

何慧根,唐红玉,李永华,等,2021.2014—2018 年重庆主城区大气污染的特征及其与大气环流之间的关系[J].气象,47(10):1233-1245. He H G, Tang H Y, Li Y H, et al, 2021. Characteristics of air pollution and its relationship with atmospheric circulation in Chongqing City from 2014 to 2018[J]. Meteor Mon, 47(10):1233-1245(in Chinese).

2014—2018 年重庆主城区大气污染的特征 及其与大气环流之间的关系^{*}

何慧根¹ 唐红玉¹ 李永华¹ 吴 遥¹ 刘 博²

¹ 重庆市气候中心,重庆 401147

² 中国人民解放军 78092 部队,成都 610036

提 要: 采用重庆市生态环境局 2014—2018 年主城区空气污染物监测数据、沙坪坝气象站观测数据、美国 NCEP 再分析数据和美国怀俄明大学的探空数据,分析了重庆主城区的空气质量指数(AQI)、主要污染物浓度、不同程度污染日数和首要污染物的月、季、年变化特征。探讨了不同污染程度日 500 hPa 高度场和 850 hPa 风场特征,分析了重污染时段垂直速度和探空条件。结果表明,重庆主城区 AQI 月变化呈“W”型,PM_{2.5}、PM₁₀ 和 CO 呈“U”型,O₃ 呈倒“U”型。除 O₃ 浓度在盛夏最高外,其余各污染物浓度在 12 月和 1 月都较高,空气质量也相对最差。O₃ 浓度呈逐年上升趋势,其他污染物浓度都呈下降趋势,空气质量明显改善。PM_{2.5} 为重庆首要污染物,冬季最为明显,PM₁₀ 污染在春季有所增加,NO₂ 污染主要出现在初春和深秋,O₃ 污染则主要出现在盛夏。大气污染主要出现在冬季,当欧亚中高纬地区环流形势呈北低南高,以纬向环流为主,低层大气受较强偏南风影响时,重庆的气象扩散条件较差;当欧亚中高纬地区环流形势呈北高南低,经向环流明显时,冷空气容易南下,促进大气对流发展,有利于重庆污染物的扩散和清除。污染较重日重庆上空对流层整层存在异常的下沉运动,水汽上升辐合较弱,低层相对湿度较小。近地面逆温层和较薄的湿层长时间维持,使大气层结较长时间处在较稳定状态,是重庆主城区大气污染持续发展和维持的关键。

关键词: 大气污染,大气环流,AQI,PM_{2.5},重庆

中图分类号: X16,P466

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.10.006

Characteristics of Air Pollution and Its Relationship with Atmospheric Circulation in Chongqing City from 2014 to 2018

HE Huigen¹ TANG Hongyu¹ LI Yonghua¹ WU Yao¹ LIU Bo²

¹ Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

² Unite 78092 of the PLA, Chengdu 610036

Abstract: Based on daily air pollution data, meteorological observation data and sounding data from Weather Station of Shapingba in Chongqing, and the NCEP/NCAR reanalysis data during 2014—2018, the characteristics of monthly, seasonal and annual AQI, different air pollutant concentration and the day numbers with different air pollutant concentrations are analyzed systematically. Besides, the 500 hPa geopotential height field, 850 hPa wind field, vertical velocity field and the skew T - $\ln p$ diagram of heavy pollution days are also analyzed. The results show that the monthly variation of AQI in Chongqing is W-shaped, while those of PM_{2.5}, PM₁₀ and CO are U-shaped, and that of O₃ is inverted U-shaped. Except that the concentration of O₃ is the highest in midsummer, the concentrations of other pollutants are so high in December and

^{*} 重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0596)和重庆市气象局智慧气象技术创新团队项目(ZHCXTD-201910)共同资助

2020 年 8 月 13 日收稿; 2021 年 8 月 12 日收修定稿

第一作者:何慧根,主要从事气候预测和气候诊断研究. E-mail: hhg0258@163.com

January that the air quality becomes the worst in the two months. The concentration of O_3 shows an increasing trend but other pollutants major decreasing year by year, and the air quality was significantly improved. $PM_{2.5}$ was the main pollutant in Chongqing, especially in winter. PM_{10} pollution increases in spring, NO_2 pollution mainly occurs in early spring and late autumn, and O_3 pollution mainly appears in midsummer. Air pollution usually happens in winter. The meteorological diffusion condition is poor in Chongqing when the circulation in the middle and high latitudes of Eurasia in the middle troposphere has a distribution of low in the north and high in the south, and the cold air force is so weak that the lower troposphere is dominated by the south wind in most of the southern region. The condition is favorable for diffusion and clearance of air pollutant when the circulation in the middle and high latitudes of Eurasia in the middle troposphere has a distribution of high in the north and low in the south, and the meridional circulation is obvious. The rising convergence of water vapor is so weak that the relative humidity of the lower troposphere is low on heavy pollution days. The near-surface inversion layer and the thin wet layer maintain for a long time making atmospheric stratification relatively stable, which is the key of development and maintenance of air pollution in Chongqing.

Key words: air pollution, atmospheric circulation, air quality index (AQI), $PM_{2.5}$, Chongqing

引 言

近年来,随着我国经济和社会的快速发展,城镇化和工业化进程加快,城市人口迅速增长,能源大量消耗,机动车数量也呈猛增的态势,二氧化碳、氮氧化物、臭氧和细颗粒物浓度明显升高,大气污染问题日益严重,已成为政府和社会共同面临的严峻问题。大气污染不仅影响大气能见度,对交通安全造成影响;还降低空气质量,影响人体健康和生态环境;而且还能直接或间接影响太阳辐射、云雾、降水等大气的物理与化学过程,最终影响全球气候变化(王明星和郑循华,2005)。为控制大气污染,改善环境质量,国内外学者相继开展了大气污染的相关研究,主要包括大气污染的时空分布(李名升等,2016;李小飞等,2012)、污染物来源及污染物类型(Pui et al, 2014;崔萌等,2018;李令军等,2012)、大气环境容量和大气自净能力(张天宇等,2019;朱蓉等,2018)、大气污染与气象条件(吴序鹏等,2018)、大气污染的预测理论与方法(洪钟祥和胡非,1999)等方面的研究工作。已有研究表明,除大气污染排放以外,不利的气象条件是导致大气重污染的重要原因(Giorgi and Meleux,2007;王莉莉等,2010)。天气形势和气象要素与污染物的排放、传输、扩散、干湿沉降、光化学反应等方面密切相关(王莉莉等,2010)。因此,排放源和气象条件共同决定着大气污染物浓度的时空分布。当大气污染物排放达到一定程度,空气质量就

会对气象条件非常敏感。一旦出现不利于扩散的气象条件,就会很容易发生较重的大气污染。准确把握大气污染的气象条件是预报污染事件的持续时间和强度的前提。因此,污染气象条件预报对大气污染治理具有重要意义,是环境气象预报的重要内容。

国内外学者开展了一系列大气污染与气象条件研究。DeGaetano and Doherty(2004)研究表明美国纽约高浓度 $PM_{2.5}$ 经常出现在高温、高湿,且风速较小的西南风气象环境下。李令军等(2012)将北京的重污染分为静稳积累型、沙尘型、复合型和特殊型,秋、冬季以静稳积累型为主。杨孝文等(2016)指出稳定的大气环流背景场、高湿度、低风速的地面气象条件和低而厚的逆温层导致北京大气层结稳定,加上特殊的地形是大气重污染发生的主要原因。陈龙等(2016)研究表明,武汉市中度以上污染日的地面环流形势主要为反气旋型、东南风型、偏东风型和高压系统控制下的偏东风型,受高压系统或偏东风影响时,高浓度污染较易出现。何建军等(2013)研究指出兰州的大气污染物浓度与边界层高度和位温递减率关系较好,且 NO_2 与气象影响因子的相关性好于 PM_{10} 。齐冰等(2012)研究表明高压控制下大气层结稳定,变压很小,地面通常微风或静风,污染物在低层空气中容易积聚,杭州地区容易产生霾天气。王媛林等(2017)研究表明,珠三角地区空气污染的天气形势主要是高压底部型和均压场型,风速小及稳定的大气层结均不利于污染物的扩散,污染物沿偏北气流输送到本地并积累。Yin et al(2015)

研究指出东亚冬季风偏弱,环流形势在水平方向和垂直方向上都不利于污染物的扩散,有利于华北黄淮地区冬季霾的发生,安徽省的霾日偏多(张浩等,2019),湖北省的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也随之增加(杨浩等,2018)。以往这些研究从不同角度对不同地方的大气污染气象条件进行了研究,为进一步预报大气污染事件的发生提供了思路。

重庆作为长江上游重要的工业城市,自 20 世纪 80 年代以来,一直是全国污染较重的城市之一,空气质量问题严重影响了城市的经济发展和市民的身心健康(周国兵,2018)。为了防治重庆的大气污染,本地学者开展了一系列针对本市的空气质量及大气污染研究工作。满洪喆等(2009)监测分析发现重庆主城区大气汞浓度高于全球水平。李九彬和王建力(2013)分析了重庆 2001—2011 年的首要污染物和空气污染指数(air pollution index, API) 的特征。任丽红等(2014)、刘佳等(2015)研究发现,污染日重庆 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的金属元素主要来源于土壤风沙、施工和道路扬尘、冶金化工、汽车尾气、燃煤燃油等。叶缙等(2008)分析了 2000—2005 年重庆主城区大气混合层厚度特征及其对空气质量的影响。杨茜等(2019)指出降水对重庆除 O_3 外的各污染物都有不同程度的清除作用,使空气质量变好。江文华等(2013)对主城区一次重度霾天气过程进行了诊断分析。胡春梅等(2020)基于自组织神经网络算法,对重庆的污染天气过程地面气压场进行了分型。周国兵和王式功(2010)分析了重庆市主城区轻度污染以上的天气特征,指出本地天气类型主要以低压或均压为主,中高纬以纬向环流或西北气流为主,天气以阴天或阴晴相间为主,气象要素变化呈规律性,地面 24 h 负变压、正变温,风速小。以往对重庆的污染气象条件研究大多基于 1996 年的环境空气质量标准,以个例或是某个类别的影响研究为主。

根据环境保护部门的相关规定,环境空气质量监测在 2013 年以前采用的是《环境空气质量标准》(GB3095—1996)(国家环境保护局,1996),采用 API 来表征空气质量。API 由 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 的污染物指数取最大值来确定。2013 年之后采用

《环境空气质量标准》(GB3095—2012)(国家环境保护局,2012),采用空气质量指数(air quality index, AQI) 来表征空气质量(周国兵,2018)。AQI 由 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 等 6 项污染指数取最大值来确定。新的空气质量指数由 5 级调整为 6 级,分级限制标准更加严格, AQI 监测的污染物指标更多,对空气质量的评价更加客观。自 2005 年重庆开始实施“蓝天行动”以来,主城区大气环境质量逐渐改善。2013 年根据环境保护部门统一部署,重庆主城区作为全国首批 74 个城市之一开始实施新的空气质量标准。因此,目前仍然缺乏采用新标准以来重庆大气污染的整体了解。深入研究重庆采用新标准后的大气污染物的变化特征,揭示不同污染程度的大气环流特征,进而有效预报污染事件的发生仍然是重庆气象工作的紧迫任务之一。本文旨在总结近 5 年重庆主城区大气污染物浓度、空气质量指数、污染日数和首要污染物的月、季、年变化特征,讨论典型的污染程度大气环流形势及重污染时段气象探空条件的演变特征,为提前预报大气污染提供参考,从而为大气污染防治提供科学的决策依据。

1 数据来源及方法

本文采用重庆市生态环境局提供的 2014—2018 年主城区 16 个空气质量自动监测站监测数据,包括颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ (粒径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$)、 PM_{10} (粒径 $\leq 10 \mu\text{m}$)、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 等 6 项。空气质量分指数和 AQI 的计算方法和空气质量评价方法均依据相关国家环境保护标准(环境保护部,2016)。重庆主城区的各污染物浓度及 AQI 采用 16 个站平均值。

AQI 为无量纲指数, CO 浓度单位为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,其他污染物浓度单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。首要污染物是指 AQI > 50 时,空气质量指数最大的空气污染物。若空气质量分指数最大的污染物为两种或两种以上时,则并列为首要污染物。AQI 对应的污染类别根据表 1 规定进行划分。

表 1 AQI 对应的类别

Table 1 The categories of air pollution corresponding to AQI

AQI	0~50	51~100	101~150	151~200	201~300	>300
AQI 类别	优	良	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染

文章还使用了沙坪坝气象观测站地面观测数据和美国怀俄明大学的探空数据,美国 NCEP 的 500 hPa 高度场、850 hPa 风场、垂直速度场等再分析数据。

2 空气质量及大气污染物浓度分析

2014—2018 年重庆主城区月平均 AQI 与 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的月平均浓度之间的相关系数都达 0.89,与 SO_2 、CO 和 NO_2 的相关系数分别为 0.65、0.65 和 0.32,都通过了 0.05 的显著性水平检验,呈显著正相关。与 O_3 之间的相关系数为 -0.33,通过了 0.05 的显著性水平检验,呈显著负相关。由此可知,各污染物的浓度直接影响着重庆的空气质量变化。

2.1 AQI 及污染物浓度的年变化

从表 2 可知,2014—2018 年重庆主城区 $PM_{2.5}$ 的年平均浓度在 $38.3 \sim 65.1 \mu g \cdot m^{-3}$, PM_{10} 的年平均浓度在 $62.3 \sim 98.1 \mu g \cdot m^{-3}$,两指数 5 年平均浓度分别为 $51.1 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $78.4 \mu g \cdot m^{-3}$ 。 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度呈逐年下降趋势,分别从 2014 年的 $65.1 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $98.1 \mu g \cdot m^{-3}$ 下降到了 2018

年的 $38.3 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $62.3 \mu g \cdot m^{-3}$ 。2014—2018 年 AQI 的年平均在 50~100,空气质量属于良的级别,5 年平均为 82.2。AQI 也呈明显的下降趋势,从 2014 年的 96.1 逐渐降低到了 2018 年的 74.1,由此可知,重庆的“蓝天行动”取得了成效,主城区的空气质量呈逐年改善趋势。

2014—2018 年 SO_2 的年平均在 $9.0 \sim 24.2 \mu g \cdot m^{-3}$, CO 的年平均在 $0.9 \sim 1.2 mg \cdot m^{-3}$ 。这两个指数的 5 年平均分别为 $14.8 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $1.0 mg \cdot m^{-3}$, SO_2 和 CO 也呈明显的下降趋势,分别从 2014 年的 $24.2 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $1.2 mg \cdot m^{-3}$ 逐渐降低到了 2018 年的 $9.0 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $0.9 mg \cdot m^{-3}$ 。

2014—2018 年 NO_2 的年平均在 $38.5 \sim 45.6 \mu g \cdot m^{-3}$, O_3 的年平均在 $61.8 \sim 75.5 \mu g \cdot m^{-3}$ 。这两个指数的 5 年平均分别为 $43.4 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $68.5 \mu g \cdot m^{-3}$ 。 NO_2 呈先上升后下降的趋势, O_3 则为逐年上升的趋势。

综合以上分析,2014—2018 年重庆主城区的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、AQI、 SO_2 、CO 呈逐年下降的趋势, NO_2 呈先上升后下降的趋势, O_3 则为逐年上升的趋势。总体而言,空气质量为良,部分污染物浓度有所下降,空气质量改善明显。

表 2 2014—2018 年重庆主城区大气污染物浓度及 AQI
Table 2 Annual average with different air pollutant concentration
and AQI for Chongqing City in 2014—2018

年份	AQI	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	CO	NO_2	O_3
2014	96.1	65.1	98.1	24.2	1.2	38.5	61.8
2015	82.4	56.4	86.7	16.2	1.1	44.9	62.6
2016	79.4	52.6	76.0	12.9	1.0	45.6	69.8
2017	79.0	43.1	69.2	11.5	1.0	44.9	72.9
2018	74.1	38.3	62.3	9.0	0.9	42.9	75.5
平均	82.2	51.1	78.4	14.8	1.0	43.4	68.5

注:CO 浓度单位为 $mg \cdot m^{-3}$,其余污染物浓度单位为 $\mu g \cdot m^{-3}$,AQI 为无量纲,下同。

Note: the unit of concentration of CO: $mg \cdot m^{-3}$, the unit of concentration of other pollutants: $\mu g \cdot m^{-3}$, AQI is dimensionless, same as below.

2.2 AQI 指数及污染物浓度的月和季变化

从图 1 可知,重庆主城区 AQI 的月平均值为 82.2,空气质量处在良的范围。AQI 的月变化呈“W”型,即 1 月最高,达 127.3,为轻度污染的等级。2 月开始 AQI 逐渐降低,7—8 月有所增加,9 月达最低后再次逐渐增加,12 月再次达到峰值 100.5。 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的月变化呈“U”型分布特征。 $PM_{2.5}$ 在 4—10 月相对较低,其余月份相对较高。 PM_{10} 则为 6—9 月相对较低,其余月份相对较高。 $PM_{2.5}$ 的

月平均浓度为 $51.1 \mu g \cdot m^{-3}$,1 月最高,达 $95.3 \mu g \cdot m^{-3}$,7 月最低,仅为 $33.1 \mu g \cdot m^{-3}$ 。 PM_{10} 各月的浓度均较 $PM_{2.5}$ 大,月平均浓度为 $78.4 \mu g \cdot m^{-3}$ 。 PM_{10} 的月平均浓度 1 月最高,达 $131.4 \mu g \cdot m^{-3}$,6 月最低,为 $57.8 \mu g \cdot m^{-3}$ 。

SO_2 的月平均浓度为 $14.8 \mu g \cdot m^{-3}$ 。1 月浓度最高,达 $24.6 \mu g \cdot m^{-3}$,6—9 月的浓度均小于 $12 \mu g \cdot m^{-3}$,其中 6 月最小,仅为 $9.5 \mu g \cdot m^{-3}$ 。 NO_2 各月浓度均较 SO_2 大, NO_2 月平均浓度为 $43.4 \mu g \cdot m^{-3}$ 。和 SO_2 相似, NO_2 在 1 月最高,达 $51 \mu g \cdot m^{-3}$,

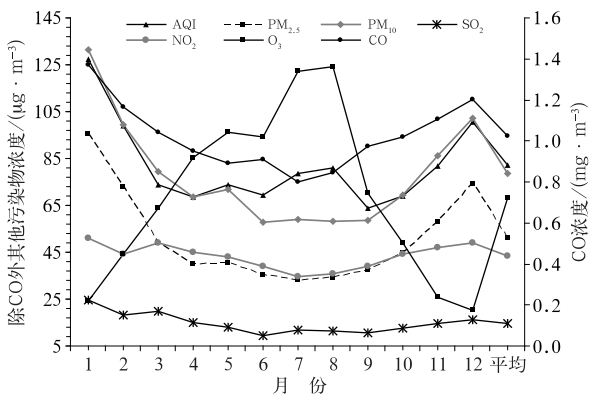


图 1 2014—2018 年重庆主城区各月不同污染物浓度及 AQI

Fig. 1 Monthly average with different air pollutant concentrations and AQI for Chongqing City in 2014—2018

6—9 月的月平均浓度均小于 $40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。其中 7 月最小,仅为 $34.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。CO 的月平均浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,月平均浓度变化和 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 相似,呈“U”型分布特征,1 月最高,达 $1.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,5—8 月的浓度均小于 $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,其中 7 月和 8 月最低,仅为 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 O_3 的月平均浓度为

$68.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,月平均浓度变化呈倒“U”型的分布特征,4—8 月浓度较高,其余月份相对较低。其中 7 月和 8 月最高,分别达 $122.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $124 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,12 月和 1 月最小,分别仅为 $20.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $24.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。这与盛夏重庆日照时数多,12 月和 1 月日照时数少有关。

综上所述,重庆主城区 AQI 指数的月变化呈“W”型,12 月和 1 月空气质量相对较差,9 月最好。 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 CO 的月平均浓度变化呈“U”型分布特征, O_3 的月平均浓度呈倒“U”型的分布特征。除 O_3 外浓度在盛夏最高外,各污染物浓度在 12 月和 1 月都较高,空气质量也相对最差。

从表 3 可知,就季节而言,AQI 冬季最高,夏季次之,秋季最小,由此表明,重庆主城区空气质量秋季最好,春季次之,冬季最差。 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的季节变化略有差异,两种污染物均为冬季最高夏季最小, PM_{10} 春季高于秋季, $\text{PM}_{2.5}$ 则秋季略高于春季。 SO_2 和 NO_2 的季节变化相似,均为冬季最高,春季次之,夏季最小。CO 为冬季最高,春季和秋季持平,夏季最小。 O_3 则为夏季最高,春季次之,冬季最小。

表 3 2014—2018 年重庆主城区各季节污染物浓度及 AQI
Table 3 Seasonal average with different air pollutants concentrations and AQI for Chongqing City in 2014—2018

季节	AQI	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	CO	NO_2	O_3
春	71.9	43.1	73.3	15.9	1.0	45.7	81.8
夏	76.5	34.2	58.4	10.9	0.9	36.4	113.5
秋	71.5	46.6	71.3	12.5	1.0	43.3	48.3
冬	109.0	80.7	111.0	19.7	1.2	48.0	29.7

2.3 污染日数的年变化

从表 4 可知,2014—2018 年重庆主城区每年都有不同程度的污染日数,轻度污染日数最多,中度污染日数次之,重度污染日数最少。2014—2018 年轻度污染日数为 41~64 d,5 年平均为 55.4 d。中度

污染日数在 7~37 d,5 年平均为 18.6 d。重度污染日数在 1~18 d,5 年平均为 7 d。

2014—2018 年空气质量为良的日数为 194~238 d,5 年平均为 215.8 d。优的日数在 52~88 d,5 年平均为 68.4 d。由此可知,重庆主城区空气质量以良为主,优次之。

表 4 2014—2018 年重庆主城区不同污染程度的日数(单位:d)
Table 4 Annual day numbers with different air pollutant concentrations in Chongqing City in 2014—2018 (unit: d)

年份	轻度污染	中度污染	重度污染	良	优
2014	64	37	18	194	52
2015	41	20	11	238	55
2016	58	7	2	238	61
2017	58	21	3	195	88
2018	56	8	1	214	86
平均	55.4	18.6	7	215.8	68.4

从逐年的变化趋势可知,优的日数在增加,重度污染日数在减少。轻度污染、中度污染日数呈波动减少的趋势,良的日数呈波动增加趋势。

综合以上分析,重庆主城区空气质量以良为主,5年平均为215.8 d。优和轻度污染次之,年平均分别为68.4 d和55.4 d。中度污染和重度污染最少,年平均分别为18.6 d和7 d。优和良的日数呈增加趋势,轻度污染、中度污染和重度污染日数呈减少趋势。

2.4 污染日数的月、季变化

从图2可知,重庆主城区各个月空气质量为良的日数均较其他等级日数多。良的月平均日数为18 d,其中6月、9—11月的天数在18 d以上,3—5月达22.2 d以上。良的日数月际变化较大,最少的1月仅为10.4 d。3—6月和9—10月空气质量为优的日数高于轻度污染日数,其余月份则相反。等级为优的月平均日数为5.7 d,轻度污染的月平均日数为4.6 d。除1月中度污染平均日数为6.8 d,重度污染平均日数为5 d外,其余月份中度污染日数均在4 d以内,重度污染日数均在1 d以内,且重度污染的日数明显少于其他等级日数。此外,2014—2018年期间,除1、2、10月和12月外,其余月份都没有出现重度污染,3—5月均未出现中度污染。

综上所述,2014—2018年重庆主城区空气质量以良为主,优和轻度污染次之,中度污染和重度污染日数较少,月平均优和良的总日数达23.7 d。

从表5可知,就季节而言,冬季空气质量相对最

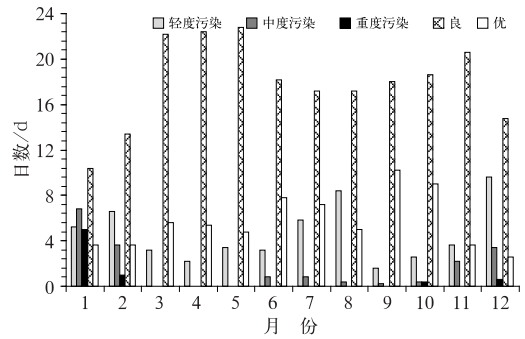


图2 2014—2018年重庆主城区各月不同污染程度日数

Fig. 2 Monthly day numbers with different air pollutant concentrations in Chongqing City in 2014—2018

差,优和良日数较少,相较其他季节污染日数最多。冬季轻度污染日数5年平均达21.4 d,中度污染为13.8 d,重度污染为6.6 d,优的日数仅为9.8 d。春季和秋季空气质量相对较好,优和良的日数之和分别达83.2 d和80 d,由此可知,春季空气质量优和良的日数多于秋季。近5年春季均未出现中度污染和重度污染。夏季轻度污染日数较春季和秋季有所增加,良的日数较春季和秋季有所减少。

2.5 首要污染物分析

从表6可知,重庆主城区首要污染物为 $PM_{2.5}$ 。 $PM_{2.5}$ 的5年平均为147.8 d, PM_{10} 的5年平均为28.6 d。随着重庆“蓝天行动”的开展, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 作为首要污染物的日数呈逐渐减少趋势。 SO_2 和CO均没有作为首要污染物出现。 NO_2 和 O_3 呈

表5 2014—2018年重庆主城区各季节不同污染程度日数(单位:d)

Table 5 Seasonal day numbers with different air pollutant concentrations in Chongqing City in 2014—2018 (unit: d)

季节	轻度污染	中度污染	重度污染	良	优
春	8.8	0.0	0.0	67.4	15.8
夏	17.4	2.0	0.0	52.6	20.0
秋	7.8	2.8	0.4	57.2	22.8
冬	21.4	13.8	6.6	38.6	9.8

表6 2014—2018年重庆主城区首要污染物出现日数(单位:d)

Table 6 Annual day numbers with different primary pollutants in Chongqing City in 2014—2018 (unit: d)

年份	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	NO_2	CO	O_3	两种以上污染日数
2014	198	48	0	2	0	52	10
2015	172	43	0	34	0	44	17
2016	180	16	0	37	0	63	9
2017	99	19	0	63	0	90	6
2018	90	17	0	63	0	102	7
平均	147.8	28.6	0	39.8	0	70.2	9.8

逐年增加的趋势。两种以上污染物同时出现的日数 5 年平均为 9.8 d,近年来也呈逐渐减少的趋势。

从表 7 可知,从 11 月到次年 2 月 $\text{PM}_{2.5}$ 作为主城区首要污染物的日数较多,5 年平均都在 19 d 以上,最多的 12 月达 26.2 d。3 月以后 $\text{PM}_{2.5}$ 作为首要污染物的日数逐渐减少, PM_{10} 的日数逐渐增多。3—6 月 PM_{10} 的日数均超过了 3 d,其中 5 月最多,达 7.2 d。和 $\text{PM}_{2.5}$ 的日数相比,其他污染物作为首要污染物的日数明显较少。 NO_2 作为首要污染物的日数在 3—4 月和 10—11 月相对较多,为 6~9 d,其余月份均相对较少。 O_3 作为首要污染物的日数则主要集中在 5—8 月,其中 7—8 月达 17 d 以上。

综上所述, $\text{PM}_{2.5}$ 为重庆主城区的首要污染物,全年有 8 个月的日数较其他污染物的多,尤其是冬季最为明显。 PM_{10} 作为首要污染物的日数在春季有所增加, NO_2 作为首要污染物主要出现在初春和深秋。 O_3 作为首要污染物,则主要出现在盛夏。

表 7 2014—2018 年重庆主城区各月
首要污染物出现日数(单位:d)

Table 7 Monthly day numbers with different primary pollutants in Chongqing City in 2014—2018 (unit: d)				
月份	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	NO_2	O_3
1	26.0	0.0	1.6	0.0
2	21.8	0.8	2.4	0.0
3	13.0	3.6	9.0	0.6
4	7.4	5.2	7.2	6.6
5	5.8	7.2	3.4	11.2
6	5.4	4.0	3.8	10.0
7	3.2	2.8	0.4	17.8
8	3.8	2.8	0.4	19.4
9	8.4	2.2	4.8	4.6
10	11.2	2.6	7.4	1.4
11	19.2	2.6	6.0	0.0
12	26.2	1.2	1.8	0.0
平均	12.6	2.9	4.0	6.0

3 中低层大气环流对大气污染的影响

周国兵(2018)研究表明,大气污染不仅取决于能源结构、交通和工业排放污染物的多少,而且与大气环流背景及当地的局地气象条件有着密切的联系。大气环流具有周期性和相似性,在相似的环流背景下,往往会出现相似的天气现象。因此,分析典型的污染程度条件下的大气环流形势,可归纳出不同空气质量类别的主要天气类型,为提前预报大气污染事件提供依据。

3.1 500 hPa 高度场分析

通过以上分析可知,大气污染主要发生在冬季。从表 1 可知,空气质量为良的 AQI 值在 51~100,轻度污染的 AQI 为 101~150。由于轻度污染和良的日数较多,因此,分别选取 2014—2018 年冬季逐日 AQI 为良的中位数 75、轻污染的中位数 125 的前后 5 位,即分别选取 AQI 为 70~80、120~130 的日子为典型良和轻度污染日。排除节日影响,共统计得出重度污染 28 d,优 40 d,典型轻度污染 24 d,典型良 28 d。重度污染、轻度污染、优和良日的 500 hPa 高度场合成分析结果如图 3 所示。

从图 3a 可知,重庆主城区出现重污染日,对流层中层欧亚中高纬环流形势总体呈北低南高、西低东高的分布特征,乌拉尔山至贝加尔湖地区高度场均偏低,青藏高原及我国大部分地区包括四川盆地高度场偏高,东北、华北、华淮等地高度场异常偏高,东亚大槽偏弱、偏东,中纬度地区环流呈纬向分布,不利于北方冷空气南下影响我国。

从图 3b 可知,重庆主城区为轻度污染日,欧亚中高纬环流呈两槽一脊型,乌拉尔山至巴尔喀什湖地区高度场均偏低,东亚大槽西伸明显,但位置偏北。中纬度地区环流仍然呈纬向型分布,从青藏高原到我国大部地区高度场仍然以偏高为主。这样的环流形势仍然不利于冷空气南下影响到四川盆地。

从图 3c 可知,重庆主城区空气质量为优时,欧亚中高纬环流形势总体呈北高南低的分布特征,乌拉尔山地区受高压脊控制,东亚大槽加强西伸,从青藏高原到我国大部地区高度场偏低。中纬度地区经向环流明显,有利于冷空气南下影响我国。

从图 3d 可知,重庆主城区空气质量为良时,欧亚中高纬环流形势总体呈西高东低,乌拉尔山—巴尔喀什湖—青藏高原一带高度场偏高较为异常,东亚大槽加强南伸,重庆地区位于脊前,此时重庆地区往往处于冷空气过境时段,空气质量也相对较好。

综合以上分析,当欧亚中高纬地区环流形势呈北低南高分布,中纬度地区以纬向环流为主时,不利于冷空气南下,重庆地区的大气环流不利于污染物的扩散。当欧亚中高纬地区环流形势呈北高南低,中纬度地区经向环流明显时,冷空气容易南下,有利于重庆地区污染物的稀释和扩散。环流形势呈西高东低、重庆地区处于脊前时,空气质量也相对较好。

3.2 850 hPa 风场分析

胡春梅等(2020)通过后向轨迹分析表明,重庆

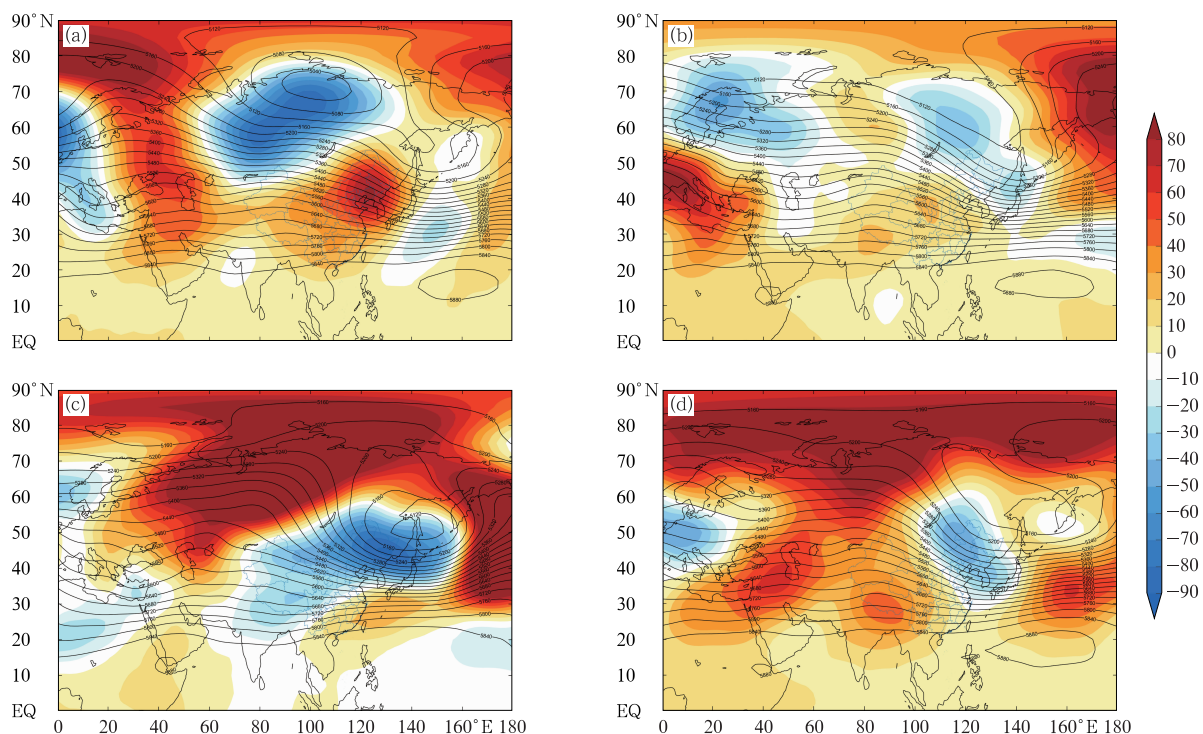


图 3 2014—2018 年重庆主城区重污染日(a)、轻污染日(b)、空气质量优日(c)、空气质量良日(d)500 hPa 高度场合成图
(阴影为距平场,等值线为平均场,单位:gpm)

Fig. 3 The 500 hPa geopotential height field of heavy pollution day (a), light pollution day (b), excellent air quality day (c) and better air quality day (d) in Chongqing City in 2014—2018
(shaded: anomaly field, contour: mean field, unit: gpm)

的污染源主要为本地污染,西北地区的输入型气溶胶颗粒对四川盆地的影响相对较小,较重污染通常由本地污染源和我国东部及南部的污染源共同影响。重庆由于特殊的山地城市特点,秋冬季节主要以本地累积污染为主,输送型污染相对较少。

同样对重度污染、轻度污染、优和良日的 850 hPa 风场进行合成分析,结果如图 4 所示。从图 4a 可知,重庆主城区重污染日大气对流层低层南海到东海一带存在反气旋风场,我国南方大部地区受偏南风控制,广西北部、贵州东部、湖南、湖北和重庆南部等地区风速较常年同期偏大。在较强的偏南风为主导风的背景下,没有冷空气的影响,我国大部地区天气较好。从沙坪坝气象站的观测数据可知,重污染日重庆无日照、无降水。从表 8 可知,重污染日地面升温最为明显,气压最低,10 m 平均风速为 $1.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,和轻污染日的平均风速一致,小于空气质量为优和良日的平均风速,相对湿度平均为 80.4%,高于空气质量为良和轻度污染日的平均值,低于空气质量为优的平均值。由此可知,当 850 hPa 以较强的南风为主导时,地面气压较小,重庆地区大气层

容易产生下沉气流,天气较好,地面升温明显,偏南风水汽含量较高,增加了本地空气湿度。长时间低风速、无降水、高湿度的气象条件有利于污染物的积聚,不利于污染物的扩散和清除。

从图 4b、4d 和表 8 可知,重庆主城区轻度污染和空气质量为良日,850 hPa 从南海到东海一带同样存在反气旋风场,且从南海经广西—贵州一线的风速较小,重庆地区仍然以偏南风为主,风速较小。轻度污染和空气质量为良日地面也有一定的升温,地面风速也较弱,但相对湿度较低,污染物的积聚性没有重污染日的强。

从图 4c 可知,重庆主城区空气质量为优日,华北—华淮—四川盆地一线存在反气旋风场,四川盆地的偏北风风速较常年同期偏强,从南海经广西—贵州一线的偏南风也较常年同期偏强。这样的风场配置有利于冷暖空气在重庆上空交汇,促进低层大气的对流发展,从表 8 可知,空气质量为优日,日平均降水量为 2.9 mm,风速也有所加大,气象条件有利于污染物的扩散和清除。

综合以上分析,冬季重庆地区长时间处在风速

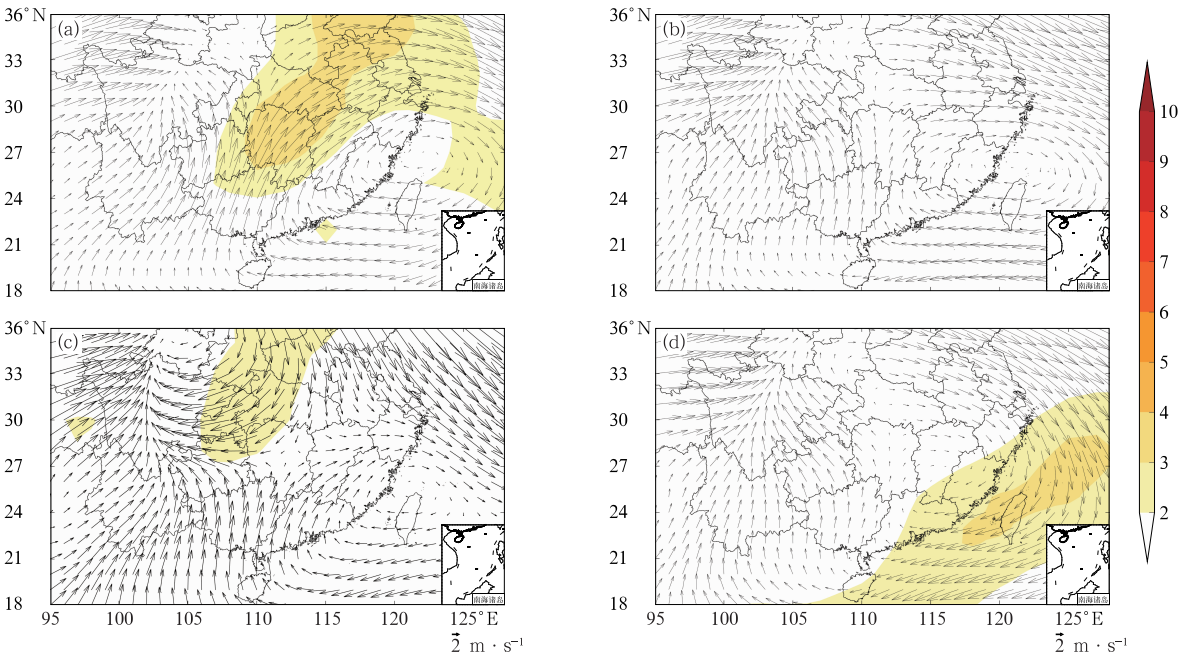


图 4 同图 3, 但为 850 hPa 风场合成图(阴影为距平场, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the 850 hPa wind height field (shaded: anomaly field, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

表 8 2014—2018 年重庆主城区不同污染程度日地面气象条件
Table 8 The weather conditions with different air pollutant concentrations in Chongqing City in 2014—2018

不同污染程度日	气温距平/ $^{\circ}\text{C}$	降水量/ mm	风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	气压/ hPa	相对湿度/ $\%$
重污染	1.9	0.0	1.1	987.7	80.4
轻污染	1.0	0.2	1.1	990.7	79.4
空气质量优	-1.5	2.9	1.5	991.9	83.1
空气质量良	0.5	0.7	1.2	993.4	75.5

小、无降水的情况下,大气污染物的稀释和扩散条件较差,对流层低层受较强的偏南风影响时,高温、高湿的气象条件对污染物浓度有加重作用,大气污染物的稀释和扩散条件较差;当四川盆地受较强的偏北风影响时,冷暖空气容易在重庆地区交汇产生降水,地面风速加大,大气污染物的稀释和扩散条件较好。

4 垂直结构对污染天气的影响

4.1 垂直运动分析

大气污染物的传输和扩散与大气边界层有直接关系(周国兵,2018)。雾-霾天气的发生与边界层内大气的垂直运动分布有一定的关联,下沉运动被认为是一种不利于污染物垂直扩散的气象条件(廖晓农等,2014)。

从图 5a 的 700 hPa 垂直速度场合成图可知,重污染期间四川盆地包括重庆地区总体处在垂直速度正值区,即重庆地区处在下沉气流控制区域,且西部地区的正距平区明显高于东部地区。从距平可知,重污染日重庆大部地区下沉运动较常年同期偏强。

2015 年 1 月 3—4 日是近几年来重庆主城区污染最重的一次,现将此次污染过程作为典型个例,对垂直速度场进行分析,从图 5b 可知,重污染期间重庆大部分时间处在正距平控制下,对流层整层存在异常的下沉运动,下沉运动的大值区位于对流层中下层。大气层结较为稳定,不利于对流的发展,水汽上升辐合较弱,低层相对湿度较小,不利于低层云的形成和发展,从而不利于降水的产生。

4.2 探空条件分析

对污染最重的 2015 年 1 月 3 日 08 时至 4 日 20 时的探空图进行分析。从图 6 的温度曲线可知,从

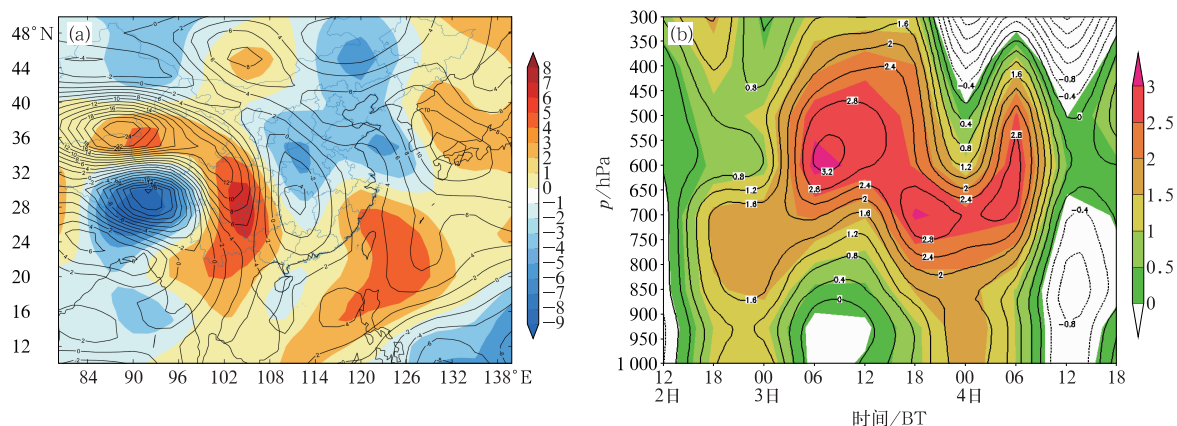


图 5 2014—2018 年重庆主城区重污染日 700 hPa 垂直速度场(a)和 2015 年 1 月 3—4 日垂直速度时间-高度剖面(b)
(等值线, 阴影, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)
Fig. 5 The 700 hPa vertical velocity field of heavy pollution day in 2014—2018 (a)
and vertical velocity time-height profile in 3—4 January 2015 (b) in Chongqing City
(contour and shaded, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

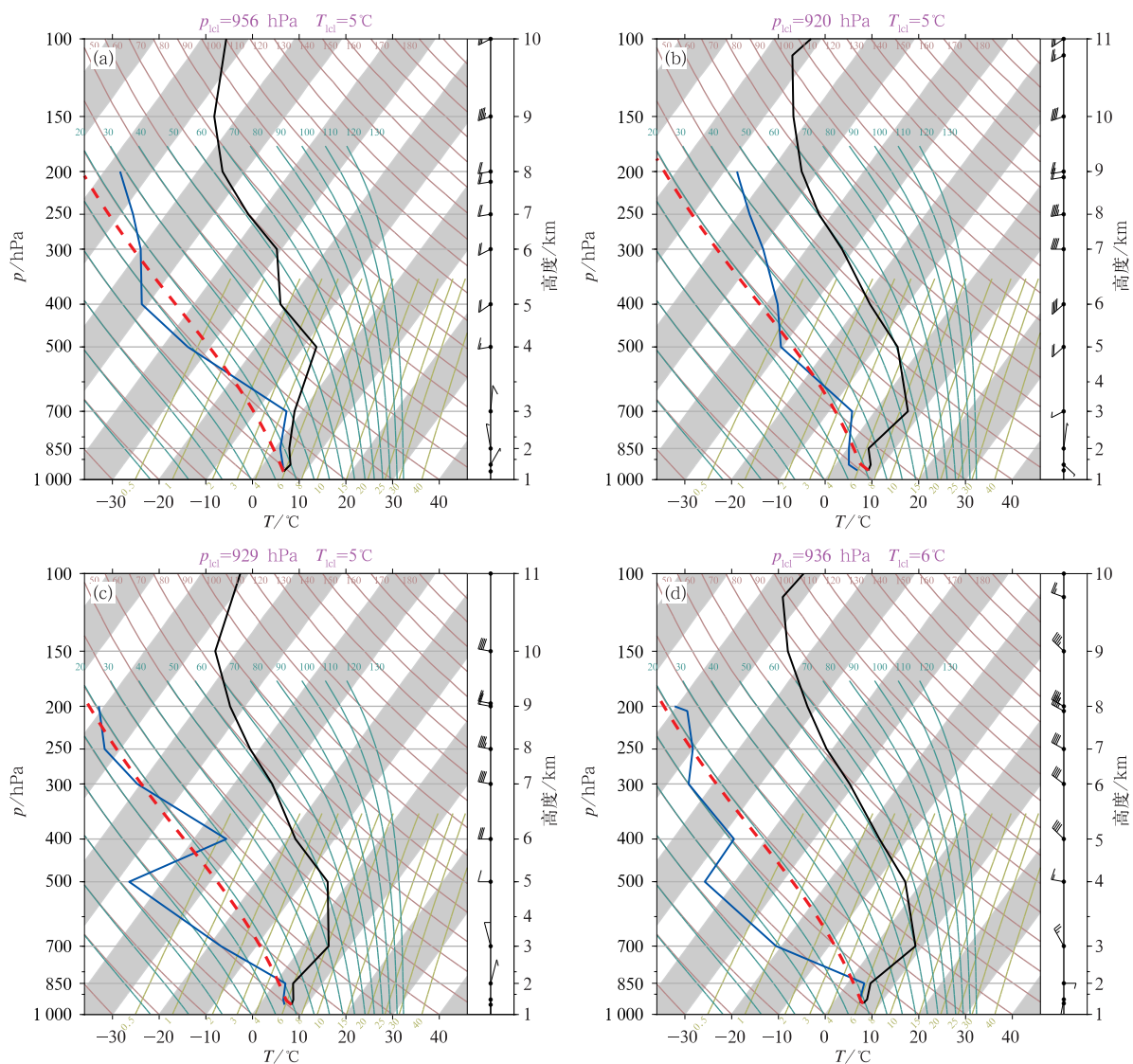


图 6 2015 年 1 月 3 日 08 时(a), 20 时(b)和 4 日 08 时(c), 20 时(d)的探空图
(黑色实线: 温度探空; 蓝色实线: 露点温度探空; 红色虚线: 状态曲线; p_{lcl} : 抬升凝结高度, T_{lcl} : p_{lcl} 处的温度)
Fig. 6 The skew T - $\ln p$ diagram at 08:00 BT (a), 20:00 BT (b) 3 and 08:00 BT (c), 20:00 BT (d) 4 January 2015
(black solid line: temperature sounding; blue solid line: dewpoint sounding;
red dashed line: condition curve; p_{lcl} : lifting condensation level, T_{lcl} : temperature at p_{lcl})

3日08时起,近地面到500 hPa存在深厚的逆温层,20时起逆温层厚度有所变薄,厚度从近地面到700 hPa,且一直维持到4日20时。值得关注的是,3日20时至4日20时,700~500 hPa的温度梯度非常小。从露点温度线可知,从3日08时地面到700 hPa存在较厚的湿层,20时地面湿度减小,近地面至700 hPa仍然存在湿层。4日08时和20时湿层明显变薄,只在地面到850 hPa存在湿层。

由此可知,在重庆主城区污染物浓度逐渐增加的过程中,从地面到对流层中下层存在深厚的逆温层,近地面存在较厚的湿层,随着时间的推移,逆温层有所变薄,但对流层中下层温度梯度仍然较小,近地面的湿层也逐渐变薄。此时大气层结仍然比较稳定,污染物持续堆积。冬季在污染物浓度较大的情况下,近地面逆温层和湿层从发展到长时间维持,使大气层结较长时间处在较稳定的状态是重庆主城区大气污染得以持续发展和维持的关键。

5 结 论

综合以上分析,得到以下结论:

(1)2014—2018年重庆主城区AQI的月变化呈“W”型,PM_{2.5}、PM₁₀和CO的月平均浓度变化呈“U”型,O₃呈倒“U”型。除O₃浓度在7月、8月最高外,各污染物浓度在12月和1月都较高,空气质量也相对最差。PM_{2.5}、PM₁₀、AQI、SO₂、CO呈逐年下降的趋势,NO₂呈先上升后下降趋势,O₃则为逐年上升趋势,空气质量呈逐年改善趋势。

(2)2014—2018年重庆主城区空气质量以良为主,优和轻度污染次之,中度污染和重度污染最少,优和良的日数呈增加趋势,轻度污染、中度污染和重度污染日数呈减少趋势。PM_{2.5}为重庆主城区的首要污染物,冬季最为明显;PM₁₀作为首要污染物的日数在春季有所增加,NO₂作为首要污染物主要出现在初春和深秋;O₃作为首要污染主要出现在盛夏。

(3)当欧亚中高纬地区环流形势呈北低南高分布,中纬度地区以纬向环流为主时,不利于冷空气南下,大气环流不利于重庆地区污染物的扩散。当欧亚中高纬地区环流形势呈北高南低,中纬度地区经向环流明显时,大气环流有利于冷空气南下,从而有利于重庆地区污染物的稀释和扩散。冬季重庆地区长时间处在风速小、无降水的情况下,对流层低层受

较强的偏南风影响时,高温、高湿的气象条件对污染物浓度有加重作用,大气污染物的稀释和扩散条件较差;当四川盆地受较强的偏北风影响时,冷暖空气容易在重庆地区交汇产生降水,地面风速加大,大气污染物的稀释和扩散条件较好。

(4)重污染日重庆上空对流层整层存在异常的下沉运动,水汽上升辐合较弱,低层相对湿度较小。近地面逆温层和湿层从发展到长时间维持,使大气层结较长时间处在较稳定状态是重庆主城区大气污染得以持续发展和维持的关键。

参考文献

- 陈龙,智协飞,覃军,等,2016.影响武汉市空气污染的地面环流形势及其与污染物浓度的关系[J].气象,42(7):819-826. Chen L, Zhi X F, Qin J, et al, 2016. Surface atmospheric circulation types of air pollution and its relationship with concentration of air pollutants in Wuhan[J]. Meteor Mon, 42(7): 819-826 (in Chinese).
- 崔萌,安兴琴,范广洲,等,2018.北京一次重污染过程的天气成因及来源分析[J].中国环境科学,38(10):3628-3638. Cui M, An X Q, Fan G Z, et al, 2018. The analysis of weather causes and sources of a heavy pollution process in Beijing[J]. China Environ Sci, 38(10): 3628-3638 (in Chinese).
- 国家环境保护局,1996.环境空气质量标准:GB3095—1996[S].北京:中国标准出版社. State Environmental Protection Administration of China, 1996. Ambient air quality standard: GB3095—1996[S]. Beijing: China Standards Press (in Chinese).
- 国家环境保护局,2012.环境空气质量标准:GB3095—2012[S].北京:中国标准出版社. State Environmental Protection Administration of China, 2012. Ambient air quality standard: GB3095—2012[S]. Beijing: China Standards Press (in Chinese).
- 何建军,余晔,刘娜,等,2013.基于WRF模式的兰州秋冬季大气污染预报模型研究[J].气象,39(10):1293-1303. He J J, Yu Y, Liu N, et al, 2013. WRF-based forecast model for autumn and winter air quality in Lanzhou[J]. Meteor Mon, 39(10): 1293-1303 (in Chinese).
- 洪钟祥,胡非,1999.大气污染预测的理论和研究方法研究进展[J].气候与环境研究,4(3):225-230. Hong Z X, Hu F, 1999. Advanced in research of the theory and method of air pollution prediction [J]. Climat Environ Res, 4(3): 225-230 (in Chinese).
- 胡春梅,陈道劲,周国兵,等,2020.基于自组织神经网络算法的重庆秋冬季空气污染与天气分型的关系[J].气象,46(9):1222-1234. Hu C M, Chen D J, Zhou G B, et al, 2020. Relationship between air pollution events in autumn and winter in Chongqing and the classification of synoptic situation based on self-organizing maps[J]. Meteor Mon, 46(9): 1222-1234 (in Chinese).
- 环境保护部,2016.环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行):HJ 633—2012[S].北京:中国环境科学出版社. Ministry of Environmental Protection of China, 2016. Technical regulation on ambient air quality index (on trial): HJ 633—2012[S]. Beijing:

- China Environmental Science Press(in Chinese).
- 江文华,陈道劲,胡春梅,2013.重庆主城区一次重度霾天气过程分析[J].气象科技,41(2):343-346. Jiang W H, Chen D J, Hu C M, 2013. Analysis of a severe haze event in downtown area of Chongqing[J]. Meteorol Sci Technol, 41(2): 343-346 (in Chinese).
- 李九彬,王健力,2013.2001—2011年重庆市空气质量特征分析[J].西南大学学报(自然科学版),35(9):146-153. Li J B, Wang J L, 2013. An analysis of air quality characteristics of Chongqing (2001—2011)[J]. J Southwest University (Natural Science Edition), 35(9): 146-153(in Chinese).
- 李令军,王英,李金香,等,2012.2000~2010年北京大气重污染研究[J].中国环境科学,32(1):23-30. Li L J, Wang Y, Li J X, et al, 2012. The analysis of heavy air pollution in Beijing during 2000—2010[J]. China Environ Sci, 32(1): 23-30(in Chinese).
- 李名升,任晓霞,于洋,等,2016.中国大陆城市PM_{2.5}污染时空分布规律[J].中国环境科学,36(3):641-650. Li M S, Ren X X, Yu Y, et al, 2016. Spatiotemporal pattern of ground-level fine particulate matter (PM_{2.5}) pollution in mainland China[J]. China Environ Sci, 36(3): 641-650(in Chinese).
- 李小飞,张明军,王圣杰,等,2012.中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J].环境科学,33(6):1936-1943. Li X F, Zhang M J, Wang S J, et al, 2012. Variation characteristics and influencing factors of air pollution index in China[J]. Chin J Environ Sci, 33(6): 1936-1943(in Chinese).
- 廖晓农,张小玲,王迎春,等,2014.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,35(6):2031-2044. Li-ao X N, Zhang X L, Wang Y C, et al, 2014. Comparative analysis on meteorological condition for persistent haze cases in summer and winter in Beijing[J]. Environ Sci, 35(6): 2031-2044(in Chinese).
- 刘佳,翟崇治,许丽萍,等,2015.灰霾天气下重庆地区秋冬金属污染特征及来源分析[J].生态环境学报,24(10):1689-1694. Liu J, Zhai C Z, Xu L P, et al, 2015. Characteristics and sources of metal elements in PM_{2.5} during heavy days in Chongqing during autumn and winter[J]. Ecol Environ Sci, 24(10): 1689-1694(in Chinese).
- 满洪喆,杨永奎,王定勇,2009.重庆市主城区大气汞调查研究[J].西南大学学报(自然科学版),31(9):131-137. Man H Z, Yang Y K, Wang D Y, 2009. Investigation of atmospheric mercury in the main urban area of Chongqing[J]. J Southwest University (Natural Science Edition), 31(9): 131-137(in Chinese).
- 齐冰,刘寿东,杜荣光,等,2012.杭州地区气候环境要素对霾天气影响特征分析[J].气象,38(10):1225-1231. Qi B, Liu S D, Du R G, et al, 2012. The characteristic analysis of climatic and environmental factors on the haze weather in Hangzhou[J]. Meteor Mon, 38(10): 1225-1231(in Chinese).
- 任丽红,周志恩,赵雪艳,等,2014.重庆主城区大气PM₁₀及PM_{2.5}来源解析[J].环境科学研究,27(12):1387-1394. Ren L H, Zhou Z E, Zhao X Y, et al, 2014. Source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} in urban areas of Chongqing[J]. Res Environ Sci, 27(12): 1387-1394(in Chinese).
- 王莉莉,王跃思,王迎红,等,2010.北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响[J].中国环境科学,30(7):924-930. Wang L L, Wang Y S, Wang Y H, et al, 2010. Relationship between different synoptic weather patterns and concentrations of atmospheric pollutants in Beijing during summer and autumn[J]. China Environ Sci, 30(7): 924-930(in Chinese).
- 王明星,郑循华,2005.大气化学概论[M].北京:气象出版社:1-10. Wang M X, Zheng X H, 2005. Introduction to Atmospheric Chemistry[M]. Beijing: China Meteorological Press: 1-10 (in Chinese).
- 王媛林,王哲,陈学舜,等,2017.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,37(9):3229-3239. Wang Y L, Wang Z, Chen X S, et al, 2017. Impact of typical meteorological conditions on air pollution over Pearl River Delta in autumn[J]. Acta Sci Circumstant, 37(9): 3229-3239(in Chinese).
- 吴序鹏,刘端阳,谢真珍,等,2018.江苏淮安地区大气污染变化特征及其与气象条件的关系[J].气象与环境科学,41(1):31-38. Wu X P, Liu D Y, Xie Z Z, et al, 2018. Change characteristics and relationship with meteorological conditions of atmospheric pollution in Huaian[J]. Meteorol Environ Sci, 41(1): 31-38(in Chinese).
- 杨浩,许冠宇,白永清,等,2018.湖北省近两年冬季月份PM_{2.5}污染天气型特征及其与大尺度环流的相关研究[J].气象,44(11):1454-1463. Yang H, Xu G Y, Bai Y Q, et al, 2018. Study on PM_{2.5} pollution synoptic patterns in Hubei Province and its connection with large scale circulation in winter months[J]. Meteor Mon, 44(11): 1454-1463(in Chinese).
- 杨茜,高阳华,陈贵川,2019.降水对重庆市大气污染物浓度的影响分析[J].气象与环境科学,42(2):68-73. Yang Q, Gao Y H, Chen G C, 2019. Influence analysis of the precipitation on atmospheric pollutant concentration in Chongqing[J]. Meteorol Environ Sci, 42(2): 68-73(in Chinese).
- 杨孝文,周颖,程水源,等,2016.北京冬季一次重污染过程的污染特征及成因分析[J].中国环境科学,36(3):679-686. Yang X W, Zhou Y, Cheng S Y, et al, 2016. Characteristics and formation mechanism of a heavy winter air pollution event in Beijing[J]. China Environ Sci, 36(3): 679-686(in Chinese).
- 叶堤,王飞,陈德蓉,2008.重庆市多年大气混合层厚度变化特征及其对空气质量的影响分析[J].气象与环境学报,24(4):41-44. Ye D, Wang F, Chen D R, 2008. Multi-yearly changes of atmospheric mixed layer thickness and its effect on air quality above Chongqing[J]. J Meteorol Environ, 24(4): 41-44(in Chinese).
- 张浩,石春娥,杨元建,2019.基于东亚冬季风指数的安徽省冬季霾预测研究[J].气象,45(3):407-414. Zhang H, Shi C E, Yang Y J, 2019. Prediction of winter haze days in Anhui Province based on East Asian winter monsoon index[J]. Meteor Mon, 45(3): 407-414(in Chinese).
- 张天宇,张丹,王勇,等,2019.1951—2018年重庆主城区大气自净能力变化特征分析[J].高原气象,38(4):901-910. Zhang T Y, Zhang D, Wang Y, et al, 2019. Analysis of variation characteristics of

- atmospheric self-purification capability in the main urban area of Chongqing from 1951 to 2018[J]. *Plateau Meteorol*, 38(4): 901-910(in Chinese).
- 周国兵, 2018. 空气污染与霾天气-以重庆市主城区为例[M]. 北京: 气象出版社.
- Zhou G B, 2018. Air Pollution and Haze Weather: A Case Study in Chongqing City[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 周国兵, 王式功, 2010. 重庆市主城区空气污染天气特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 19(11): 1345-1349.
- Zhou G B, Wang S G, 2010. Research on weather characteristics of air pollution in Chongqing[J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 19(11): 1345-1349(in Chinese).
- 朱蓉, 张存杰, 梅梅, 2018. 大气自净能力指数的气候特征与应用研究[J]. *中国环境科学*, 38(10): 3601-3610.
- Zhu R, Zhang C J, Mei M, 2018. The climate characteristics of atmospheric self-cleaning ability index and its application in China[J]. *China Environ Sci*, 38(10): 3601-3610(in Chinese).
- DeGaetano A T, Doherty O M, 2004. Temporal, spatial and meteorological variations in hourly $PM_{2.5}$ concentration extremes in New York City[J]. *Atmos Environ*, 38(11): 1547-1558.
- Giorgi F, Meleux F, 2007. Modelling the regional effects of climate change on air quality[J]. *Comptes Rendus Geosci*, 339(11/12): 721-733.
- Pui D Y H, Chen S C, Zuo Z L, 2014. $PM_{2.5}$ in China: measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation[J]. *Particuo-logy*, 13: 1-26.
- Yin Z C, Wang H J, Guo W L, 2015. Climatic change features of fog and haze in winter over North China and Huang-Huai Area[J]. *Sci China Earth Sci*, 58(8): 1370-1376.