张艳晴,高怡,许丽人,等.2024.气溶胶效应对北京一次暴雨过程影响的数值模拟研究[J].暴雨灾害,43(6):657-667. ZHANG Yanqing, GAO Yi, XU Liren, et al. 2024. Numerical analysis of aerosol effects on a heavy precipitation event in Beijing [J]. Torrential Rain and Disasters,43(6):657-667 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-235

气溶胶效应对北京一次暴雨过程影响的数值模拟研究

张艳晴[1],高怡[2],许丽人[4],张美根[2,3]

(1. 北京市气象服务中心,北京 100089;2. 中国科学院大学大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室,北京 100029; 3. 中国科学院大学地球与行星科学学院,北京 100049; 4. 地理信息工程国家重点实验室,西安 710054)

摘 要: 人为气溶胶对夏季强降水有重要影响,但其影响程度和相关机理仍具有极大不确定性。以2020年8月12—13日发生在北京的一次区域性暴雨过程为例,利用耦合了气溶胶-气象相互作用的WRF-Chem模式,基于敏感性试验探究了气溶胶直接效应、间接效应与总效应对此次暴雨过程的影响及机制。结果表明:(1) 降水第一阶段(8月12日15:00—18:00) (北京时,下同),由于气溶胶对太阳辐射的消光及对云粒子的影响,气溶胶直接效应、间接效应和总效应均使得北京城区小时雨强减少,最大依次减少6 mm·h^{-1}、1 mm·h^{-1}和4 mm·h^{-1}。(2) 降水第二阶段(8月12日20:00—13日04:00),气溶胶直接和间接效应也均使北京城区小时雨强减少,最大均减少约4 mm·h^{-1},气溶胶总效应对小时雨强影响不大,但使降水时间滞后。总体上,气溶胶直接效应使暖云过程增强、冷云过程减弱,从而减少降水并使第二阶段强降水过程提前;气溶胶间接效应使雨滴的有效半径降低,从而降低碰并过程,减少降水,并推迟第二阶段强降水的发生时间;气溶胶总效应对降水的影响是气溶胶直接和间接效应共同的非线性影响结果,在降水第一阶段以直接效应为主,第二阶段则以间接效应为主。

关键词: 气溶胶直接效应;气溶胶间接效应;暴雨;数值模拟

中图法分类号: P426.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.12406/byzh.2023-235

Numerical analysis of aerosol effects on a heavy precipitation event in Beijing

ZHANG Yanqing[1], GAO Yi[2], XU Liren[4], ZHANG Meigen[2,3]

(1. *Beijing Meteorological Service Center, Beijing* 100089; 2. *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry (LAPC), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029; 3. *College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049; 4. *State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an* 710054)

Abstract: Anthropogenic aerosols have an important impact on summer heavy precipitation, but their impact and associated mechanisms are still greatly uncertain. In this study, the WRF-Chem including the aerosol-meteorology interactions was used to investigate the effects and possible mechanisms of aerosol direct, indirect, and total effects on a heavy rainfall event that occurred in Beijing during August 12—13, 2020. The results are as follows. (1) In the first stage of the precipitation (15:00—18:00 BT on August 12), due to the aerosol effects on solar radiation and cloud nuclei, the aerosol direct, indirect, and total effects all decrease the hourly precipitation intensity in the Beijing urban area, with a maximum reduction of 6 mm·h^{-1}, 1 mm·h^{-1}, and 4 mm·h^{-1}, respectively. (2) In the second stage (20:00 BT on August 12 to 04:00 BT on August 13), both aerosol direct and indirect effects decrease the hourly precipitation intensity, with a maximum reduction of about 4 mm·h^{-1}. The aerosol total effect has little impact on the hourly precipitation intensity but delays the precipitation time. Generally, the aerosol direct effect enhances the warm cloud process while weakening the cold cloud process, thus decreasing the precipitation and advancing the strong precipitation process in the second precipitation stage. The aerosol indirect effect decreases the effective radius of rain, thereby reducing the merging process and precipitation, and delaying the onset of heavy precipitation during the second precipitation stage. The aerosol to-

收稿日期: 2023-11-01;**定稿日期:** 2024-02-19

资助项目: 中国科学院B类先导专项(XDB0760300);国家重点研发计划(2022YFC3701203);北京市自然科学基金(8244061);国家自然科学基金重点项目(41830966)

第一作者: 张艳晴,主要从事气溶胶-云-辐射研究。E-mail: 1094806786@qq.com

通信作者: 张美根,主要从事空气质量模式研究和应用。E-mail: mgzhang@mails.iap.ac.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

tal effect on precipitation is a nonlinear result of both aerosol direct and indirect effects, with the direct effect dominating in the first stage of precipitation and the indirect effect dominating in the second stage of precipitation.

Key words: aerosol direct effect; aerosol indirect effect; heavy precipitation; numerical simulation

引 言

人为气溶胶是大气中悬浮的固态或液态颗粒，可通过直接、半直接和间接效应对降水产生影响(Ackerman et al.，2000；Choudhury et al.，2020)。气溶胶直接效应是指气溶胶通过吸收、散射和反射辐射，对大气辐射收支产生影响，进而影响大气的稳定性(Bollasina et al.，2011)，从而影响降水。气溶胶半直接效应是指气溶胶中某些对短波辐射具有较强吸收作用的粒子还会向外重新释放吸收的辐射，从而加热大气和云团，对云和降水产生影响(Johnson et al.，2004；Mallet et al.，2020)。气溶胶间接效应是指气溶胶通过充当云凝结核(CNN)和冰核(IN)影响微物理过程(Rosenfeld et al.，2008；Lee et al.，2016)，从而影响降水。当气溶胶充当CCN时，气溶胶的增加会增加暖云中云滴数浓度，减小云滴有效粒子半径。大量多而小的云滴会增加云的反照率并辐射冷却地面，从而影响降水过程，该效应被称为“Twomey”理论(Twomey，1977)；大量多而小的云滴会通过影响碰并和凝结过程，从而影响暖云过程(Rosenfeld et al.，2014)。气溶胶作为冰核活化形成冰晶参与云微物理过程，影响云的特性，如Grabowski和Morrison(2020)的研究表明，冰核的增加会增加高层卷云，从而通过辐射对降水过程会产生的影响。同时，冰核的活化过程会释放出比凝结过程更多的潜热能，导致不稳定能量增加，对流上升运动得到加强，降水受到影响(Koren et al.，2005)。

北京作为中国首都和超大城市，在快速城市化的背景下极易受到强降水等灾害天气的影响。因而，北京地区强降水的特征及原因一直是科学家们关注的重点研究之一(岳甫璐等，2014；段伯隆等，2017)。近年来，包括北京在内的华北平原地区污染严重，这促进了国内学者开展关于气溶胶对北京地区降水影响的相关研究。彭杰等(2015)利用卫星资料和观测资料分析了上海及周边地区气溶胶与降水之间的关系，结果发现气溶胶增多会抑制弱降水发生而加强强降水发生。师宇等(2016)利用中尺度气象模式WRF针对2015年7月16—17日降水过程开展数值模拟，研究了不同CCN浓度对云物理和降水过程的影响，结果显示区域平均累计降水量随着气溶胶的增加而减少。陈卫东等(2018)研究了气溶胶污染引起的云滴数增加对北京夏季降水精细数值预报的影响，结果显示气溶胶浓度增加，当水汽供应充足(不足)时，会促进(抑制)降水性粒子形成，降水效率提高(降低)，降水增加(减少)。肖之盛等(2022)利用GPM-DPR观测资料和MERRA-2再分析资料分析了气溶胶污染与华北地区秋、冬季对流云降水和层状云降水的关系，结果表明，与清洁状况相比，气溶胶污染状况下对流云降水的降水强度有所增强，云顶高度更高。在污染状态下对流云降水具有粒径小但数浓度高的降水粒子，潜热加热率更高。

以上研究大多利用观测资料、再分析资料和WRF模式探讨气溶胶浓度对降水的影响，而未区分气溶胶直接效应和间接效应，且缺乏两者对降水的影响机理分析。因此，本文以北京地区一次暴雨天气过程为例，利用耦合了气溶胶-气象相互作用的WRF-Chem模型，通过是否考虑气溶胶-辐射反馈和气溶胶-云相互作用开展了数值模拟试验，分析了气溶胶直接效应、间接效应和总效应对北京此次暴雨天气过程中累计降水量、小时雨强的影响，并从辐射和云微物理过程解释三者对降水的可能影响机理，以期深入理解气溶胶与天气气候变化的成因和发展机制、气溶胶-云-降水的相互作用。

1 模式设置与试验方案

1.1 模式设置

本文使用WRF-Chem v4.2，设置双层嵌套，水平分辨率分别为9 km和3 km，网格数为308×308和280×280，模拟的中心经纬度为(116.148°E，37.961°N)。垂直方向为59层。模拟时间为2020年8月10日08∶00(北京时，下同)—14日08∶00，前一天为模式的spin-up时间。

使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代(ERA5)再分析资料(Hersbach et al.，2020)作为模式气象初始和边界条件，时间和空间分辨率为3 h和0.25°×0.25°。模拟中使用了Noah陆面方案、Revised MM5 Monin-Obukhov方案、YSU边界层方案、SLUCM城市冠层方案、Morrison双参微物理方案和RRTMG长波/短波方案，仅在最外层使用了Grell-Freitas积云方案。化学方案选取碳键机制(CBMZ)、模拟气溶胶相互作用和化学模型(MOSAIC)以及Fast-J光化学反应机制。人为排放使用2016年MEIC(Multi-resolution Emission Inventory for China)月度排放清单(Zhang et al.，2009；Lei et al.，2011)。

1.2 模式试验方案设计

为了探究气溶胶效应对此次强降水过程的影响，共设置了四组试验，如表1所示。控制试验具有标准的人

为排放量，并且气溶胶与气象模拟完全耦合。通过关闭气溶胶和气象变量之间的反馈来消除模型中的气溶胶直接效应，记作试验1。将 Morrison 方案中的云滴数浓度设置为常数(10 cm^{-3})，同时关闭该方案中化学模块，即化学模块生成的气溶胶理化性质不传递给云微物理方案，即相当于关闭了气溶胶的间接效应(Zhao et al.，2017)，记作试验2。同时消除气溶胶的直接效应和间接效应，记作试验3。气溶胶直接效应对降水的影响为控制试验和试验1之间的差异，气溶胶间接效应对降水的影响则为控制试验和试验2的差值，气溶胶总效应对降水的影响为控制试验与试验3的差异。

表1 试验方案设计

Table 1 Numerical experimental design

试验名称	试验方案	气溶胶-辐射反馈	气溶胶-云相互作用
控制试验	同时包含气溶胶直接效应、间接效应	开	开
试验1	关闭气溶胶直接效应，其他与控制试验相同	关	开
试验2	关闭气溶胶间接效应，其他与控制试验相同	开	关
试验3	关闭气溶胶直接和间接效应，其他与控制试验相同	关	关

2 资料与个例降水实况

2.1 所用资料

本文使用的观测资料包括：(1) 2020年8月12日00:00—13日14:00北京251个区域和国家气象站降水数据，来源于全国综合气象信息共享平台“天擎”，并由该平台进行了质控。(2) $PM_{2.5}$逐小时浓度，站点包括：万寿西宫(116.37°E，39.88°N)、定陵(116.23°E，40.30°N)、海淀区万柳(116.31°E，39.97°N)、顺义新城(116.66°E，40.19°N)、昌平(116.23°E，40.23°N)和古城(116.03°E，40.55°N)，数据来自中国国家环境监测中心。

2.2 暴雨个例降水实况

2020年8月12日00:00—13日14:00北京市出现区域性强降雨天气过程(图1a)，大部分地区出现暴雨，沿山一带出现大暴雨，并伴有雷电和局地7—9级短时大风，强降雨主要集中在12日21:00—13日01:00，期间有36个站小时雨强超过50 mm·h^{-1}。12日11:00—13日10:00，全市平均累计降水量69.5 mm，城区平均92.8 mm，西北部68.8 mm，东北部68.7 mm，西南部65.1 mm，东南部45.9 mm；最大降雨出现在昌平沙河水库156.7 mm；最大小时雨强出现在昌平回龙观，即12日22:00—23:00达73.3 mm·h^{-1}。

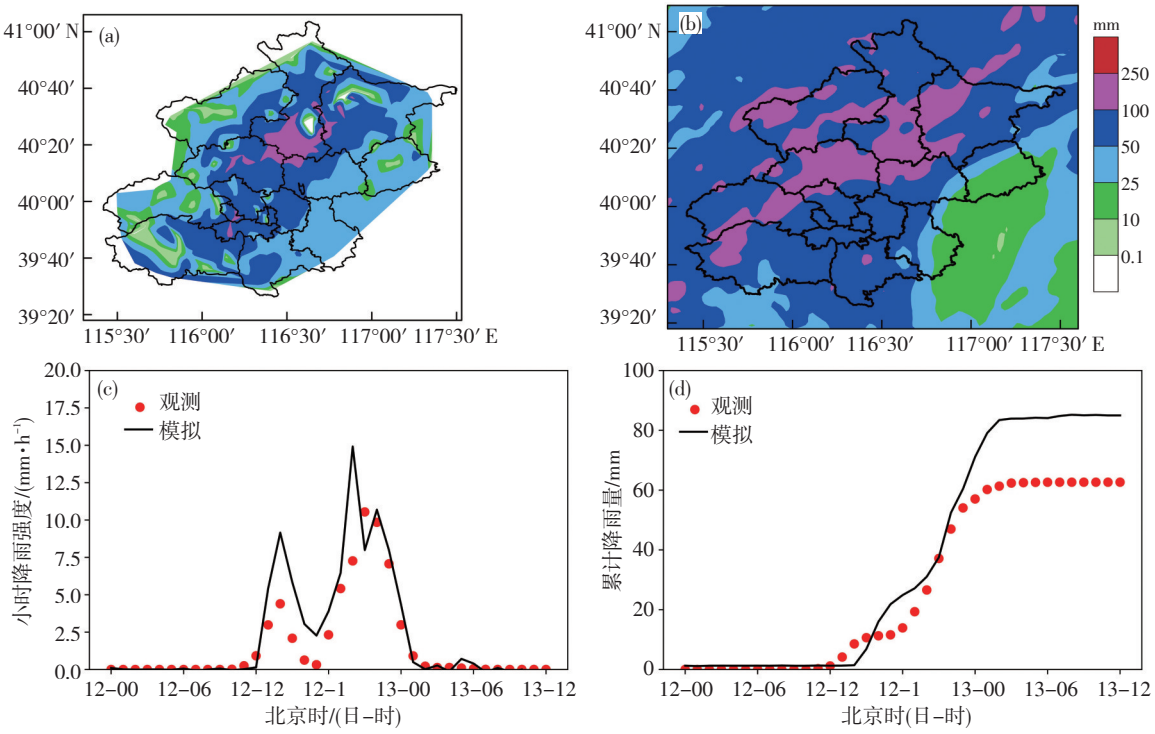


图1 2020年8月12日00:00—13日14:00北京地区累计降水量观测(a)和模拟(b)对比图、北京平均小时雨强模拟和观测(c)及累计降水量模拟和观测(d)时间序列曲线

Fig.1 Comparison of (a) observed and (b) simulated spatial distribution accumulated precipitation in Beijing, (c) time series of simulated and observed hourly rainfall intensity, and (d) simulated and observed accumulated precipitation from 00:00 BT on August 12 to 14:00 BT on August 13, 2020

3 模拟结果与分析

3.1 模拟效果检验

利用北京251个自动气象站的降水数据对模式模拟降水的能力进行评估。由图1a—b可知，观测的降水中心在延庆南部、昌平东北和顺义西北，累计降雨量大于100 mm，模拟的降水中心范围和降水量级均偏大，模拟的降水中心分布在北京西部，累计降雨量大于100 mm。从图1c可见，本次降水过程分为两个阶段，第一个阶段为2020年8月12日15:00—18:00，模拟的最大小时雨强为10 mm·h^{-1}左右，观测的最大小时雨强为6 mm·h^{-1}左右。第二阶段为2020年8月12日20:00—13日04:00，模拟的最大小时雨强约15 mm·h^{-1}，观测的最大小时雨强约11 mm·h^{-1}。模式高估了本次降雨过程的小时雨强，因此累计降雨量也明显高估，高估约30 mm (图1d)。进一步分析不同量级降水的TS评分(表2)，发现≥0.1 mm和≥10 mm的TS评分均为100，漏报和空报的站点数均为0。≥25 mm的TS评分为90.7，漏报和空报站点数接近。而降雨量级≥50 mm和≥100 mm时，空报的站点数明显增多，这是由于与观测相比模拟的降水中心略偏，降水量级偏大造成的。

表2 北京地区2020年8月12日00:00—13日14:00不同量级降水的TS评分

Table 2 TS scores for different magnitudes of precipitation in Beijing from 00:00 BT on August 12 to 14:00 BT on August 13, 2020

降水量级	TS评分/%	站点总数	漏报站点数	空报站点数
≥0.1 mm	100	251	0	0
≥10 mm	100	251	0	0
≥25 mm	90.7	248	13	10
≥50 mm	61.7	227	3	84
≥100 mm	25.0	68	6	45

为探究气溶胶效应对降水的影响，需要评估模式模拟$PM_{2.5}$的能力。图2为模拟和观测$PM_{2.5}$的时间变化曲线。可见模式很好地模拟出本次降水期间$PM_{2.5}$随时间的变化特征，相关系数为0.54~0.88 (表3)，在降水初期$PM_{2.5}$处于高值(60~70 μg·m^{-3})，随着降水的湿沉降，$PM_{2.5}$浓度逐渐降低，后期约10 μg·m^{-3}。结合表3可知，模式低估了除海淀区万柳以外站点的$PM_{2.5}$浓度(标准化平均偏差为−1.9%~−36.5%)，这可能是由于对人为排放的低估造成的。总得来说，模式能很好地再现本次暴雨过程的累计降水量、小时雨强和$PM_{2.5}$浓度变化，为开展气溶胶直接效应、间接效应对降水影响的研究奠定了基础。

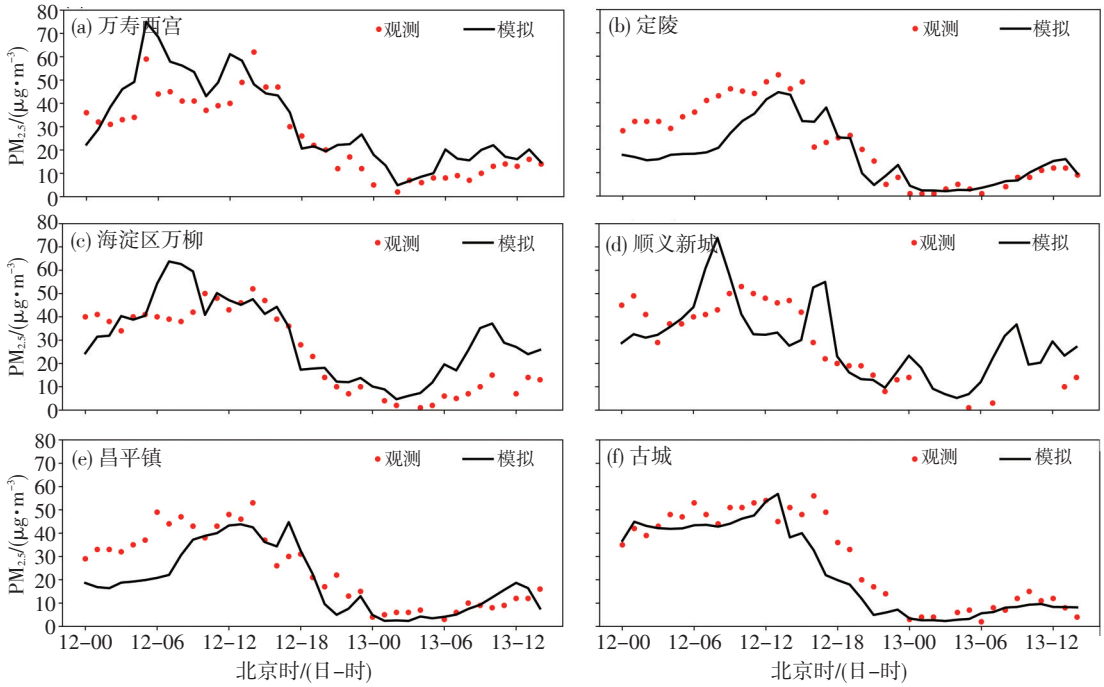


图2 2020年8月12日00:00—13日14:00北京万寿西宫(a)、定陵(b)、海淀区万柳(c)、顺义新城(d)、昌平(e)和古城(f)站$PM_{2.5}$模拟值与观测值对比

Fig. 2 Comparison of simulated and observed $PM_{2.5}$ at (a) Wanshou Xigong, (b) Dingling, (c) Haidian Wanliu, (d) Shunyi Xincheng, (e) Changping, and (f) Gucheng sites in Beijing from 00:00 BT on August 12 to 14:00 BT on August 13, 2020

3.2 气溶胶直接效应和间接效应对降水的影响

气溶胶直接效应、间接效应和总效应对累计降水量影响的水平分布以及降水期间小时雨强和累计降水量的时间序列曲线见图3。由图3a—c可知，气溶胶直接效应和间接效应均会使北京城区降水减少，分别减少约40 mm和80 mm，总效应则使城区西部降水减少，东部降水增加。为了更好地分析气溶胶效应对降水的影响及机理，以下均以北京城区(图3a红框)为例进行分析。

表3 2020年8月12日00:00—13日14:00模拟和观测的$PM_{2.5}$及其相关系数与偏差

Table 3 Statistics of simulated and observed $PM_{2.5}$ and its correlation coefficient and deviation from 00:00 BT on August 12 to 14:00 BT on August 13, 2020

站名	观测平均/($\mu g\cdot m^{-3}$)	模式平均/($\mu g\cdot m^{-3}$)	相关系数	平均偏差/($\mu g\cdot m^{-3}$)	标准化平均偏差/%
万寿西宫	31.3	30.7	0.60	−0.6	−1.9
定陵	23.2	14.7	0.88	−8.5	−36.5
海淀区万柳	30.5	31.3	0.54	0.8	2.6
顺义新城	32.1	26.4	0.54	−5.6	−17.5
昌平镇	25.9	17.0	0.82	−8.9	−34.3
古城	33.0	22.4	0.76	−10.7	−32.3

由图3d—e可知，在降水第一阶段，控制试验、试验1、试验2和试验3的最大小时雨强分别约为11 mm·h^{-1}、17 mm·h^{-1}、12 mm·h^{-1}和15 mm·h^{-1}。可见，气溶胶直接效应、间接效应和总效应均减少了小时雨强，分别约6 mm·h^{-1}、1 mm·h^{-1}和4 mm·h^{-1}。在降水第二阶段，控制试验、试验1、试验2和试验3的最大小时雨强分别约为10 mm·h^{-1}、14 mm·h^{-1}、14 mm·h^{-1}和10 mm·h^{-1}，即气溶胶直接效应和间接效应均使小时雨强减少约4 mm·h^{-1}，总效应对小时雨强影响不大，但使降水时间滞后。在降水的两个阶段，气溶胶间接效应均使降水过程滞后。对于累计降水量(图3e)，控制试验、试验1、试验2和试验3的累计降水量分别约为80 mm、100 mm、115 mm和80 mm，因此，气溶胶直接效应的影响弱于气溶胶间接效应，累计降水量分别减少20 mm和35 mm，总效应的影响则很微弱。这也说明了气溶胶效应的对降水影响的非线性。此外，试验2和试验3降水的起始时间相比控制试验提前了约1 h左右，而对强降水发生时段影响不大。从降水第二阶段可以看出，试验3和试验2的强降水发生时间相比控制试验同样提前了约1 h左右。

3.3 气溶胶直接和间接效应对辐射和云微物理过程的影响

图4为不同试验北京城区(图3a红色方框)总水凝物(云+冰+雪+霰+雨)的时间−高度剖面，反映了气溶胶直接、间接和总效应对云过程的影响。从图中可见，三者对云过程的影响不同。各数值试验在降水第一阶段的水凝物分布主要集中在4 km以上，试验1和控制试验超过1.5 g·kg^{-1}的范围大于试验3和试验2。降水第二阶段，气溶胶效应对总水凝物的影响与第一阶段不同。控制试验总水凝物含量大值区离地约1 km左右，最大约为1.3 g·kg^{-1}；试验1总水凝物含量从地面至高空6 km约1.2 g·kg^{-1}；试验2和试验3总水凝物含量的大值区则主要集中在4 km以上，其中试验2的水凝物含量最大值超过2.0 g·kg^{-1}，高于试验3的1.2 g·kg^{-1}。因此，接下来将分别探讨气溶胶效应在辐射和云微物

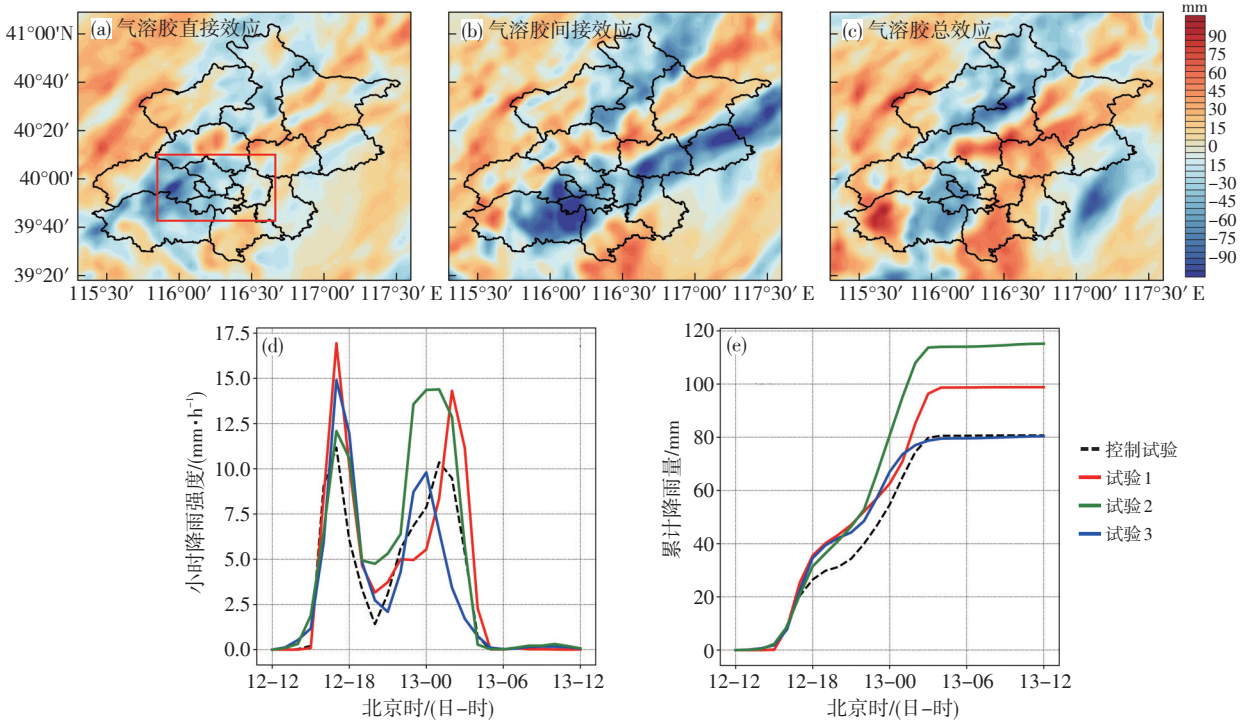


图3 2020年8月12日12:00—13日12:00气溶胶直接效应(a)、间接效应(b)和总效应(c)对北京地区累计降水量影响的水平分布以及降水期间小时雨强(d)和累计降水量(e)的时间序列曲线(图a中的红框代表北京城区)

Fig. 3 Horizontal distribution of (a) aerosol direct effect, (b) aerosol indirect effect, and (c) aerosol total effect on accumulated precipitation (unit: mm) and time series of (d) hourly precipitation intensity and (e) accumulated precipitation over Beijing during the period from 12:00 BT on August 12 to 12:00 BT on August 13, 2020 (the red box in figure a represents the urban area of Beijing)

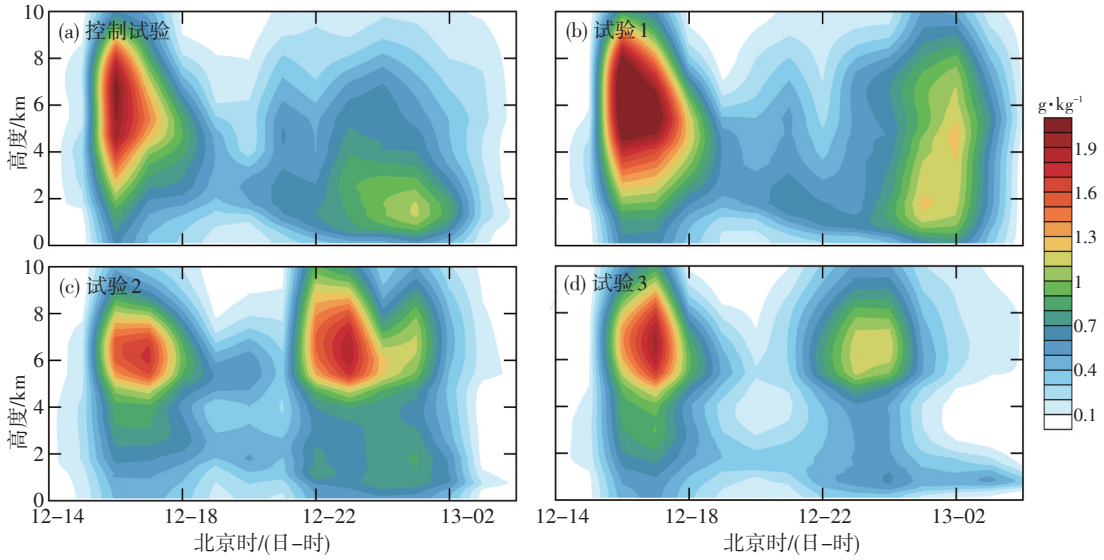


图4 2020年8月12日14:00—13日06:00控制试验(a)、试验1 (b)、试验2 (c)和试验3 (c)北京城区总水凝物含量的时间-高度剖面

Fig. 4 Time-height cross-section of the water condensate content in the urban area of Beijing during the period from 14:00 BT on August 12 to 06:00 BT on August 13, 2020 for (a) control experiment, (b) experiment 1, (c) experiment 2, and (d) experiment 3

理过程中对第一和第二阶段降水的影响。

首先分析气溶胶直接、间接和总效应对降水第一阶段的影响。图5为降水第一阶段北京城区平均水凝物混合比和总雨水生成效率的垂直分布。从中可以

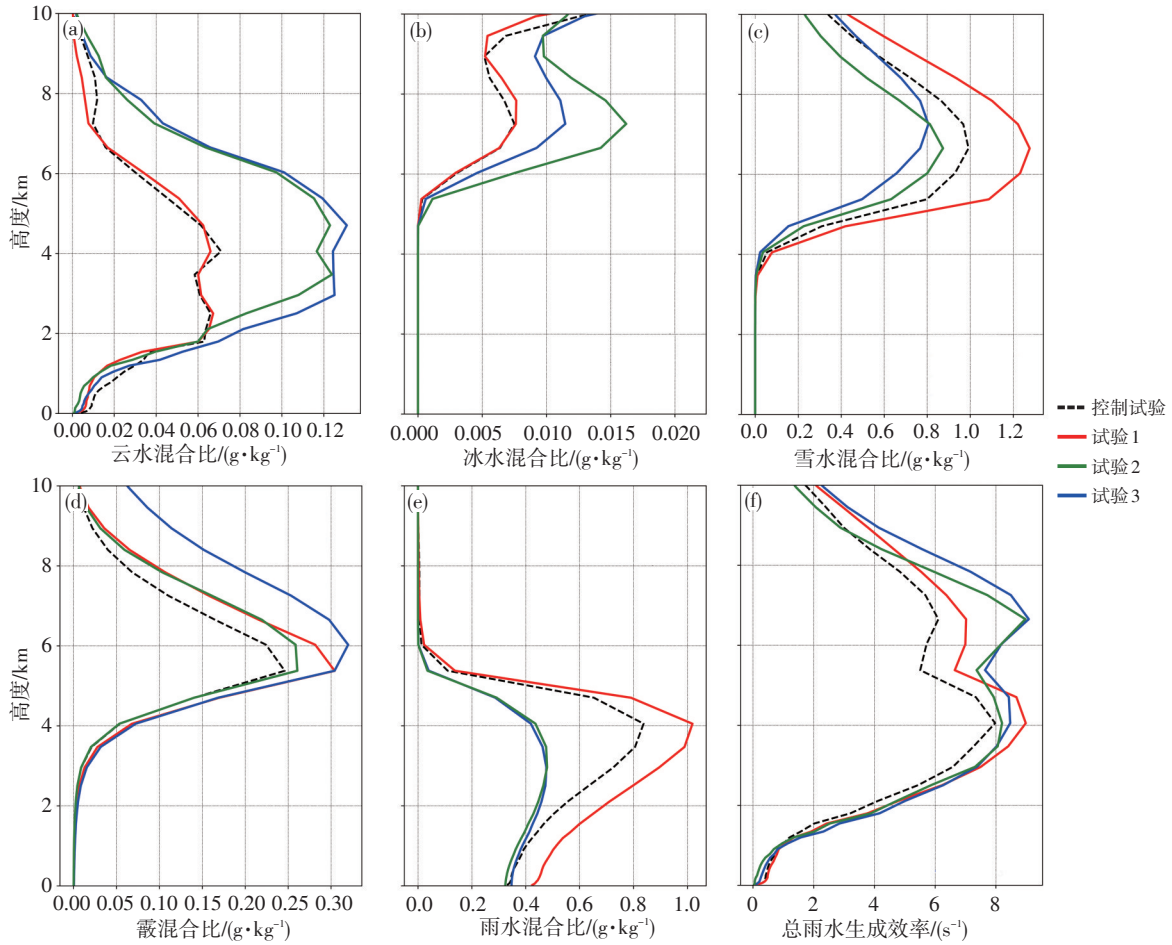


图5 第一降水阶段(2020年8月12日15:00—18:00)北京城区平均云水混合比(a)、冰水混合比(b)、雪水混合比(c)、霰混合比(d)、雨水混合比(e)和总雨水生成效率(f)的垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of average (a) cloud water mixing ratio, (b) ice water mixing ratio, (c) snow water mixing ratio, (d) shrapnel mixing ratio, (e) rainwater mixing ratio, and (f) total rainwater generation efficiency in the Beijing urban area during the first precipitation stage (from 15:00 BT to 18:00 BT on August 12, 2020)

看出，云水主要集中在4 km左右(图5a)，试验2和试验3的云水混合比接近，最大超过0.12 g·kg^{-1}，明显高于控制试验和试验1 (最大约0.06 g·kg^{-1})，说明气溶胶间接效应会使得云水混合比降低。冰相粒子主要集中在2 km以上，其中云冰在5 km以上(图5b)，试验2最大冰粒子混合比超过0.015 g·kg^{-1}；霰粒子主要集中在高空5~6 km处，其中试验1和试验3的霰粒子混合比含量最大超过0.3 g kg^{-1}，高于控制试验和试验2；雪水分布在高空4 km以上，大值区在7 km左右。此外，对比发现此次降水过程雪水占比高于其余水凝物，其中试验1的雪水混合比最大，超过1.2 g·kg^{-1}；试验3的雪水混合比最小，最大约0.8 g·kg^{-1}。试验1和控制试验的雨水混合比最大分别超过1.0和0.8 g·kg^{-1} (高空4 km处)，高于试验3和试验2 (约0.5 g·kg^{-1})，且地面至高空4 km处雨水混合比变化幅度同样大于试验3和试验2。结合图5c—d中雪水和霰的垂直分布可以看出，试验1和控制试验雨水混合比的大值区与雪水混合比有明显的相关性，表明该阶段试验1和控制试验雨水的增加是由冰相降水粒子融化造成的。这从图5f中也可以看出，试验1在高空4 km处总雨水生成效率最高，约为9×10^{-10}。

综上，仅包含气溶胶直接效应使得冰相降水性粒子雪水混合比减少，从而降低了该阶段的降水量，因此需要进一步探究气溶胶直接效应造成雪水混合比降低的原因。图6为2020年8月12日17:00短波辐射、长波辐射、辐射引起的位温倾向、云微物理过程潜热释放、垂直向上水汽通量、垂直上升速度、液滴数浓度和雨水数浓度的垂直分布。从中可见，降水第一阶段，所有试验中短波辐射引起的位温倾向变化均为正值，即短波辐射对大气具有增温作用，并且该增温作用随着高度的增加而逐渐增加，大值区分别位于高空2 km、4 km和8 km处，最大增温约为0.07 K·h^{-1}、0.10 K·h^{-1}和0.14 K·h^{-1}。高空4 km以下，控制试验和试验2的短波辐射引起的位温倾向高于试验3和试验4。长波辐射引起的位温倾向变化基本为负值，表明了长波辐射的降温效果。而2 km以下控制试验辐射引起的位温倾向最高，约0.05 K·h^{-1}，而高空2 km以上辐射引起的位温倾向逐渐降低。低层温度较多的增加以及高

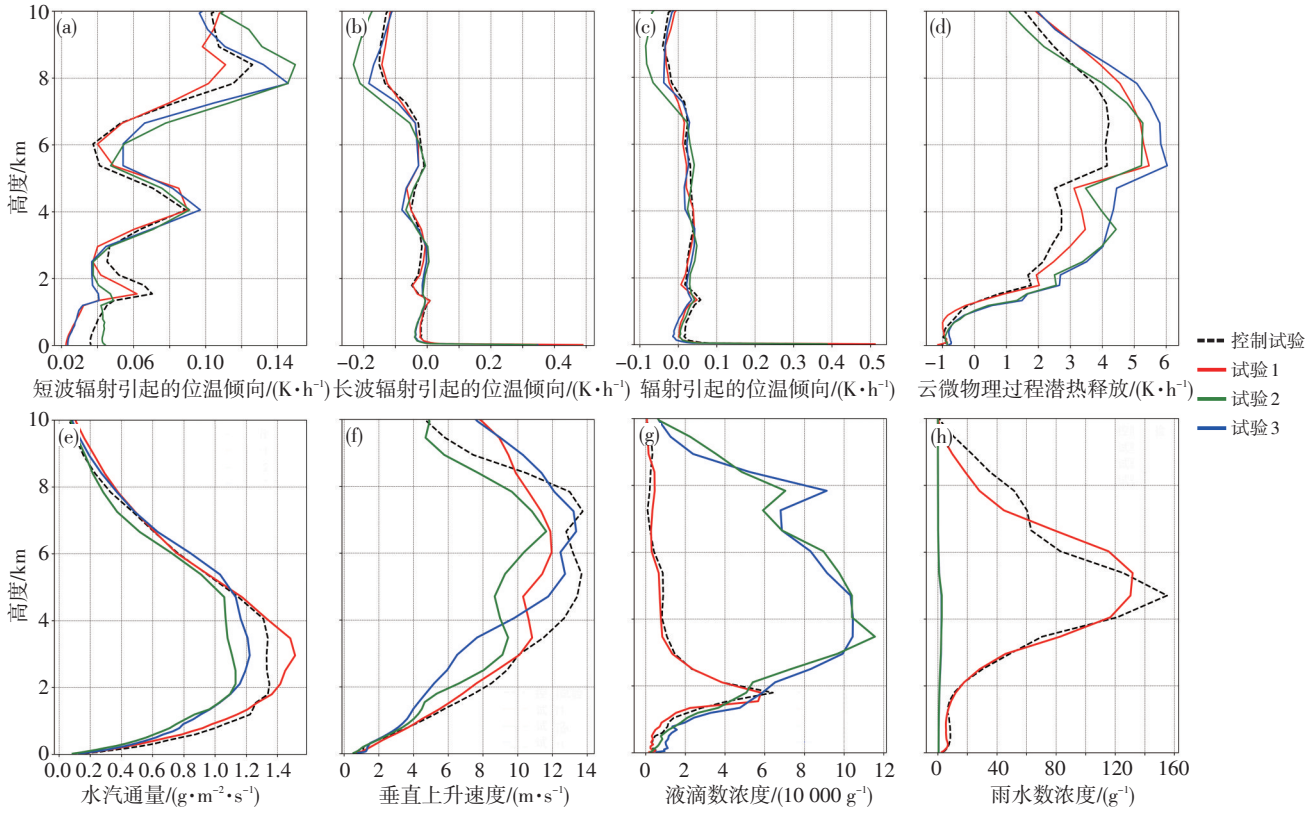


图6 2020年8月12日17:00北京城区平均短波辐射引起的位温倾向(a)、长波辐射引起的位温倾向(b)、辐射引起的位温倾向(c)、云微物理过程的潜热释放(d)、水汽通量(e)、垂直上升速度(f)、液滴数浓度(g)和雨水数浓度(h)的垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of average (a) shortwave radiation-induced potential temperature tendency, (b) longwave radiation-induced potential temperature tendency, (c) radiation-induced potential temperature tendency, (d) latent heat release from cloud microphysical processes, (e) water vapor flux, (f) vertical updraft velocity, (g) droplet number concentration, and (h) rain number concentration in the Beijing urban area at 17:00 BT on August 12, 2020

层温度较少的增加使得大气不稳定程度增强，有利于垂直运动的发展，控制试验的垂直上升速度最高，约为13.8 m·s^{-1}，高于试验1的最大垂直上升速度(12 m·s^{-1})。但试验1垂直向上的水汽通量约为1.3 g·m^{-2}·s^{-1}，高于控制试验的1.8 g·m^{-2}·s^{-1}。这表明，气溶胶直接效应通过热力过程过改变大气动力过程和水汽的输送，从而降低雪的形成和后续总雨水生成效率，导致降水减少，这从图6d中也可以看出，试验1中云微物理潜热的释放在高空2 km以上高于控制试验。

气溶胶间接效应则主要是通过影响液滴数浓度，影响云微物理过程来影响降水。从图6g可以看出不同数值试验液滴数浓度垂直分布与云水混合比垂直分布具有较高的一致性。这表明，气溶胶间接效应使得云滴混合比降低是由于液滴数浓度降低造成的。从图6d可以看出，试验2和试验3中云微物理过程潜热的释放显著高于控制试验，表明气溶胶间接效应不利于云微物理过程潜热的释放，从而抑制对流的发展。然而试验2和试验3的水汽通量和垂直上升速度均小于控制试验，这表明降水第一阶段由辐射引起的对流增强强于云微物理过程引起的对流增强。此外，图6h显示试验3和试验2的雨水数浓度显著低于试验1和控制试验，其从地面至高空均保持在个位数，而试验1和控制试验雨水数浓度最高分为约为130和145 g^{-1}。图6e雨滴混合比差异远低于数浓度混合比，表明无气溶胶间接效应产生的雨滴粒子半径较大，有利于碰并过程，从而使得降水发生提前和降水强度的增加(图3c)。

相比第一阶段，降水第二阶段气溶胶浓度偏低(图2)，这主要是由于降水湿沉降以及参与间接效应导致。图7为降水第二阶段北京城区平均水凝物混合比和总雨水生成效率的垂直分布。由图可知，相比降水第一阶段，降水第二阶段的云水混合比大值区主要集

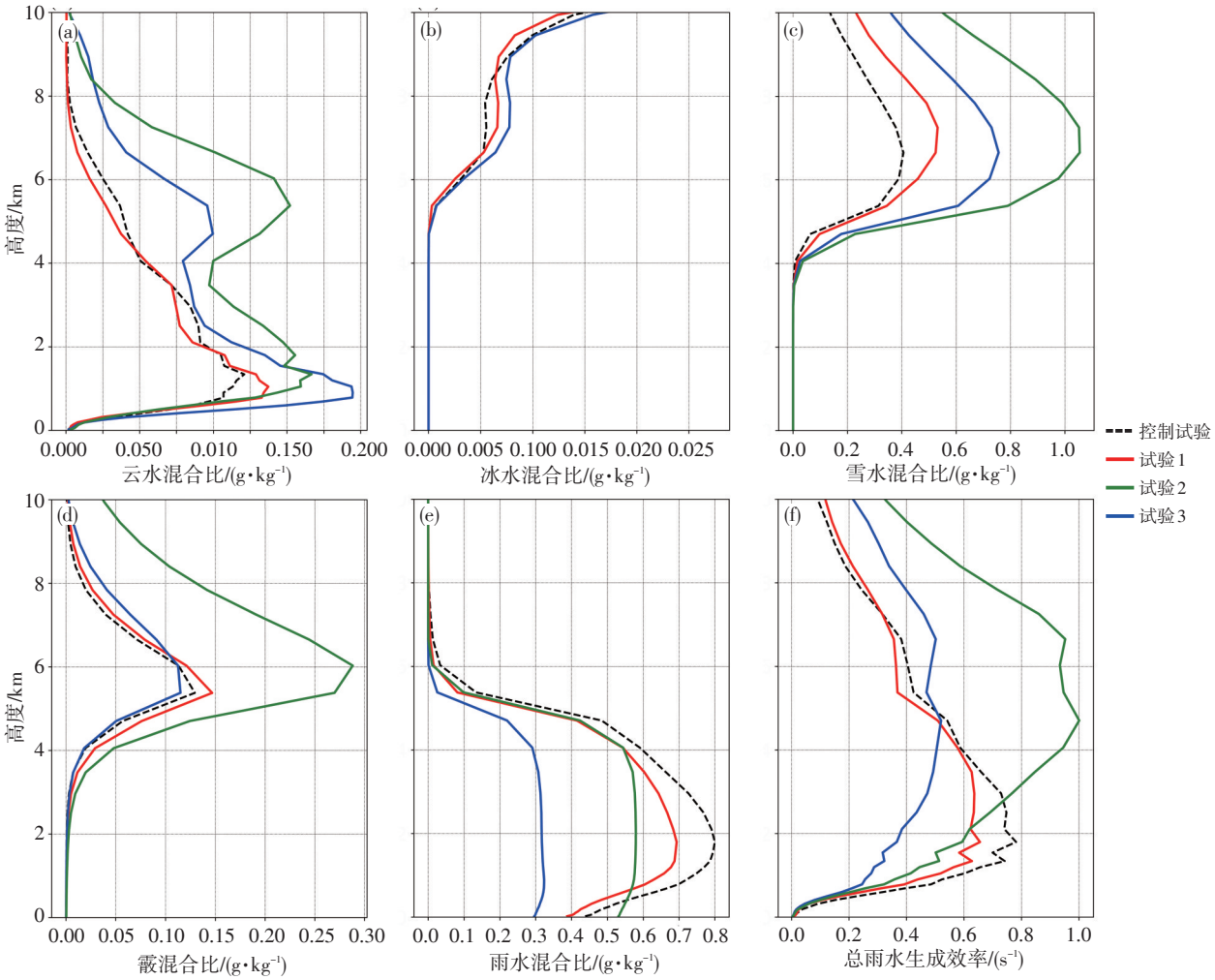


图7降水第二阶段(2020年8月12日20:00—13日04:00)北京城区平均云水混合比(a)、冰水混合比(b)、雪水混合比(c)、霰混合比(d)、雨水混合比(e)和总雨水生成效率(f)的垂直分布

Fig. 7 Vertical distribution of average (a) cloud water mixing ratio, (b) ice water mixing ratio, (c) snow water mixing ratio, (d) shrapnel mixing ratio, (e) rainwater mixing ratio, and (f) total rainwater generation efficiency in the Beijing urban area during the second precipitation stage (from 20:00 BT on August 12 to 04:00 BT on August 13, 2020)

中在1 km左右，低于降水第一阶段的4 km，其中试验3的云水含量最高，约为0.27 g·kg^{-1}，控制试验最低，不足0.1 g·kg^{-1}。不同试验冰相粒子大值的高度分布与第一阶段较为相似，而雨水混合比分布却与第一阶段不同。在降水第二阶段，试验2雨水混合比约为0.58 g·kg^{-1}，高于试验3 (0.3 g·kg^{-1})。此外，试验1和控制试验最大雨水混合比高于试验3和试验2，但从2 km至地面雨水混合比逐渐降低，而试验3和试验2从地面至高空4 km雨水混合比变化不大。总雨水生成效率在地面至高空2 km处(图7f)与雨水混合比相似，并与云水混合比成反比，从而表明第二阶段的降水多由暖云过程主导。

为进一步解释气溶胶通过热力过程对降水的影响，图8给出降水第二阶段北京城区平均辐射引起的位温倾向、云微物理过程的潜热释放、水汽通量、液滴数浓度和雨水数浓度的垂直分布。由于第二阶段降水在夜间，因此辐射引起的位温倾向均由长波辐射引起。从中可见，辐射引起的位温倾向在4 km以下为负值，表明了长波辐射对周围环境的冷却作用。其中控制试验在1 km处辐射引起的位温倾向约为0 K·h^{-1}，高于试验1的−0.02 K·h^{-1}，在2 km处两者均为0.02 K·h^{-1}，而试验1在高空4 km处辐射引起位温倾向为−0.07 K·h^{-1}，低于控制试验，这表明得控制试验有利于低层对流的发展而抑制高空对流的发展。结合图8c中控制试验低层水汽通量略高于试验1，而2 km以上的垂直水汽通量略低于试验1，可以看出，相比控制试验，试验1在地面至2 km水汽通量的降低使得暖云过程减弱，而2 km以上水汽通量的增加使得冷云过程增强，从而使得强降水推迟。

从图8d、e可以看出，除液滴数浓度和雨水数浓度

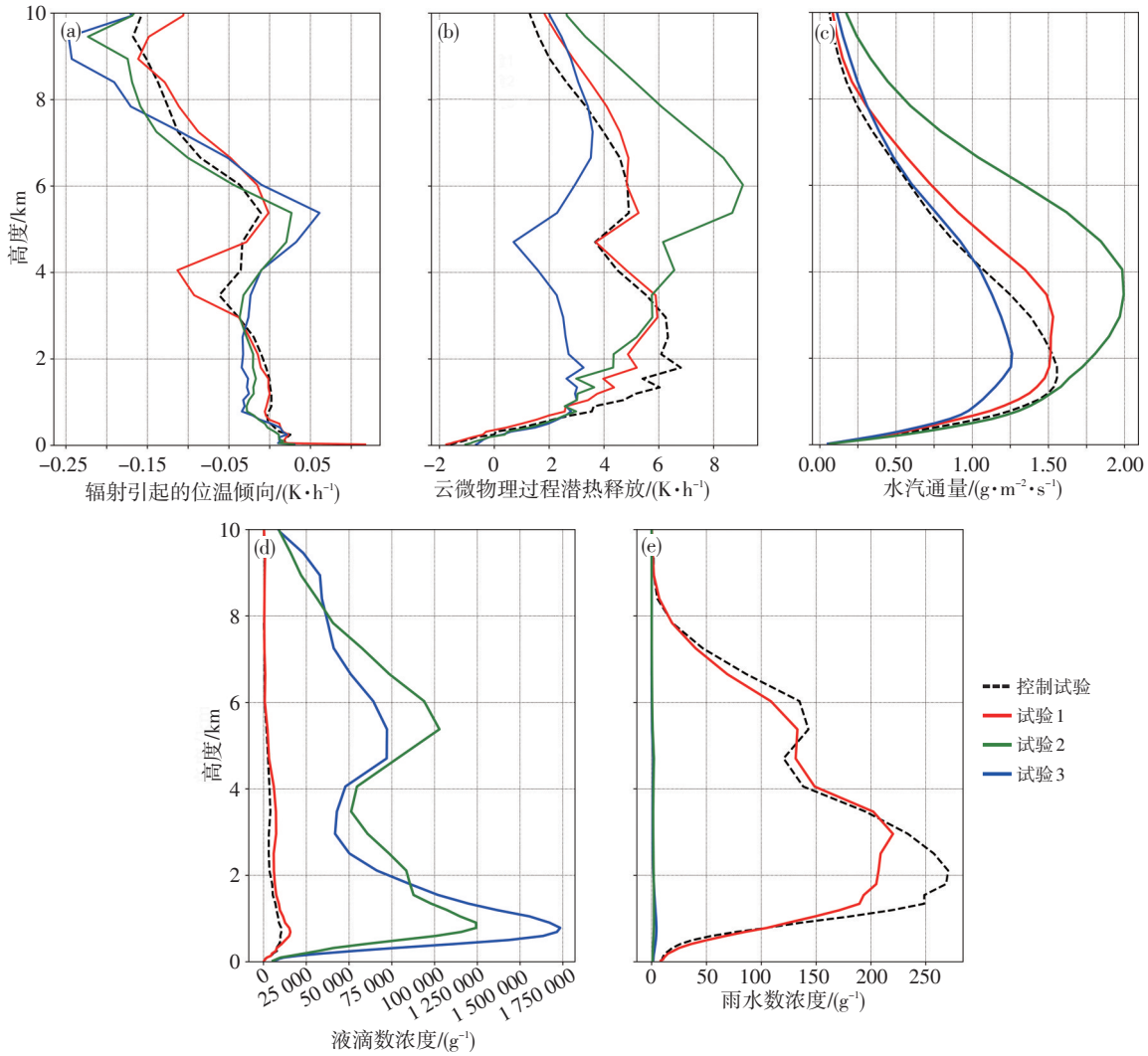


图8 降水第二阶段(2020年8月12日20:00—13日04:00)北京城区平均辐射引起的位温倾向(a)、云微物理过程潜热释放(b)、水汽通量(c)、液滴数浓度(d)和雨水数浓度(e)的垂直分布

Fig. 8 Vertical distribution of average (a) radiation-induced potential temperature tendency, (b) latent heat release from cloud microphysical processes, (c) water vapor flux, (d) droplet number concentration, and (e) rain number concentration in the Beijing urban area during the second precipitation stage (from 20:00 BT on August 12 to 04:00 BT on August 13, 2020)

混合比大值区的高度与降水第一阶段存在差异外，气溶胶直接效应、间接效应和总效应在降水第二阶段液滴数浓度和雨水数浓度分布的差异与降水第一阶段较为相似，仍表现为试验3和试验2液滴数浓度显著高于试验1和控制试验，但雨水数浓度混合比显著低于试验1和控制试验。然而，从图8b中却发现，试验2和试验3由云微物理过程引起的潜热释放显著小于控制试验。以上表明，无气溶胶间接效应产生的雨滴粒子半径较大，有利于碰并过程，从而使得降水发生提前。

4 结论与讨论

本文针对2020年8月12—13日发生在北京的一次暴雨过程，利用WRF-Chem模式设置四组数值试验，探究了气溶胶直接效应、间接效应和总效应对此次降水过程的影响及可能机理。得出如下主要结论：

(1) 与观测相比，WRF-Chem模式能很好地再现此次暴雨的落区，也较好地模拟出了小时雨强随时间的变化，但累计降水量高估约30 mm；模式也很好地模拟出此次降水期间$PM_{2.5}$的浓度及其随时间的演变过程。

(2) 气溶胶直接效应和间接效应均使北京城区降水减少，累计降水量分别减少约40 mm和80 mm，总效应则使城区西部降水减少而使东部降水增加。

(3) 气溶胶直接效应通过热力过程增强低层大气不稳定度，从而增加垂直上升速度和地面至高空2 km处的垂直水汽通量，并降低2 km以上的垂直水汽通量，这使暖云过程增强，冷云过程减弱。由于降水第一阶段云水大值区高度较高(4 km左右)，气溶胶直接效应引起的冷云过程的减弱导致冰相粒子中雪水混合比降低，较少的雪在融化层融化成雨水，从而降低第一阶段的降水量，小时雨强最大减少约6 $mm\cdot h^{-1}$。而由于降水第二阶段云水含量大值区较低(1 km左右)，暖云过程的增强和冷云过程的减弱使得强降水提前，并减少降水量，小时雨强最大减少约4 $mm\cdot h^{-1}$。

(4) 气溶胶间接效应降低液滴数浓度和混合比，增加雨水数浓度和混合比，导致雨水有效半径降低，从而降低碰并过程，使小时雨强最大减少1 $mm\cdot h^{-1}$，并且在第二阶段使强降水发生时间推迟约1 h。

(5) 气溶胶总效应对降水的影响是气溶胶直接和间接效应共同的非线性影响结果，降水第一阶段以直接效应为主，第二阶段则以间接效应为主。

本文根据暴雨发展的不同阶段，探讨了气溶胶直接效应、间接效应和总效应对降水的可能影响机理，为理解气溶胶-云-降水的相互作用提供参考。然而，本文仅分析了2020年8月12—13日发生在北京地区的一次暴雨过程，结果不具有普适性，未来将进一步探讨气溶胶效应对不同类型降水的影响及机理，不断加深对气溶胶-云-降水相互作用的理解。

参考文献(References)：

陈卫东,付丹红,苗世光,等.2018.气溶胶污染对夏季降水精细数值预报的影响研究[J].地球物理学进展,33(1):10-18. Chen W D, Fu D H, Miao S G, et al. 2018. Impacts of aerosols on the fine-scale numerical forecasting of summer precipitation [J]. Progress in Geophysics,33(1):10-18 (in Chinese). doi:10.6038/pg2018AA0663

段伯隆,张文龙,刘海文,等.2017.北京"7.21"特大暴雨过程暖区降水和锋面降水的时空分布特征[J].暴雨灾害,36(2):108-117. Duan B L, Zhang W L, Liu H W, et al. 2017. The spatial and temporal distributions of warm sector rainfall and frontal rainfall for the torrential rain event in Beijing on 21 July 2012 [J]. Torrential Rain and Disasters,36(2):108-117 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2017.02.002

彭杰.2015.上海及周边地区气溶胶对云和降水的影响初探[J].暴雨灾害,34(4):324-334. Peng J. 2015. Tentative discussion on the impact of aerosol on cloud and precipitation over Shanghai and its surrounding areas [J]. Torrential Rain and Disasters,34(4):324-334 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2015.04.005

师宇,楼小凤,王广河. 2016.气溶胶对北京地区云和降水影响的模拟研究[J].地理研究,35(10):1912-1924. Shi Y, Lou X F, Wang G H. 2016. Numerical simulation of the effect of aerosol on cloud and precipitation in Beijing [J]. Geographical Research,35(10):1912-1924 (in Chinese). doi:10.11821/dlyj201610010

肖之盛,缪育聪,朱少斌,等.2022.华北地区秋冬季气溶胶污染与不同类型降水的关系[J].气象学报,80(6):986-998. Xiao Z S, Miao Y C, Zhu S B, et al. 2022. The relationship between aerosol pollution and different precipitation types in autumn and winter in North China [J]. Acta Meteorologica Sinica,80(6):986-998 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2022.066

岳甫璐,王春明,崔强,等.2014. "7·21" 北京大暴雨过程的地形作用分析和数值试验研究[J].沙漠与绿洲气象,8(2):41-53. Yue F L, Wang C M, Cui Q, et al. 2014. Diagnostic analysis and numerical simulation of the impact of terrain on a torrential rain event in Beijing on July 21, 2012 [J]. Desert and Oasis Meteorology,8(2):41-53 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1002-0799.2014.02.006

Ackerman A S, Toon O B, Taylor J P, et al. 2000. Effects of aerosols on cloud albedo:Evaluation of Twomey's parameterization of cloud susceptibility using measurements of ship tracks [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,57(16):2684-2695. doi:10.1175/1520-0469(2000)057<2684:EOAOCA>2.0.CO;2

Bollasina M A, Yi M, Ramaswamy V. 2011. Anthropogenic aerosols and the weakening of the South Asian summer monsoon [J]. Science,334(6055):502-505. doi:10.1126/science.1204994

Choudhury G, Tyagi B, Krishna V N, et al. 2020. Aerosol-enhanced high precipitation events near the Himalayan foothills [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,20(23):15389-15399. doi:10.5194/acp-20-15389-2020

Grabowski W W, Morrison H. 2020. Do Ultrafine cloud condensation nuclei

invigorate deep convection? [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 77(7):2567–2583. doi: 10.1175/JAS–D–20–0012.1

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,146(730): 1999–2049. doi:10.1002/qj.3803

Johnson B T, Shine K P, Forster P M. 2004. The semi–direct aerosol effect: Impact of absorbing aerosols on marine stratocumulus [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,130(599):1407–1422. doi: 10.1256/qj.03.61

Koren I, Kaufman Y J, Rosenfeld D, et al. 2005. Aerosol invigoration and restructuring of Atlantic convective clouds [J]. Geophysical Research Letters,32(14):L148283. doi:10.1029/2005GL023187

Lei Y, Zhang Q, He K, et al. 2011. Primary anthropogenic aerosol emission trends for China, 1990–2005 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 11(3):931–954. doi: 10.5194/acp–11–931–2011

Lee S S, Guo J, Li Z. 2016. Delaying precipitation by air pollution over the Pearl River Delta: 2. Model simulations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,121(19):11739–11760. doi:10.1002/2015JD023257

Mallet M, Solmon F, Nabat P, et al. 2020. Direct and semi–direct radiative forcing of biomass–burning aerosols over the southeast Atlantic (SEA) and its sensitivity to absorbing properties: a regional climate modeling study [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,20(21):13191–13216. doi:10.5194/acp–20–13191–2020

Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B. 2008. Flood or drought: how do aerosols affect precipitation [J]. Science,321(5894):1309–1313. doi: 10.1126/science.1160606

Rosenfeld D, Sherwood S, Wood R, et al. 2014. Climate effects of aerosol–cloud interactions [J]. Science, 343(6169):379–380. doi:10.1126/science.1247490

Twomey S. 1977. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,34(7):1149–1154. doi: 10.1175/1520–0469(1977)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2

Zhang Q, Streets D, Carmichael G, et al. 2009. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX–B mission [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 9(14):5131–5153. doi: 10.5194/acp–9–5131–2009

Zhao B, Liou K N, Gu Y, et al. 2017. Enhanced PM2.5 pollution in China due to aerosol–cloud interactions [J]. Scientific Reports,7(1),4453. doi: 10.1038/s41598–017–04096–8

（责任编辑　何明琼）