

冰核浓度变化对云辐射的模拟试验*

李 娟 毛节泰

(北京大学物理学院大气科学系, 北京, 100871)

胡志晋 游来光

(中国气象科学研究院人工影响天气研究所, 北京, 100081)

张 蕾

(北京市气象局人工影响天气办公室, 北京, 100089)

摘 要

文中利用中国气象科学研究院 2000 年版三维对流云模式, 假设冰核浓度比现在模式中通常用来计算实际降水量的 Fletcher 给出的冰核浓度增大了 5 倍, 对北京地区 1996 年 6~9 月 18 次降水过程作了模拟的对比分析。结果表明, 80% 的模拟云在冰核浓度增大后都出现降水减小, 云顶卷云毡面积扩大, 云顶升高; 95% 的模拟云出现冰晶尺度变小, 数量增多的现象。说明冰核浓度增大后, 云的物理特性会有一些改变, 并可能通过直接和间接作用改变辐射过程从而产生一定的气候效应。

关键词: 冰核, 观测, 数值模拟, 气候, 辐射。

1 引 言

有关云凝结核对于云的辐射特性及对气候产生的影响已有大量的研究工作, 但是冰核浓度的改变可能对云所产生的作用目前尚没有很好地分析过。实际上, 在很多天气过程中冰核作用也很重要。分析以往的观测资料发现冰核浓度增加了很多, 因此希望了解冰核浓度增加可能带来的对辐射过程甚至气候的影响。由于在实际测量中, 很难同步观测高空云区附近冰核含量和云内冰晶数浓度及尺度分布, 观测其气候效应就更困难。据统计云通常覆盖地球表面的 $2/3$ 左右^[1], 它同时具有阳伞效应和温室效应, 云的净辐射强迫是这两种效应的综合效果。全球平均的云净辐射强迫大约是 CO_2 倍增可能引起的温室效应的 4 倍^[1,2]。由于云对全球辐射收支很重要, 因此, 当云的一些物理特性发生变化时, 就会对全球辐射收支及气候变化等产生举足轻重的作用。在全球气候模式等一些模拟试验中, 有关这种影响的研究仍然是一个难题。近年来, 由于人为及

自然排放的增加, 大气中的气溶胶粒子增加了很多。气溶胶粒子可以通过充当云凝结核和冰核来分别参与暖云和冷云中的微物理过程, 并直接和间接的影响云降水和辐射特性的变化。关于云凝结核数浓度的变化可能导致的气候变化, Twomey 和 Alkezweeny^[3,4] 认为, 云凝结核的增加, 会抑制暖雨过程, 使得降水减少, 并通过直接和间接的效应加强云对天气系统的辐射强迫作用。这种效应已经得到很多工作^[5] 的证实。由于云凝结核主要对暖云降水起关键作用, 因此, 这些工作都只是针对暖云降水来讨论的。

事实上, 冰核对于云的宏微观结构、辐射特性及其物理特性都可能有着重要影响, 但这些目前还没有作过专门的研究。当温度在 $-35\text{ }^\circ\text{C}$ 以上时, 冰晶的形成主要依赖于冰核的异质核化^[6], 因此, 冰核浓度对于大部分冷云中初生冰晶的数量起着重要作用, 影响着整个冰水转化过程。而冰晶对于冷云降水、云的辐射效应、水分循环甚至平流层的水汽含量的作用都很大, 是一个重要的影响因子^[7]。因此,

* 初稿时间: 2003 年 8 月 10 日; 修改稿时间: 2003 年 9 月 10 日。

资助课题: 国家科技攻关计划项目“卫星资料在人工影响天气作业中的应用”。

冰核在很多物理过程都扮演着重要角色,与云凝结核具有同等的重要性。有关冰核数浓度对云的物理特征等的影响,早期有过一些初步的探讨。1985年, Perez^[8]通过观测分析认为局地冰核源可能对其附近的降水分布产生影响。Vali^[9]在1991年也提出冰核浓度除了可能影响降水过程外,还可能通过影响云的微结构来影响大气辐射过程。游来光等曾经研究过冰核数浓度对冰晶浓度的影响,20世纪60年代,他们在吉林进行过层状冷云中冰晶浓度的飞机观测^[10],结果表明,该云中冰晶浓度普遍偏高,推测可能是由于该地区处于大陆黄土高原下游,接近冰核源区。这就说明冰晶浓度与冰核浓度之间很可能是正相关的关系。20世纪80年代北方层状云观测时利用粒子测量系统(PMS)对冰云的微结构进行了多次的飞机观测。游来光等^[11]对冰云中霾粒子浓度和冰粒子浓度作了相关分析,发现云中气溶胶粒子浓度高时对应应有高冰晶浓度,且对应有更小的冰粒子尺度。

在以上工作中,他们都认为冰核数浓度和冰晶的数量之间存在密切关系,并提出了冰核可能会影响冰云物理特性的推测,但他们没有对冰核数量所带来的冷云降水及其辐射特性的影响作更为深入的分析。近年来,冰核的浓度也有所增加。对于了解多年来冰核浓度的变化比较理想的资料是游来光等^[10,11]在北京地区于1963年和90年代中期对自然冰核浓度观测得到的资料。这几次观测地点和方法是一致的,采用的都是最接近云中实际核化条件的混合冷云室。他们发现90年代中期的冰核浓度比1963年平均增加了约15倍。尽管90年代中期的观测结果可能存在一些局地污染和沙尘的影响,在没有沙尘影响下的本底冰核浓度也有明显增加,这表明伴随社会发展,人类活动作为大气冰核源有显著增强。因此,我们希望了解冰核浓度变大后,云物理特征是否会产生变化以及可能会对辐射过程甚至气候产生的影响。

由于在实际测量中,很难同步观测高空云区附近冰核含量和云内冰晶数浓度及尺度分布,由此可能带来的辐射及气候效应也很难观测到。为了对冰核浓度可能导致的云的物理过程的变化做一些初步的分析,本文假设冰核浓度比现在模式中通常用来计算实际降水的由Fletcher给出的冰核浓度增大了5和10倍(根据游来光的观测,冰核浓度增加15倍,考虑到污染影响,选取这两个值),并作了一组对

比模拟试验,分析了北京地区1996年6~9月共18次的降水过程。力图通过较为长期的统计及统一的数值试验定性地了解大气冰核浓度变化对于对流云物理过程的作用,以及由此产生的对辐射传输的影响,分析了可能导致的气候效应。

2 模式介绍

由于本文希望了解冰核浓度的变化对于云的物理过程的影响及其可能带来的气候效应,采用大-中尺度模式可能更为合适。但是目前大-中尺度模式的网格分辨率较低,对于云中的微物理结构的描述也不够细致,所以这里采用较小尺度的对流云模式作一些先行性的工作。虽然对流云的尺度偏小,占全球云量远不及系统性云系,但是云中的主要微物理过程相似,还是有一定的可行性。另外,本文采用的2000年版中国气象科学研究院三维对流云模式^[12]中对于冰晶核化过程的处理更为合理,它考虑了水汽过饱和度和温度变化率,更接近于室内实验的结果。而其他大-中尺度模式如MM5的方案中没有考虑这些因素。所以本文采用该模式进行模拟试验。

该模式将水成物分成5类,即云水、冰晶、雨水、霰粒和冰雹,并详细考虑了它们之间的29种转化过程,可以预报10个云物理量。模式的初始场采用探空资料作为水平均一的理想初始场,对流启动采用湿热泡扰动方式。模式的水平格距为1200m,垂直格距700m。水平积分范围为60×60格点,垂直层数取30层。云微物理过程的参数化方程主要取自胡志晋和何观芳^[13]的结果,动力学框架取自胡志晋和邹光源^[14]。该模式经过了多次的补充和完善,能较好地模拟实际降水中的云物理过程。在湖北和青海两地的试用结果表明,模式的模拟结果如回波强度和降水量等基本上与实际的对流云发展情况符合。

在模式中大气冰核浓度及其温度谱是输入参数。同时考虑了降温率与过饱和度的影响,模式中冰晶的核化方程取为:

$$N_{\text{pvi}} = \begin{cases} 0 & \text{当 } \frac{dT}{dt} < 0 \text{ 或 } Q_v > Q_{si} \\ -N_0 B \exp[B(273 - T)] \left| \rho \left(\frac{Q_v - Q_{si}}{Q_{sw} - Q_{si}} \right)^k \frac{dT}{dt} \right| & \text{当 } \frac{dT}{dt} \geq 0 \text{ 或 } Q_v \leq Q_{si} \end{cases}$$

大气冰核数浓度为:

$$N_{in} = N_0 \exp[B(273 - T)]$$

N_{pvi}, N_{in}, N_0, B 分别为冰核在单位时间内所产生的冰晶数浓度, 大气冰核浓度及其两个参数。模式中一般采用 Fletcher (1962) 的实验结果用来计算实际的冰核活化情况, $N_0 = 6.53, B = 0.342$ 。 $Q_v, Q_{sw}, Q_{si}, \rho$ 分别表示实际比湿、水面饱和比湿、冰面饱和比湿与空气的密度。式中 $Q_v - Q_{si}$ 表征冰面过饱和度的大小, 由于以上冰核浓度是在水面饱和云室测得的, 也就是说, 此时处于水面过饱和, 相当于 $Q_v - Q_{si} = Q_{sw} - Q_{si}$ 的条件。而根据实验结果可知, 在温度一定时, 冰核活化的数目与冰面过饱和度有密切关系, 所以在模式中还考虑了过饱和度的影响, 认为 N_{pvi} 与 $\left(\frac{Q_v - Q_{si}}{Q_{sw} - Q_{si}}\right)^k$ 成正比, k 在这里取为 5。

3 大气冰核浓度增大的数值试验

3.1 个例分析

首先我们用了 1996 年 6 月 10 日北京市气象局

现象台的探空资料作了初步的试验, 试图了解自然冰核浓度可能产生的对北京地区降水云的物理过程的影响。当天观测有降雹过程, 是一次比较典型的对流云降水。早晨的探空资料显示, 0°C 层位于 4 km 处, 地面相对湿度为 33%, 对流凝结高度 2766 m, 最大经向风速高度 12.6 km, 为 20.5 m/s。模式计算的云顶最大高度为 14 km, 温度为 -54°C 。模式计算云底高度 1.4 km, 温度为 27°C 。在冰核浓度改变后, 同时出现了云体宏观结构的变化。

3.1.1 模拟云的雷达回波对比及与实测比较

图 1a 为 1996 年 6 月 10 日 14 时 37 分雷达体扫图像, 从实测回波图上看, 回波顶可以达到 11~13 km, 云顶较平, 已经平行开来, 此时回波及地, 最大强度为 60 dBz 左右。模拟云在 45 分时的回波 (图 1b), 顶高在第 17~18 个垂直格点处, 也就是 12~13 km, 接近于雷达实测顶高, 强度也比较相似。通过模拟云体结构与实际的雷达回波图的对比, 说明模式模拟的云体结构与实测基本上相符。

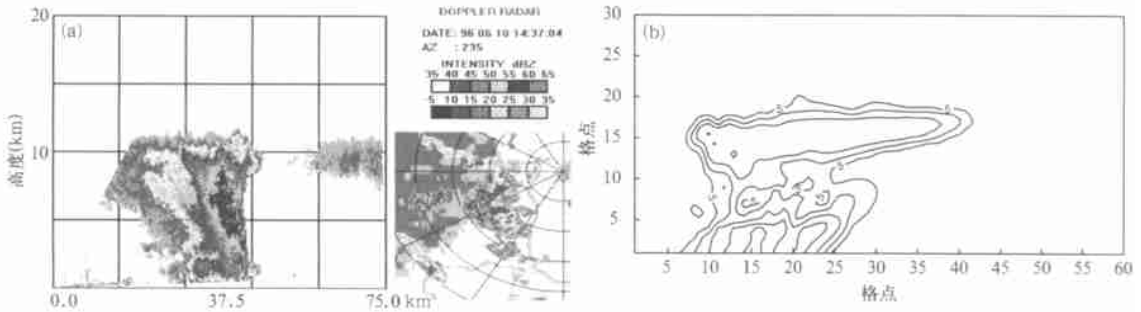


图 1 1996 年 6 月 10 日 14 时 37 分实测雷达回波 (a) 和 45 分模拟雷达回波 (b) 演变情况

(取纵向第 30 个格点的截面图, 最小为 5 dBz, 相邻两线间距 10 dBz)

Fig. 1 Radar echo observed at 14:37 on Jun, 10, 1996 (a) and simulated radar echo at 45 min (b)

3.1.2 假设冰核浓度分别增大 5, 10 倍后, 模拟云的降水情况和云物理特征的变化

(1) 模拟的降水情况

冰核浓度增大后模拟得到的一些宏观量见表

1。从表 1 可以看出, 当冰核数浓度分别增大 5 和 10 倍后, 地面降水量受到削弱。另外, 云顶高度、云的厚度和上升速度都有了一定的增强。这是由于大量冰晶的核化放出的潜热促进了云体动力结构发展

表 1 冰核浓度分别增大 5, 10 倍后模拟云的宏观物理特征

Table 1 macro-physical and microphysical characteristics of simulated cloud with normal IN concentration and with IN concentration increased for 5 and 10 times

参 量	云 底 (km)	最大云高 (km)	最大云顶温度 ($^\circ\text{C}$)	最大升速 (m/s)	降水总量	
					雨(10^6kg)	雹(10^6kg)
模拟基本情况	1.4	14	- 54	39	891	456
冰核浓度增大 5 倍	1.4	15	- 55	39.5	829	377
冰核浓度增大 10 倍	1.4	15	- 55	39.5	842	357

的结果。从表中给出的结果看,冰核浓度增大 5 和 10 倍后相比基本情况各物理量的变化趋势是一致的。

(2) 冰核浓度变化后云物理特征变化

冰核浓度的变化主要通过影响云内各粒子的含量来影响地面累计降水量。冰核浓度变大后,冰核的自然核化过程更加有效,在 30 分时,冰核浓度分别增大 5, 10 倍后的模拟云的冰核核化最大速率 V_{ip} 是之前的 5, 9 倍左右(图 2a)。生成的初始冰晶数量大量增加,并通过冰晶的增生过程(图略),即霰粒碰并大云滴时产生次生冰晶的过程使得冰晶含水

量 Q_i 继续增大。60 分时 Q_i 达到最大,此时冰晶的含水量在冰核浓度分别增大 5, 10 倍后增大 20% 和 22% 左右(图 2b)。 x_i 为冰晶的尺度参数,与冰晶的平均直径成正相关。随着初始冰核浓度的增大,冰核核化产生的冰晶的平均直径变小(图 2c),但冰核浓度增大 10 倍后粒子尺度的减小并不比增大 5 倍时明显很多。在冷云降水中,主要通过贝吉龙过程(冰晶过程)使得冰相物质长大,然后各水成物相互碰并,继续长大直到形成降水。当冰晶变小时,它与其他水成物的碰并比较困难,云中大粒子不易形成,因此也影响了总降水量。

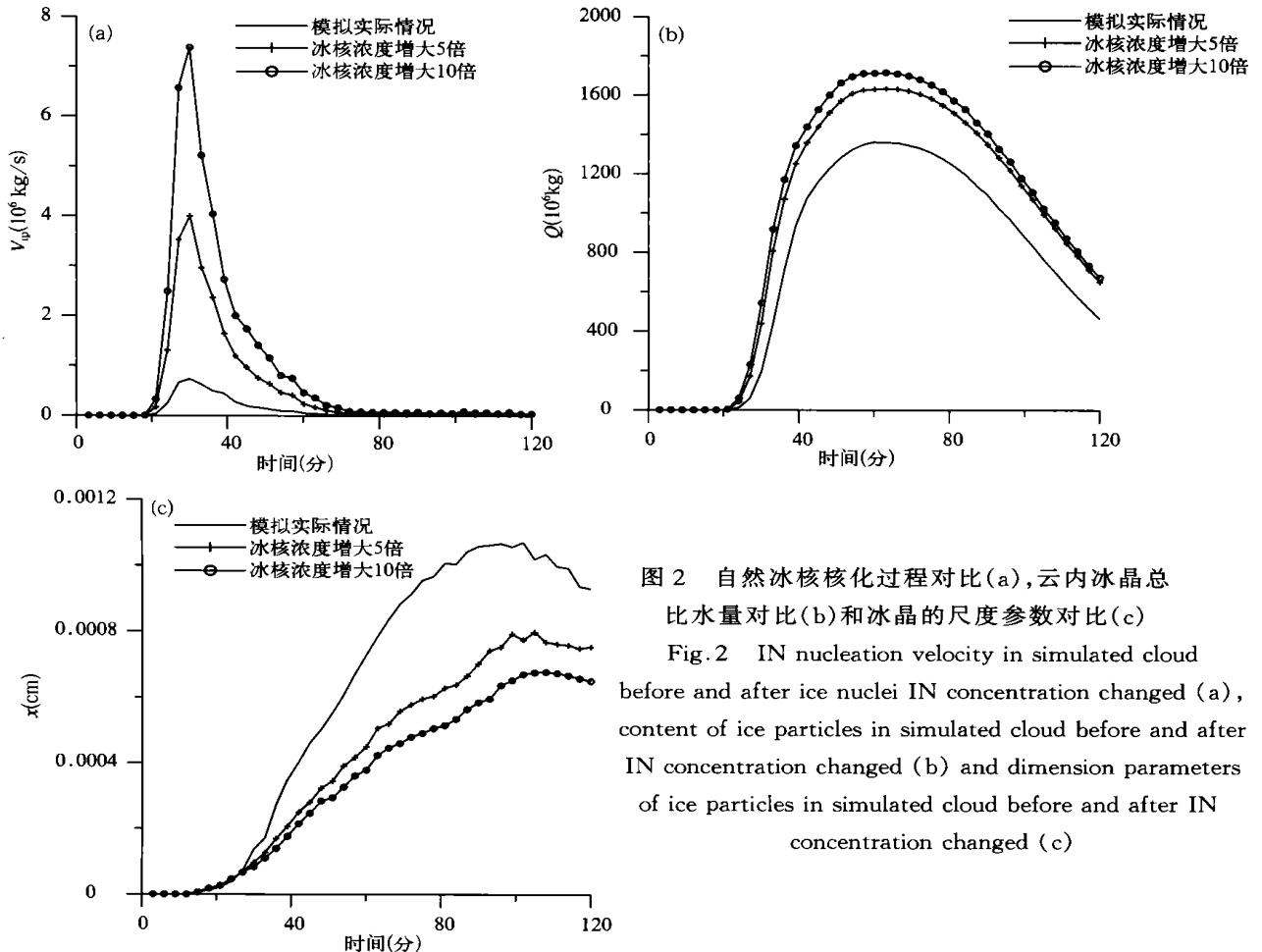


图 2 自然冰核核化过程对比(a),云内冰晶总比水量对比(b)和冰晶的尺度参数对比(c)

Fig. 2 IN nucleation velocity in simulated cloud before and after ice nuclei IN concentration changed (a), content of ice particles in simulated cloud before and after IN concentration changed (b) and dimension parameters of ice particles in simulated cloud before and after IN concentration changed (c)

初始冰核浓度增大后,各种大粒子的产生项受到削弱,并转化为随气流移动的小冰晶粒子移动到云砧或下游方向。由于刁量的小冰晶粒子随气流更易移动,且数浓度较大,从而使卷云砧面积扩大。图 3a~ c 给出 57 分时模拟的实际云与冰核浓度分别增大 5, 10 倍后的模拟云中冰晶的空间分布。通过对比分析可以看出,冰晶的水平分布面积扩大。冰核浓度增大 5 倍时,水平方向上大概扩大了 1~ 2 个

格距,也就是 1.2~ 2.5 km 左右。在相同的空间点上冰晶的数浓度也在增大。当冰核浓度增大 10 倍时,与增大 5 倍时的云砧面积接近。

3.2 统计分析

通过上面对于 1 次的模拟试验分析发现,当冰核浓度增大 5 倍时,冰核对云的物理过程有较为明显的影响,会出现如降水减少,云顶升高,云砧扩大,冰晶尺度变小等现象。当冰核浓度在此基础上再加

倍时,它对云降水和物理过程的影响不比增大 5 倍时明显很多,因此可以以冰核浓度增大 5 倍为例来做定性的试验分析。由于一个例子很难有说服力和代表性,为了检验这是否是一种普遍的效应,下面作了统计分析。

我们对 1996 年 6~9 月 26 次的降水过程作了数值模拟分析,得到这 26 次实际和假设冰核浓度增大 5 倍后的模拟降水情况。降水日从 6 月 10 日到 9 月 14 日,总的来说,共有 18 次的模拟结果的模拟降水量与北京气象局观象台的实际雨量站资料基本吻合(图 4)。有些模拟的降水量要比在实际测量的

略大,这可能是由于最大的降雨区并没有经过本站,雨量筒没有测量到大的降水导致的。通过模拟与实测降水量的比较,说明模式具有较好的模拟能力。这样就给模式计算得到的其他结果也提供了可信的依据。图 4 中空白和斜条状的直方图为模拟实际的降水和假设冰核浓度增大 5 倍后得到的模拟云的降水量。从图中对比可以看出,冰核浓度增大 5 倍后的模拟降水中,73% 左右的模拟云降水受到不同程度的削弱,22% 的降水过程对冰核浓度的变化反应不敏感,5% 的降水略有增加。

在冰核浓度增大后,云的微结构也出现了一定

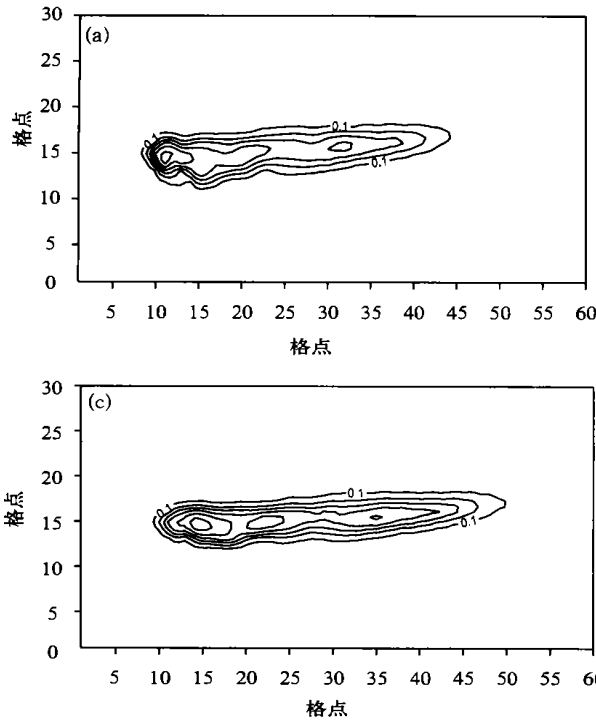


图 3 57 分时冰晶含量的空间分布
(a. 模拟实际情况的云, b. 冰核浓度增大 5 倍的模拟云, c. 冰核浓度增大 10 倍的模拟云; 最小为 0.1 g/kg, 等值线间距 0.2 g/kg)
Fig. 3 Spatial distribution of the content of ice particles in the simulated cloud at 57 min
(a. simulated cloud with normal IN concentration, b. simulated cloud with IN concentration increased for 5 times, c. simulated cloud with IN concentration increased for 10 times; the minimum of ice contents is 0.1 g/kg and the space between two lines is 0.2 g/kg)

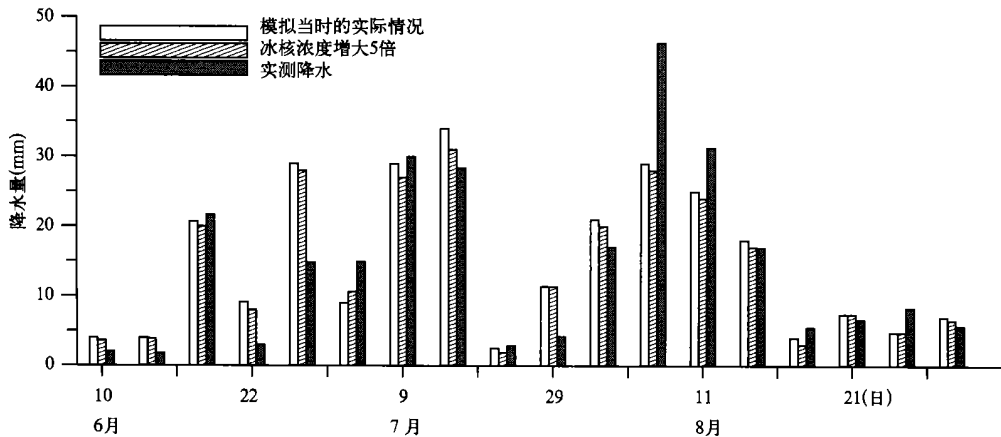


图 4 1996 年 6~9 月模拟云降水量与实测降水量比较及假设冰核浓度增大 5 倍后的模拟云降水量

Fig. 4 Observed precipitations in 18 days from June to September in 1996 and simulated precipitations before and after IN concentration increased for 5 times

的变化,在 18 次的模拟试验中,只有 1 次的模拟云中冰核浓度增大后冰晶尺度参数 x_i 比之前的略大,由于模拟结果同时显示这一天冰核浓度增大 5 倍后冰晶的含水量 Q_i 是之前的 2 倍多,出现两者 x_i 比值大于 1 的现象可能是由于当天空气比较潮湿,高空水汽非常充足的缘故。根据统计结果,这种情况出现的很少,表明这种现象不是普遍的规律。统计显示,17 次的模拟云都出现了冰晶浓度变大,粒子尺度变小的现象(图 5)。图中显示,冰核浓度增大

后的模拟云中 Q_i 是之前相应值的 1.0~2.2 倍左右,而其冰晶的尺度参数 x_i 却是之前的 50%~100% (1 次除外)。这主要是由于冰核浓度增大,大量冰核的活化造成初始的冰晶浓度也增大,在水汽没有由于动力原因增加很多的情况下,冰晶的平均尺度变小。另外,由于云中粒子平均尺度变小,它与霰粒等水成物的碰并系数很小,云中大粒子不易形成,降水因而受到抑制。

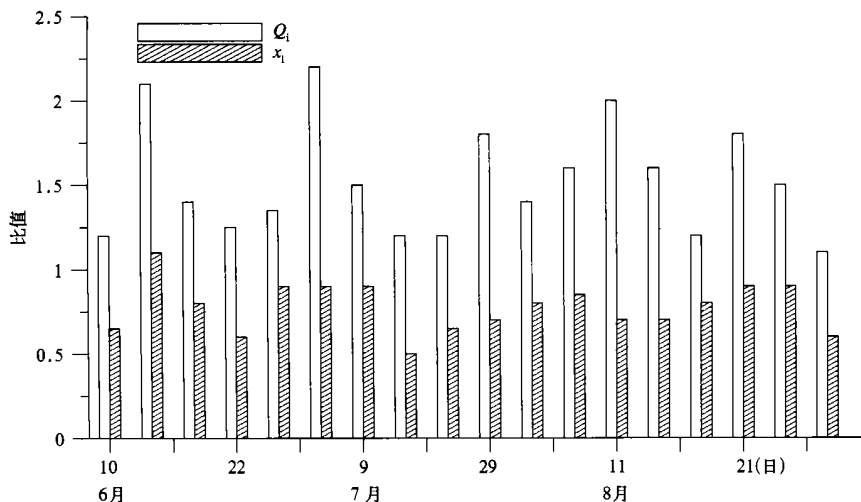


图 5 1996 年 6~9 月假设冰核浓度增大 5 倍后的模拟云和模拟的实际云内冰晶总含水量 Q_i 和冰晶粒子尺度参数 x_i 分别达到峰值时的比值

Fig. 5 Ratio of maximal ice content Q_i and maximal dimension parameters x_i before and after IN concentration increased for 5 times in the simulations from June to September in 1996

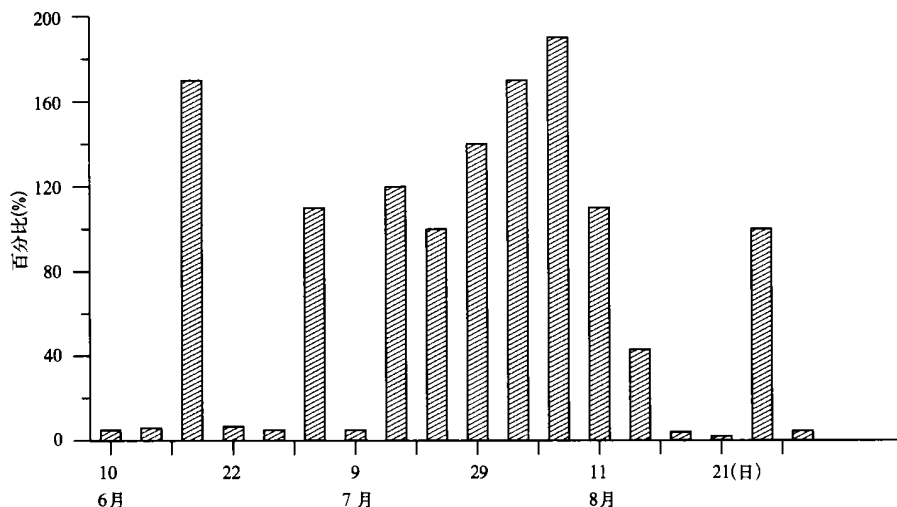


图 6 1996 年 6~9 月冰核浓度增大 5 倍后云毡面积的增加比例

Fig. 6 Ratio of the cloud top area before and after IN concentration increased for 5 times in the simulations from June to September in 1996

冰核浓度增大后,多数云出现了宏观尺度的变化,表现为云顶抬高,云毡略有扩大,云厚增加,云的上升速度增强的现象。这是由于大量冰晶的核化放出的潜热促进了云体的动力结构的发展,使得云内部的上升速度增大,促进云顶抬升。另外,各种大粒子的产生项被削弱后,转化为更易于随气流移动的小冰晶粒子移动到云毡或下游方向,使得冰晶云顶

部平行开来,云毡面积扩大。图 6 为冰核浓度增大 5 倍后云毡面积增加的比例。在有些降水过程中,云毡的面积可以扩大一倍左右。

云顶高度的比例见图 7。可以看出,83% 的云顶抬升,云顶高度一般增加 5%~10%,也就是 0.5~1 km 左右。17% 左右的云体基本没有宏观变化,只是出现微结构的改变。

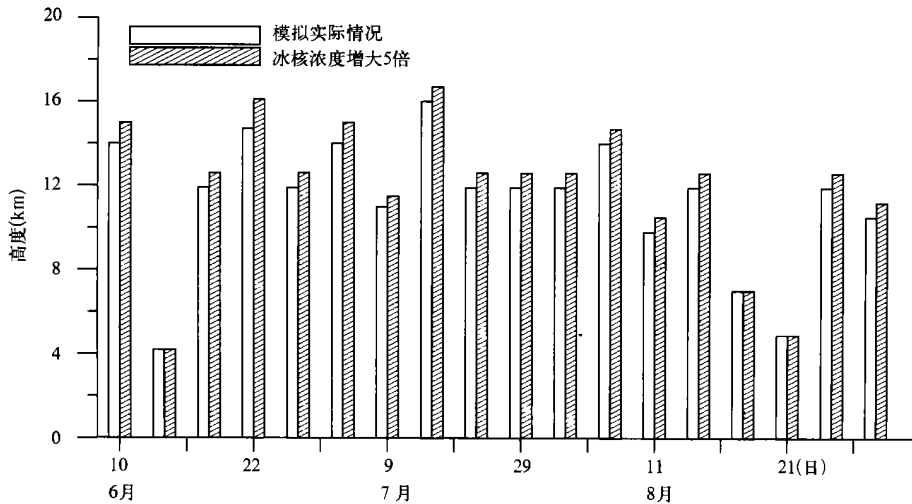


图 7 1996 年 6~9 月冰核浓度增大 5 倍前后的云顶最大高度

Fig. 7 The maximum of cloud top height before and after IN concentration increased for 5 times in the simulations from June to September in 1996

4 讨论和总结

对于一块云来说,在照到大气顶的太阳辐射通量,纬度、季节等其他条件都相同时,云上的辐射特性的差异主要取决于云量、云状、云高及其他微物理性质,包括云粒子的相态、形状、数密度、复折射指数等。通过对 1996 年 6~9 月 18 次降水过程的模拟结果的对比比较,可以看出,冰核浓度加大后,80% 左右的模拟云出现降水减少,云顶增高,云毡扩大等宏观变化,95% 以上的云出现冰晶粒子比水量增大,尺度变小的现象。这样,由于云的物理结构发生变化,云的辐射性质也会改变。下面作逐一讨论。

Kinne S^[17] 对比分析了具有较小粒子的非对流性云 Cs 和具有较大粒子的对流性云 Ci 的辐射特性,认为在同样的光学厚度下,不管是由何种形状的冰晶构成的冰云,当由大量的小粒子构成时,会比由较少的大粒子构成的冰云具有更大的几何截面,从而具有更大的反照率。而本文的模拟结果显示,冰

核浓度增加后,模拟云内微结构发生改变,冰晶云从由较少的大粒子到由大量较小冰粒子组成。这样,会使得模拟云有更大的反照率,云的净辐射冷却作用会得到增强。另外,本文的模拟结果显示模拟云的卷云毡扩大。Roewe 和 Liou^[18] 利用已经观测得到的冰含量分布,计算了卷云中的红外加热率和太阳辐射冷却率,他们认为较厚冰晶云一般会有微弱的冷却效应。由于本文模拟的扩大云毡都是指可以产生降水的云体上部的冰晶云毡,因此这部分扩大了云体产生的辐射效应,根据 Liou 的试验结果,可能为负的,有降温作用。

云的高度也在很大程度上影响了云的短波辐射强迫,云越高,云的阳伞效应会更明显一些。从前面的分析看,本文的模拟云云体的宏观结构有了一定的改变。前文的统计分析表明,83% 的云顶抬升约 0.5~1 km。由于云顶高度及云厚度的变化,会造成云辐射特性的变化。这里,我们用了 SBDART 辐射模式对由于云顶高度的变化可能带来的大气顶辐

射的变化作了初步的试验分析^[19]。该辐射模式采用近年来广泛使用的各种物理模式,结合了经典的离散纵坐标辐射传输模式、低分辨率的大气辐射传输模式、以及水滴和冰晶的 Mie 散射计算结果,是一个可以信赖的辐射传输模式。模式选取中纬度夏天的大气廓线,并设太阳位于天顶,由于目测对黄绿光(大约 $0.55 \mu\text{m}$)最敏感,因此,我们选取该波段计算了当云顶处在不同高度时大气顶谱辐出度的大

小。各日的模拟结果见图 8。从图上看,在 $0.55 \mu\text{m}$ 处,由于云顶高度的变化,导致了 83% 左右的云上部大气顶的向上辐射增强,变化幅度在 $0.03\% \sim 0.17\%$ 左右。在其他可见光波段,我们也得到了同样的结果(图略),也就是说,云顶高度抬升后,云的反照率增加。这说明,云顶高度的变化使得云的反照率增大,使得其对地气系统的冷却效应进一步增强。

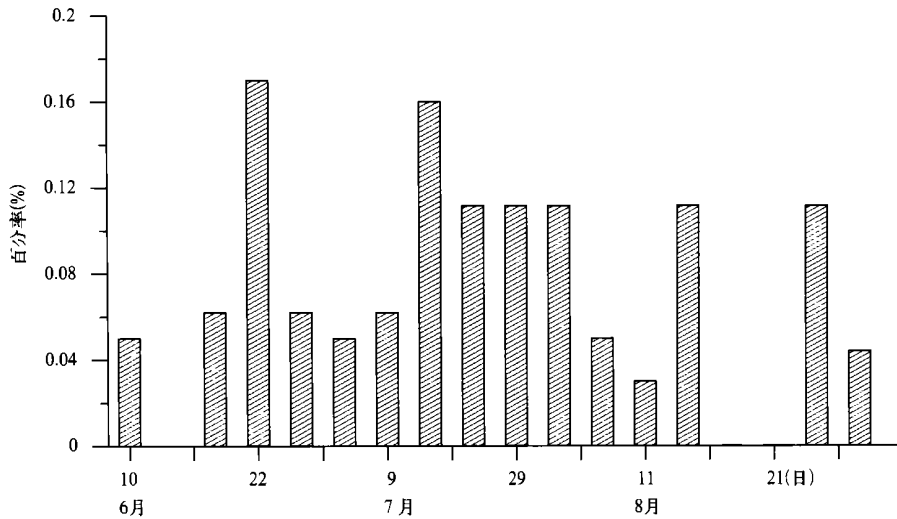


图 8 1996 年 6~ 9 月由于云顶变高造成的大气顶在 $0.55 \mu\text{m}$ 的谱辐出度增加的比例

Fig. 8 Increment of upward radiation at top of atmosphere at $0.55 \mu\text{m}$ caused by rise of cloud top in the simulations from June to September in 1996

降水受到削弱会带来冰核的间接辐射强迫作用。由于初始冰核浓度增大后,地面降水减少,因而降水对云下包括冰核在内的气溶胶粒子的冲刷作用减弱。这样,就形成了正反馈的作用。另外,冰核浓度增大后,由于冰晶尺度变小,冷云中碰并过程受到抑制,会使得降水物不易形成,这样,云维持时间更长,更稳定,云量从而相对增加,进一步增强了云的辐射强迫作用。

由于在 1996 年 6~ 9 月 80% 左右的模拟云当冰核浓度增大后,都出现了上述改变,这说明,冰核浓度会通过改变冰云微结构来直接和间接地影响冷云辐射特性,可能使得云辐射冷却作用增强,并带来长期的气候效应。当然,本文所用的资料对于讨论气候效应有一定的局限性,但本文力求通过较为长期的统计及统一实测的数值试验来了解云的物理特

性的变化,提出一点想法,以达到抛砖引玉的作用。另外,本文的模拟试验只是针对对流云,没有考虑层状云可能也受到冰核浓度变化的影响。对于层状云的可能效应,我们认为,层状云比较稳定,动力作用不强,云顶高度可能不会出现和对流云一样的抬高,但冰核对其微结构的改变如云粒子尺度变小,反照率增大等还是会有,这也是我们将要进一步作的工作。另外,对于冰核浓度的改变可能带来的云物理及辐射特性的改变及气候效应的这一推测的验证还需要开展现场观测,利用地面、飞机、卫星上多种手段测量不同尺度云的结构、成分等微物理特性及云的辐射性质,并在理论上对由非球形粒子组成的冰晶云的辐射特性再作进一步的研究。通过观测,试验和理论相结合以期获得对这种由冰核浓度变化带来的影响作进一步的了解。

参考文献

- 1 Ramamatha V, et al. Cloud radiative forcing and climate: Results from the earth radiation budget experiment. Science, 1988, 243: 57~ 63

- 2 Harrison E F, et al. Seasonal variations of cloud radiative forcing derived from the earth radiation budget experiment. *J Geophys Res*, 1990, 95: 18687~ 18703
- 3 Twomey S, et al. An assessment of the impact of pollution on the global cloud albedo. *Tellus*, 1984, 36B: 356~ 366
- 4 Alkezweny A J, et al. Measurements of cloud droplet size distribution in polluted and unpolluted stratiform clouds. *J Appl Meteor*, 1993, 32(1): 106~ 115
- 5 Francois Marie Breon, et al. Aerosol effect on cloud droplet size monitored from satellite. *Science*, 2002, 295: 834~ 838
- 6 Baker M B. Cloud microphysics and climate. *Science*, 1997, 276: 1072~ 1078
- 7 Ramanathan V, et al. Aerosols, climate and the hydrological cycle. *Science*, 2001, 294: 2119~ 2124
- 8 Perez P J, et al. Ice nuclei concentration in Valladolid Spain and their relation to meteorological parameters. *J Rech Atmos*, 1985, 19: 153~ 158
- 9 Vali G. Report of the experts meeting on interaction between aerosols and clouds. WCRP-59, WMO/TD-NO. 423, 1991
- 10 游来光, 石安英. 北京地区 1963 年春季冰核浓度变化特点的观测分析. *气象学报*, 1964, 34(4): 548~ 554
- 11 游来光, 杨绍忠, 王祥国等. 1995 和 1996 年春季北京地区大气冰核浓度观测与研究. *气象学报*, 2002, 60(1): 101~ 108
- 12 于达维, 何观芳等. 三维对流云催化模式及其外场试用. *应用气象学报*, 2001, 12(增刊): 122~ 132
- 13 胡志晋, 何观芳. 积雨云中微物理过程的数值模拟(一): 微物理模式. *气象学报*, 1987, 45(4): 467~ 483
- 14 邹光源. 三维准弹性对流云模式[硕士论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 1991
- 15 Cai Q M, Liou K N. Theory of polarized light scattering by hexagonal ice crystals. *Appl Opt*, 1982, 21: 3569~ 3580
- 16 Stephens G L. Radiative transfer through arbitrarily shaped optical media I: A general method of solution. *J Atmos Sci*, 1988, 45: 1818~ 1936
- 17 Kinne S, Liou K N. The effects of the nonsphericity and size distribution of ice crystals on the radiative properties of cirrus clouds. *J Atmos Res*, 1989, 24: 273~ 284
- 18 Roewe D, Liou K N. Influence of cirrus clouds on the infrared cooling rate in the troposphere and lower stratosphere. *J Appl Meteor*, 1978, 17: 92~ 106
- 19 Paul Ricchiazzi, et al. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79(10): 2101~ 2114

NUMERICAL SIMULATION EXPERIMENTS FOR THE EFFECTS OF CHANGES OF ATMOSPHERIC ICE NUCLEI CONCENTRATIONS ON RADIANT PROPERTIES OF CLOUD

Li Juan Mao Jietai

(Department of Atmosphere Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Hu Zhijin You Laiguang

(Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081)

Zhang Qiang

(Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089)

Abstract

Research on the possible effects of Cloud Condensation Nuclei (CNN) on radiant properties of cloud and climate has been investigated in many papers, but the effects of Ice Nuclei (IN) have not been well analyzed. In fact, ice nuclei are very important in many weather events for the reason that IN can affect the initial concentrations of ice particles in cold cloud and then change the physical characteristics of cold cloud. Recently, with more and more human activities, numerical concentrations of IN have increased a lot in atmosphere in some places. Observations in Beijing show that the concentrations of IN in Beijing have increased a lot in about 32 years from 1963 to 1995. The IN concentrations which can be activated at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ increase about 15 times. Since, ice nuclei concentrations at high altitudes and the concentrations and scales of ice crystal in cloud can not be observed synchronous easily now, so the relation between concentrations of IN and ice crystal by observation we can not be tested in reality. Thus, numerical simulations are adopted. In this thesis, all simulations used 3-D convective cloud model of CAMS (Chinese Academy of Meteorological Sciences, version 2000). First of all, a single test which used the sounding data of June, 10, 1996 was completed. In the simulation, it is supposed that the concentration of IN had increased 5 times and 10 times and got the same results that ice particles concentration increased and the size of them decreased. What is more, cloud tops heightened when IN concentrations increased although the change ranges were not entirely the same. Then numerical simulations of 18 precipitation days from June to September in 1996 were conducted. The conclusions were that when ice nuclei concentrations increased, in 80 percents simulated precipitation processes, the amounts of precipitation decreased, the cloud tops heightened and the areas of cloud top height increased. rather more, in 95 percents processes, the scales of ice crystal in the cloud decreased and the quantities increased. That is, physical properties of cold cloud changed when IN concentrations changed. From some analysis including a simulation using SBDART radiative model, some results could be achieved. That is, cloud reflectance increased when cloud top increased, ice particles concentration increased and size of them decreased when cloud reflectance increased. In conclusion, radiant properties of cloud changed when IN concentrations increased. For the reason that cold cloud plays an important role in global radiative balance, the climatic effects caused by cold cloud can be modified directly and indirectly.

Key words: Ice nuclei, Observatton, Numerical simulation, Climate, Radiation.