

李红斌,傅瑜,张靖萱,等,2018.一次大气污染过程的降水天气特征及相关分析[J].气象,44(5):655-664.

一次大气污染过程的降水天气特征 及相关分析*

李红斌¹ 傅瑜¹ 张靖萱² 何阳¹ 濮文耀¹
夏葳¹ 赵繁盛¹ 周德平³ 张殿刚¹

1 大连市人工影响天气办公室,大连 116001

2 沈阳市气象服务中心,沈阳 110168

3 中国气象局沈阳大气环境研究所,沈阳 110016

提 要: 本文分析了大连市2015年11月16日一次污染过程的降水(降水量为5 mm)天气特征及NCEP/NCAR再分析资料,结果表明,天气形势场为典型的大连秋、冬季的高空槽降水,而大气层结无论是在污染前期,还是污染后期的降水阶段均为稳定层结,有逆温层存在;空气上升运动于降水前持续了较长时间(近十几小时),表明近地面细颗粒物(PM_{2.5})随着上升气流会源源不断输送到高空,其中部分颗粒物转化为云中冰核,补充了降雨云中冰核数;同时,对本次污染降水过程及大连近两年秋、冬季另外三次小雨(降水量<5 mm)降水过程的云中液态水含量、地面降水量和PM_{2.5}的小时观测值及其变化进行了详细讨论和分析发现,当PM_{2.5}浓度较低时,降雨云中的冰核数缺乏,地面降水较小,适合实施人工增雨(雪)作业,增加云中冰核及地面降水,当PM_{2.5}浓度较高,特别是出现大气污染时,降雨云中的冰核数会相对增加(甚至过量),地面降水较充分(或出现消减雨情况),此时人工影响作业应根据实际情况减小作业剂量,或减少作业。此外,相关综合分析表明,大连市大气污染源有两种,一为本地源,二为外来源;一定程度的降水对本地源大气污染能起到沉降作用,对外来源不明显。

关键词: 大气污染降水过程,天气特征,细颗粒物(PM_{2.5})浓度与降水相关分析

中图分类号: P458.X16

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.05.006

Precipitation Characteristics and Correlation Analysis During an Air Pollution Episode

LI Hongbin¹ FU Yu¹ ZHANG Jingxuan² HE Yang¹ PU Wenyao¹ XIA Wei¹
ZHAO Fansheng¹ ZHOU Deping³ ZHANG Diangang¹

1 Dalian Weather Modification Office, Dalian 116001

2 Shenyang Meteorological Service Center, Shenyang 110168

3 Shenyang Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110016

Abstract: Precipitation (5 mm) characteristics and NCEP/NCAR reanalysis data of a pollution process in Dalian on 16 November 2015 were analyzed. The results showed that the synoptic situation was the typical high-level trough before the precipitation in Dalian in autumn and winter. The atmospheric stratifications were stable with inversion layers during the early stage of pollution and the late stage of precipitation. There was ascending motion before the precipitation for more than 10 hours, which means the fine particles (PM_{2.5}) around the surface could be transported into the upper air continually with the rising air, and part of the particles would transform into ice nuclei as supplement of ice nucleus in the precipitating cloud.

* 国家自然科学基金项目(41440036)资助

2017年3月8日收稿; 2018年1月19日收修定稿

第一作者:李红斌,主要从事人工影响天气研究. Email: lhb7159@163.com

In addition, three more processes of precipitation (<5 mm) in Dalian in autumn and winter during 2015—2016 were analyzed. Cloud liquid water content, amount of precipitation and concentration of fine particles ($PM_{2.5}$) were discussed in detail. The results showed that there are less ice nuclei leading to smaller rainfall with low concentration of $PM_{2.5}$, which is suitable for artificial precipitation operation to increase the ice nuclei in clouds and the surface precipitation. Otherwise, there are more or overdosed ice nuclei leading to sufficient precipitation or lower precipitation with high concentration of $PM_{2.5}$, especially during the air pollution episode. In such cases during artificial precipitation operation working dose or times should be reduced according to the actual situation. Comprehensive analysis also showed that there are two kinds of pollution sources in Dalian. One is local source, and the other is external source. A certain amount of precipitation could reduce pollution through wet deposition by local source, with no obvious effect by external source.

Key words: precipitation during air pollution episode, weather characteristic, correlation analysis of $PM_{2.5}$ concentration and precipitation

引 言

冰晶在促进云的冰相形成和降水过程中起着重要作用,而云中冰晶的多少与一定条件下增长成冰晶的冰核浓度密切相关。冰核数量影响冷云降水过程,目前的人工增雨作业正是建立在云中是否缺乏冰核的理论基础之上,因此,对大气冰核的观测和分析研究引起了各国科学家的重视。早期的研究曾揭示出一些人类活动排放大气冰核的观测结果,以及局地冰核源对其附近降水分布产生影响(Bigg, 1960; Perez et al, 1985; Warner, 1968)。我国在 20 世纪 60 年代开始就已经陆续开展了大气冰核的观测和研究,取得了一些有益的成果(鄂大雄等, 1994; 汪学林等, 1965; 牛生杰等, 2000; 游来光等, 2002; 石爱丽等, 2006; 周德平等, 2012; 杨磊等, 2013; 刘香娥等, 2016), 结果表明, 风沙过程的自然飘尘和人类活动排放的气溶胶粒子是冰核的主要来源。鄂大雄等(1994)研究认为黄土高原是大气冰核的主要源地; 60—90 年代, 游来光和石安英(1964)研究发现, 在城市污染情况下比在风沙情况下冰核浓度更高, 并对 1963 年北京冰核观测分析发现, 在明显的城市污染条件($-20^{\circ}C$)下平均冰核浓度为 13.1 个 $\cdot L^{-1}$, 极端值达 27 个 $\cdot L^{-1}$, 而对 30 年后的 1995 和 1996 年北京对比观测发现冰核浓度平均增加 15 倍, 表明伴随社会发展, 人类活动导致大气冰核源有显著增强。因此, 近年来我国许多地区频繁出现持续和严重的大气污染过程, 各地相继开展了大气污染过程

的天气条件分析, 以获取污染天气预报分析依据, 取得了一些初步成果(刘爱军等, 2004; 吴兑等, 2006; 饶晓琴等, 2008; 范新强和孙照渤, 2009; 吕翔等, 2015; 花丛等, 2016; 郭蕊等, 2016), 但对大气污染降水过程的天气特征和气象要素分析很少, 特别是结合云中液态水含量、地面降水量以及近地面大气细颗粒物($PM_{2.5}$)的浓度综合分析研究还未曾见。

近几年来, 大连市城市污染时有发生, 由于目前还没有云中冰核数浓度观测设备, 为了有效开展大气污染条件下的人工增雨(雪)作业, 之前曾用数值模式模拟了大连市秋、冬季大气颗粒物浓度的时空分布特征等(李红斌等, 2017)。在此基础上, 本文采用天气资料、NCEP/NCAR 再分析资料和最新引进应用的微波辐射计探测资料(周秀骥, 1982; 游来光, 1994; 段英和吴志会, 1999; 魏重等, 2001; 王黎俊等, 2007)、地面降水量资料, 以及近地面 $PM_{2.5}$ 等观测数据资料, 对大连市 2015—2016 年秋、冬季出现的 1 次大气污染降水过程(降水量为 5 mm)和 3 次无污染降水过程(降水量 <5 mm)的相关要素资料进行了统计和综合分析, 研究了近地面 $PM_{2.5}$ 浓度及其变化对降雨云中冰核数和地面降水影响的关系, 初步得到了一些对人工增雨(雪)作业有指示意义的结果。

1 大气污染过程的降水天气形势及层结分析

结合近两年大连市秋、冬季频繁出现的大气污

染天气过程,选取了 2015 年 11 月 15—16 日一次大气污染过程中产生的小雨降水天气过程,对其进行了天气形势场和大气层结等相关气象要素的观测分析,得到了一些有意义的结果。

1.1 天气形势分析

大连市此次大气污染过程从 2015 年 11 月 15 日开始持续到 16 日中午降水结束之后。其中,降水时段发生在 16 日 06—11 时。15 日凌晨大连市出现了轻度大气污染,从 08 时高空 500 hPa 图(图 1a)看到,大连地区上空为较平直的东西气流,对应地面天气图(图 1b)为明显的均压场特征,风速较小,表明此次大气污染源为本地源(见 2.2 节)。15 日,大气污染曾一度达到重度污染(17 时 PM_{2.5} 浓度达 197 μg · m⁻³),16 日上午出现降水时,从 08 时 500 hPa 图(图 2a)看到,大连正处于高空槽前上升气流区,对应地面天气图(略)由均压场变为低压场

控制,表明大连市高层、低层均在上升气流场控制下,十分有利于近地面大气细颗粒物向高空的输送(见 2.1 节)。

1.2 大气层结稳定度分析

从 2015 年 11 月 15 日 08 时和 16 日 08 时探空资料 $T-\ln p$ 图(图 1c 和图 2b)看到,从 15 日凌晨大气污染开始到 16 日早上的降水过程,大气层结均表现为稳定层结,均有逆温层存在,表明此次大气污染中的降水为稳定性降水过程,符合大连市秋、冬季稳定性降水特征。由此可见,在大气稳定层结条件下,产生降水条件的天气形势场(高空槽前和地面低压带)存在着一定时间、空间尺度的上升运动,使近地面一定数量的大气细颗粒物被输送至高空,并部分转化为云中冰核,直接影响地面降水,同游来光等(2002)研究的“污染型大气冰核浓度高值区常对应污染严重的地面低压带”的结论相一致。

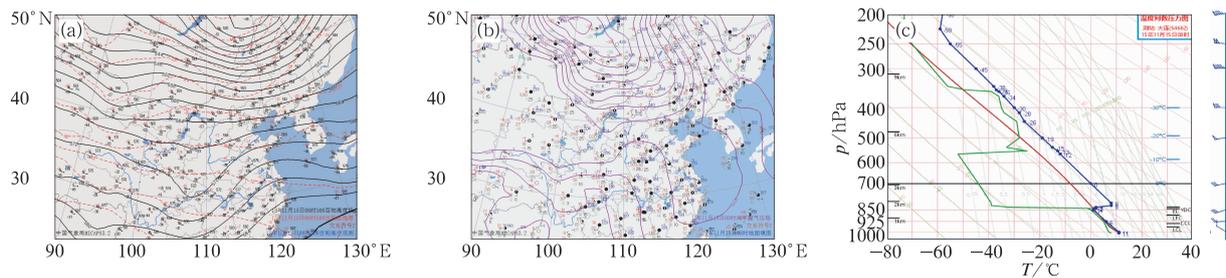


图 1 2015 年 11 月 15 日 08 时 500 hPa 高空图(a)、地面图(b)、 $T-\ln p$ 图(c)
Fig. 1 High-level chart at 500 hPa (a), synoptic chart (b), and $T-\ln p$ chart (c)
at 08:00 BT 15 November 2015

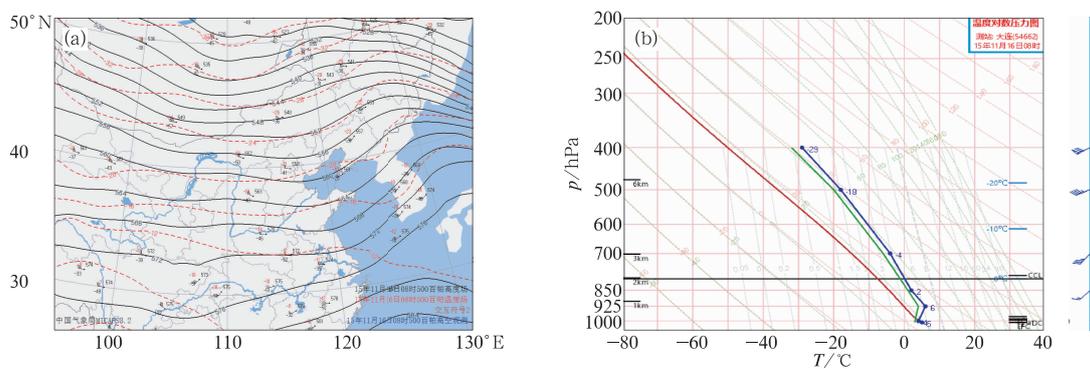


图 2 2015 年 11 月 16 日 08 时 500 hPa 高空图(a)和 $T-\ln p$ 图(b)
Fig. 2 High-level chart at 500 hPa (a) and $T-\ln p$ chart (b)
at 08:00 BT 16 November 2015

2 风场对细颗粒物($PM_{2.5}$)分布影响分析

2.1 垂直运动对 $PM_{2.5}$ 空间分布的影响

本文选用每日4次、空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR)再分析资料(采用当今先进的全球资料同化系统和完善的数据库,对各种卫星、飞机、测风气球、船舶、地面等观测资料进行质量控制和同化处理得到的再分析资料)中的垂直风资料,对大连地区上空垂直风时空分布及变化进行了分析。其具体方法:根据大连市气象站经纬度($38.9^\circ N, 121.6^\circ E$),选取NCEP/NCAR数据中大连站周围四个格点($2.5^\circ \times 2.5^\circ$)数据进行插值,求得降水过程前后大连本站上空的近似垂直风分布。

图3a为2015年11月16日降水过程前后大连市本站上空的垂直风时空变化情况,可以看到,在大气污染过程产生降水的前一日,即15日14时就已出现明显的上升运动,且上升速度随时间逐渐增大,在16日06时降水前的3~4h达最大,且最大速度出现在高层。可见降雨前较长时间的垂直上升运动有利于近地面 $PM_{2.5}$ 向高空的输送和扩散;当出现降水后,上升运动逐渐减弱,到降水后期的09—10时,垂直运动转为弱的下沉运动,与后期充分降水有关(见第三节详细论述)。

对2016年11月30日另一次降水过程(降水后

期出现大气轻度污染)的垂直运动时空分布(图3b)分析发现,降水前也出现了较长时间的上升运动。可见降水前及降水过程中长时间持续的上升运动对近地面 $PM_{2.5}$ 向高空降雨云中输送和扩散起到重要作用,并使其中的一部分 $PM_{2.5}$ 转化为云中冰核,从而补充云中冰核不足,增加(或冰核过量消减)地面降水。

2.2 水平运动对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响

利用大连市气象站($38^\circ 54' N, 121^\circ 38' E$,海拔91.5 m)测得的10 m水平风速资料分析发现,2015年11月16日大气污染降水过程的近地面风速较小,平均小时风速为 $2.4 m \cdot s^{-1}$,表明此次大气污染过程受本地源影响产生。这一点结合2015年11月16日05时(降雨前)和09时(降雨中)的全国 $PM_{2.5}$ 实时分布图(图4, <https://www.aqistudy.cn/>)也可以看到,本次污染降水过程中大连市的 $PM_{2.5}$ 浓度升高与本地源排放密切相关,外来影响很小。

另外3次的降水过程,第二、三次过程的 $PM_{2.5}$ 浓度较低,在此不作详细分析。

第四次降水过程,大连市高空受偏西气流影响,近地面受西南风影响。在降水过程中,大连市近地面的小时平均风速为 $2.6 m \cdot s^{-1}$,后期增强,达到 $4 m \cdot s^{-1}$;大连市近地面 $PM_{2.5}$ 浓度在降水后期逐渐增大,超过 $75 \mu g \cdot m^{-3}$,达轻度污染程度,并在降水结束后突增且不断上升。结合降水前期(03时)和降水结束后(15时)的全国 $PM_{2.5}$ 实时分布图(图5)可以看到,降水前,大连西部的山西、河北地区污染严重,受逐渐增大的西南风影响,污染区域逐渐东移,处于下游地区的大连市在降水后期 $PM_{2.5}$

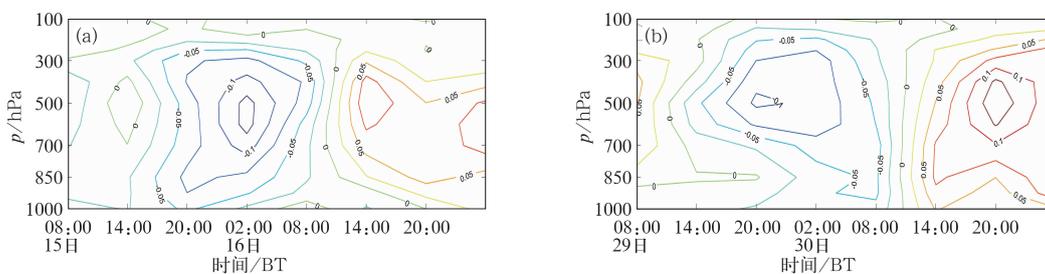


图3 2015年11月15—16日(a)和2016年11月29—30日(b)垂直风速时空分布图(单位: $Pa \cdot s^{-1}$)

Fig. 3 Spatial-temporal distribution of vertical velocity (unit: $Pa \cdot s^{-1}$) in 15—16 November 2015 (a) and 29—30 November 2016 (b)

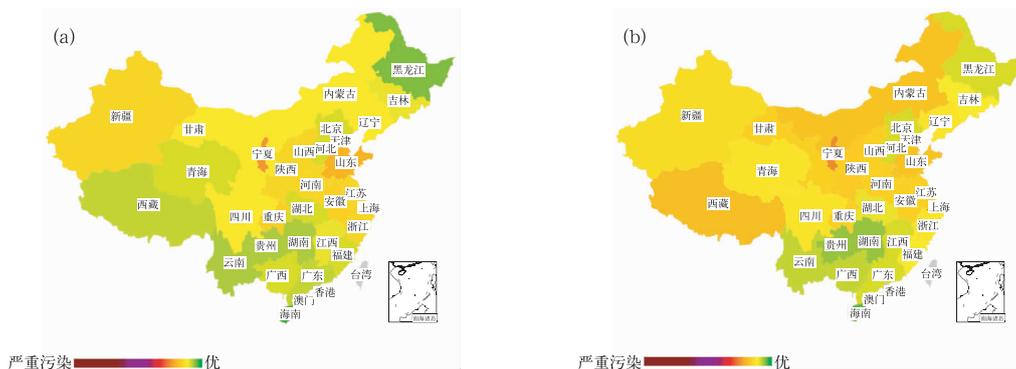


图 4 2015 年 11 月 16 日 05 时(a)和 09 时(b)全国 PM_{2.5} 实时分布

Fig. 4 National distribution of PM_{2.5} at 05:00 BT (a) and 09:00 BT (b) 16 November 2015

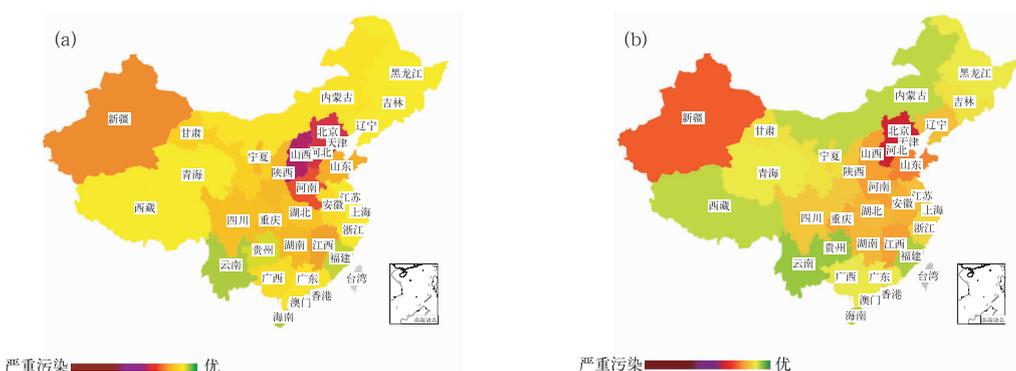


图 5 2016 年 11 月 30 日 03 时(a)和 15 时(b)全国 PM_{2.5} 实时分布

Fig. 5 National distribution of PM_{2.5} at 03:00 BT (a) and 15:00 BT (b) 30 November 2016

升高与京津冀地区严重污染密切相关,故大连本次污染主要是受外来源污染。

上述分析表明,大连市出现大气污染有两种原因,一种是当地排放产生,其天气特征是近地面水平风速较小;另一种由外来源影响产生,其天气特征是近地面水平风速较大。

3 污染条件下 PM_{2.5} 对云中冰核数及降水影响分析

基于冷云催化理论,通常自然云中有足够的过冷水和适宜数量的冰核才能产生充分降水。若云中过冷水多,冰核数少,则降水量相对小,降水不充分;若冰核数多,云中过冷水相对少,则降水也会减少甚至消雨。

依据上述原理,本文对大连市 2015—2016 年产生小雨(降水量≤5 mm)过程的微波辐射计云水资料、地面降水量和 PM_{2.5} 等观测资料进行统计和分析,对该三要素小时数据资料及其随时间的变化进

行了逐一讨论分析,从中发现 PM_{2.5} 浓度对云中冰核数及降水的影响,为大气污染天气条件下如何有效实施人工增雨(雪)作业提供了基础决策依据。

3.1 微波辐射计与资料处理

3.1.1 双通道微波辐射计简介

2014 年 11 月,大连市人影办引进一部中国电波传播研究所研发的 QFW—2000 型双频地微波辐射计,安装在大连市气象局主楼(四楼)屋顶上(38°54'N,121°38'E,海拔高度 91.5 m)。该微波辐射计的两个通道共用一个天线,并增加了一个 45°角的反射镜,提高了微波辐射计的防雨性。其主要性能指标:(1)工作频率为 23.80 和 31.65 GHz;(2)接收机灵敏度 $\Delta T_{\min} \leq 0.3 \text{ K}$;(3)俯仰驱动范围 0°~90°,步进角 0.1°;(4)方位驱动范围 0°~360°,步进角 0.5°。

该仪器自 2015 年 1 月投入业务应用,对大连市本站大气中的水汽、云中液态水含量及其演变规律进行 24 h 连续跟踪观测。QFW—2000 型微波辐射

计采用目前国际主流马鞍形设计,在降雨时,由于天线罩表面会有雨水累积,会造成液态水测量值偏大(趋势正确),影响了测量的精度,通过采用疏水材料天线罩,可减小降雨造成的影响。通过试验发现,大雨时,天线罩上的水无法及时流走,故在天线罩上产生了水膜,此时液态水的演变趋势仍然可以测量,但测量的精度会受到影响;但小雨时,疏水材料使雨水很快流走,天线罩上累积的雨水很少,从而保证了测量的准确性。通过国家重点基础研究发展计划“云-气溶胶气候效应的观测与模拟研究”中国气象局给出的试验对比图(略)可以看出,10 mm 以下的小雨测量结果和地面雨量筒给出的结果很一致。

3.1.2 云中液态水资料处理

根据以上试验结果,采用该微波辐射计对 10 mm 以下小雨过程所探测到的云中液态水含量可看作接近客观实测;同时,魏重等(2001)研究认为在雨强小于 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 范围内,都可由地基辐射计测定得到大气水汽总量和云中液水总量。为了获得降雨云中液态水含量,本文选取了 2015—2016 年共 4 次满足小雨条件的降水过程,其过程雨量均小于 5 mm,雨强平均为 $0.77 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。对 4 次降水过程所探测到的云中液态水含量(即分钟液态水含量)进行了统计和分析,获得了 4 次降水过程云中的小时液态水含量值。

3.2 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对云中冰核数及降水的影响

选取大连市 2015—2016 年秋、冬季探测到的 4 次小雨降水过程(2015 年 11 月 16 日,2016 年 11 月 10、18 和 30 日,满足地基双通道微波辐射计对云中液态水定量探测基本可用的降水过程)云中液水含量数据资料,利用地面降水量、云中液态水含量和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度(市内 10 个观测站数据平均值)观测数据资料进行组合分析,并将一组三要素组合数据作为一个个例,4 次降水过程共观测到了 22 个组合数据,即得到 22 个个例。以下对 22 个个例分别进行讨论和分析。

3.2.1 大气污染条件下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对云中冰核数及降水影响

2015 年 11 月 15—16 日大连市出现了一次中度以上大气污染降水天气过程。15 日 17 时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据曾一度接近重度污染($197 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),之后回落,维持轻度污染,直到降水停止后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度开始减小。本次降水出现在 16 日的 06 时,11 时结

束,降水持续 5 h(过程雨量为 5 mm),取得了 5 组三要素数据观测资料,即 5 个个例。表 1 给出了本次降水过程逐时云中液态水含量、地面降水量、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,以及近地面风速小时平均值等。从表 1 看到,降水前 5 h,云中液态水开始增加,到降水(06 时)时达到最大值 2.83 mm,而对应的地面小时降水量却只有 0.5 mm,即较大的云中液水量,未出现较大降水,说明此时的降水不充分,云中缺乏冰核(根据冷云催化原理);到 07 时,云中液态水略有减小,为 2.16 mm,而降水量却增大到 1.8 mm,也是本次降水过程中最大的小时降水量,表明此时云中冰核数得到增加,致使降水充分,降雨量增加,这与降水前较长时间的上升运动密切相关。因为空气持续上升运动可将近地面浓度较高的大量细颗粒物输送到高空(并与此时近地面大气轻度污染及 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度不断增加相吻合),其中部分细颗粒物可转化为云中冰核,与补充了降雨云中冰核不足密切相关,该结论与赵剑平等(1965)对大连市冰核观测分析研究得到的“降水天气条件与核暴有很密切关系”结论相一致,也同游来光和石安英(1964);游来光等(2002)研究的“冰晶浓度与云中气溶胶有较好的正相关”的结论相吻合。

对 07 和 08 时两组数据对比分析看到,08 时云中液水量略有降低,地面降水量却大幅度减小,出现了减雨现象,分析原因可能是长时间上升运动,以及降水后近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度持续增大,故空中转化成冰核的细颗粒物增加,使降雨云中的冰核数过量导致出现减雨现象;到 09 时,从三要素组合数据分析看到,地面降水出现了明显消减雨现象,同理,说明此时云中冰核数仍然过量,与这一阶段的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度大幅增加相吻合;在降水后期 10—11 时,均表现为充分降水,即云中液水量减小,地面降水增大,尤其在 11 时,云中液水量已降至 0.96 mm,而地面降水仍为 0.5 mm,与 06 时云中最大液水量(2.83 mm)具有相同的地面降水量,表明此时降水较充分,分析原因可能与出现降水后,一定量降雨的下沉运动削弱了大气细颗粒物的向上输送,使空中转化为冰核的细颗粒物相对减少,降雨云中的冰核得到适量增加,是云中冰核数与减小的云中液态水量相匹配的结果。

综上分析,在大气产生污染的降水天气过程中,由于降水前较长时间的上升运动(图 3a),可将近地面大量 $\text{PM}_{2.5}$ 输送到空中,其中会有一部分转化为

冰核,从而补充了降雨云中的冰核不足,使地面降水增大,甚至由于云中冰核过量,出现地面降水减小的现象,故此时开展人工增雨(雪)作业,应根据实际情况,结合近地面 $PM_{2.5}$ 浓度适当减少作业剂量,或减少催化作业,以确保增雨(雪)作业科学有效实施。

此外,由表1可见,本次降水结束后, $PM_{2.5}$ 浓度开始减小,大气污染降低,表明一定程度的降水和近地面风速增大对本地源产生的大气污染能起到缓解和减轻作用。

表1 2015年11月16日降水过程各要素值
Table 1 Elements of precipitation on 16 November 2015

时间/BT	雨强/mm·h ⁻¹	云中液水量/mm	降雨量/mm	$PM_{2.5}$ 浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	风速/m·s ⁻¹
00:00	0	0.00	0	78	2.9
01:00	0	0.01	0	75	3.0
02:00	0	0.23	0	75	3.2
03:00	0	0.34	0	78	3.4
04:00	0	0.75	0	86	3.0
05:00	0	1.79	0	90	2.7
06:00	0.5	2.83	0.5	93	2.5
07:00	1.8	2.16	1.8	95	2.5
08:00	1.0	1.82	1.0	97	1.7
09:00	0.5	1.95	0.5	105	2.6
10:00	0.7	1.77	0.7	116	2.3
11:00	0.5	0.96	0.5	121	3.0
12:00	0	0.59	0	116	3.5
13:00	0	0.88	0	111	3.7
14:00	0	0.23	0	97	2.9

3.2.2 无污染条件下 $PM_{2.5}$ 浓度对云中冰核及降水的影响

对大连市2016年11月10、18和30日3次小雨降水(降雨量分别为4、3.8和4.9 mm)过程的17个个例的地面降水量、云中液水量和 $PM_{2.5}$ 浓度三要素观测数据资料及其变化进行了统计和分析发现,较低浓度的 $PM_{2.5}$ 均对应较小的地面降水量,反之则地面降水充分(或过量减雨)。

在10和18日的两次降水过程中,近地面 $PM_{2.5}$ 浓度均较低($20\sim 50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),从个例分析看到地面降水量均偏小,为云中冰核数缺乏所致,分析可能是降雨前的上升气流将地面有限(较低浓度 $PM_{2.5}$)的大气细颗粒物输送至空中,其中有限的部分细颗粒物转化为有限冰核的缘故。

表2为2016年11月10日降水过程相关要素观测数据。降水从15时开始,比较15与19时两组要素观测资料发现,15时云中相对较大液水量产生较小地面降水,说明此时云中冰核数严重缺乏,与此时较低浓度的 $PM_{2.5}$ 相吻合;对比16与19时两组数据也看出,16时较大云中液水量与19时较小云中液水量出现了相同的地面降水,同理说明16时降雨云中冰核缺乏,而19时地面降水却相对增大,即

较小的云中液水量(0.08 mm)对应地面较大降水(0.5 mm),表明此时云中冰核数相对增加,这一点在降水中期17时就已表现,即出现地面降水量相对增大;结合19时三要素数据分析判断,出现降水后的15、16和17时,云中冰核数相对缺乏,故地面降水量偏小,与此阶段的 $PM_{2.5}$ 浓度较低($20\sim 30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)吻合;18时,云中液水量达最大(1.49 mm),地面降水量也较大(2.8 mm),分析可能与降水后期18和19时 $PM_{2.5}$ 浓度增大以及上升气流的维持和加强(前期降水微弱)密切相关,使相对更多的细颗粒物被输送至高空,因此转化为冰核的细颗粒物数量增多,地面降水增加。

从表2还看到,降水停止(20时)后 $PM_{2.5}$ 浓度仍继续增大,可能与降水后期近地面风速突然减小有关;雨强较小的降水和雨强较大的短时降水对 $PM_{2.5}$ 的沉降作用均不明显。

表3是2016年11月18日降水过程的要素观测资料。对该降水过程中5个个例逐一比较分析发现,云中冰核数都较缺乏,即云中较大液水量,对应的地面降水相对偏小,分析与 $PM_{2.5}$ 浓度较低密切相关,并与降水过程 $PM_{2.5}$ 持续降低相一致,因此,在降水停止前的21时,云中液水量较大为1.27 mm,

而地面降水仅有 0.1 mm,表明冰核数量严重缺乏,所以,在 22—23 时尽管云中液水量仍较大,但地面降水为 0,与此时的 $PM_{2.5}$ 浓度较低密不可分。从表

3 还看到,降水后期 $PM_{2.5}$ 迅速减小与近地面风速增大有关。

表 2 2016 年 11 月 10 日降水过程各要素值
Table 2 Elements of precipitation on 10 November 2016

时间/BT	雨强/ $mm \cdot h^{-1}$	云中液水量/mm	降雨量/mm	$PM_{2.5}/\mu g \cdot m^{-3}$	风速/ $m \cdot s^{-1}$
10:00	0	0.00	0	20	5.6
11:00	0	0.00	0	18	7.0
12:00	0	0.00	0	21	6.5
13:00	0	0.01	0	23	5.1
14:00	0	0.00	0	22	5.7
15:00	0.1	0.88	0.1	20	3.9
16:00	0.5	1.19	0.5	21	5.4
17:00	0.1	0.74	0.1	26	3.9
18:00	2.8	1.49	2.8	31	4.0
19:00	0.5	0.08	0.5	35	1.9
20:00	0	0.00	0	35	2.8
21:00	0	0.00	0	42	2.1
22:00	0	0.00	0	69	1.8
23:00	0	0.00	0	94	2.3

表 3 2016 年 11 月 18 日降水过程各要素值
Table 3 Elements of precipitation on 18 November 2016

时间/BT	雨强/ $mm \cdot h^{-1}$	云中液水量/mm	降雨量/mm	$PM_{2.5}/\mu g \cdot m^{-3}$	风速/ $m \cdot s^{-1}$
10:00	0	0.04	0	60	2.9
11:00	0	0.00	0	56	3.2
12:00	0	0.30	0	51	2.2
13:00	0	0.66	0	45	2.1
14:00	0	0.54	0	43	2.4
15:00	0	0.64	0	43	2.0
16:00	0	0.75	0	45	0.9
17:00	0.2	2.10	0.2	49	2.0
18:00	1.0	2.52	1.0	49	2.5
19:00	1.2	2.86	1.2	45	2.0
20:00	1.3	2.49	1.3	36	2.2
21:00	0.1	1.27	0.1	25	4.0
22:00	0	1.51	0	13	2.8
23:00	0	1.76	0	14	3.7

以上对两个无污染降水过程的 10 个个例观测资料分析发现,当近地面 $PM_{2.5}$ 浓度较低时,降雨云中的冰核数均不足和较缺乏,因此降水不充分,地面降水量较小(较大云中液水量对应较小的地面降水),可通过实施人工增雨(雪)催化作业,适量补充和增加降雨云中的冰核数,从而起到增大地面降雨的目的。

表 4 为 2016 年 11 月 30 日降水天气过程各要素观测数据。本次降水前期为无污染天气,降水后期出现轻度污染,即 $PM_{2.5}$ 浓度小时平均值超过

$75 \mu g \cdot m^{-3}$,且降水停止后 $PM_{2.5}$ 浓度快速上升,近地面风速迅速增大,表明此次大气污染主要是外来源影响(图 5)。从表 4 给出的降水过程云中液水量、地面降水量和 $PM_{2.5}$ 浓度等要素观测值及变化分析可以看到,大气无污染时,云中冰核数较缺乏,所以地面降水偏小(从 03 时降水开始到 08 时的 6 个小时降水中),即云中存在较大液水量(均大于 2 mm),对应地面降水较小(均为零点几毫米),尤其在降水前的 02 时,云中的液水量已达 1.96 mm,地面却没有降水,表明云中冰核数极缺乏,分析原因应

是降水前期近地面 $PM_{2.5}$ 浓度值较小(十几至三十几),所以尽管上升气流持续了近十几个小时,可被输送到空中的大气细颗粒物数量却很有效,能转化成为冰核的数量更是微乎其微;到降水后期,随着 $PM_{2.5}$ 浓度的不断升高,有更多的大气细颗粒物被高空槽前的上升气流输送到高空,使转化成为云中冰核的数量得到增加,因此到 09 时,尽管云中液水量相对减小为 1.7 mm,地面降水却相对增大到 1.5 mm,出现了较充分的降水,与 $PM_{2.5}$ 浓度升高相一致,此时 $PM_{2.5}$ 浓度已升到 $76 \mu g \cdot m^{-3}$, 达大气轻度污染;到 10 时,云中液水量略有降低,地面降

水却迅速降为 0.2 mm,分析可能是云中冰核数过量导致了减雨,因为前期降水均较弱,故大气垂直运动以上升运动为主,随着降水后期 $PM_{2.5}$ 浓度迅速升高,大量细颗粒物随着上升气流被输送到高空云中,使其转化成为云中冰核的数量不断增加,这一点从 11 时降水停止也能说明(即云中存在一定量的液态水,地面降水却为 0,而此时 $PM_{2.5}$ 浓度已达 $92 \mu g \cdot m^{-3}$,故此时云中不缺冰核,只有冰核过量导致消减雨)。降水停止后, $PM_{2.5}$ 值突增后继续增大,此时的近地面风速变大,说明此次降水后期出现的大气污染主要为外来源影响(图 5)。

表 4 2016 年 11 月 30 日降水过程各要素值

Table 4 Elements of precipitation on 30 November 2016

时间/BT	雨强/mm · h ⁻¹	云中液水量/mm	降雨量/mm	$PM_{2.5}/\mu g \cdot m^{-3}$	风速/m · s ⁻¹
00:00	0	0.00	0	14	3.7
01:00	0	0.01	0	33	4.4
02:00	0	1.96	0	58	4.1
03:00	0.2	2.46	0.2	57	3.4
04:00	0.9	2.52	0.9	66	2.6
05:00	0.3	2.24	0.3	60	3.5
06:00	0.8	2.35	0.8	59	1.4
07:00	0.3	2.59	0.3	62	1.2
08:00	0.7	2.60	0.7	67	2.6
09:00	1.5	1.71	1.5	76	2.6
10:00	0.2	1.20	0.2	76	3.2
11:00	0	0.19	0	92	4.2
12:00	0	0.00	0	105	3.9
13:00	0	0.00	0	114	3.5
14:00	0	0.00	0	118	4.4

对该降水过程分析不难看到,降水初期地面降水偏弱,是由于降雨云中冰核数缺乏导致,这与此阶段的 $PM_{2.5}$ 浓度较低有关;降水后期,地面降水量先增后减,分析可能是云中冰核数增加至过量的结果,这与此阶段 $PM_{2.5}$ 浓度升高(达轻度污染)相吻合;同时,对于外来源大气污染,一定程度的降水对减轻和缓解污染作用不明显。

4 结 论

(1) 统计和分析了大连市 2015 年秋、冬季出现的一次大气污染降水过程的天气特征,其高空形势场为大连秋、冬季典型的高空槽前降水(同于另外 3 次非污染降水天气形势场);对探空资料分析发现,大气层结无论是降水前的污染阶段,还是降水阶段均为稳定层结,有逆温层存在。

(2) 通过 NCEP/NCAR 再分析资料分析了垂直速度时空分布发现,大气污染降水过程和非污染降水过程,在其降水前的十几个小时里均为明显的上升运动。表明近地面 $PM_{2.5}$ 随着上升气流源源不断被输送到空中降雨云系里,其中的部分 $PM_{2.5}$ 可转化成为云中冰核,补充和增加了云中的冰核数,从而起到增加地面降水(或冰核过量消减雨)的作用。

(3) 选取了大连市 2015—2016 年秋、冬季出现的 4 次小雨(5 mm 以下)降水过程。统计和分析了降水过程中的云中液水量、地面降水量和 $PM_{2.5}$ 浓度三要素组合(共 22 个例)等小时观测数据资料发现,当 $PM_{2.5}$ 浓度较低时,云中冰核数较缺乏,地面降水偏小,此时适合开展人工增雨(雪)催化作业,以达到增加降水的目的;当 $PM_{2.5}$ 值较高(或升高)时,特别在出现大气污染时,云中的冰核数增多,降水较充分,或冰核数过量出现消减雨,此时人工增雨(雪)

作业应结合实际情况减小作业剂量,或减少催化作业,以确保云水资源的有效开发。

(4) 通过对大连市大气污染降水过程近地面风速观测数据和全国 $PM_{2.5}$ 分布图及其演变综合分析发现,大连市产生大气污染有两种情况,一种是本地生成(本地源),一种是外来影响(外来源)。对于本地源大气污染,一定量的降水能起到减轻大气污染的作用,对于外来源大气污染,降水对减缓污染作用不明显。

致谢:感谢中国科学院大气物理研究所孙继明研究员提供的国内外相关研究成果,特此致谢!

参考文献

- 段英,吴志会,1999. 利用地基遥感方法监测大气中汽态、液态水含量分布特征的分析[J]. 应用气象学报,10(1):34-40.
- 范新强,孙照渤,2009. 1953—2008年厦门地区的灰霾天气特征[J]. 大气科学学报,32(5):604-609.
- 鄯大雄,陈汝珍,蒋耿旺,1994. 黄土高原尘沙作为大气冰核的实验研究[J]. 应用气象学报,5(2):129-134.
- 郭蕊,段浩,马翠平,等,2016. 河北中南部连续 12d 重霾污染天气过程特征及影响因素分析[J]. 气象,42(5):589-597.
- 花丛,张恒德,张碧辉,2016. 2013—2014 冬半年北京重污染天气气象传输条件分析及预报指数初建[J]. 气象,42(3):314-321.
- 李红斌,傅瑜,张靖萱,等,2017. 大连市冬季大气污染数值模拟及其对人工增雨(雪)作业的指示作用[J]. 气象与环境学报,33(5):10-16.
- 刘爱军,杜尧东,王惠英,2004. 广州灰霾天气的气候特征分析[J]. 气象,30(12):68-71.
- 刘香娥,高茜,何晖,等,2016. 碘化银冷云催化的数值模拟研究[J]. 气象,42(3):347-355.
- 吕翔,刘端阳,李冰峰,等,2015. 徐州持续性霾过程的季节特征分析[J]. 气象,41(9):1134-1143.
- 牛生杰,安夏兰,陈跃,等,2000. 贺兰山地区大气冰核浓度的测量及初步分析[J]. 南京气象学院学报,23(2):294-298.
- 饶晓琴,李峰,周宁芳,等,2008. 我国中东部一次大范围霾天气的分析[J]. 气象,34(6):89-96.
- 石爱丽,郑国光,游来光,2006. 2003 年秋季青海省河南县地面大气冰核观测分析[J]. 应用气象学报,17(2):245-249.
- 王黎俊,孙安平,刘彩红,等,2007. 地基微波辐射计探测在黄河上游人工增雨中的应用[J]. 气象,33(11):28-33.
- 汪学林,张万钧,熊尚清,1965. 白城地区春季的大气冰核[J]. 气象学报,35(3):273-279.
- 魏重,雷恒池,沈志来,2001. 地基微波辐射计的雨天探测[J]. 应用气象学报,12(S1):65-72.
- 吴兑,毕雪岩,邓雪娇,等,2006. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究[J]. 气象学报,64(4):510-516,538.
- 杨磊,银燕,杨绍忠,等,2013. 南京地区冬季大气冰核特征及其与气溶胶关系的研究[J]. 大气科学,37(5):983-993.
- 游来光,1994. 利用粒子测量系统研究云物理过程和人工增雨条件[M]//游景炎,段英,游来光. 云降水物理和人工增雨技术研究. 北京:气象出版社:236-249.
- 游来光,石安英,1964. 北京地区 1963 年春季冰核浓度变化特点的观测分析[J]. 气象学报,34(4):548-554.
- 游来光,杨绍忠,王祥国,等,2002. 1995 和 1996 年春季北京地区大气冰核浓度的观测与研究[J]. 气象学报,60(1):101-109.
- 赵剑平,张澍,王玉玺,等,1965. 我国北部地区大气冰核观测的分析研究[J]. 气象学报,37(4):416-422.
- 周德平,洪也,王扬锋,等,2012. 沈阳春夏季大气冰核浓度的观测研究[J]. 气候与环境研究,17(6):719-726.
- 周秀骥,1982. 大气微波辐射及遥感原理[M]. 北京:科学出版社.
- Bigg E K,1960. Summary of measurement of ice nucleus concentrations[J]. Bull Obs Puy de Dome,6(2):194-199.
- Perez P J, Garcia J A, Casanova J,1985. Ice nuclei concentration in Valladolid Spain and their relation to meteorological parameters [J]. J Rech Atmos,19:153-158.
- Warner J,1968. A reduction in rainfall associated with smoke from sugar-cane fires—an inadvertent weather modification[J]. J Appl Meteor,7(2):247-251.