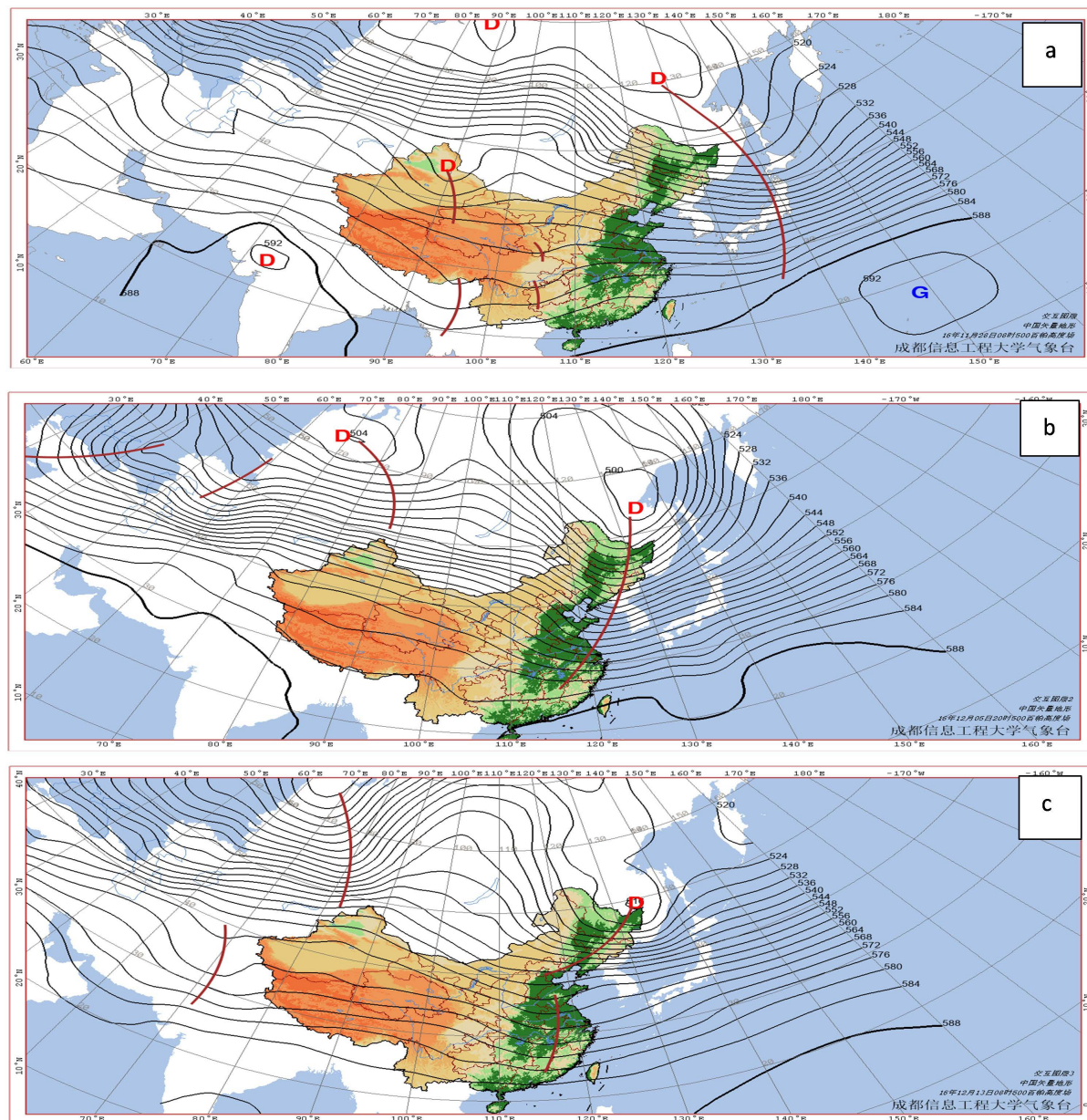


Figure 14. 500 hpa circulation situation (Figure a is at 08:00 on November 28, 2016, Figure b is at 20:00 on December 5, Figure c is at 08:00 on December 13)

图 14. 500 hpa 环流形势(图 a 为 2016 年 11 月 28 日 08 时, 图 b 为 12 月 05 日 20 时, 图 c 为 12 月 13 日 08 时)

大尺度环流形势可以影响污染物的生成、积累和清除[17], 天气形式的演变直接影响污染的持续时间和严重程度[18]。如图 14 所示, 污染初期亚欧中高纬环流形势为纬向型, 极涡较强向南压, 在日本附近形成东亚大槽, 大槽后有槽不断东移, 四川盆地位于大槽后, 受偏西气流控制, 由于处于局地均压场中, 易造成本地污染物堆积。随着东亚大槽不断东移消亡, 大槽后的小槽逐渐发展东移成为新的东亚大槽。总的来说亚欧中高纬环流形势经历了从纬向型到一槽一脊型到两槽一脊型到纬向型到两槽一脊型, 四川盆地大多处于槽的后部, 受下沉气流控制, 大气比较稳定, 不利于污染物的扩散。

3.2.8. 其他气象要素

Table 6. Correlation coefficients between temperature, 24 h variable temperature, air pressure, 24 h variable pressure and AQI from November 28 to December 13, 2016

表 6. 2016 年 11 月 28 日到 12 月 13 日温度、24 h 变温、气压、24 h 变压与 AQI 的相关系数

区域	城市	温度	24 h 变温	气压	24 h 变压
成都平原	成都	-0.797*	0.017	0.118	-0.539*
	绵阳	-0.715	0.236	0.130	-0.439
	遂宁	0.079	-0.005	0.653*	-0.145
	雅安	-0.716*	0.024	-0.140	-0.395
	乐山	0.038	0.218	-0.077	-0.036
川东北	达州	0.141	-0.135	-0.736*	-0.44
	南充	-0.453	-0.223	0.587*	-0.036
	广元	-0.134	0.263	-0.089	-0.474
	巴中	0.141	0.192	-0.423	-0.363
川南	内江	0.063	-0.472	0.314	-0.265
	宜宾	-0.131	0.219	-0.698*	-0.308
	泸州	-0.163	0.207	-0.417	-0.537*

注: *代表通过显著性水平 $\alpha=0.05$ 的相关性检验。

温度、24 h 变温、气压、24 h 变压都是常见的地面观测要素, 如表 6 所示, 整体来说污染期间 24 h 变压与 AQI 呈负相关(相关性较弱), 24 h 变温与 AQI 呈正相关(相关性较弱)。24 h 变压增大、24 h 变温减小有利于污染物的扩散。

4. 结论

1) 本次污染过程, 成都平原的污染最严重, 其次是川南地区, 然后是川东北地区, 具体而言, 成都平原 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 O_3 污染最为严重, 川东北地区 CO 污染最严重, 川南地区 SO_2 污染最严重; 主要污染物为 $PM_{2.5}$, 其次是 PM_{10} 污染最严重, 然后是 NO_2 。

2) 风速、混合层高度与 AQI 呈负相关, 相关性不是很显著, 相对湿度和逆温层厚度的减小有利于污染物的扩散, 相对湿度和逆温层厚度与 AQI 成正相关, 相关性不是很显著, 能见度与空气质量指数(AQI) 显著相关, 降水能显著降低污染物浓度。

3) 亚欧中高纬环流形势经历了从纬向型到一槽一脊型到两槽一脊型到纬向型到两槽一脊型, 四川盆地大多处于槽的后部, 受下沉气流控制, 大气比较稳定, 不利于污染物的扩散。

4) 24 h 变压与 AQI 呈负相关(相关性较弱), 24 h 变温与 AQI 呈正相关(相关性较弱)。24 h 变压增大、24 h 变温减小有利于污染物的扩散。

致 谢

在此, 我想特别感谢我的指导老师曾胜兰。在我的论文撰写期间, 她总是耐心给予我们指导, 常常忙到深夜。与一般老师不同, 她给我们的指导又是恰到好处的, 给予了学生一定的空间自己去探索, 这样很有助于培养学生处理问题的能力。最后想祝老师身体健康, 一切顺利!

基金项目

四川省重大专项(2018SZDZX0023)。

参考文献

- [1] Boettger, C.M. and Smith, H.J. (1961) The Nashville Daily Air Pollution Forecast. *Monthly Weather Review*, **89**, 477-481. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1961\)089<0477:TNDAPF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1961)089<0477:TNDAPF>2.0.CO;2)
- [2] Guest, P.S., Mach, W.H. and Winchester, J.W. (1984) Meteorological Associations with Aerosol Composition in the Boundary Layer. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 1459-1467. <https://doi.org/10.1029/JD089iD01p01459>
- [3] 徐晓峰, 李青春, 张小玲. 北京一次局地重污染过程气象条件分析[J]. 气象科技, 2005, 33(6): 543-547.
- [4] 张蓬勃, 金琼, 陆晓波, 等. 2013年1月持续性霾天气中影响污染程度的气象条件分析[J]. 气象科学, 2016, 36(1): 112-120.
- [5] 王珊, 廖婷婷, 王莉莉, 等. 西安一次霾重污染过程大气环境特征及气象条件影响分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3452-3462.
- [6] 王媛林, 王哲, 陈学舜, 等. 珠三角秋季典型气象条件对空气污染过程的影响分析[J]. 环境科学学报, 2017, 37(9): 3229-3239.
- [7] 曾胜兰, 余莲, 季承荔, 江婷. 成都一次持续性污染天气过程的气象条件分析[J]. 高原山地气象研究, 2019, 39(4): 59-66.
- [8] 李培荣, 肖天贵, 王铭杨. 基于风廓线雷达对成都地区典型持续性重污染天气的研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(12): 4174-4186.
- [9] 吴明. 2017年1月成都PM_{2.5}化学组分特征及来源追踪研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- [10] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 张会兰, 赵冰清. 北京地区冬春PM_{2.5}和PM₁₀污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 418-427.
- [11] 张雅斌, 林琳, 吴其重, 等. “13·12”西安重污染气象条件及影响因素[J]. 应用气象学报, 2016, 27(1): 35-46.
- [12] 廖碧婷, 黄俊, 王春林, 翁静娴, 李黎微, 蔡桓, 吴兑. 广州地区灰霾过程和清洁过程的边界层特征对比分析[J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4432-4443.
- [13] 蒋瑞滨, 李郁竹. 逆温与空气污染[J]. 气象, 1992, 18(1): 12-141.
- [14] Tan, H.B., Yin, Y., Gu, X.S., et al. (2013). An Observational Study of the Hygroscopic Properties of Aerosols over the Pearl River Delta Region. *Atmospheric Environment*, **77**, 817-826. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.049>
- [15] 吴昊旻, 王伟征, 麻碧华, 姜燕敏. 丽水市大气污染的时空分布特征及与气象要素的相关分析[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(10): 51-55.
- [16] 王莉莉, 王跃思, 吉东生, 等. 天津滨海新区秋冬季大气污染特征分析[J]. 中国环境科学, 2011, 31(7): 1077-1086.
- [17] 田伟, 唐贵谦, 王莉莉, 等. 北京秋季一次典型大气污染过程多站点分析[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(5): 595-606.
- [18] 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 等. 高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 801-808.