北京及周边城市气溶胶污染对城市降水的影响

陈卫东^{①③④}, 付丹红^②, 苗世光^{①*}, 张亦洲^①

① 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089;

② 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

③ 中国气象科学研究院, 北京 100081;

④ 中国电力科学研究院, 南京 210003

* 联系人, E-mail: sgmiao@ium.cn

2015-04-06 收稿, 2015-06-15 接受, 2015-07-07 网络版发表

国家自然科学基金(41175015, 41175122)资助

摘要 利用中尺度可分辨云模式(Weather Research and Forecasting, WRF)研究了北京及周边城市气溶胶污染对城市降水的影响. 结果表明: 2011年8月14日北京地区一次强降水过程中, 城市气溶胶污染对区域平均降水量均有一定的增加作用, 城市轻度污染型区域平均降水量增加39.42%, 城市污染型降水增加15.63%, 城市重度污染型降水增加12.28%. 城市污染背景下, 区域平均降水量随气溶胶浓度增加而逐渐减小, 城市污染型相对于城市轻度污染型区域平均降水量减少约17%. 这主要是由于城市污染气溶胶增多使得云凝结核(CCN)增多, 云滴数浓度增加, 云滴有效半径减小, 零度层以下云滴碰并效率降低, 抑制云水向雨水的转化, 雨滴数浓度减少, 雨滴蒸发过程减弱, 不利于零度层以下强下沉气流的发展和维持, 地面冷池和最大风速减弱, 低层辐合抬升减弱, 不利于水汽垂直输送和降水的转化, 地面降水减小. 城市污染气溶胶通过云微物理过程影响热力场和动力场影响地面降水过程.

关键词

气溶胶
降水
数值模拟

随着现代工业的快速发展和人类活动的影响, 气溶胶的影响及其气候效应越来越受到人们的关注. 气溶胶是指大气与悬浮在其中的固态和(或)液态微粒共同组成的多相体系. 气溶胶粒子可以作为云凝结核(Cloud Condensation Nuclei, CCN)影响云的微物理过程, 从而影响云的形成、发展和演变, 因此各种自然源和人为源排放的气溶胶可能是引起降水变化的原因之一^[1-3]. Warner和Twomey^[4], Twomey^[5]的早期研究就曾提出, 气溶胶粒子可成为CCN, 造成云滴数增加、云滴半径减小、增加云的反射率和延长云的生命期, 但是气溶胶对云和降水的影响是复杂的. Rosenfeld^[6,7]利用卫星资料研究发现, 印度尼西亚森林大火后产生的烟尘会抑制降水发生, 澳大利亚地区的城市污染排放使得区域降水减少. Givati等人^[8]

关于以色列和美国西海岸多年降水变化趋势的研究结果, 进一步印证了Rosenfeld的结论. 但Lin等人^[9]利用卫星数据研究发现, 亚马逊流域地区在生物质燃烧期间出现降水增多的现象. Shepherd和Burian^[10]的研究也指出, 在污染严重的美国沿海城市降水是增强的. 因此, 气溶胶对降水的影响不仅仅是气溶胶浓度的影响, 还与大尺度环境场有重要的联系^[11,12].

近年来, 随着北京及其周边地区的城市化程度不断扩大、人口迅速增长和工业发展, 导致该地区的气溶胶排放逐年快速增加^[13,14], 这对北京地区的天气和气候造成不同程度的影响^[15-18]. 段婧和毛节泰^[19]利用长期的地面降水和能见度资料, 得出华北区域气溶胶增加使局地降水量减少的结论. 岳治国等人^[20]利用耦合双参数显式云方案的WRF模式, 对

引用格式: 陈卫东, 付丹红, 苗世光, 等. 北京及周边城市气溶胶污染对城市降水的影响. 科学通报, 2015, 60: 2124-2135

Chen W D, Fu D H, Miao S G, et al. Impacts of aerosols from Beijing and the surrounding areas on urban precipitation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 2124-2135, doi: 10.1360/N972015-00217

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972015-00217>

北京地区暴雨、中雨和微量降水等3次降水过程进行了数值模拟研究,结果表明随着气溶胶浓度的增加,北京地区的暴雨、中雨和微量降水平均累积降水量分别减少了23.8%,16.6%和14%,且随着气溶胶浓度的增加,降水的强度、分布和时间会发生改变.而Guo等人^[21]利用WRF-Chem模式对一次北京夏季对流降水的模拟研究认为,城市气溶胶污染增强使得区域平均降水量增加,对强降水有增强作用,对弱降水有抑制作用.

由此可见,以上研究主要分析了气溶胶对城市降水量的影响,而对于北京及周边城市气溶胶污染对降水的影响机理研究还相对较少,本文利用中尺度可分辨云模式(WRF)模拟了2011年8月14日北京地区一次强降水过程,分析了北京及周边城市气溶胶污染对强降水过程的影响机制.此次强降水过程基本反映了北京地区对流发生发展的大尺度环流背景,地理条件和局地热力动力因素,研究结果具有一定的代表性,能够定性地反映北京地区城市污染气溶胶对城市云和降水的影响机制,对于提高数值预报准确率具有重要意义.

1 研究方法

1.1 模式设计

利用中尺度可分辨云模式(WRF v3.4.1),采用北京地区高分辨率快速更新循环同化和预报系统^[22]中的初始场和边界条件,水平分辨率为3 km,水平网格数为424(南北)×550(东西),模拟区域中心点为(40.17°N, 114.36°E),垂直方向分为38层,模式顶为50 hPa.地表资料采用2009年Landsat-TM高分辨率卫星资料,将城市地表类型按照不透水面积百分比细分为低、中、高密度城市的33类地表分类数据和优化的城市冠层参数^[23].模拟积分时间段为2011年8月13日23时至14日08时,辐射方案为RRTM(Rapid Radiative Transfer Model)长波辐射方案和Dudhia短波辐射方案,采用YSU边界层方案和Noah陆面模式耦合单层城市冠层模式(Single-Layer Urban Canopy Model).云微物理方案采用NSSL 2-mom微物理方案,该方案可预报水成物混合比和粒子数浓度以及平均霰粒子密度,有效防止虚假的大颗粒沉淀,对于较强的降水类型有很好的模拟结果^[24].NSSL 2-mom方案中包含云水、雨滴、雪、冰晶体、霰和冰雹,其中云滴的粒

子数浓度表示为

$$C_N = CkS_w^{k-1}V \cdot \nabla S_w, \quad (1)$$

C_N 为云滴粒子数浓度, C 为假定的CCN浓度, k 为常数0.6, V 为风速, S_w 为过饱和度.云的核化过程主要发生在云底、云的侧边界或者当凝结速率不足以维持云内过饱和度低于云底时,云内会发生核化.依据Twomey方程,从云边界流入的气流中计算得到液滴的浓度;如果过饱和度大于云底过饱和度的峰值1%,则额外的核化过程将在云内部产生.利用总的数浓度与过饱和度的时间微分幂函数关系获得局部稳定的过饱和度来估算核化速率.气溶胶通过活化过程,影响云和降水过程^[4,5],为了进一步分析城市气溶胶对云和降水的影响,针对方程(1)中的CCN浓度 C 进行一系列敏感性试验(表1).为了更好地模拟城市环境,敏感性试验中下垫面均为城市地表且均考虑人为热排放的影响.

1.2 模拟效果检验

2011年8月13日23时至14日05时(北京时间,下同),受雷雨云团的影响,北京自北向南出现了强对流天气.短时雨强较大,降雨量分布不均,部分地区达到暴雨量级,最大降雨出现在怀柔的大水峪水库(水文站),降水量为103 mm.此次过程受弱低压系统影响,北京地区处于气压梯度较小,温度露点差小于3℃的大湿度区(图略),有利于局地对流性降水的产生.2011年8月13日北京地区为污染天气条件,根据北京地区气溶胶和云凝结核(CCN)的观测结果表明^[25,26],此次强降水过程中CCN数浓度约为6000 个/cm³.

图1为2011年8月13日23时至8月14日05时观测和城市污染型情况下(CCN=6000 个/cm³)模拟的北京地区累积降水量分布图.可以看到,此次降水过程主

表1 模拟试验
Table 1 Simulation tests

模拟试验名称	CCN(个/cm ³)
Case1(城市清洁型)	0.06
Case2	0.6
Case3	6
Case4	60
Case5(城市轻度污染型)	600
Case6	2000
Case7(城市污染型)	6000
Case8(城市重度污染型)	12000

图1 2011年8月13日23时至8月14日05时北京地区的累积降水量分布。(a) 观测; (b) 城市污染型

Figure 1 Distribution of the rainfall in Beijing from 23:00LST, 13th to 05:00LST, 14th, Aug. 2011. (a) Observation; (b) urban polluted

要集中在北京城区附近(图1(a)), 观测最大降水量可达到100 mm; 城市污染型情况下($CCN=6000$ 个/ cm^3), 最大降水量达到120 mm(图1(b)), 可以看出城市污染型情况下的累积降水量和降水分布与观测较为一致。

图2是2011年8月14日00时至03时的观测和城市污染型情况下模拟的雷达反射率水平分布图。2011年8月14日00时(图2(a)), 北京延庆和怀柔地区出现雷达强回波, 雷达最大回波强度达到55 dBZ, 地面有降水产生。8月14日01时(图2(b)), 对流单体发生合并, 对流发展加强, 雷达最大回波强度达到60 dBZ, 对流系统向南移动至北京昌平、怀柔和顺义交界处, 地面降水进一步发展加强。8月14日02时(图2(c))对流单体继续向南移动到海淀、朝阳、昌平和顺义地区的交界处, 雷达最大回波强度为64 dBZ, 系统逐渐影响北京中心城区。到8月14日03时(图2(d)), 对流系统向南移动到北京城区的南部, 强度略有增强, 水平尺度减小, 北京城区降水明显增强。从观测图上可以看到, 2011年8月13日至14日的降水过程主要是对流系统造成的对流性降水, 降水系统由北京北部向南移动, 降水集中在北京城区附近(图1(a))。从模拟图上来看, 2011年8月14日00时(图2(a1)), 北京延庆和怀柔地区有雷达强回波, 雷达最大回波强度达到55 dBZ以上。到01时(图2(b1)), 对流云系统向南移动, 水平尺度达到100 km以上, 对流发展加强, 雷达最大回波强度达到60 dBZ。到02时(图2(c1))雷达最大回波强度为65 dBZ左右, 系统逐渐影响北京中心城区。到03时(图2(d1)), 对流系统向南移动到北京城区的南部, 具有多个强中心。可以看到, 城市污染型情况下模拟的雷达反射

率水平分布与观测的雷达反射率在位置, 移动方向和量级大小基本一致, 城市污染型情况下的模拟结果很好地再现了此次强对流云的发展演变过程。

2 城市气溶胶对区域降水的影响

从观测和模拟的降水分布可以看到, 北京地区主要受自西北向东南方向移动的对流云系影响, 本文主要研究城市气溶胶浓度对区域A内(见图1(a)的区域A: $116.0^{\circ}\sim 116.8^{\circ}E$, $39.6^{\circ}\sim 40.5^{\circ}N$)云和降水的影响。

图3(a)为不同CCN浓度对区域平均降水量的影响。可以看到, CCN浓度较小时, 随着CCN浓度的增加, 区域平均降水量逐渐增加, CCN浓度达到60 个/ cm^3 左右以后, 区域平均降水量随CCN浓度增加而逐渐减小。同时, CCN在600~2000 个/ cm^3 之间时, CCN浓度的增加对区域平均降水量的影响相对较小, CCN浓度从6000 个/ cm^3 增加到12000 个/ cm^3 时, 区域平均降水量的减小作用也相对不显著。从CCN浓度对城市降水影响的演变可以看到, 相对于城市清洁型($CCN=0.06$ 个/ cm^3), 城市轻度污染型($CCN=600$ 个/ cm^3)、城市污染型($CCN=6000$ 个/ cm^3)和城市重度污染型($CCN=12000$ 个/ cm^3)对区域平均降水量均有一定的增加作用, 城市轻度污染型区域平均降水量增加39.42%, 城市污染型区域平均降水量增加15.63%, 城市重度污染型区域平均降水量增加12.28%。在城市污染背景下, 城市气溶胶污染增强导致区域平均累积降水量减少, 城市污染型相对于城市轻度污染型区域平均累积降水量减少约4.26 mm, 平均降水量减少17% (图3(a))。

图2 观测((a)~(d))和城市污染型情况下模拟((a1)~(d1))的2011年8月14日雷达组合反射率. (a)和(a1) 00时; (b)和(b1) 01时; (c)和(c1) 02时; (d)和(d1) 03时

Figure 2 The distribution of the radar reflectivity of observation ((a)~(d)) and urban polluted ((a1)~(d1)) on 14 August, 2011. (a) and (a1) 00:00LST; (b) and (b1) 01:00LST; (c) and (c1) 02:00LST; (d) and (d1) 03:00LST

图3 CCN浓度对(a)区域平均降水量和(b)最大降水强度的影响

Figure 3 The effect of CCN concentration on (a) the average precipitation and (b) the maximum precipitation intensity in the region A

降水强度的分析表明(图3(b)), 相对于城市清洁型, 城市轻度污染型、城市污染型和城市重度污染型对强降水有增强作用而对弱降水有一定的减弱作用, 这与Guo等人^[21]的研究结果一致。

3 城市气溶胶对区域云和降水影响机理

北京地区观测到的气溶胶浓度一般在184~7338个/ cm^3 之间^[25], 在一定的天气背景条件下气溶胶对

云和降水的影响主要分为城市轻度污染型($\text{CCN}=600$ 个/ cm^3)和城市污染型($\text{CCN}=6000$ 个/ cm^3)两种情况。因此, 本文主要分析城市轻度污染型和城市污染型两种情况下, 气溶胶污染对城市降水的影响。

3.1 城市气溶胶对云物理过程的影响

大气污染物与云和降水相互影响的主要媒介是气溶胶, 气溶胶既可以影响云的辐射特性, 也可以作

为凝结核参与云滴的形成过程^[27]。图4(a)是云滴的平均有效半径随高度的变化,云滴有效半径的表达式为^[28-30]:

$$r_e = k \left(\frac{3L\rho_a}{4\pi\rho_w N} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

其中 ρ_a 为大气密度, L 为云水含量, ρ_w 为水的密度, k 为缩放系数,在陆地上取为1.077。 L 为云水含量(g m^{-3}), N 为云滴数浓度(个/ cm^3)。

城市污染型情况下,更多的气溶胶可以形成更多的云凝结核(CCN),云滴的形成消耗了更多的CCN,云滴数浓度增加,使得云滴有效半径较小,为7 μm 左右(图4(a))。城市轻度污染型情况下云滴的有效半径主要集中在10 μm 左右(图4(a))。可以看到,城市污染型情况下形成了大量有效半径较小的云滴,碰并效率降低,不利于云水向雨水的转化(图4(b)),云水向雨水的转化率为 $2.0 \times 10^{-5} \text{ g kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。城市轻度污染型情况下,云凝结核(CCN)相对较少,云滴有效半径较大,有利于云滴的碰并增长,云水向雨水的转化率达到 $3.0 \times 10^{-5} \text{ g kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$,有利于雨滴的形成(图4(b))。

图5是区域A内平均水成物含量随高度的变化。可以看到,城市气溶胶的增多对云的微物理过程有较明显的影响。城市污染背景下,城市气溶胶污染增强有利于云滴增加,城市污染型情况下,最大云水含量达到 0.16 g kg^{-1} ,位于零度层(550 hPa)以上,而城市轻度污染型情况下,最大云水含量约为 0.08 g kg^{-1} ,云水主要位于零度层以下(图5(a))。因为城市污染型情况下,云滴有效半径较小(图4(a)),减小了云滴的重力沉降速度,有利于云滴向高层发展,形成大量过

冷云滴,这对冷云过程有重要的影响。

城市污染型情况下,云内冰晶含量增加(图5(b)),最大雪粒子和霰粒子含量分别为 0.09 和 0.18 g kg^{-1} 左右(图5(c))。城市轻度污染型情况下,雪粒子和霰含量分别达到 0.088 和 0.23 g kg^{-1} (图5(d)),这表明城市污染气溶胶不利于霰的形成。

城市污染型情况下,云中最大雨滴含量仅为 0.17 g kg^{-1} (图5(e)),城市轻度污染型情况下,云中最大雨滴含量为 0.26 g kg^{-1} (图5(e))。可以看到,随着气溶胶污染增强,云中雨滴含量逐渐减小。

由此可以看到,云凝结核(CCN)的数浓度增加会形成更多云滴,云滴通过碰并过程影响暖云过程,同时云滴在动力作用下向零度层以上发展影响冷云过程。

3.2 城市气溶胶对云动力过程的影响

图6是区域A的最大上升气流和最大下沉气流随时间的变化。可以看到,城市污染型有利于对流初期的发展增强(图6(a)),随着对流的发展,城市污染型情况下最大上升气流达到 19 m s^{-1} ,城市轻度污染型情况下最大上升气流为 21 m s^{-1} 。城市污染气溶胶对最大上升气流的发展强度影响相对较小,城市气溶胶污染增强对上升气流仅有一定的减弱作用。

对流发展初期,城市污染型和轻度污染型情况下的最大下沉速度分别为 -6.0 和 -7.0 m s^{-1} (图6(b)),随着对流的移动发展和降水的产生,城市污染型和轻度污染型情况下的最大下沉气流分别达 -8 和 -11.3 m s^{-1} 。可以看到,城市污染气溶胶对最大下沉气流有重要的影响作用,城市污染气溶胶浓度的增加使得

图4 (a) 云滴有效半径垂直分布; (b) 云水向雨水的平均转化量

Figure 4 (a) The vertical distribution of cloud droplet effective radius; (b) the average amount of cloud water convert to rainwater

图5 平均水成物含量垂直分布. (a) 云滴; (b) 冰晶; (c) 雪; (d) 霰; (e) 雨滴

Figure 5 The vertical distribution of average hydrometeors. (a) Cloud droplet; (b) ice; (c) snow; (d) graupel; (e) raindrop

最大下沉气流明显减弱。

3.3 城市气溶胶对云和降水的主要影响机制

非绝热过程对云系的结构和演变以及大尺度环境场都有重要的影响, 不同城市气溶胶浓度通过凝结、冻结和凝华等云微物理过程改变云的结构和动力过程, 进而影响城市降水. 图7为非绝热过程随时间的演变. 可以看到, 城市污染型情况下冻结潜热释放相对较大(图7(a)), 这主要是由于零度层以上大量过

冷云滴存在(图5(a)), 有利于冻结过程的发生, 释放冻结潜热. 城市污染型情况下的凝华潜热释放相对较小(图7(b)), 凝华过程相对较弱. 相对于冻结潜热释放, 潜热释放过程中凝华潜热的加热作用更为明显, 因此城市轻度污染型情况下, 总的潜热释放相对较大, 这使得浮力增强, 上升气流增大(图6(a)), 有利于促进云系对流活动的发展. 但总体说来, 城市污染型情况和城市轻度污染型情况下的潜热释放加热作用的差别较小, 因此在城市污染型和城市轻度污

图6 区域A内(a)最大上升速度和(b)最大下沉速度随时间的变化

Figure 6 Time evolution of the (a) maximum updraft and (b) maximum downdraft in the region A

染型情况下最大上升气流的强度差异也相对较小。

降水性粒子的融化和蒸发对下沉气流有重要的作用。城市污染型情况下,最大平均融化冷却率为 -0.065 s^{-1} ,最大平均雨水蒸发冷却率为 -0.23 s^{-1} ,而城市轻度污染型情况下,最大平均融化冷却率和最大平均雨水蒸发冷却率分别为 -0.06 s^{-1} 和 -0.35 s^{-1} (图7(c), (d)). 相对于霰粒子的融化,雨水的蒸发冷却作用更为明显。因此,城市轻度污染型情况下,较强的雨水蒸发冷却作用,使得下沉气流得到了更好的发展加强(图6(b)),这也是城市污染型情况和城市轻度污染型情况下下沉气流强度显著不同的主要原因。

伴随降水过程的下沉气流一般比较湿冷,湿冷空气在下降过程中,雨水蒸发冷却作用使得强下沉气流进一步变冷和加速,因此到达地面后会形成强冷池和强辐散出流。图8(a)和8(b)分别为地面最小扰动位温和地面最大风速随时间的变化。可以看到,城市污染型情况下,地面最小扰动位温为 -3.5 K ,城市

轻度污染型情况下,地面最小扰动位温为 -3.8 K ,降水过程中城市轻度污染型情况下的冷池更为明显(图8(a)). 由于冷池由高密度的冷空气组成,因此强冷池的形成在地面产生雷暴高压,加强了地面辐散出流速度,地面产生强风速区。城市污染型情况下,地面最大风速为 18.5 m s^{-1} ,城市轻度污染型情况下的地面最大风速为 19.5 m s^{-1} ,随着气溶胶污染的增强,地面最大风速减小约5% (图8(b)). 地面强风速有利于抬升前部空气,形成较强的辐合抬升,促进对流的发展和新的对流的形成。这一点在图8(c)和8(d)中辐合和辐散场随高度的变化可以看到,城市轻度污染型情况下,在对流发展旺盛期(图6(b)),强下沉气流及其辐散出流在低层形成较强的辐散,而由雷暴高压加速的低层辐散出流与前部空气产生了较强的辐合,这有利于水汽的垂直输送。同时,在城市轻度污染型情况下,高层存在相对较强的辐散,这对对流的发展增强也起到了一定的作用。

为了进一步说明地面辐合对水汽垂直输送的影

图7 非绝热过程随时间的演变. (a) 平均冻结潜热; (b) 平均凝华潜热; (c) 平均霰和雪融化潜热; (d) 平均雨滴蒸发潜热
Figure 7 Time evolution of nonadiabatic heating process. (a) The average latent heat of freezing; (b) the average latent heat of sublimation; (c) the average latent heat of graupel and snow melting; (d) the average latent heat of raindrop evaporation

图8 不同CCN浓度对环境场的影响. (a) 地面最小扰动位温和(b)地面最大风速随时间的变化; (c) 城市污染型和(d)城市轻度污染型最大辐合辐散场随时间和高度变化 (单位: 10^{-3} s^{-1})

Figure 8 The effect of different CCN concentrations on meteorology environment fields. Time evolution of (a) minimum perturbation potential temperature and (b) maximum wind speed on the surface. Time-height distribution of maximum convergence and maximum divergence of (c) urban polluted and (d) urban slightly polluted (Unit: 10^{-3} s^{-1})

响,图9(a)为区域A内最大向上水汽垂直通量随时间的变化.水汽的垂直通量表达式为

$$f = w \cdot \rho_v = \frac{w \cdot \varepsilon \cdot r \cdot p}{R_d \cdot T \cdot (\varepsilon + r)}, \quad (3)$$

其中, f 为水汽的垂直输送通量, w 为气流垂直速度, ρ_v 为水汽密度, r 为水汽混合比, p 为大气压强, T 为大气温度, R_d 为比气体常数, $\varepsilon = 0.622$.

可以看到,城市污染型情况下,最大垂直水汽通量为 $110 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 城市轻度污染型情况下,最大向上垂直水汽通量为 $140 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 此次强降水过程主要发生在2011年8月14日00时至04时,城市轻度污染型情况下,最大下沉气流和地面冷池相对较强(图6(b)),低层辐散达到 $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 以上,强辐散出流促进了前部气流的辐合抬升,最大辐合抬升达到 $-4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 以上,因此有利于水汽的垂直输送. 城市污染型情况下,云内最强下沉气流和地面冷池相对较弱,地面强风速减小,不利于低层气流的辐合抬升,水汽垂直输送减弱.

图9(b)为平均降水转化率随时间的变化.降水转化率是指实际降水量和与可能降水量的百分比,即:

$$\eta = \frac{P}{W} \times 100\%, \quad (4)$$

其中, P 为降水量, W 为整层大气可降水量. 城市污染型情况下,最大降水转化率为16%,城市轻度污染型情况下最大平均降水效率达到18%,这主要是由于城市轻度污染型情况下云内碰并效率较强(图4),有利于水汽向降水性粒子的转化,降水转化率增强(图9(b)),同时水汽垂直输送增强(图9(a)),使得更多的

水汽向降水转化,导致地面降水增加. 城市污染型情况下,降水效率减小,水汽垂直输送减弱,因此地面降水减小.

4 结论与讨论

本文利用中尺度可分辨云模式(WRF)和北京地区高分辨率快速更新循环同化和预报系统,研究了北京及周边城市气溶胶污染对2011年8月14日北京地区一次强降水过程的影响. 研究结果表明:

(1) 城市气溶胶污染对区域平均降水量均有一定的增加作用,城市轻度污染型情况下区域平均降水量增加39.42%,城市污染型情况下降水增加15.63%,城市重度污染型情况下降水增加12.28%. 城市污染背景下,区域平均降水量随气溶胶浓度增加而逐渐减小,城市污染型相对于城市轻度污染型区域平均降水量减少约17%;

(2) 城市污染型情况下,城市污染气溶胶增多使得云凝结核(CCN)增多,云滴数浓度增加,云滴有效半径减小,零度层以下云滴碰并效率降低,抑制云水向雨水的转化,雨滴数浓度减少,零度层以上过冷云水含量碰冻过程增强,冰晶含量增加,对冷云过程产生重要影响;

(3) 城市污染型情况下,城市污染气溶胶增多使得凝华过程减弱,潜热释放加热作用减小,不利于强上升气流的发展增强,雨滴蒸发过程减弱,不利于零度层以下强下沉气流的发展和维持,地面冷池和最大风速减弱,低层辐合抬升减弱,不利于水汽垂直输送和降水的转化,地面降水减小. 因此,城市污染气溶胶通过云微物理过程影响热力场和动力场来影响地面降水过程.

图9 (a) 最大垂直水汽通量和(b)平均降水转化率随时间的变化

Figure 9 Time evolution of (a) the maximum vertical vapor flux and (b) average conversion rate of precipitation in the regional A

致谢 感谢北京应用气象研究所许焕斌研究员的悉心指导。

参考文献

- Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, 297: 2250–2253
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, 2001, 294: 2119–2124
- Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B, et al. Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? *Science*, 2008, 321: 1309–1313
- Warner J, Twomey S. The production of cloud nuclei by cane fires and the effect on cloud droplet concentration. *J Atmos Sci*, 1967, 24: 704–706
- Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. *J Atmos Sci*, 1977, 34: 1149–1152
- Rosenfeld D. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 3105–3108
- Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 2000, 287: 1793–1796
- Givati A, Rosenfeld D. Quantifying precipitation suppression due to air pollution. *J Appl Meteorol*, 2004, 43: 1038–1056
- Lin J C, Matsui T, Pielke R A, et al. Effects of biomass-burning-derived aerosols on precipitation and clouds in the Amazon Basin: A satellite-based empirical study. *J Geophys Res: Atmos*, 2006, 111: D19
- Shepherd J M, Burian S J. Detection of urban-induced rainfall anomalies in a major coastal city. *Ear Interact*, 2003, 7: 1–17
- Khain A, Rosenfeld D, Pokrovsky A. Aerosol impact on the dynamics and microphysics of deep convective clouds. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2005, 131: 2639–2663
- Khain A, BenMoshe N, Pokrovsky A. Factors determining the impact of aerosols on surface precipitation from clouds: An attempt at classification. *J Atmos Sci*, 2008, 65: 1721–1748
- Shao Z Y, Zhou T, Shi P J, et al. Spatial-temporal characteristics of the influence atmospheric pollutant inn surface solar radiation changes for Chinese key cities (in Chinese). *Plateau Meteorol*, 2009, 28: 1105–1114 [邵振艳, 周涛, 史培军, 等. 大气污染对中国重点城市地面总辐射影响的时空特征. *高原气象*, 2009, 28: 1105–1114]
- Fan Y Q, Li C Q. Visibility trends in Beijing, Tianjin and Hebei Province during 1980–2003. *Plateau Meteorol (in Chinese)*, 2009, 27: 1392–1400 [范引琪, 李春强. 1980–2003年京、津、冀地区大气能见度变化趋势研究. *高原气象*, 2009, 27: 1392–1400]
- Zhao Z C. The changes of temperature and the effects of the urbanization in China in the last 39 years (in Chinese). *Meteorol Monthly*, 1991, 17: 14–17 [赵宗慈. 近 39 年中国的气温变化与城市化影响. *气象*, 1991, 17: 14–17]
- Xu X D, Shi X H, Zhang S J, et al. Aerosol influence domain of Beijing and peripheral city agglomeration and its climatic effect. *Chin Sci Bull*, 2005, 50: 2522–2530 [徐祥德, 施晓晖, 张胜军, 等. 北京及周边城市群气溶胶影响域及其相关气候效应. *科学通报*, 2005, 50: 2522–2530]
- Li S Y, Chen H B, Li W. The impact of urbanization on city climate of Beijing region (in Chinese). *Plateau Meteorol*, 2008, 27: 1102–1110 [李书严, 陈洪滨, 李伟. 城市化对北京地区气候的影响. *高原气象*, 2008, 27: 1102–1110]
- Zhao N, Liu S H, Yu H Y. Urbanization effects on local climate in Beijing in recent 48 years (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2011, 35: 373–385 [赵娜, 刘树华, 虞海燕. 近48年城市化发展对北京区域气候的影响分析. *大气科学*, 2011, 35: 373–385]
- Duan J, Mao J T. Influence of aerosol on regional precipitation in North China. *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 474–483
- Yue Z G, Liu X D, Liang G. Numerical simulation of influence of aerosols on different cloud precipitation types in Beijing area (in Chinese). *Plateau Meteorol*, 2011, 30: 1356–1367 [岳治国, 刘晓东, 梁谷. 气溶胶对北京地区不同类型云降水影响的数值模拟. *高原气象*, 2011, 30: 1356–1367]
- Guo X, Fu D, Guo X, et al. A case study of aerosol impacts on summer convective clouds and precipitation over northern China. *Atmos Res*, 2014, 142: 142–157
- Fan S Y, Wang H L, Chen M, et al. Study of the data assimilation of radar reflectivity with the WRF 3D-Var (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2013, 71: 527–537 [范水勇, 王洪利, 陈敏, 等. 雷达反射率资料的三维变分同化研究. *气象学报*, 2013, 71: 527–537]
- Zhang Y Z, Miao S G, Dai Y J, et al. Numerical simulation of characteristics of summer clear day boundary layer in Beijing and the impact of urban underlying surface on sea breeze (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2013, 56: 2558–2573 [张亦洲, 苗世光, 戴永久, 等. 北京夏季晴天边界层特征及城市下垫面对海风影响的数值模拟. *地球物理学报*, 2013, 56: 2558–2573]
- Mansell E R, Ziegler C L, Bruning E C. Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics. *J Atmos Sci*, 2010, 67: 171–194
- Zhang Q, Quan J, Tie X, et al. Impact of aerosol particles on cloud formation: Aircraft measurements in China. *Atmos Environ*, 2011, 45: 665–672
- Fan J, Leung L R, Li Z, et al. Aerosol impacts on clouds and precipitation in eastern China: Results from bin and bulk microphysics. *J Geophys Res: Atmos*, 2012, 117: D2

- 27 Levin Z, Cotton W R. Aerosol Pollution Impact on Precipitation: A scientific review. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2008
- 28 Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres. *Space Sci Rev*, 1974, 16: 527–610
- 29 Stephens G L. Radiation profiles in extended water clouds. II : Parameterization schemes. *J Atmos Sci*, 1978, 35: 2111–2122
- 30 Slingo A, Schrecker H M. On the shortwave radiative properties of stratiform water clouds. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 1982, 108: 407–426

Impacts of aerosols from Beijing and the surrounding areas on urban precipitation

CHEN WeiDong^{1,3,4}, FU DanHong², MIAO ShiGuang¹ & ZHANG YiZhou¹

¹*Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China;*

²*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*

³*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;*

⁴*China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China*

The aerosol properties and possible impacts on a convective precipitation case on 14 August 2008 over the Beijing region are investigated by using Weather Research and Forecasting Model (WRF). The results show that the domain-averaged precipitation amount can be increased up to 39.42%, 15.63% and 12.28% under slightly, moderately and heavily polluted conditions, respectively. Under polluted conditions, the increase of aerosols can lead to the decrease of the domain-averaged precipitation amount over the Beijing region. The domain-averaged precipitation amount can be reduced about 17% between light polluted and polluted conditions, which is mainly caused by the increase of the number of cloud condensation nuclei and cloud droplets and the decrease of cloud droplet effective radius. Many small cloud droplets nucleating from high aerosol concentrations may not grow larger, and coalesce very inefficiently into raindrops, and the cooling processes of the raindrops weaken, which is not favorable to the development and maintain of downdrafts and lead to the decreases of the surface outflow wind speed and cold pool near the surface, and the low-level convergence produced by the interactions between low-level cold outflows and large-scale low-level airflow weakens, which is not favorable to the vertical transport of water vapor and conversion of precipitation, and leads to the decrease of precipitation. Therefore, the mainly mechanism is the effects of the cloud and microphysical processes on the thermal and dynamic fields under polluted conditions.

aerosol, precipitation, numerical simulation

doi: 10.1360/N972015-00217