

马贤芳,刘长海,刘晓东,等.气溶胶对北京中尺度对流系统影响的数值试验.气象科学,2010,30(1):21-26 Ma Xianfang, Liu Changhai, Liu Xiaodong, et al A numerical study of impacts of aerosol concentration on a mesoscale convective system observed in Beijing. Scientia Meteorologica Sinica, 2010, 30(1): 21-26

气溶胶对北京中尺度对流系统影响的数值试验

马贤芳¹ 刘长海^{1,3} 刘晓东^{1,2} 付丹红⁴ 潘翻番⁵

(1 中国科学院地球环境研究所,西安 710075) (2 西安交通大学,西安 710049) (3 美国国家大气研究中心,博尔德 80307)

(4 中国科学院大气物理研究所,北京 100029) (5 河海大学环境学院,南京 210098)

摘要 利用可分辨云模式(WRF),模拟研究了不同气溶胶浓度对北京地区 2001 年 8 月 23 日一次产生强降水和冰雹的对流天气的影响。结果表明,气溶胶浓度的增加不利于对流云的发展,导致地面降水减小,但是对降水结构没有明显影响。气溶胶浓度增加导致云中水成物数浓度和质量浓度均发生变化,其中云水、冰晶和雪含量增加,而雨水、霰和雹含量减小。从云微物理学分析发现,气溶胶浓度减小有利于高层云的形成,云滴有效半径随着气溶胶浓度增加而减小。

关键词 气溶胶 云 云滴有效半径 降水 数值试验

分类号 P458.3 **文献标识码** A

A numerical study of impacts of aerosol concentration on a mesoscale convective system observed in Beijing

Ma Xianfang¹ Liu Changhai^{1,3} Liu Xiaodong^{1,2} Fu Danhong⁴ Pan Fanfan⁵

(1 Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China) (2 Xi'an Jiaotong University,

Xi'an 710049, China) (3 National Center for Atmospheric Research, Boulder Colorado 80307, USA)

(4 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(5 School of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract The high-resolution (1km) WRF modeling system was used to study the influence of aerosol on the cloud properties and precipitation associated with a mesoscale convective system in Beijing under maritime, continental, polluted continental conditions. The development of convective clouds was simulated under the same meteorological conditions except different initial aerosol concentrations. The results show that polluted convective clouds start their precipitation later and precipitate less than normal clouds and clean clouds. The evolution and overall structure of the simulated mesoscale organized convection are largely insensitive to aerosol concentrations. The impact of aerosols on the cloud properties is also investigated on the basis of mass and number concentration of various condensate categories (i.e., cloud droplet, ice, snow, rain water, graupel and hail). Both the number concentration and mixing ratio of the cloud water, ice and snow increase with the aerosol concentration increasing, whereas the other three compositions have an opposite correlation. In addition, analysis of the simulated cloud fraction indicates that the maximum and minimum upper-level cloud amounts occur under the maritime and polluted continental environment, respectively, and an intermediate cloudiness appears in the continental aerosol scenario. Furthermore, the cloud effective radius is inversely related to the aerosol concentration.

Key words Aerosol Cloud Cloud effective radii Precipitation Numerical simulations

收稿日期:2009-01-07;修改稿日期:2009-03-13

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706036);国家杰出青年科学基金项目(40825008)

第一作者简介:马贤芳(1982-),女,江苏宿迁,硕士,主要从事全球气候变化与气溶胶影响研究,xina2008@yahoo.cn

引言

气溶胶是指悬浮在气体中的固体和(或)液体微粒与气体载体共同组成的多相体系^[1]。近年来,随着工业的迅速发展,排入大气的废气、烟尘等物质急剧增加。气溶胶对气候变化、云的形成、能见度的改变、大气微量成分的循环以及人类健康有着重要影响。

观测研究表明^[2-4],气溶胶对气候的冷却效应在量级上是可以与温室气体的加热效应相比拟。气溶胶通过影响辐射过程来影响气候,它的辐射强迫可分为两个方面,一是直接强迫,即通过散射和吸收太阳辐射来直接影响地球的辐射平衡;二是间接强迫,气溶胶可作为云凝结核(CCN)和冰核(N)影响云的光学特性、云量以及云的寿命^[5]。云滴辐射有效半径的减小与云滴数浓度的增加密切相关的,而气溶胶颗粒有可能使云滴的数密度增加,云滴的平均半径变小,导致云光学厚度和反射率的增大^[6],这有可能使云对太阳辐射的反射率增加或使云的维持时间加长^[7],甚至使降水减少^[8-10]。因此,研究气溶胶的浓度对云和降水的影响有着重要意义。

北京及其周边地区随着城市建设和发展,大气气溶胶的分布状况成为研究北京地区云、降水、环境及区域气候变化的重要问题。北京及周边地区的气溶胶观测资料分析发现^[3-4,11-12],气溶胶的分布随天气状况不同具有较大的差异,特别是近地层逆温、风速、云状况对气溶胶的分布和谱分布影响很大。尽管这些研究对了解北京及周边地区气溶胶的特性有价值,但针对北京及周边地区气溶胶浓度变化对云和降水影响的研究较少。

本文用可分辨云模式(WRF)在对不同气溶胶浓度条件下模拟分析了北京2001年8月23日一次产生强降水和冰雹的强对流天气过程。目的在于分析气溶胶对中尺度对流系统形成发展的作用,这对北京地区气溶胶对区域降水及气候变化等领域的研究有重要意义。

1 模式设计及研究方案

1.1 模式设计

本研究中所采用模拟区域格点数为 600×180 ,水平分辨率采用1 km,垂直方向为坐标,共160层,模式层顶高度为20 km。模式的垂直边界采用自由滑动边界条件,水平方向采用循环边界条件。不考虑辐射和地面过程,初始场为北京20时探空资

料,初始扰动采用热泡扰动。模式时间为2001年8月23日20—23时,时间步长为3 s。

1.2 微物理过程

微物理方案采用Seifert等^[13-14]所描述的总体双参数化混合相云方案。该方案将水凝物分为云水、雨水、冰晶、雪、霰和雹等,细致地考虑了云中微物理过程,包括云中降水粒子的起源、冰相水凝物的凝结、冻结、凝华、融化、蒸发、升华等详细的物理过程,预报变量是云中主要水成物的数浓度和质量浓度。按照初始气溶胶数浓度分布将方案分为洁净型、大陆型以及污染型三种情形,其气溶胶浓度分别为 $150 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ 、 $1500 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ 、 $3200 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ 。

2 结果分析

2.1 地面降水的时空分布

2001年8月23日受蒙古南下冷空气的影响,北京地区出现强降水过程。在21时29分(图1),中尺度对流系统位于北京东南方向,具有多个强中心,最大降水强度达到 $48.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,为了很好的再现此次强降水过程,图2为不同气溶胶浓度条件下模拟的地面降水强度分布。系统发展到1.5 h时,大陆型气溶胶浓度分布情况下,降水强度有多个强中心,最大降水强度达到 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。根据雷达观测结果和模拟结果对比分析认为,大陆型气溶胶浓度分布情况下的降水强度分布与观测较为一致。

从模拟的地面降水强度随时间的变化可以看到(图3a),随着气溶胶浓度的增加,地面降水强度逐渐减弱。洁净型气溶胶浓度分布的地面累积降水量最大,大陆型次之,而污染型气溶胶浓度分布下的地面累积降水量最小,洁净型的降水量要比污染型的降水量高28%(图3b)。

2.2 微物理特征分析

图4为云中水成物含量随时间变化的垂直分布。在污染型气溶胶分布情况下,云水、冰晶、雪晶的浓度相对较大,而雨水、霰和雹的含量相对较小。洁净型的云中水成物分布可以看到,云水、冰晶和雪晶含量较小,而云中雨水、霰和雹的浓度相对较高。气溶胶不利于云水、冰晶和雪晶向雨水、霰和雹的转化,导致地面降水减小。

图5中为云中平均水成物的垂直廓线分布。洁净型气溶胶浓度分布情况下,云水含量最小,位于700 hPa层。随着气溶胶浓度的增加,云水含量逐渐减小,并逐渐向高层发展(图6a)。云中的冰晶主要位于高层,随着气溶胶的浓度增加,冰晶含量也逐渐

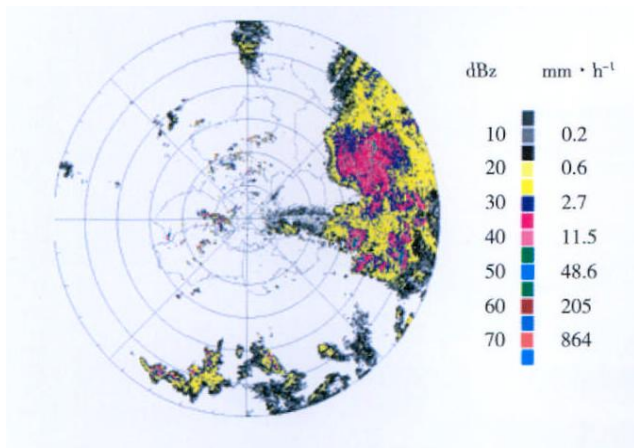


图 1 2001-08-23T21:29北京气象台观测的对流云回波 (dBz)及降水强度 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)分布

Fig 1 The horizontal distribution of observational radar reflectivity and rain rate at 21:29 on 23 August 2001. The elevation angle and detection range are 1.5° and 150km, respectively

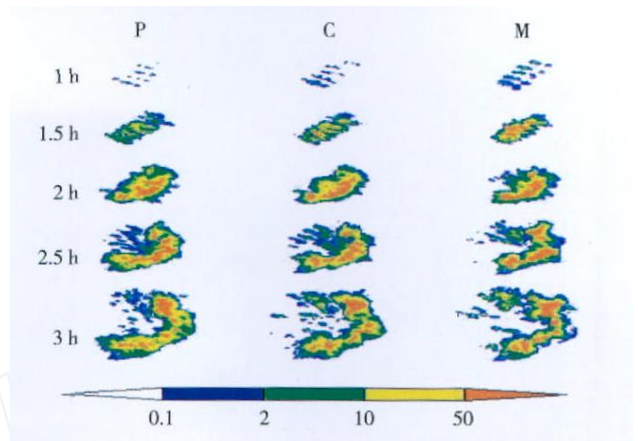


图 2 污染 (P, 左列)、大陆 (C, 中列) 和洁净 (M, 右列) 环境下模拟的不同时刻区域地面降水率 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 分布

Fig 2 Spatial distributions of surface precipitation rate (unit $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) under condition of the polluted continental (P, left panels), continental (C, central panels) and maritime (M, right panels) environments

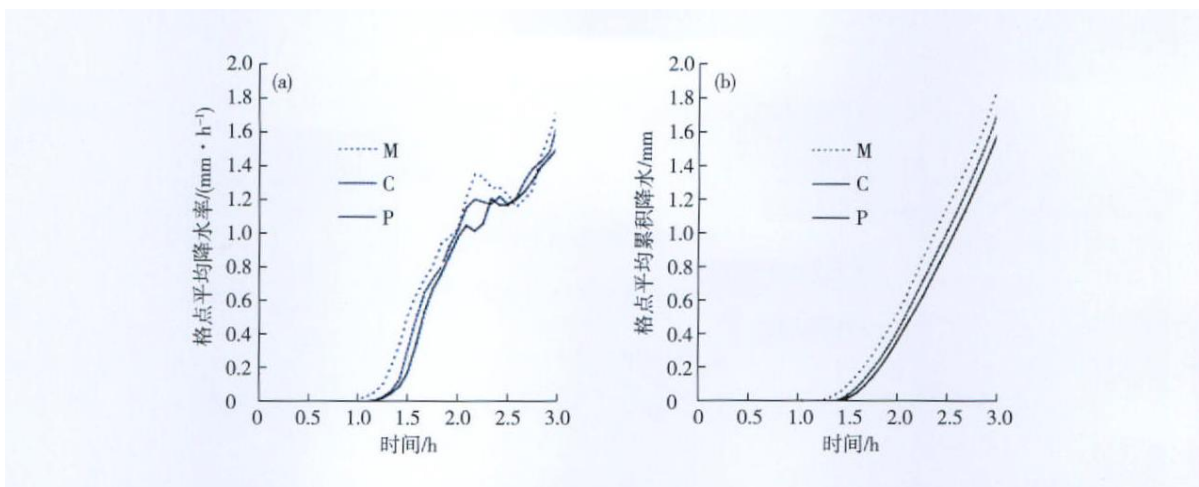


图 3 污染 (P)、大陆 (C) 和洁净 (M) 环境下 (a) 区域平均降水率 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); (b) 累积降水量 (mm) 随时间的变化
Fig 3 Variations of the average rain rate (a) (unit $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) and accumulated rainfall (b) (unit mm) with time for the polluted continental (P), continental (C) and maritime (M) environments

增加 (图 6b)。洁净型气溶胶分布情况下,云中雪晶含量较小,为 $0.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而污染型气溶胶分布情况下,云中雪晶含量达到 $0.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 6c)。随着气溶胶浓度的增加,云中雨水、霰和雹的含量逐渐减小 (图 6d, e, f)。

为了更好的反映云对降水的贡献,假设如果云滴,云冰,雪晶的含量大于等于 $0.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时该格点的云量为 100%^[15-16]。图 7 为污染型、大陆型和洁净型环境下模拟的平均云量的垂直分布。在低层 (1000 ~ 600 hPa) 和高层 (300 ~ 100 hPa), 洁净环境下平均云量最大,其次是大陆环境,而污染环境下云量最小。在中层 (600 ~ 300 hPa), 洁净环境下平均云量最小,污染情况下平均云量最大。与图 7 对应的起来可以看到,最大水成物含量与最大云量并

不完全一致,这主要是因为模拟中较大的云量主要是由冰晶的下落速度以及雪晶向云冰转化速度所决定的。通常情况下,下落速度较大会导致冰晶的快速减少;冰晶向雪晶的快速转化过程则是冰晶的快速减少以及雪晶含量迅速增加的过程。随着对流发生发展,地面产生降水,云中水成物含量减小。

图 7 为云水,冰晶和雪晶的数浓度随时间变化的垂直剖面。污染情况下的云水,冰晶和雪晶的数浓度达到最大,分布范围较大。污染情况下云中云水的数浓度最大,达到 $1.5 \times 10^8 \text{ kg}^{-1}$ 以上,约为雪晶浓度的 10000 倍。与前文分析的云水,冰晶和雪晶的混合比的分布状况相一致。

2.3 云滴有效半径

有效半径 (r_e) 是由 Hansen and Travis^[17] 在 1974

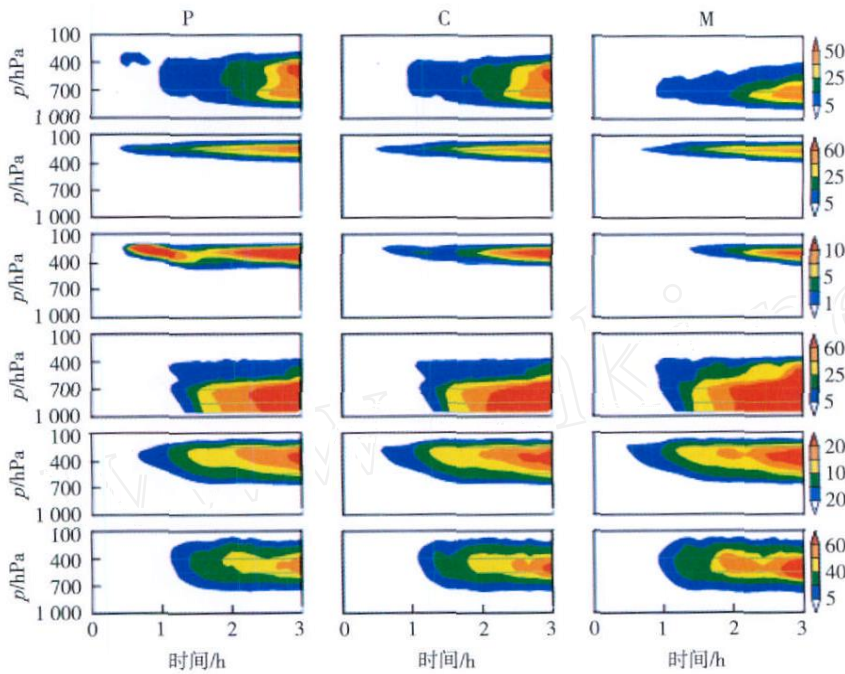


图 4 污染 (P,左)、大陆 (C,中)和洁净 (M,右)环境下云中云滴、冰晶、雪晶、雨水、霰和雹等 6 种组份混合比的高度 (气压)–时间剖面。
从上到下依次为云水、云冰、雪晶、雨水、霰和霰 (单位: $g \cdot kg^{-1}$)

Fig 4 Pressure-time sections of mixing ratios (unit $g \cdot kg^{-1}$) of cloud droplet, ice crystal, snow, rain water, graupel and hail (from top to bottom) for the polluted continental (P, left), continental (C, central) and maritime (M, right) environments, respectively

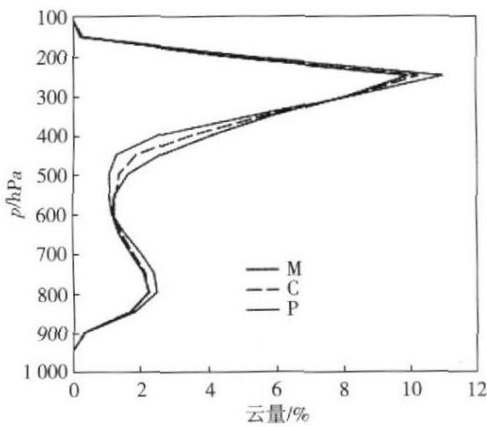


图 5 污染 (P)、大陆 (C)和洁净 (M)环境下模拟的平均云量的垂直分布

Fig 5 Domain and time-averaged profiles of cloud fraction in three simulations

年提出来的。Stephens等^[18]和 Slingo and Schrecker^[19]给出了云水有效半径的谱分布。此时有效半径被定义为粒子三次方谱分布和二次方谱分布的比值为

$$r_e = \frac{\int r^3 n(r) dr}{\int r^2 n(r) dr} \quad (1)$$

在 1994 年, Martin^[20]等将公式简化为

$$r_e = k \left(\frac{3L}{4wN} \right)^{1/3} \quad (2)$$

其中 k 为缩放系数, 在海洋和陆地上分别取为 1.143 和 1.077。 L 为云水含量 ($g \cdot m^{-3}$), N 为云滴数浓度 (cm^{-3})。

在 WRF 中输出的云水含量单位为 $kg \cdot kg^{-1}$, 故将公式转化为:

$$r_e = k \left(\frac{3L_a}{4wN} \right)^{1/3} \quad (3)$$

其 a 为大气密度, L 为云水含量, w 为水的密度, 其余变量同公式 (2)。

陈英英等^[21]利用 FY-2C 静止卫星资料反演云滴有效半径并将其于 MODIS 反演结果对照发现, 二者的云滴有效半径均主要集中在 $7.5 \sim 15 \mu m$ 。研究表明^[22], 云滴的有效半径达到 $12 \mu m$ 以上会产生明显的降水。根据公式 (3) 计算出污染型、大陆型以及洁净型三种情形下的云滴有效半径分别为: $7.58 \mu m$ 、 $8.33 \mu m$ 和 $14.6 \mu m$ 。有效半径的分布和云滴数浓度的分布情况与观测结果较为一致^[23-27], 随着气溶胶浓度的增加, 云滴数浓度增加, 而有效半径则减小, 这将对云体的整体辐射性质产生一定的影响^[23]。

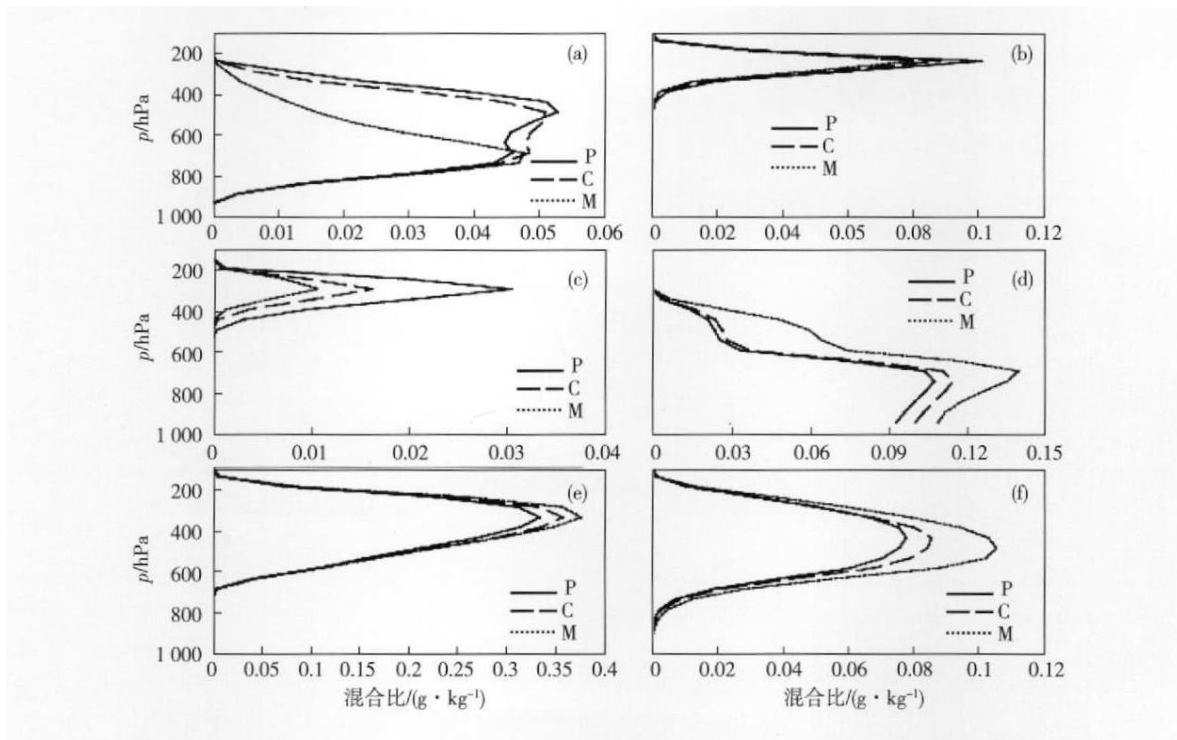


图 6 污染 (P)、大陆 (C) 和洁净 (M) 环境下云中 (a) 云滴; (b) 冰晶; (c) 雪晶; (d) 雨水; (e) 霰; (f) 雹等 6 种组份时间平均的混合比随高度的变化 (单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Fig 6 Variations of time-mean mixing ratios (unit $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) of (a) cloud droplet; (b) ice crystal; (c) snow, rain water; (d) graupel and (f) hail for the polluted continental (P, solid line), continental (C, dashed line) and maritime (M, dotted line) environments, respectively

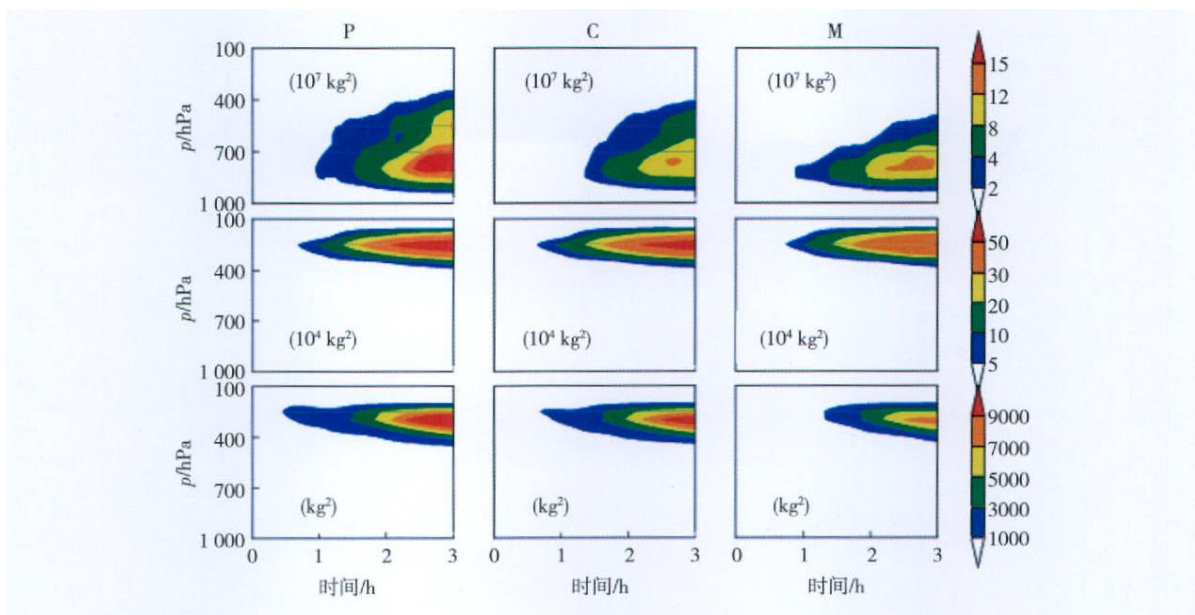


图 7 同图 4, 但为云水、云冰、云雪数浓度的气压-时间剖面

Fig 7 Same as Fig 4 but for pressure-time sections of cloud droplet (upper panels), ice (middle panels) and snow (lower panels) number concentration

3 结论

利用可分辨云模式 (WRF), 模拟研究了气溶胶浓度对北京地区 2001 年 8 月 23 日一次产生强降水

和冰雹的对流天气的影响。研究结果表明:

(1) 气溶胶浓度的增加不利于对流云的发展, 导致地面降水减小。

(2) 气溶胶对云有着重要的影响。气溶胶浓度

增加导致云中水成物浓度发生变化,其中云水、冰晶和雪含量增加,而雨水和霰含量减小。从云微物理学分析发现,气溶胶浓度减小有利于高层云的形成,云滴有效半径随着气溶胶浓度增加而减小。

参 考 文 献

- [1] 王明星. 大气化学(2版). 北京:气象出版社, 1999: 166.
- [2] 牛生杰, 章澄昌, 孙继明. 贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究. 大气科学, 2001, 25(2): 224-252.
- [3] 张佃国, 郭学良, 付丹红, 等. 2003年8~9月北京及周边地区云系微物理飞机探测研究. 大气科学, 2007, 31(4): 576-610.
- [4] 范晔, 郭学良, 付丹红, 等. 北京及周边地区2004年8、9月间大气气溶胶分布特征观测分析. 气候与环境研究, 2007, 12(1): 49-62.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The Scientific Basis Cambridge Univ Press, New York 2001.
- [6] Albrecht B A. Aerosols, cloud microphysics, and fraction cloudiness. Science, 1989, 245: 1227-1230.
- [7] Rotstajn L D and Liu Y. Sensitivity of the first indirect aerosol effect to an increase of cloud droplet spectral dispersion with droplet number concentration. J. Climate, 2003, 16: 3476-3481.
- [8] 黄梦宇, 赵春生, 周广强, 等. 华北地区层状云微物理特性及气溶胶对云的影响. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 360-368.
- [9] 何宏让, 魏绍远, 黄云贵. 初始云滴浓度(CCN)对对流性降水作用的数值试验. 气象科学, 1998, 18(1): 10-19.
- [10] 王春明, 叶家东, 魏绍远. 气溶胶浓度影响暖雨过程的数值模拟试验. 气象科学, 1997, 17(4): 316-324.
- [11] 张佃田, 郭学良, 肖稳安. 北京及周边地区2003年夏秋季气溶胶和云滴分布特征. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 402-410.
- [12] 霍娟, 吕达仁. 利用全天空数字图像对北京上空云况分布特征的试验分析. 气象科学, 2005, 25(3): 238-243.
- [13] Seifert A, Beheng K D. A two-moment cloud microphysics parameterization for mixed-phase clouds Part I Model description Meteor and Atmos Physics, 2006, 92: 45-66.
- [14] Seifert A, Khain A. A comparison of spectral bin and two-moment bulk mixed-phase cloud microphysics Atmos Res, 2006, 80: 46-66.
- [15] 付丹红, 郭学良, 肖稳安, 等. 北京一次大风和强降水天气过程形成机理的数值模拟. 南京气象学院学报, 2003, 26(2): 190-200.
- [16] Liu C, Moncrieff M. Sensitivity of cloud-resolving simulations of warm-convection to cloud microphysics parameterizations Mon Wea Res, 2006, 135: 2854-2868.
- [17] Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres Space Sci Rev, 1974, 16: 527-610.
- [18] Stephens G L. Radiation profiles in extended water clouds: Parameterization schemes J. Atmos Sci, 1978, 35: 2111-2122.
- [19] Slingo A, Schrecker H M. On the shortwave radiative properties of stratiform water clouds Quart J. Roy. Meteor Soc, 1982, 108: 407-426.
- [20] Martin G M, Johnson D W, Spice A. The measurement and parameterization of effective radius of droplets in warm stratocumulus clouds J. Atmos Sci, 1994, 51: 1823-1842.
- [21] 陈英英, 周毓荃, 毛节泰, 等. 利用FY-2C静止卫星资料反演云粒子有效半径的实验研究. 气象, 2007, 33(4): 29-34.
- [22] Hallett J, Mossop S C. Production of secondary ice particles during the riming process Nature, 1974, 249: 26-28.
- [23] Lohmann U, Lesins G. Stronger constraints on the anthropogenic indirect aerosol effect Science, 2002, 298: 1012-1015.
- [24] Ramanathan V, Crutzen P J, Lelieveld J, et al. The Indian Experiment: An integrated assessment of the climate forcing and the effects of the great indo-asian haze J. Geophys Res, 2001, 106: 28, 371-28, 398.
- [25] Heymsfield A, McFarquhar G M. Microphysics of NDOEX clean and polluted trade cumulus clouds J. Geophys Res, 2001, 106: 28, 653-28, 673.
- [26] Liu G, Shao H, Coakley J A, et al. Retrieval of cloud droplet size from visible and microwave radiometric measurements during NDOEX J. Geophys Res, 2003, 108(D1), 4006, doi: 10.1029/2001JD001395.
- [27] 汪宏七, 赵高祥. 云物理特性对云光学和云辐射性质的影响. 应用气象学报, 1996, 7(1): 36-44.