

文章编号: 2096-1618(2021)05-0537-08

四川盆地一次人工增雨作业前后 降水和臭氧变化的对比分析

林 丹^{1,2}, 王维佳³, 范思睿^{1,2}, 刘 平^{1,2}

(1. 四川省人工影响天气办公室, 四川 成都 610072; 2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072; 3. 成都市气象局, 四川 成都 611133)

摘要:为对比分析四川盆地2020年5月的一次人工增雨影响的降水过程前后降水和臭氧的变化,基于成都、乐山和眉山站的地面气象台站和环境国控站资料,以及多普勒雷达、FY-4A卫星等数据,研究增雨作业前后各项云物理参数及臭氧浓度的变化特征。结果表明:2020年5月23-24日四川盆地出现一次大范围的积层混合云系降水过程。针对此次降水过程实施了人工增雨地面和飞机的联合作业。作业后雷达回波强度和强回波面积增大,云顶高度升高,云顶温度降低,云粒子有效半径增大,大部分过冷水云发展为混合云并出现少量冰云,催化作业对促进云层发展起到了积极的作用,作业区域普降小到中雨,地面雨量增加,臭氧浓度降低,空气质量转好。

关键词:气象学;人工增雨;臭氧;云粒子;FY-4A

中图分类号:P426.67

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcui.2021.05.011

0 引言

近年来,对抗旱、防雹、生态环境保护、空气质量改善和重大活动气象保障等方面的迫切需求,促进了人工影响天气技术水平的快速提升^[1]。人工影响天气作业主要包括人工增雨和人工防雹,人工增雨(雪)是指对具有人工增雨催化条件的云,采用科学的方法,在适当时机,将适当的催化剂引入云的有效部位,达到人工增加雨(雪)目的的科学技术措施。因此,可以通过地面和飞机人工增雨作业来增加降水,对缓解干旱、水库蓄水和改善空气质量等起到积极作用^[2-3]。随着工业化和城市化水平的快速发展,大气污染日趋严重,而四川盆地处于青藏高原东侧,盆地地形易出现静稳天气,有利于大气污染物堆积,不利于大气污染物的扩散,受到中国空气质量治理的高度关注。目前的大部分研究表明,气象条件对空气质量改善有显著的影响,不利于扩散的气象条件是造成大气污染的关键因素之一^[1-2],其中降水在一定程度上有利于降低大气污染物浓度。栾天等^[4]分析北京地区PM_{2.5}和降水数据发现,降水强度越大,对PM_{2.5}清除效率越高,大雨的清除效果明显高于小雨和中雨。陈漾等^[5]研究发现,广州市臭氧浓度与日

最高气温呈正相关关系,与降水、相对湿度和风速呈负相关关系。邓霞君等^[6]在研究浙江省空气质量中也发现,适量降水和中等风速有利于空气净化,连晴时空气污染加重。李明华等^[7]分析珠江三角洲的臭氧浓度变化特征发现低浓度臭氧大多出现在气温较低、风速较大、云量较多伴有降水的天气。

2020年5月,四川盆地平均气温较常年同期偏高,出现两次较大范围的高温天气,降水偏少,盆地地区旱情持续发展,部分地区达重度干旱,对农业生产和社会生活带来了较大影响。并且,由于受持续高温强辐射天气影响,四川盆地已陆续出现臭氧污染,并逐步形成区域污染,成都平原、川南和川东北区域均出现不同程度污染。5月以来出现的大范围持续干旱和污染天气,导致对人工增雨的需求加大。根据四川省气象台预测,5月23-24日将会出现一次积层混合云系降水过程,本文针对此次降水天气过程,结合人工增雨作业,分析了增雨作业前后各物理特征量和臭氧浓度的变化趋势。

1 污染过程的空气质量概况

在VOCs和NO_x等臭氧前体物排放浓度没有显著变化的情况下,气象条件尤其是日照、气温、云量、风速、降水、相对湿度等成为影响臭氧浓度变化的重要因素。2020年前期,四川省气温较高,降水偏少,干旱情况较严

收稿日期:2020-07-24

基金项目:四川省科技计划资助项目(2019YJ0621);四川省留学回国人员科技活动择优资助项目(2018-72);中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题资助项目(2019Z01602);高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金资助项目(省重点实验室2018-青年-19)

重。5月上中旬全省平均气温21.3℃,较常年同期偏高2.2℃,且出现两次较大范围的高温天气时段,全省大部地区降水偏少,降水较常年偏少0.5~1倍,导致四川盆地干旱持续发展,程度重且覆盖面积广,至5月23日,四川盆地西部、中部、北部大部分地区达到重旱。在高温、低湿、少雨等气象条件和污染物排放的叠加影响下,5月成都平原经济区内的成都、乐山、眉山等市空气

质量超标日数较多,且超标日的首要污染物均为臭氧(图1)。臭氧前体物光化学反应加速,造成臭氧浓度超标,臭氧浓度高于全国主要重点城市,且升幅较大,持续时间较长,同时颗粒物、NO₂浓度也居高不下,呈现典型的复合污染特征。5月23日,白天臭氧小时生成速率约38 μg/m³,浓度超过200 μg/m³持续7 h,夜间23时浓度还保持在100 μg/m³以上。

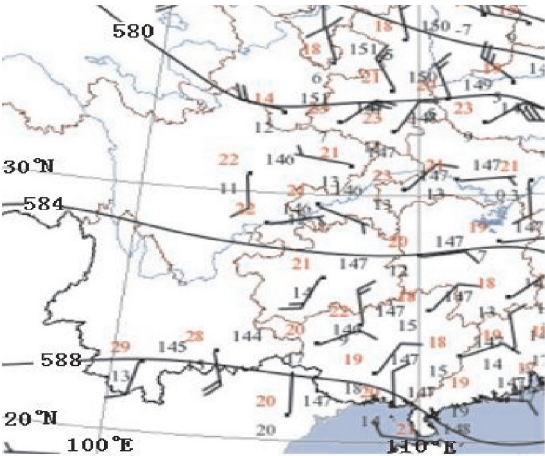


图1 2020年5月眉山、乐山和成都市臭氧日历图

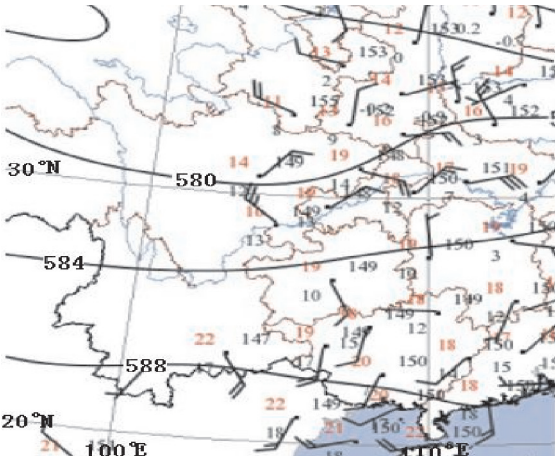
2 污染过程的天气形势和增雨作业情况

2020年5月23-24日,四川盆地出现一次大范围的积层混合云系降水过程。5月23日20时(北京时间)实况资料显示(图2a),500 hPa川西高原有切变线,盆地西部受槽前西南气流影响,700 hPa甘肃南部负变温明显,盆地西部受南风影响,风速较大,对水汽输送有利,850 hPa受偏北风引导地面冷空气南下影响,偏北风风速增强,湿度增大。由云图可以看到,5

月24日凌晨有云系由东向西移动,在移动过程中云系继续发展,并逐渐覆盖四川盆地大部分地区。5月24日08时实况资料显示(图2b),500 hPa盆地受低槽前西南气流影响,700 hPa北风南下至盆地北部,盆地南部有一低压存在,盆地西部为低压前部偏南风,24 h负变温显著,850 hPa盆地西部为偏北冷空气影响,风速较大,湿度条件好。5月24日08时成都温江站探空图显示,整层大气湿度条件较好,湿层深厚,有一定的不稳定能量,0℃、-5℃、-10℃层高度分别为4000 m、5000 m和6500 m。



(a) 2020年5月23日20时天气形势图



(b) 2020年5月24日08时天气形势图

图2 500 hPa高度场和850 hPa风场天气形势图

2020年5月24日,增雨飞机夏延(B-3625)从广汉机场起飞,主要在四川盆地的眉山市、乐山市和成都市实施增雨作业,飞行时间为9:05-12:15,其中播撒时间段为10:05-11:10,播撒作业区域位于29.3°N~

30.3°N,103°E~104°E,播撒区域温度约-8℃,高空风向为西南风,飞行高度约6000 m,采用20根碘化银烟条做为播云催化剂(图3)。5月24日,成都市的龙泉、双流、蒲江和邛崃等地,以及乐山市的沐川和井

研等地先后开展7次地面人工增雨作业,共消耗火箭弹30发、高炮20发,成都市有5个作业站点开展地面人工增雨作业,作业时间主要集中在24日凌晨,乐山市有2个作业点开展地面人工增雨作业,作业时间在24日早晨和下午(表1)。

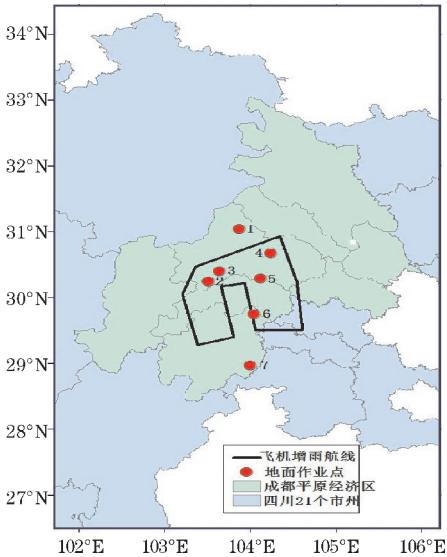


图3 飞行增雨航线和地面作业点

表1 地面作业信息表

编号	地点	作业时间	工具	用弹量/发
1	彭州	01:14	火箭	4
2	蒲江	02:50	火箭	4
3	邛崃	02:50	高炮	10
4	龙泉	03:23	高炮	10
5	双流	03:23	火箭	4
6	井研	08:38	火箭	8
7	沐川	16:48	火箭	10

3 增雨效果和臭氧变化

3.1 地面作业

结合飞机增雨作业和降水云系的发生发展,以及催化作业时作业点方位角和仰角的合理性,重点分析凌晨和早晨(表1编号2~4,6)的地面增雨作业。崔丹等^[8]对地面人工增雨作业进行物理统计分析后得到,催化一般在作业后半小时内起到效果并达到最强。国内外也有不少研究表明,在作业后1 h内,播云所致的云中固相、液相粒子在数量组成、尺度大小方面都有显著的变化^[9-10]。目前人工影响天气地面作业最常用的是雷达数据,尤其是反射率因子产品,回波增长是云层发展的一个重要特征^[11]。因此,选取成都和乐山的

多普勒雷达6 min一次的体扫数据和二次产品,分析作业后1 h内物理参数的变化特征,同时选取作业影响范围内的区域自动站分钟降水量数据,累计计算出每隔10 min的平均雨量和累计雨量,可以直观看出雨量的变化趋势,检验催化效果^[10]。

从02:45的雷达回波图(图4)可以看到,邛崃和蒲江地区已有大片雷达回波生成,回波中心最大强度可达45 dBZ,02:50两地开始地面作业,此时雷达回波持续发展,回波强度平均值随时间增大,大部分雷达回波在25~35 dBZ,45 dBZ的回波面积增加,具备大面积降水的回波特征,大片混合性降水回波中有强回波团块。作业20 min后,至03:00回波仍呈现持续发展的状态,作业30 min后,至03:19强回波略微减弱,但回波面积持续增加,尤其30~40 dBZ的回波面积增加明显。地面雨量与雷达回波匹配较好,整个降水过程作业区域的雷达回波较强,对应的地面雨量也较大,2:40~2:50已有降水产生,平均雨量达到3 mm,作业后2:50~3:00,雨量增长明显,平均雨量达到6 mm,累计雨量达到16 mm,随后雨量开始减少,平均雨量维持在3 mm。

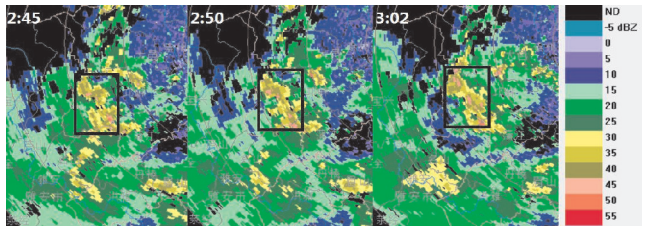


图4 成都站雷达回波(邛崃和蒲江地区)

从03:24的雷达回波图(图5)可以看到,作业时龙泉地区的雷达回波较邛崃和蒲江地区覆盖面积较小,大部分雷达回波强度在20~35 dBZ,最大回波可达40 dBZ,此时地面雨量也相对较小,平均雨量低于0.5 mm。作业后10 min内,雷达回波有明显改变,大部分区域的回波强度达到30 dBZ以上,强回波面积覆盖面增加,随后回波持续发展,平均雨量超过0.6 mm,累计雨量达到2 mm。作业20 min后,3:42的雷达回波显示中心强度30 dBZ,大部分回波强度降到15~20 dBZ,此时地面雨量也开始减弱。

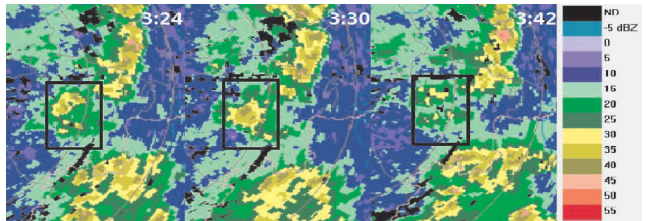


图5 成都站雷达回波(龙泉地区)

从08:38的雷达回波图(图6)可以看到,作业时乐山井研地区已有大片雷达回波生成,回波强度普遍已达到30 dBZ以上,对应的地面累计雨量也已达3 mm。作业后20 min内,雷达回波强度变化不大,大面积回波强度维持在30~35 dBZ,呈现稳定持续的降水状态,地面累计雨量在8:50~9:00达到最大值,超过7 mm。至9:05,雷达回波开始消散,对应的地面雨量也明显减少。从成都和乐山的地面人工增雨作业来看,雷达回波强度和强回波面积在催化作业后增大明显,且约在30 min内达到最强,催化作业对促进云层发展起到积极作用,

地面雨量增加明显,作业区域普降小到中雨。

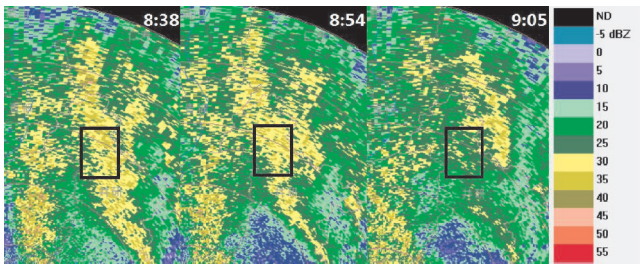


图6 乐山站雷达回波(井研地区)

以上3地区10 min平均雨量和累计雨量见图7。

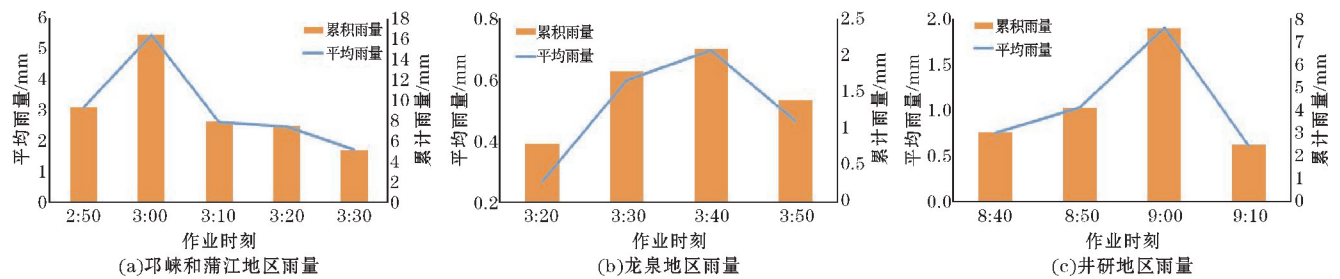


图7 10 min 平均雨量和累计雨量

3.2 飞机作业

在进行飞机播撒作业效果分析时,将10:00~11:00认定为作业时,11:00~13:00认定位为作业后2 h。从作业后11:30~13:00的云图发现,云团随时间移动缓慢,作业后2 h内云团移动范围较小。在高空风的作用下,考虑到扩散影响,结合飞行记录的高空风速和风向,催化剂会随云团以约50 km/h(0.45°/h)的速度向东北方向移动,作业后2 h内云团移动的经向和纬向距离约0.6°,因此选取作业区域29.3°N~30.9°N,103°E~104.6°E进行播撒作业后分析。

卫星反演的宏观云特征参数包括云顶高度、云顶温度和云过冷层厚度,云顶高度和云顶温度有助于了解云系的发展程度和演变趋势,研究表明,降水过程中云参数的分布有明显变化趋势^[12-16]。图8(a)、(b)分

别为10:00,12:00和13:00FY-4A卫星反演的云顶高度和云顶温度,从10:00的云顶高度和云顶温度可知,作业区域云顶高度约6000~11000 m,云顶温度约-5℃~-25℃,云层属于混合云系,液态水滴、过冷却水滴和冰晶共存,但由于云顶温度还不够低,冰晶比较缺乏。云顶温度是增雨作业的重要条件之一,作业区域符合冷云增雨的有效催化温度范围(-10℃~-24℃),且云中缺少冰晶,可以通过播撒催化剂,弥补冰晶数的不足,具有可播性。从12:00和13:00的云顶高度和云顶温度可知,作业后2 h内,作业区域大部分云层的云顶温度在13:00降到-20℃~-30℃,最低可达-40℃,云顶高度上升到8000~12000 m,云层加厚,云顶温度明显降低,云顶高度明显升高,云层持续发展。

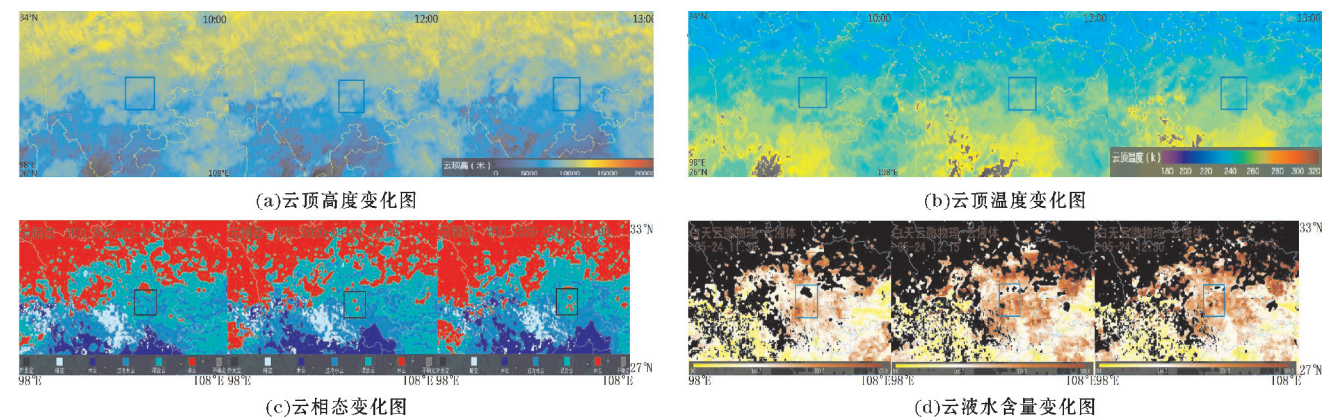


图8 云特征参数变化图

云相态、云液态水含量和云粒子有效半径是重要的云微物理参数,可以表征云内发展变化特征,在降水过程的分析中起着重要作用。图8(c)分别为11:38,12:38和13:00FY-4A卫星反演的云相态,11:38作业区域覆盖大量的过冷水云和混合云,12:38大部分过冷水云发展为混合云并出现少量冰云,至13:00,冰云持续发展,作业区域主要覆盖混合云和冰云。图8(d)分别为11:38,12:15和12:30FY-4A卫星反演的云液水含量,作业后2 h内,作业区域内液水含量色调逐渐加深,液水含量随时间有明显的增加趋势,部分地区液水含量已超过 300 g/m^2 ,13:00以后液水含量呈现减少趋势。结合云顶高度和云顶温度的变化特征,飞机播撒作业向云中引入冰晶,加快冰水转化速度,促使作业区域云层在播撒后的2 h内不断发展,冰粒子不断长大,部分云层的云顶温度持续降低并发展为冰云。

统计作业区域内区域站的逐小时平均雨量和累计雨量(图9),作业前9:00作业区域内已有降水形成,随后地面雨量逐渐增加,雨量的峰值区在11:00–12:00,平均雨量超过 2 mm ,累计雨量接近 800 mm ,12:00后地面雨量逐渐减少,13:00的平均雨量与作业前9:00雨量相当,累计雨量高于作业前9:00雨量,至14:00地面雨量降到最低值。与卫星参数进行比较,两者变化趋势一致,作业后2 h内云层呈现出持续发展的状态,对应的地面雨量持续增加,云层发展至13:00以后,云液水含量开始减少,对应地面雨量也呈现减少趋势。

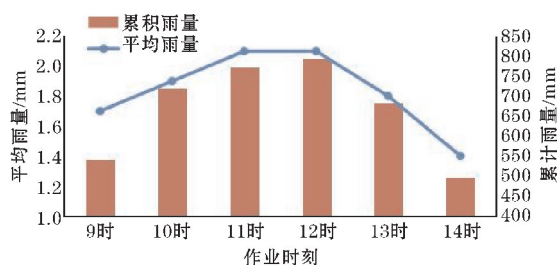


图9 逐小时平均雨量和累计雨量

为更直观的看出播撒作业后云参数的变化特征,对作业区域和区域内单点进行移动分析,作业区域位为成都市、眉山市和乐山市($29.3^{\circ}\text{N} \sim 30.3^{\circ}\text{N}$, $103^{\circ}\text{E} \sim 104^{\circ}\text{E}$),单点分别选取作业区域中位于成都市(104.2°E , 30.3°N)、眉山市(103.8°E , 30.1°N)和乐山市(104.0°E , 29.6°N),以约 50 km/h ($0.45^{\circ}/\text{h}$)的速度向东北方向移动作业区域和单点。

图10为云顶高度和云顶温度的单点时间演变图,从图中可知,作业时的成都市云顶高度最高、云顶温度最低,云顶高度已经达到 7500 m ,云顶温度低于

-15°C ,乐山市的云顶高度略低、云顶温度略高,云顶高度约 6500 m ,云顶温度约 -10°C 。根据飞行记录表显示,飞行作业高度约 6000 m ,作业层温度约 -8°C ,与单点云参数数值相符,且碘化银烟条至少要低于 -4°C 才会起到催化作用,此时的作业层温度适合进行播撒作业。作业后3个点的云参数均有明显的变化特征,伴随着云层的发展,云参数持续增长,尤其是作业后1 h,云参数变化趋势显著,成都、眉山、乐山的云顶高度上升约 1000 m ,云顶高度降低约 -7°C 。作业后3 h,成都的云顶高度升高至 9000 m ,眉山的云顶高度升至 8200 m ,C点的云顶高度升至 8400 m ,云顶温度显著降低,乐山的云顶温度降低至 -24°C ,眉山、乐山的云顶温度降低至 -20°C 。

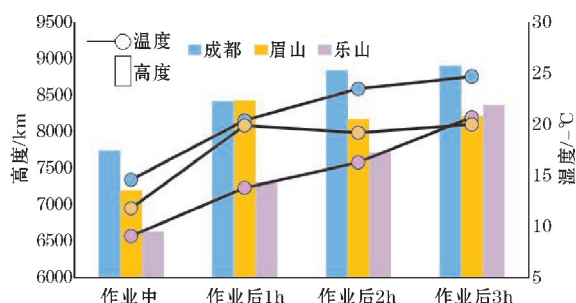


图10 单点云顶高度和云顶温度的时间演变图

云粒子有效半径可用于进行云中平均粒子大小的判断,随着云层的发展演变,云粒子有效半径会随高度(温度)而变化,分析云粒子有效半径的变化特征,可以了解云结构的改变,图11为经过移动后的作业区域云粒子有效半径与温度的廓线图。从地面雨量可知,在播撒作业时,作业区域已产生降水,10:00廓线图显示此时降水主要为稳定的中低层降水过程,云粒子主要通过凝结过程长大,当云粒子半径达到 $15\text{ }\mu\text{m}$ 及以上时,就会产生水滴降落到地面,形成降水。结合云相态分析,作业时作业区域分布较多的过冷水云,过冷水较丰富,为降水粒子生长提供了有利条件。作业时作业区域无冰云分布,当温度低于 -10°C 后,大部分云粒子半径低于 $15\text{ }\mu\text{m}$,高层冰粒子较少,缺少冰晶。作业后云粒子有效半径在12:00开始有明显增大,高层云粒子有效半径最大可达 $28 \sim 30\text{ }\mu\text{m}$,低层云粒子有效半径大于 $12\text{ }\mu\text{m}$,至14:00云粒子有效半径基本维持在 $12 \sim 28\text{ }\mu\text{m}$ 。结合云相态和云液态水含量分析,作业后区域内分布着大量混合云和少量冰云,高层为低层提供了冰粒子,低层含有丰富过冷水,利于掉落下来的大粒子增长,产生了较大的降水,但随着时间推移,13:00以后液水含量呈现减少趋势,云滴增长环境减弱,对应地面降水在13:00以后开始逐渐减少。

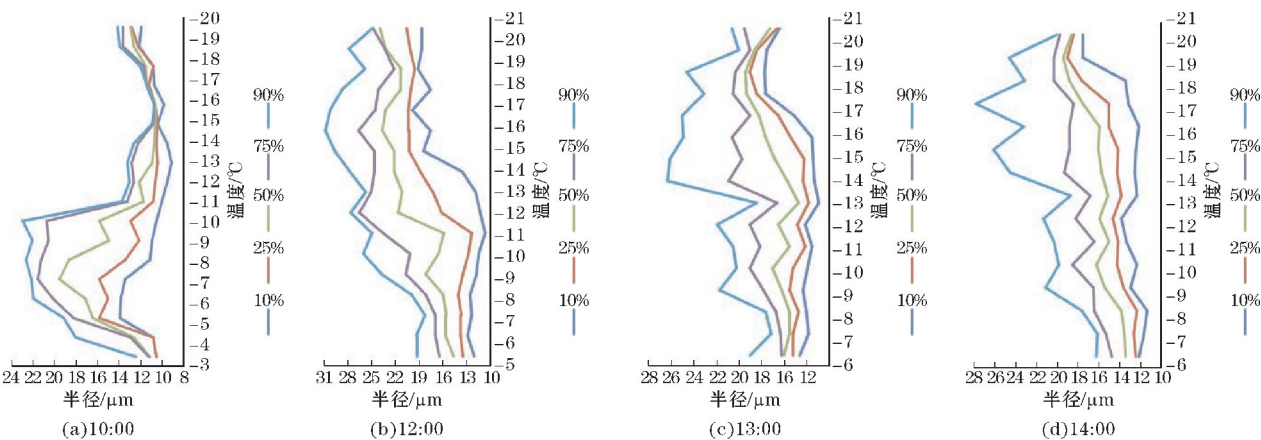


图 11 不同时间作业区域云粒子有效半径与温度的廓线图

3.3 臭氧浓度

国内外研究已表明,一般情况下臭氧浓度与气温、日照时数等呈正相关关系,与降水、风速等呈负相关关系^[17-22]。为分析降雨过程前后臭氧的浓度变化特征,选取成都、乐山和眉山的臭氧监测数据,数据来源于中国城市空气质量实时发布平台,计算得到2020年5月18-25日的臭氧随时间变化的曲线图(图12)。气象要素数据来源于地面观测站,选取成都温江站、眉山站和乐山站的风速、温度和雨量数据,数据起止时间与臭

氧数据一致。从风速上来看,5月18-25日,成都、眉山和乐山地区风速且变化均较小,大部分风速低于2 m/s,在5月24降雨过程中,平均风速约1.5~2.5 m/s。5月18-20日,气温普遍较高,最高温度超过35℃,5月20-21日,气温开始降低,维持在20℃~25℃,地面出现降水,成都和眉山雨量较大,雨量峰值区对应温度低值区。23日开始气温开始逐渐升高,至18时气温升到峰值,超过30℃,随后气温又逐渐降低,并一直维持在20℃左右,并伴随地面出现降水,此次降雨过程从24日凌晨持续到25日中午结束。

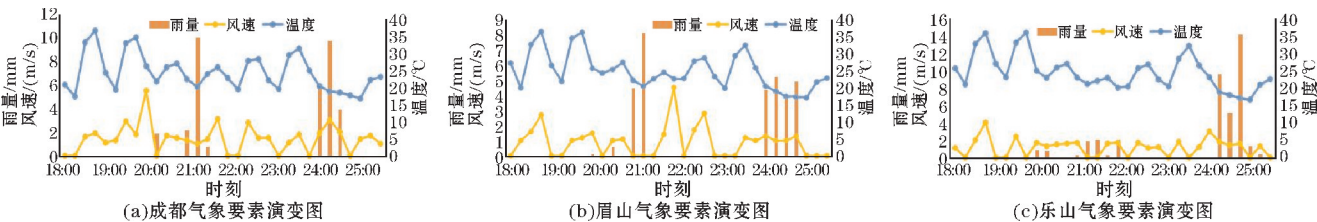


图 12 5月18日至25日气象要素随时间变化曲线图

目前,中国《环境空气质量标准》中8 h臭氧平均浓度的二级标准限值为160 μg/m³,与世卫组织标准限值一致,与美国0.07 ppm(约150 μg/m³)较为接近,已与国际接轨,1 h臭氧平均浓度的二级标准限值为200 μg/m³。图13中显示5月18-20日成都、乐山和眉山的臭氧均维持在较高浓度,最高超过200 μg/m³,乐山臭氧浓度峰值达250 μg/m³,与气象要素比较,此阶段正好对应了较高的气温。5月20-22日臭氧浓度降低,维持在50~150 μg/m³,地面出现连续降水,雨量最高可达10 mm。5月23日臭氧浓度显著增加,成

都增加幅度最大,峰值超过250 μg/m³,乐山和眉山臭氧浓度达到200 μg/m³,伴随着气温的逐渐升高。直至24日,降雨过程出现,臭氧浓度显著减少,成都由280 μg/m³降至70 μg/m³,乐山由205 μg/m³降至27 μg/m³,眉山由198 μg/m³降至5 μg/m³,随后臭氧浓度基本维持在100 μg/m³以下,空气质量明显好转。从以上分析可知,此次降雨过程中成都、乐山和眉山地区的臭氧变化与温度、降水关系密切,风速的影响较小,降雨过程出现后,伴随地面雨量增加和气温降低,臭氧浓度降低。

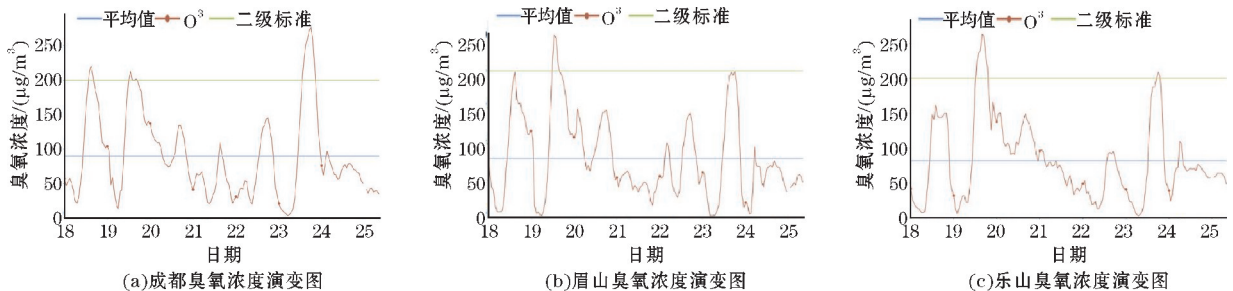


图 13 2020年5月18-25日臭氧浓度随时间变化曲线图

4 结束语

2020年4月底开始,受持续高温强辐射天气影响,四川盆地已陆续出现臭氧污染,并逐步形成区域污染,在高温、低湿、少雨等气象条件和污染物排放的叠加影响下,5月成都平原经济区内的成都、乐山、眉山等市空气质量超标日数较多,且超标日的首要污染物均为臭氧。5月24日凌晨有云系由东向西移动,在移动过程中云系继续发展,并逐渐覆盖四川盆地大部分地区。针对此次降水过程,成都和乐山先后开展了地面人工增雨作业,并在眉山、乐山和成都实施飞机人工增雨作业。

从地面增雨作业来看,作业时成都和乐山地区已有雷达回波生成,雷达回波强度和强回波面积在催化作业后均增大明显,大部分区域的回波强度达到30 dBZ以上,成都地区雷达回波中心最大强度可达45 dBZ,回波强度约在30 min内达到最强,催化作业对促进云层发展起到了积极的作用。地面雨量与雷达回波匹配较好,整个降水过程作业区域的雷达回波较强的时候对应的地面雨量也较大,地面雨量在催化作业后增加明显。

从飞机增雨作业来看,催化作业后2 h内,作业区域大部分云层的云顶温度明显降低,最低可达 -40°C ,云顶高度明显上升,最高可达12000 m,云层持续加厚。催化作业向云中引入了冰晶,加快了冰水转化速度,促使了作业区域云层在播撒后不断发展,冰粒子不断长大,部分云层的云顶温度持续降低并发展为冰云,高层为低层提供了冰粒子,低层含有丰富过冷水,利于掉落下来的大粒子增长,产生了较大的降水。

从臭氧浓度的变化来看,此次降雨过程前后,成都、乐山和眉山地区的臭氧变化与气温、降水关系密切,风速的影响较小。5月23日,伴随着气温的逐渐升高,臭氧浓度增加,成都市臭氧浓度峰值超过 $250\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,从24日凌晨起,伴随地面雨量增加和气温降低,臭氧浓度显著降低。

参考文献:

- [1] 郭学良,方春刚,卢广献,等. 2008–2018年我国人工影响天气技术及应用进展[J]. 应用气象学报,2019,30(6):641–650.
- [2] 朱士超,郭学良. 华北积层混合云中冰晶形状、分布与增长过程的飞机探测研究[J]. 气象学报,2014,72(2):366–389.
- [3] 孙海燕,谷笑楠,王旗,等. 吉林省一次飞机增雨过程方案设计及效果分析[J]. 气象科技进展,2019,9(6):104–109.
- [4] 栾天,郭学良,张天航,等. 不同降水强度对PM_{2.5}的清除作用及影响因素[J]. 应用气象学报,2019,30(3):279–291.
- [5] 陈漾,张金谱,黄祖照. 广州市近地面臭氧时空变化及其与气象因子的关系[J]. 中国环境监测,2017,33(4):99–109.
- [6] 陈超,林旭,叶辉,等. 杭州市臭氧污染特征及过程分析[J]. 中国环境监测,2019,35(3):73–81.
- [7] 李明华,甘泉,曹静,等. 惠州市臭氧污染特征及其与气象条件关系研究[J]. 热带气象学报,2019,35(3):324–331.
- [8] 崔丹,黄彦彬,肖辉,等. 多普勒雷达数据在海南省人工增雨效果评估中的应用[J]. 大气科学学报,2012,35(1):87–94.
- [9] 李红斌,何玉科,周德平,等. 多普勒雷达数值产品在火箭增雨效果分析中的应用[J]. 气象科技,2007,35(2):269–273.
- [10] 唐仁茂,向玉春,叶建元,等. 多种探测资料在人工增雨作业效果物理检验中的应用[J]. 气象,2009,35(8):70–75.
- [11] 王丽荣,汤达章,郭彦波,等. 多普勒雷达在对流云火箭增雨作业中的应用[J]. 气象科技,2005,33(增刊):47–52.
- [12] 周毓荃,蔡森,欧建军,等. 云特征参数与降水相关性的研究[J]. 大气科学学报,2011,34(6):641–652.
- [13] 陈英英,唐仁茂,周毓荃,等. FY-2C/D卫星微物理特征参数产品在地面降水分析中的应用[J]. 气象,2009,35(2):15–18.
- [14] 彭亮,姚展予,戴进,等. 河南春季一次云降水过程的宏微观物理特征分析[J]. 气象,2007,33(5):3–11.
- [15] 邓军英,丁明月,王文彩,等. 冰云粒子微物理属性在一次强降雨过程中的垂直分布[J]. 干旱区地理,2016,39(1):590–599.
- [16] 王磊,周毓荃,蔡森,等. 华北云特征参数与降水相关性的研究[J]. 气象与环境科学,2019,42(3):9–16.
- [17] 耿福海,刘琼,陈勇航. 近地面臭氧研究进展[J]. 沙漠与绿洲气象,2012,6(6):8–14.
- [18] 王淑云,节江涛,熊险平,等. 城市空气质量与气象条件的关系及空气质量预报系统[J]. 气

象科技,2006,34(6):688-692.

[19] 黄小刚,邵天杰,赵景波,等. 长三角城市群臭氧浓度的时空分异及驱动因素[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(6):1434-1445.

[20] 黄小刚,邵天杰,赵景波,等. 气象因素和前体物对中国东部 O₃ 浓度分布的影响[J]. 中国环境科学,2019,39(6):2273-2282.

[21] 常美玉,向卫国. 川西地区空气污染特征及气象影响因素分析[J]. 成都信息工程大学学报,2019(1):92-99.

[22] 潘文琪,肖国杰,孟林夕,等. 杭州市臭氧污染特征及其气象成因分析[J]. 成都信息工程大学学报,2019(6):664-670.

Comparative Analysis of Changes in Precipitation and Ozone before and after an Artificial Precipitation Enhancement Operation in Sichuan Basin

LIN Dan^{1,2}, WANG Weijia³, FAN Sirui^{1,2}, LIU Ping^{1,2}

(1. Weather Modification Office of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 3. Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu 611133, China)

Abstract: In order to compare and analyze the variations in precipitation and ozone before and after a precipitation process impacted by cloud seeding in Sichuan Basin on May 2020, based on the ground meteorological and environmental observation data from Chengdu, Leshan and Meishan, and the data from the Doppler radar and FY-4A satellite, the variations of various cloud microphysical parameters and ozone concentration before and after the precipitation enhancement operations were studied. The results show that a large scale precipitation process of cumulus mixed cloud system occurred in Sichuan Basin from May 23 to 24. For this precipitation process, a joint operation of artificial ground and airborne precipitation enhancement was implemented. After the operation, the radar echo intensity and strong echo area increased, the cloud top height increased, the cloud top temperature decreased, the cloud particle radius increased, and most of the super-cooled water clouds developed into mixed clouds and a few ice clouds. Catalytic operations of cloud seeding played a positive role in promoting the development of clouds, and the operation area was covered with light to moderate rain. After the occurrence of rainfall, with the increase of surface rainfall and the decrease of air temperature, ozone concentration decreased, and air quality improves.

Keywords: meteorology; precipitation enhancement; Ozone; cloud particles; FY-4A