

陈丽, 银燕. 沙尘气溶胶对大气冰相过程发展的敏感性试验. 气象科学, 2009, 29(2): 208-213

沙尘气溶胶对大气冰相过程发展的敏感性试验

陈丽^{1,2} 银燕²

(1 连云港市连云区环保局, 江苏 连云港 222042) (2 南京信息工程大学 大气物理学与大气环境重点实验室, 南京 210044)

摘要 利用分档云动力学模式, 研究了沙尘气溶胶输送过程中在不同大气背景环境条件下对云内冰相粒子形成、发展和降水过程的影响。通过敏感性试验发现: 在背景气溶胶浓度不断增加的情况下, 冰相降水率以及冰相降水在总降水量中的比例逐渐减小; 只有在大陆性云和污染严重的地区, 含有一定比例可溶性物质的沙尘粒子提高了大气中的巨核浓度, 使云中冰相降水质粒提前出现, 有利于降水的形成。另一方面, 当把不可溶矿物气溶胶粒子作为有效的大气冰核参与云降水形成的物理过程时, 由矿物气溶胶引起的大气冰核浓度增加在一定程度上抑制云中冰相降水质粒的发展, 部分抵消巨核对降水的促进作用。

关键词 沙尘气溶胶 冰相质粒 云凝结核 冰核

分类号 P426 **文献标识码** A

A sensitivity study of the effect of dust aerosols on the development of ice-phase cloud processes

Chen Li^{1,2} Yin Yan²

(1 Lianyung District Environmental Protection Bureau, Jiangsu Lianyungang 222042, China)

(2 Key Laboratory of Atmospheric Physics & Environment, Nanjing University of

Information Science & Technology Nanjing 210044, China)

Abstract A spectral cloud microphysics and dynamics model is used to investigate the effect of dust aerosols on the formation and growth of ice particles and precipitation in convective clouds under different atmospheric environmental background conditions. The results obtained from sensitivity tests show that the increasing concentration of background aerosol particles leads to a lower rainfall rate from the ice-phase processes. The results also indicate that only in the clouds developed in continental air masses and/or under polluted atmospheric conditions, dust particles containing certain fractions of water-soluble substances can increase the concentrations of giant CCN, lead to earlier development of ice-phase precipitation particles, and therefore, promote the formation of precipitation. On the other hand, when insoluble dust aerosols, as effective N, are involved in the cloud processes, the increase in atmospheric N resulted from dust particles may inhibit the development of ice-phase precipitation particles, and partially offset the positive effect of GCCN.

Key words Dust aerosols Ice particles CCN N

引言

发源于亚洲干旱和半干旱地区的沙尘天气可将

沙尘粒子输送到高层大气, 在西风气流的作用下向东传输, 经过中国东部沿海地区向韩国日本及太平洋地区输送^[1-4]。在向下游传输的过程中, 沙尘气

收稿日期: 2007-10-15; 修改稿日期: 2008-03-20

基金项目: 国家重点研究发展计划项目 (2006CB403706); 江苏省气象灾害重点实验室 (南京信息工程大学) 项目 (KLME060209) 和南京信息工程大学科研基金

第一作者简介: 陈丽 (1981-), 女, 江苏连云港, 硕士, 主要从事云降水物理学研究, cllchen@126.com

溶胶与大气中产生的二级产物,如硫酸铵、硝酸铵、氯化钠等发生内部混合^[5-6]并在其表面发生的非均相化学反应^[7],可改变其化学成分及光学性质。沙尘粒子与可溶性成分的混合,以及与对流过程中由边界层输送而来的酸性物种相互作用,均可提高沙尘气溶胶的溶解度,使其成为较好的云凝结核(Cloud Condensation Nuclei,简称CCN)。数值模拟研究表明,少量巨核(Giant Cloud Condensation Nuclei,简称GCCN)的存在可增加层积云^[8]和积云中的降水^[9-12]。国外的研究表明^[13-15]沙尘天气的爆发增加了大气中的冰核(Ice Nuclei,简称N)浓度,而N浓度增加将抑制大陆性降水。Mahowald等^[16]研究表明,在全球尺度范围内,矿物气溶胶确实改变着暖云降水及冷云过程。可见,在地气系统的云与气溶胶相互作用方面,沙尘气溶胶可以在大气过饱和或接近饱和的情况下,作为CCN和N为云雨过程提供降水粒子胚胎,通过改变云内水成物粒谱分布影响云的微物理和降水过程。本文采用二维分档积云模式,对沙尘气溶胶在远程传输中引起的大气CCN和N浓度的改变及其对云中冰相粒子形成和演变过程可能造成的影响进行探讨。

1 敏感性试验

本文采用以色列Tel Aviv大学的二维面对称非静力分档云模式,模式描述及初始热力学条件详见文献[10-11]。传输过程中背景气溶胶浓度变化以及传输过程中沙尘气溶胶粒子均对云和降水过程产生影响。本文分别考虑海洋、陆地和污染严重地区三种不同背景条件下云中CCN浓度的差异。考虑的CCN总浓度分别为150、750和1500个/cm³。地面附近CCN的谱分布由图1(a)中的A1、A2和A3

所示,而图1(b)中B1、B2、B3则依次代表在上述背景气溶胶分布下沙尘传输过程增加GCCN浓度(具体数值见文献[11]沙尘暴天气过程中的气溶胶谱分布)的个例。

沙尘天气向大气中输送的矿物质气溶胶颗粒可分为可溶性和不可溶性,它们在云和降水形成过程中有不同的作用。可溶性物质增加了大气中大核和巨核的浓度,从而增加了大气中有效CCN的浓度;不可溶质粒,作为N参与冷云微物理过程。DeMott等^[17]发现沙尘的远程传输过程可使N浓度增加20~100倍,本文采用与Van等^[18]相似的N浓度的廓线,考虑了沙尘传输过程中沙尘气溶胶引起的CCN和N浓度增加,分别由个例C1、C2和C3表示。

2 结果分析

2.1 沙尘气溶胶对冰相降水及地面总降水量的影响

表1给出了从清洁地区到受污染严重地区这样一个气溶胶浓度变化的背景条件下,沙尘传输过程引起的GCCN和N浓度增大对典型积云冰相及地面总降水量等产生的影响。由表1A栏可见,随着背景环境中CCN浓度的增加,地面总降水量及冰相降水的贡献率不断减小。从A1到A3,地面总降水量从28.09 m³降低到1.86 m³,冰相降水贡献率由20.1%降低至1.8%。这主要是由于CCN浓度增加,云内水成物粒子数浓度增加而使其有效半径减小^[11],降水粒子增长过程中粒子间的碰并效率降低,导致云内可降水量减小约91.9%。同时,众多过冷云滴的维持使其转化为冰相粒子的几率相应降低,冰相降水过程受抑制,冰相降水减少约99.4%。说明在本文模拟的混合性对流云降水过程中,CCN

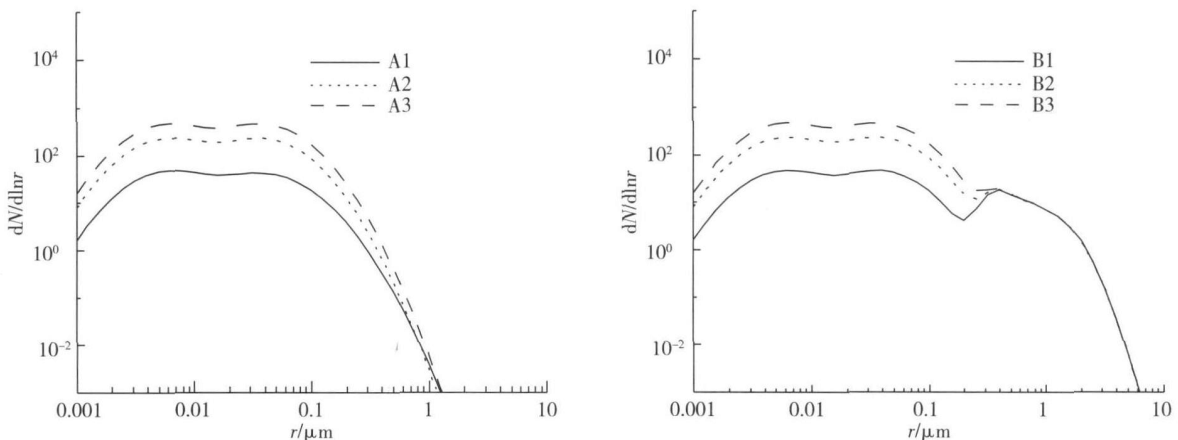


图1 (a)个例A1、A2和A3(b)个例B1、B2和B3中初始CCN的浓度谱分布
Fig 1 Initial size distributions of CCN for (a) cases A1, A2 and A3, and (b) cases B1, B2 and B3

表 1 各方案地面总降水量、冰相降水贡献率及其相对变化

Table 1 The total precipitation amount on the ground, the ratio of ice phase to the total precipitation and its relative changes

序号	A (不受沙尘影响)			B (增加 GCCN)				C (增加 GCCN 和 N)		
	CCN 浓度 个·cm ⁻³	总降水 量/m ³	冰相降水 贡献率/%	CCN 浓度 个·cm ⁻³	总降水 量/m ³	冰相降水 贡献率/%	冰相降水 相对变化/%	总降水 量/m ³	冰相降水 贡献率/%	冰相降水 相对变化/%
1	150	28.09	20.1	175	26.87	19.9	- 5.3	25.85	20.0	- 8.2
2	750	11.15	8.4	780	12.55	12.1	+62.0	9.51	12.6	+27.8
3	1500	1.86	1.8	1530	5.57	7.8	+1209.0	3.15	8.1	+672.7

注: B 与 C 的 CCN 浓度相同

增加对冷云过程的抑制效应要强于暖云过程。

沙尘传输过程中矿物气溶胶增多使少量大核得以活化, CCN 浓度增加约 25 ~ 30 个/cm³, 由表 1 B 栏可知, GCCN 在不同的背景条件下对降水的作用有所不同。在洁净的海洋大气环境中, GCCN 一定程度上增加云内粒子浓度, 降低地面总降水量, 冰相降水降低约 5.3%, 冰相过程对混合云总降水量的贡献率也有所降低。随着背景气溶胶浓度的增加, GCCN 对降水的作用有所改变, 使大陆性云的降水

效率提高, 且背景气溶胶浓度越大 GCCN 对降水的促进效应越强。在 B2 中, GCCN 使地面总降水量增加约 12.5%, 冰相降水对总降水量的贡献率也提高了 3.7%, 而冰相降水比没有 GCCN 时增加了 62%。在 B3 中, GCCN 增加使地面总降水量增加了 2 倍多, 冰相降水对总降水量的贡献率提高了 6%, 而冰相降水比没有 GCCN 时增加了 11 倍。总之, 沙尘气溶胶引起的 GCCN 增多对冰相降水的作用取决于背景 CCN 的浓度, 即在海洋性积云中, GCCN 抑制着

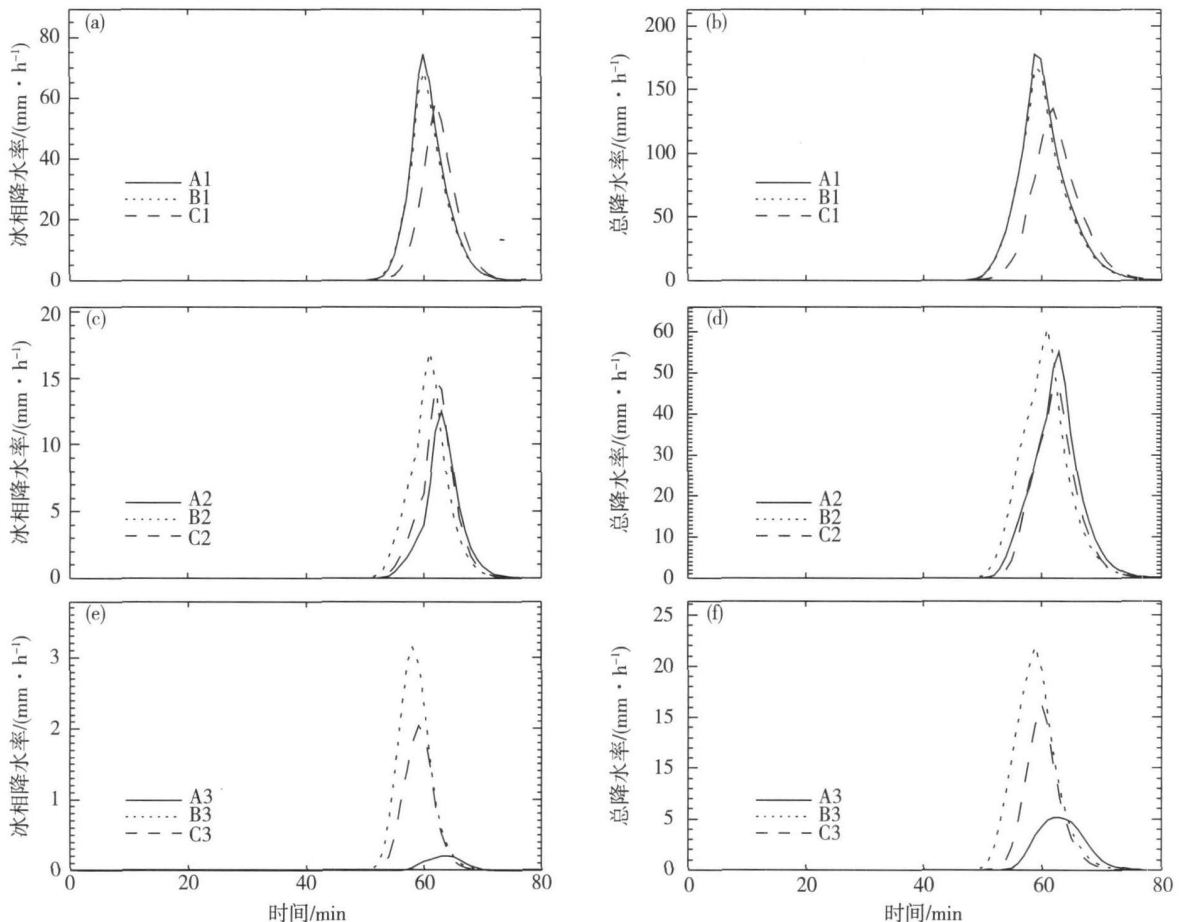


图 2 冰相降水率及总降水率随时间变化 (a, b) 个例 A1, B1, C1; (c, d) 个例 A2, B2, C2; (e, f) 个例 A3, B3, C3

Fig 2 The time-varying ice-phase and total precipitation rates for cases A1, B1 and C1 (a, b), for cases A2, B2, C2 (c, d) and for cases A3, B3, C3 (e, f)

冰相过程的发展,而在大陆性积云中,GCCN促进云中冰相的发展,且这种促进作用随着污染程度的提高而增强。

在沙尘传输过程中,除一部分矿物气溶胶粒子成为GCCN外,部分不可溶矿物气溶胶粒子则可作为有效N参与云内的各种冰相物理过程。表1C栏给出了当沙尘气溶胶同时增加GCCN和N时上述三种背景气溶胶下模拟得到的积云降水的差异。同表1B栏相比,N增加虽使冰相降水在地面总降水量中的贡献率略有增长,但使总降水量减少3%~43%,说明沙尘气溶胶传输导致的N浓度升高,在一定条件(如同本文模拟的情况)下会抑制积云降水的发展,但总降水量的改变程度决定于背景气溶胶浓度以及沙尘气溶胶引起的大气中GCCN和N浓度的相对改变。在本文个例中,只有在大陆性和污染严重地区云中沙尘气溶胶引起的GCCN和N增加对降水起促进作用。

2.2 冰相降水率和总降水率的时间变化

图2给出了模拟个例的冰相降水率和总降水率随时间变化。由图2,GCCN增多后降低了海洋性积云(a,b)的最大降水效率,大气中沙尘气溶胶的增多引起的N浓度增加延迟降水的开始时间,并进一步降低最大降水率;在大陆性云(c,d)中,少量的GCCN的存在可提前冰相及整个降水开始时间,提高最大降水效率,在沙尘同时增加N浓度后,较之不受沙尘影响的云冰相降水提前开始且最大冰相降水效率略有增加,但混合降水的开始时间有1~2分钟的落后,最大降水效率降低了20%;在污染严重的大陆性云(e,f)中,沙尘气溶胶的传输过程可提前降水起始时间,提高降水效率。

图3给出了所有模拟方案降水效率的水平分布随时间变化情况。从(a)、(d)、(g)可以看出,背景GCCN浓度增加后,降水的水平分布范围逐渐缩小,降水开始时间推迟,持续时间缩短。由(b)、(e)、

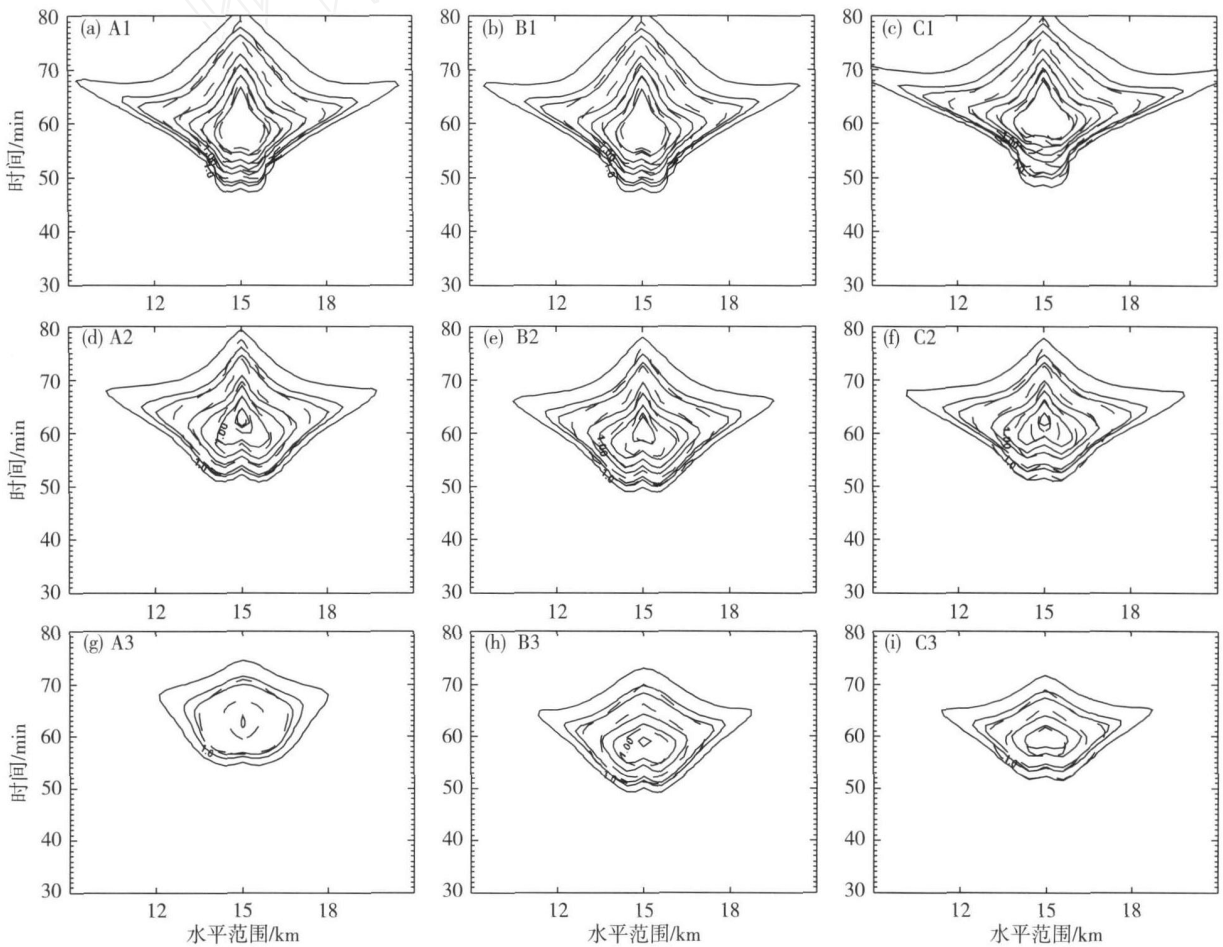


图3 各个例地面降水率时间变化,其中,实线为总降水率,等值线分别为0.1、0.5、1.0、5.0、10、20和40(单位:mm/h);长划线为冰相降水率,等值线分别为0.01、0.1、1.0、4.0和8.0(单位:mm/h)。

Fig 3 Precipitation rate on the ground as a function of time for all the cases, where the solid lines represent total precipitation rates (the isolines are 0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10, 20, and 40mm/h, respectively), and dashed lines are precipitation rates from ice-phase particles (the isolines are 0.01, 0.1, 1.0, 4.0, and 8.0 mm/h, respectively)

(h)可见,在个例 B1中 GCCN 浓度增多对降水的水平分布几乎没有影响,但明显提前了个例 B2和 B3的降水起始时间,并拓宽了 B3个例的液相和冰相降水水平范围。当沙尘传输同时增加 N 浓度时,在个例 C1、C2中,降水的水平分布范围变大,这是由于冰晶有效活化消耗了云内有限的水汽含量,降低液滴的尺度,小液滴在水平气流的作用下可以输送到更宽的水平范围内;而在 C3情况下,大气中 N 增多降低了云内液水以及霰粒含水量,云中可降水量的降低缩小了降水的水平分布范围及持续时间。

由图 2和图 3可知,沙尘传输对降水的影响因背景环境而异。在清洁地区远程传输而来的沙尘气溶胶增加了大气中的 CCN 浓度,使降水过程受到抑制,相比之下,在 N 浓度增加的情况下,液相及冰相降水的水平分布范围相应增加。在大陆性云中沙尘的远程传输可为云内提供 GCCN,大尺度云滴增多提高了液滴间的碰并效率,使冰相及整个降水过程

提前并延长降水的持续时间,同时增大降水效率;在矿物气溶胶增多为大气中提供了大量的 N 后,冰相降水开始时间提前,冰晶增多降低了液滴以及霰粒的质量含量,降水的水平分布范围变小。当沙尘传输同时增加 GCCN 及 N 浓度时,对降水的影响要取决于受污染的程度,在清洁地区,沙尘气溶胶传输降低降水效率但降水的水平分布范围增加;在污染严重的地区,沙尘传输明显提高了降水效率,但降水的水平分布范围有一定程度的缩小。

2.3 对霰粒分布产生的影响

模式中考虑了冰晶、雪花和霰粒三种冰相质粒。图 4给出了模拟水平区域中心不同粒径大小的霰粒垂直分布随时间的变化情况。A1中,不同半径大小的霰粒几乎是同时出现的,且出现在相同的高度;在清洁的海洋性云中, GCCN 浓度增多后几乎不影响霰粒的垂直分布(B1);在沙尘增加了大气中的 N 浓度后,霰粒提前 2 min 出现,但半径大于 4.34 mm 的霰粒的出现时间保持不变(C1)。A2中,半径大

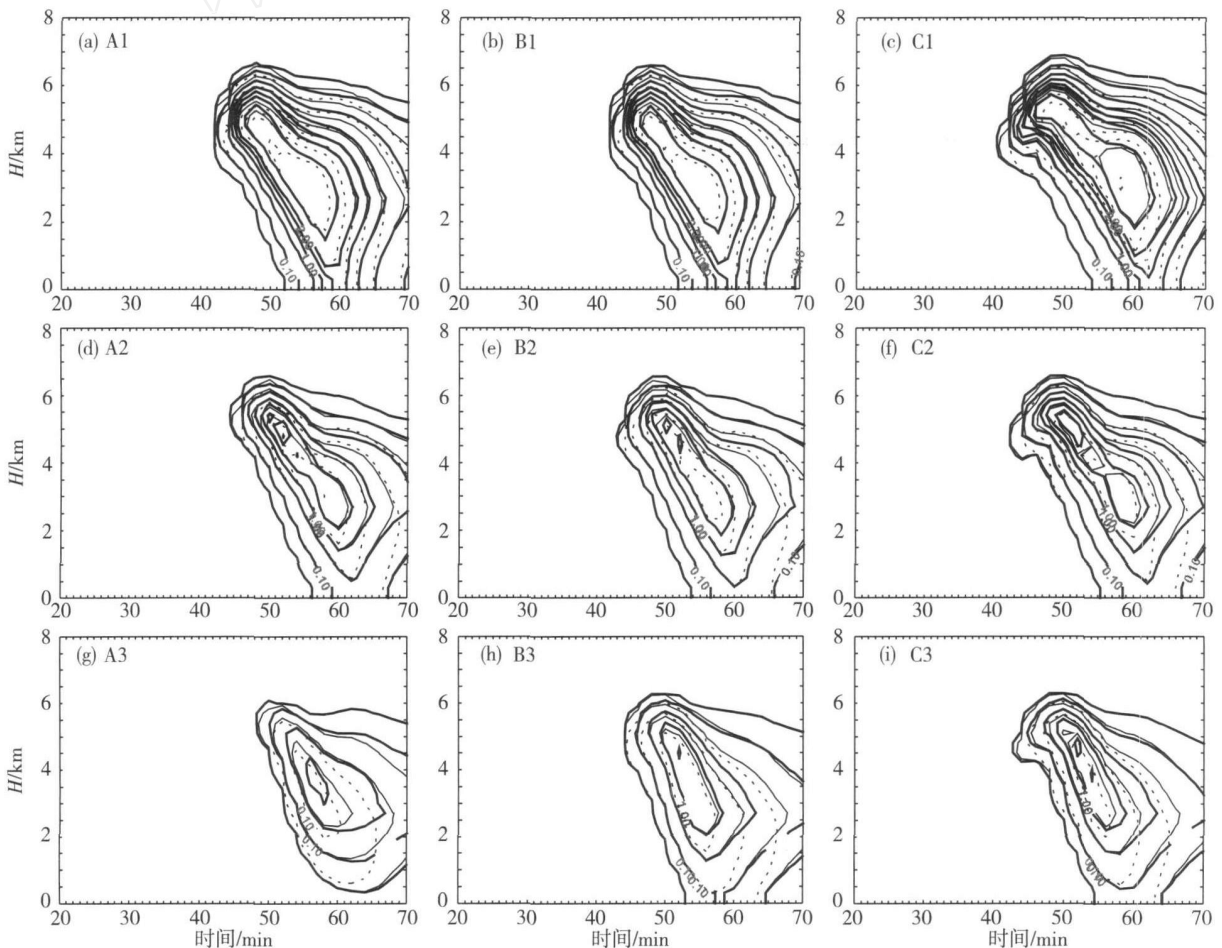


图 4 模式中心不同尺度大小的霰粒比含水量 (g/kg) 在垂直方向随时间的变化 (其中粗实线、细实线和虚线分别代表半径大于 1.09、2.17 和 4.34 mm 的霰粒分布)

Fig 4 The specific masses of different sized graupel particles in the cloud as a function of time and height, where the coarse solid, thin solid and dashed lines represent particle radii larger than 1.09, 2.17 and 4.34 mm, respectively

于4.34 mm的霰粒的出现时间相对较晚,随着霰粒尺度增大,出现的高度降低;受传输过程影响 GCCN浓度增加后(B2),大陆性积云内霰粒在地面的出现时间提前约5 min,半径大于4.34 mm霰粒的最大含水量值由A2的1.505 g/kg提高到1.789 g/kg;在沙尘同时增加N浓度后(C2),霰粒在地面的出现时间较之B2略有推迟,含水量中心值相应下降。A3中,半径越大的霰粒在云中出现的时间越晚、维持的时间也越短,所能达到的垂直高度也越低,半径大于1.09 mm的霰粒在没有到达地面之前即融化掉了;少量巨核的引入对此种类型的云(B3)影响最大,霰粒提前5 min形成,垂直分布范围扩大,霰粒的最大高度出现于6.5 km,比不受GCCN影响的云提高了0.6 km;大气中N浓度增加后霰粒的最大含量有所降低(C3)。

随背景环境中活化的气溶胶浓度的增多,霰粒在云内的出现时间推迟,分布的垂直高度降低。GCCN的作用在受污染的大陆性积云中表现最为明显,使霰粒提前出现,并增大其冰水含量值。大气中N浓度增加后小霰粒的出现时间提前,但尺度较大的霰粒出现时间几乎不受其影响,霰粒在云内的维持时间变短。

3 结 论

本文通过敏感性试验,得到以下结论:

(1)大气中背景气溶胶浓度增大后,冰相降水的开始时间延迟,冰相降水率减小。

(2)只有在污染严重的大陆性云中,矿物气溶胶的远程传输过程中增加的GCCN可加快云内冰相粒子形成,增大冰相降水粒子的降水率及其对整个降水的贡献率。

(3)不可溶的矿物气溶胶在其传输过程中可增加大气中的N浓度,部分抵消GCCN增多为霰粒增长提供的有利条件。只有在污染严重的大陆性云中,N浓度增多后才没有完全抵消GCCN对霰粒形成的促进作用。

参 考 文 献

- [1] 俞剑蔚,王元,沈树勤,等. 江苏地区沙尘天气时空特征及气候变化分析. 气象科学, 2008, 28(1): 45-49.
- [2] 周自江,牛若芸. 2004年春季中国沙尘天气特征分析. 气象科学, 2007, 27(1): 69-75.
- [3] 黄辉军,刘红年,蒋维楣,等. 南京市主城区大气颗粒物来源探讨. 气象科学, 2007, 27(2): 162-168.
- [4] 金正润,牛生杰,河惠卿. 2002年3月21—22日影响韩国的沙尘天气分析. 南京气象学院学报, 2007, 30(5): 643-647.
- [5] Seinfeld J H, Carmichael G R, Arimoto R, et al. ACE-ASIA-Regional climatic and atmospheric chemical effects of Asian dust and pollution Bull Amer Meteorol Soc, 2004, 85(3): 367-380.
- [6] 黄蔚薇,杨军,凌士兵,等. 沙尘气溶胶粒子表面变性对云滴形成过程的影响. 南京气象学院学报, 2007, 30(2): 210-215.
- [7] Sullivan R C, Guazzotti S A, Sodeman D A, et al. Direct observation of the atmospheric processing of Asia mineral dust Atmos Chem Phys, 2007, 7: 1213-1236.
- [8] Feingold G, Cotton W R, Kreidenweis S M, et al. Impact of giant Cloud Condensation Nuclei on drizzle formation in marine stratocumulus: Implications for cloud radiative properties J Atmos Sci, 1999, 56: 4100-4117.
- [9] Levin Z, Teller A, Ganor E, et al. On the interactions of mineral dust, sea salt particles and clouds Measurements and modeling study from the MEDEX campaign. J. Geophys Res, 2005, 110: D20202, doi: 10. 1029/2005JD005810.
- [10] Yin Y, Levin Z, Reisin T G, et al. The effect of giant cloud condensation nuclei on the development of precipitation in convective clouds A numerical study Atmos Res, 2000, 53: 91-116.
- [11] 陈丽,银燕,杨军,等. 沙尘气溶胶对云和降水影响的模拟研究. 南京气象学院学报, 2007, 30(5): 590-600.
- [12] Yin Y, Wuzler S, Levin Z, et al. Interactions of mineral dust particles and clouds: Effects on precipitation and cloud optical properties J. Geophys Res, 2002, 107: doi: 10. 1029/2001JD001544.
- [13] Pruppacher H R, and Klett J D. Microphysics of Clouds and Precipitation D. Reidel, Norwell, Mass, 1997: 954.
- [14] Sassen K. Indirect climate forcing over the western US from Asian dust storms Geophys Res Lett, 2002, 29(10): 1465, doi: 10. 1029/2001GL014051.
- [15] Teller A. and Levin Z. The effects of aerosols on precipitation and dimensions of subtropical clouds: a sensitivity study using a numerical cloud model Atmos Chem Phys, 2006, 6: 67-80.
- [16] Mahowald N M, Kiehl L M. Mineral aerosol and cloud interactions Geophys Res Lett, 2003, 30(9): 1475, doi: 10. 1029/2002GL016762.
- [17] DeMott P J, Sassen K, Poellot M R, et al. African dust aerosols as atmospheric ice nuclei Geophys Res Lett, 2003, 30(14): 1732, doi: 10. 1029/2003GL017410.
- [18] Van den Heever S C, Carrio G G, Cotton W R, et al. Impacts of nucleating aerosol on Florida convection Part I Mesoscale simulations J Atmos Sci, 2006, 63(7): 1752-1775.