

# 沙尘气溶胶表面变性影响 区域降水的数值研究

黄蔚薇<sup>1,2</sup> 杨军<sup>3</sup> 刘俊卿<sup>3,4</sup>

(1. 北京华风气象影视信息集团有限责任公司, 100081;  
2. 南京信息工程大学 大气科学学院; 3. 南京信息工程大学应用气象学院;  
4. 西藏日喀则地区气象局)

**提 要:** 选取 2003 年 4 月 8—11 日发生在我国北方的一次沙尘暴天气过程, 使用 MM5V3—7 版中尺度模式, 研究沙尘气溶胶表面变性产生的不溶性沙尘粒子外包可溶性硫酸铵层的混合气溶胶作为云凝结核对区域降水的影响。根据这种特殊的气溶胶对云微物理过程的影响, 在 Reisner 霞方案中加入沙尘气溶胶形成的云滴的表面平衡水汽压对饱和水汽混合比  $q_{sw}$  的影响, 设计了 6 种模式方案进行敏感性试验, 通过对比分析各个方案模拟的物理量场的分布特点, 研究混合气溶胶与冷云降水发展之间的关系, 并探讨沙尘气溶胶对云和下游降水的影响机制。

**关键词:** 沙尘气溶胶 云凝结核 区域降水 数值模拟

## 引 言

近年来, 中国北方频繁发生的沙尘暴事件引起国内外的广泛关注, 沙尘暴已经成为一个严重的地球环境问题<sup>[1-2]</sup>。沙尘暴是大气中沙尘气溶胶粒子的重要来源<sup>[3]</sup>, 对于我国北方沙尘暴所波及的地区, 沙尘气溶胶粒子含量较高<sup>[4]</sup>。特别是每年春季受蒙古气旋等天气系统影响, 沙尘粒子不断由西北和内蒙古地区输送到辽宁上空。加之我国主要以煤为能源, 是硫污染较重的国家, 尤其是在冬春取暖季节, 也正是我国沙尘暴发生的季节, 大气中硫的含量更大<sup>[5]</sup>。

国内外许多观测事实以及理论研究表明, 一定条件下  $\text{SO}_x$  与沙尘粒子的相互作

用可使得可溶性硫酸盐在沙尘粒子上形成<sup>[6-9]</sup>, 因此沙尘气溶胶粒子在传输过程中表面化学特性可能受 S 污染物作用产生变性, 从而沙尘粒子表面覆盖着可溶性硫酸盐<sup>[10]</sup>。在我国沙尘暴发生的季节大气中硫的含量较大, 一定湿度条件下不可溶的沙尘粒子表面有机会硫化而成为表面包裹一层可溶性硫酸盐的混合气溶胶粒子。沙尘与硫污染共同产生的这种气溶胶粒子在大气中的增多, 其凝结增长特性不同于均质可溶性核<sup>[11]</sup>。沙尘天气的出现则很可能通过这种变性的沙尘气溶胶粒子影响云微物理过程从而影响降水过程。

本文在已有研究成果的基础上<sup>[11]</sup>, 考虑表面变性的沙尘气溶胶作为云凝结核对云微物理过程影响, 选取 2003 年 4 月 8—11

日发生在我国北方的一次沙尘天气过程，利用 NCEP 的全球  $1^\circ \times 1^\circ$  FNL 分析资料，使用 MM5V3-7 版中尺度模式，研究混合气溶胶粒子作为云凝结核对区域降水的影响。根据混合气溶胶对云微物理过程的影响，在 Reisner 篓方案中加入沙尘气溶胶形成的云滴的表面平衡水汽压对饱和水汽混合比  $q_{sw}$  的影响，设计了 6 种模式方案进行敏感性试验，详细对比分析各个方案模拟的温度、水汽混合比、6 小时降水量、雪混合比和雨水混合比等物理量场的分布特点，从而研究混合气溶胶与冷云降水发展之间的关系，并探讨沙尘气溶胶对云和下游降水的影响机制。

## 1 沙尘天气个例

2003 年中国共出现了 11 次沙尘天气过程，2 次沙尘暴天气过程均发生在 4 月份，其中 4 月 8—11 日出现的沙尘暴过程是 2003 年入春以来强度最强、范围最广的一次，影响面覆盖新疆、青海、甘肃、内蒙古、宁夏、陕西、山西、辽宁、黑龙江等省区，共有 29 个台站观测出现了沙尘暴，其中 9 个站出现了强沙尘暴。这次沙尘过程至少使近 3000 万人口、430 万公顷耕地及 5900 多万公顷草地受影响。

此次沙尘天气过程大大增加了沙尘影响地区和其下游地区沙尘气溶胶的浓度，并且过后 1~2 日内，沙尘传输下游地区均有降水出现，而且降水过程多出现在沙尘影响地区的边缘和下游地区。在沙尘气溶胶传输过程中，强盛的西南气流除了为降水提供了有利的条件，也为沙尘气溶胶硫化过程提供了较好的相对湿度，从而有利于增加下游地区以及沙尘影响边缘地区混合气溶胶的数量<sup>[10]</sup>。这次沙尘天气比较适合研究沙尘气溶胶粒子在传输过程中表面变性对冷云降水的影响，因此选定这次沙尘天气作为本文的

研究个例，重点研究 4 月 10 日受沙尘影响的降水过程。

## 2 模拟方案设计

### 2.1 MM5 模式中显式云降水物理方案的选择

本文所研究的降水云系是北方春季的层状云系，因此云降水物理过程中必须考虑冰相水凝物。MM5 的显式方案中，简单冰相方案中没有过冷水存在，混合方案中虽然允许过冷水存在但其冰相过程比较简单，因此在本文中不选用这两个方案，而选用冰相方案比较详细、物理过程最全面的显式云降水方案 Reisner 篓方案。

### 2.2 Reisner 篓方案中涉及方程的讨论

本文中涉及的 Reisner 篓方案预报方程如下<sup>[12]</sup>：

水汽混合比预报方程：

$$\frac{\partial p^* q_v}{\partial t} = -ADV(p^* q_v) + DIV(p^* q_v) + D(q_v) + p^*(P_{recp} - P_{idep} - P_{sdep} - P_{gdep} - P_{dsn} - P_{cond}) \quad (1)$$

云水预报方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* q_c}{\partial t} = & -ADV(p^* q_c) + DIV(p^* q_c) + \\ & D(q_c) + p^*(-P_{anc} - P_{ncw} + P_{and} \\ & - P_{ifc} - P_{apl} - P_{s.saw} - P_{g.saw} - \\ & P_{gcw} - P_{i.ncw} - P_{g.ncw} + P_{init}) \end{aligned} \quad (2)$$

而水汽混合比预报方程（1）和云水预报方程（2）所涉及的参数云水凝结率  $P_{and}$  的预报方程则为：

$$\delta M = q_v - q_{sw} \quad (3)$$

其中  $q_v$  是水汽混合比， $q_{sw}$  是饱和水汽混合比， $q_{sw} = \frac{0.622e_{sw}}{p - e_{sw}}$ ， $e_{sw}$  是平水面饱和水汽

压,  $e_{sw} = 6.112 \exp\left(17.67\left(\frac{T - T_0}{T - 29.65}\right)\right)$ ,

$T$  为环境温度,  $T_0$  为冰点温度 273.15 K,  $P$  为气压。当  $\delta M > 0$ , 云水凝结率  $P_{and}$  为:

$$P_{and} = \frac{r_1 \delta M}{\Delta t} \quad (4)$$

其中  $\Delta t$  为时间步长,  $r_1 = \frac{1}{1 + \frac{L_w^2 g_{sw}}{R_w C_p T^2}}$ ,  $L_w$

为凝结潜热,  $C_p$  是干空气比热,  $R_w$  为水汽比气体常数。当  $\delta M < 0$  并且云水混合比  $q_c > 0$ ,

$$P_{and} = -\min\left(-\frac{r_1 \delta M}{\Delta t}, \frac{q_c}{\Delta t}\right) \quad (5)$$

当  $\delta M < 0$  并且  $q_c = 0$ ,

$$P_{and} = 0 \quad (6)$$

在 Reisner 篓方案中, 饱和水汽混合比为  $q_{sw} = \frac{0.622 e_{sw}}{p - e_{sw}}$ , 其中  $e_{sw}$  为平水面饱和水汽压,

$$e_{sw} = 6.112 \exp\left(17.67\left(\frac{T - T_0}{T - 29.65}\right)\right),$$

即 Reisner 篓方案认为平水面饱和水汽压  $e_{sw}$  近似等于云滴表面的饱和水汽压  $E_r$ 。而实际上对于混合气溶胶形成的云滴表面的饱和水汽压  $E_r$ , 根据公式  $\frac{E_r}{E_\infty} = 1 + \frac{C_r}{r} - \frac{C_n}{r^3 - r_o^3}$ <sup>[13]</sup> 可以得出:

$$E_r = (1 + \alpha) E_\infty \quad (7)$$

其中  $\alpha = \frac{C_r}{r} - \frac{C_n}{r^3 - r_o^3}$ ,  $E_\infty$  为平水面饱和水汽压。所以如果考虑混合气溶胶对云滴凝结过程的影响, 应将  $q_{sw} = \frac{0.622 e_{sw}}{p - e_{sw}}$  改为:

$$q_{sw} = 0.622 \frac{(1 + \alpha) E_\infty}{p - (1 + \alpha) E_\infty} \quad (8)$$

从而改变云水凝结率  $P_{and}$  的预报方程。

使用过饱和度  $\delta S = \frac{E_r}{E_\infty} - 1$ ,  $\frac{E_r}{E_\infty} = 1 +$

$\frac{C_r}{r} - \frac{C_n}{r^3 - r_o^3}$  又可写为:

$$\delta S = \frac{C_r}{r} - \frac{C_n}{r^3 - r_o^3} \quad (9)$$

因此  $\alpha$  在数值上等于过饱和度  $\delta S$ , 根据公式<sup>[14]</sup>  $\frac{E_r}{E_\infty} = 1 + \frac{C_r}{r} - \frac{C_n}{r^3}$  可得纯盐核粒子的过饱和度:

$$\delta S = \frac{C_r}{r} - \frac{C_n}{r^3} \quad (10)$$

图 1 中点线为含  $10^{-14}$  g 硫酸铵盐的纯盐核的 Kohler 曲线, 实线为与前者干核半径相同  $\epsilon = 0.1$  的混合气溶胶粒子 Kohler 曲线, 虚线为与纯盐核含盐量相同  $\epsilon = 0.1$  的混合气溶胶粒子 Kohler 曲线。根据公式 (9) 和 (10) 可见, 曲率的影响是要求增加过饱和度, 而盐分则是降低过饱和度的要求。实线代表的混合气溶胶粒子虽然与含  $10^{-14}$  g 硫酸铵盐的纯盐核干核半径相同, 但由于前者  $\epsilon = 0.1$  硫酸铵盐含量仅为  $10^{-15}$  g, 盐分对过饱和度的作用相比纯盐核要小, 所以相同半径下过饱和度始终大于纯盐核; 虚线代表的混合气溶胶粒子与纯盐核含盐量相同, 根据公式 (9) 和 (10) 可见, 相同含盐量的混合气溶胶粒子的盐分 (拉乌尔作用) 项  $-\frac{C_n}{r^3 - r_o^3}$  小于纯盐核的盐分项  $-\frac{C_n}{r^3}$ , 即相同半径下混合气溶胶粒子表面的相对湿度要小于纯盐核表面的相对湿度, 前者的活化半径为  $0.615 \mu\text{m}$  略大于后者的活化半径  $0.595 \mu\text{m}$ , 随着半径  $r$  的增大尤其超过活化半径之后, 常数项  $-r_o^3$  对盐分项  $-\frac{C_n}{r^3 - r_o^3}$  的影响逐渐减小, 两者的过饱和度趋于一致 (图 1)。因此, 对于干核半径相同的气溶胶粒子, 由其形成的云滴表面相对湿度主要由可溶性盐含量决定, 可溶性盐含量越高相对湿度以及需要的过饱和度越小; 对于可溶性盐含量相同干核半径不同的气溶胶粒子, 随

着半径  $r$  的增大尤其在超过活化半径之后，粒子的过饱和度趋于一致。对于沙尘传输下游地区，大气中气溶胶粒子硫酸铵盐含量不变的情况下，由于沙尘气溶胶粒子浓度的增加从而混合气溶胶粒子硫酸铵盐的含量相对要减少，由混合气溶胶粒子形成霾滴以及云滴分别所需要的过饱和度和临界过饱和度相对纯盐核所需要的要高。

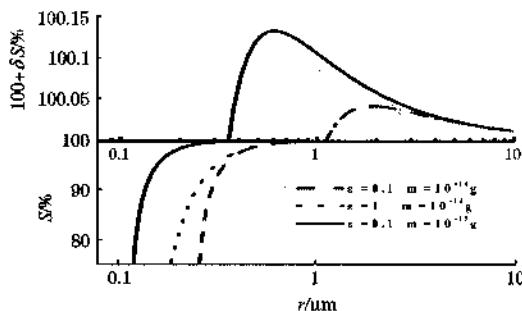


图 1 给定干核半径与给定硫酸铵盐含量的气溶胶粒子的 Kohler 曲线 ( $\epsilon$ : 干粒子可溶部分占整个核的体积比;  $m$ : 硫酸铵盐质量)

### 2.3 MM5 模拟试验方案

由于 MM5 模式的显式方案没有进行分档，而  $E_r = (1 + \alpha)E_\infty$  中的参数  $\alpha = \frac{C_r}{r} - \frac{C_n}{r^3 - r_o^3}$

$\frac{C_n}{r^3 - r_o^3}$ ，其与气溶胶粒子的半径  $r$  有关，考虑到模拟地区和辽宁两地皆是沙尘传输下游，利用 1997 年春末在辽宁观测的气溶胶航测资料计算出的算术平均半径确定  $\alpha$  的值<sup>[11]</sup>。公式 (9) 中的曲率项  $\frac{C_r}{r}$  可看作云滴曲率对云滴表面平衡水汽压的修正，云滴尺度越小，曲率越大，其表面的平衡水汽压越高；盐分项  $-\frac{C_n}{r^3 - r_o^3}$  为混合气溶胶粒子所含的可溶性盐和混合气溶胶中不可溶性核对云滴表面平衡水汽压的修正，盐分越高云滴表面的平衡水汽压越低，不可溶性核尺度

越大云滴表面的平衡水汽压越低。

表 1 给出了本研究模拟试验的 6 个方案，以及各个方案对应的  $\alpha$  的值。其中方案 A 为控制试验，采用原 Reisner 方案。方案 B 将云中观测的气溶胶粒子的算术平均半径代入公式  $\alpha = \frac{C_r}{r} - \frac{C_n}{r^3 - r_o^3}$  求得  $\alpha$  值，以云中观测的气溶胶粒子作为  $t = 0$  秒初始粒子，方案 C 和 D 为分别将 30 秒和 70 秒之后初始粒子上形成的云滴谱的算术平均半径公式  $\alpha = \frac{C_r}{r} - \frac{C_n}{r^3 - r_o^3}$  求得不同的  $\alpha$  值。方案 B、C 和 D 表示气溶胶粒子硫酸铵盐含量相同的情况下，不同时间之后云滴不断的凝结增长对应不同的云滴表面平衡水汽，由于观测时大部分气溶胶粒子已经活化，随着云滴半径不断增大，云滴曲率逐渐减小，从而云滴表面平衡水汽压不断减小，相应  $\alpha$  值不断减小。方案 E 和 F 则是在方案 B 的基础上，考虑气溶胶数浓度分别增加 10 倍和 100 倍的情况，对于沙尘传输下游地区大气中气溶胶粒子硫酸铵盐含量不变的情况下，由于沙尘气溶胶粒子浓度的增加从而混合气溶胶粒子硫酸铵盐的含量相对要减少，云滴表面平衡水汽压增加，使得  $\alpha$  值也相应增大。

表 1 模拟试验方案

方案	时间/s	算术平均半径/ $\mu\text{m}$	$\alpha$
A	—	—	0
B	0	0.95	$5.53 \times 10^{-4}$
C	30	3.55	$1.48 \times 10^{-4}$
D	70	6.67	$7.9 \times 10^{-5}$
E	0	0.95	$1.2 \times 10^{-3}$
F	0	0.95	$1.27 \times 10^{-3}$

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 控制试验（方案 A）模拟的降水

4月9日08时到9日14时，模拟区域有不规则的弱降水区出现。9日14时到9

日 20 时的累积降水图中有中雨开始出现，并且有 3 个降水区域。到 10 日 02 时（图 2a），3 个降水区域明显扩大合并为一个降水区域并且东移了约 2 个经度，北面的强雨区中心东移到  $41^{\circ}\text{N}$ 、 $111^{\circ}\text{E}$  附近，中部的强雨区中心位置约在  $37^{\circ}\text{N}$ 、 $108^{\circ}\text{E}$ ，南面的强雨区中心处在  $36^{\circ}\text{N}$ 、 $106^{\circ}\text{E}$  附近，同时  $36^{\circ}\text{N}$ 、 $111^{\circ}\text{E}$  也有一个降水中心。到 10 日 08 时（图 2b），雨区整体继续东移，范围略有缩小，北面的强雨区中心分裂为两个，其中一个在  $41^{\circ}\text{N}$ 、 $112^{\circ}\text{E}$  附近，另一个在  $41^{\circ}\text{N}$ 、 $114^{\circ}\text{E}$  附近，中部的强雨区中心位置约在  $38^{\circ}\text{N}$ 、 $111^{\circ}\text{E}$ ，南面的强雨区中心处在

$34^{\circ}\text{N}$ 、 $108^{\circ}\text{E}$  左右。到 10 日 14 时，雨区整体继续东移 2 个经度左右，并且降水中心雨量减小明显。

图 3 是利用地面加密测站降水资料绘制的 2003 年 4 月 10 日 02 时（图 3a）和 08 时（图 3b）2 个时段 6 小时降水实况。对照实况雨区图，可以看出 MM5 对此次降水过程的降水落区模拟基本与实况相一致，同时雨区的东移和明显降水的开始时间也与实况相吻合，特别是 4 月 9 日 20 时到 4 月 10 日 08 时这段时间内降水的模拟，只是模拟的降水略微偏大。

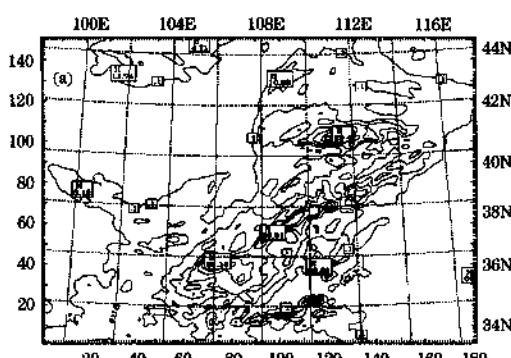


图 2 控制试验 4 月 9 日 20 时到 10 日 02 时 (a) 和 10 日 02—08 时 (b)  
的 6 小时累积降水 (单位: mm)

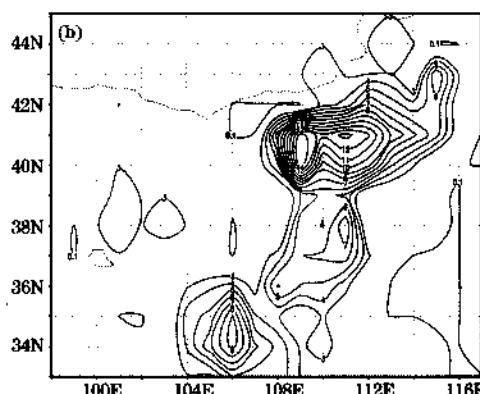
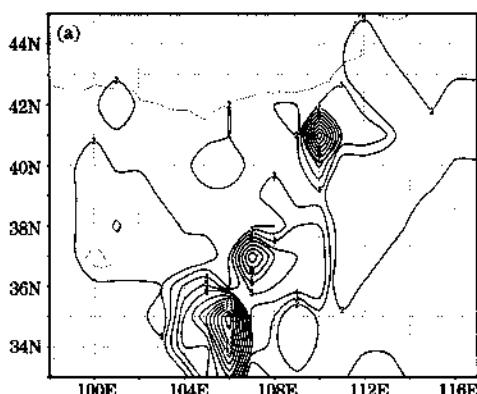
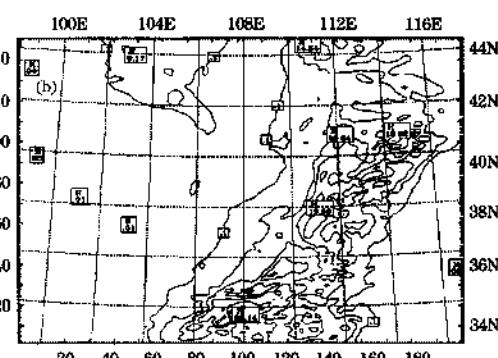


图 3 模拟区域 4 月 9 日 20 时到 10 日 02 时 (a) 和 10 日 02—08 时 (b)  
的 6 小时累积降水实况 (单位: mm)

根据控制试验模拟的水汽混合比和 850hPa 温度场并结合地面图，对应降水发生的区域可以看出：对应冷锋，控制试验模拟的降水区的中部和南部降水基本上属于锋面和锋后降水；北部的降水区从 4 月 9 日 14 时到 4 月 10 日 02 时大部分处于锋前，到 10 日白天，北部降水区的偏西部已处于锋后。由地面观测可知，4 月 9 日下午，锋面附近降水为雨，暖锋后以及冷锋后为固态降水；4 月 9 日晚间到 10 日凌晨，冷锋后大部分地区为固态降水，而北部和中部降水也以固态降水居多；到了 10 日白天，冷锋后转为降雨，北部和中部降水仍以固态降水居多。

### 3.2 不同云滴平衡水汽压的敏感试验

#### 3.2.1 敏感试验方案与控制试验方案降水量以及降水范围的对比

图 4 为各个方案 4 月 9 日 08 时到 10 日 08 时的 24 小时区域降水量对比。总体来看，控制试验方案 A 的 24 小时区域降水量以及降水范围最小，敏感试验中各个方案的 24 小时区域降水量以及降水范围与方案 A

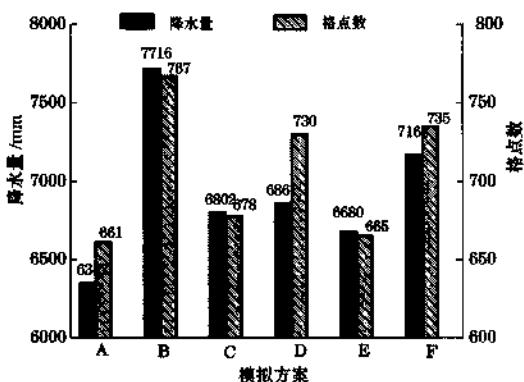


图 4 各个方案 4 月 9 日 08 时到 10 日 08 时的 24 小时区域降水量对比

浅灰斜杠柱体分别为各个方案 24 小时降水量大于 0.01mm 的格点数，表示降水范围；深灰柱体分别指各个方案 24 小时区域降水量，即所有 24 小时降水量大于 0.01mm 格点上降水量的累加值。

相比都有不同程度的增加，其中方案 B 和方案 F 的降水量以及降水范围较大。

由于模拟降水场的降水中心较多，为了更方便而直观地比较各个方案模拟的降水强度和落区变化，给出了敏感试验各个方案与控制试验方案 A 的差值图（将其它方案 12 小时降水场减去同时次方案 A 的降水场）。图 5 为敏感试验各个方案与控制试验方案 A 4 月 9 日 20 时到 4 月 10 日 08 时的 12 小时降水差值图。从图中可见，随着  $\alpha$  值的增大，降水差值的范围基本上也不断增大，特别是考虑沙尘气溶胶浓度增加的方案 E 和 F。方案 B、C 和 D 的降水正差值的高中心主要处于中部地区，三者的正差值高中心在 37°N、109°E，并且正值区呈东北—西南方向的带状分布，方案 B 在 40°N 附近还有一个明显的东北—西南方向的带状正值区，方案 B 和 C 在南部有正值区和负值区的分布，而方案 D 南部则基本与方案 A 无明显差别。相比前三个方案，方案 E 和 F 的正值区分布更广，除了在 37°N、40°N 分布有东北—西南走向的带状正值区，方案 E 和 F 在 42°N 也有明显的相同走向的正值区分布，两者差值区在南部的分布与方案 B 基本相同，只是正值区的分布略广些。

根据控制试验 4 月 9 日 20 时到 10 日 08 时 6 小时累积降水分布（图 2）可以看出：中部的降水中心在 37°N、108°E，中部强降水带也呈东北—西南走向，因此敏感试验的方案使中部强降水中心加强并使其向东北方向偏移；北部降水中心约在 41°N、111°E，因此敏感试验的方案使北部强降水向东南方向移动，方案 E 和 F 北部的另一个正差值区则在降水中心的西北处。

#### 3.2.2 各个方案的水成物分析

为了更好分析敏感试验方案和控制试验方案降水差值产生的物理机制，以下分析各个方案相关时次的水成物。

### (1) 雪混合比

各个方案的雪混合比高中心处于700hPa高度附近, 利用700hPa上的雪混合比基本可以分析各个方案雪混合比的分布型。图6为各个敏感试验与控制试验4月10日02时700hPa雪混合比差值图(将其

它方案雪混合比减去同时次方案A的雪混合比)。根据图6可以看出, 在中部有明显的正差值中心, 正中心西部是明显的负值区, 并且分布位置基本和同时次同方案的降水差值分布一致。 $\alpha$ 值较小的方案C和D的图中正差值和负差值区分布比较散乱,  $\alpha$ 值

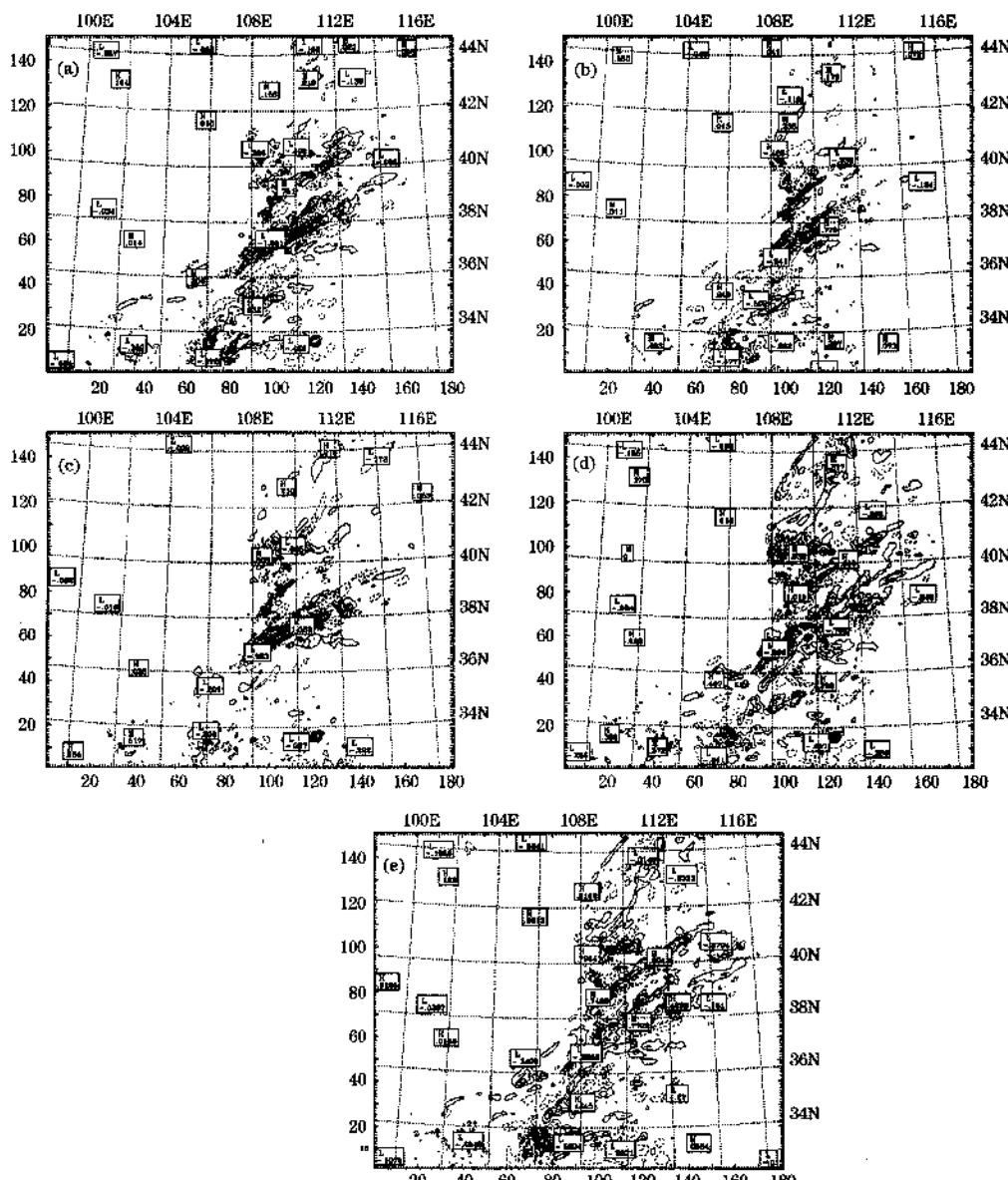


图5 方案B(a)、C(b)、D(c)、E(d)、F(e)与方案A4月9日20时到4月10日08时的12小时降水差值  
实线为正值区;虚线为负值区

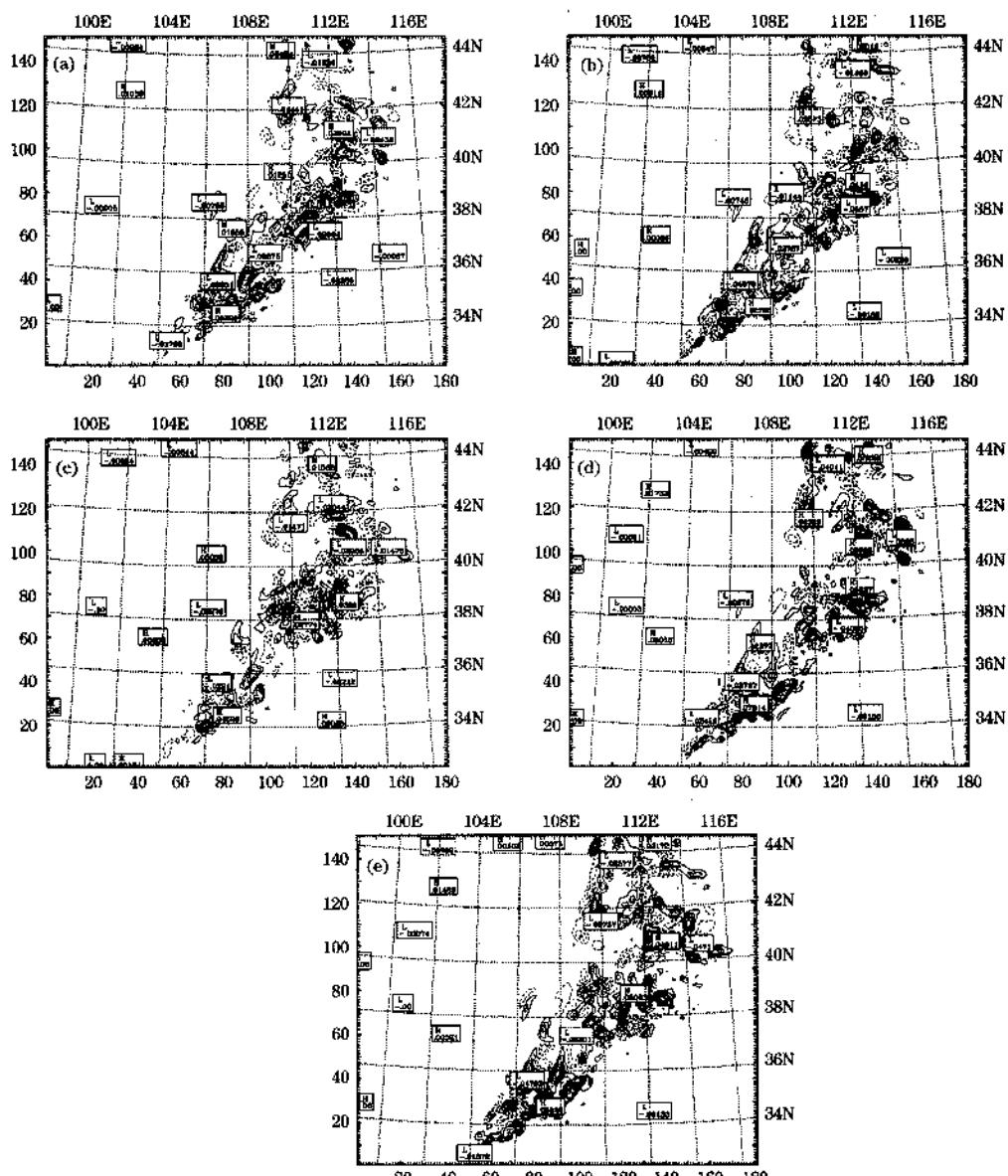


图6 方案B (a)、C (b)、D (c)、E (d)、F (e) 与方案A 4月10日02时700hPa雪混合比差值  
实线为正值区；虚线为负值区

较大方案B、E和F的图中正差值和负差值区分布比较有规律，在模拟区域的中部和北部，三个方案的正差值区与相应的降水正差值区分布基本一致，并且 $\alpha$ 值越大的方案的图中正差值分布区的范围越大。

从控制试验4月10日02时850hPa水

汽混合比分布图（图7a）可以看出在34~40°N、106~112°E之间有一个水汽密集带，对照方案B、E和F同时次的700hPa雪混合比差值图上可以发现700hPa水汽密集带的位置与雪混合比正差值区位置接近，南部大部分正差值区处于水汽密集带以西，中部

的水汽密集带处于中部雪混合比正差值区的中间, 而北部大部分雪混合比正差值区处于水汽密集带的东部和北部。从控制试验4月10日02时850hPa温度场分布图(图7b)可以看出在37°N、112°E和35°N、110°E附近分别有温度高值中心, 对比同时次700hPa雪混合比差值图可以发现中部和南部雪混合比正差值区分别分布在两个温度高值区以西温度较低的地区, 在温度场41°N、110°E和40°N、114°E分别有温度的高中心和低中心, 同时次雪混合比差值图北部的正

差值区则在这个温度高中心以东靠近温度低中心的地区。配合温度和湿度条件可以看出, 在云微物理过程中考虑云滴表面平衡水汽压的影响使得湿度较大温度较低的地区的雪混合比增大。对于南部地区, 雪混合比正差值区分布在温度较低的水汽密集带以西, 中部地区的雪混合比的正差值区则分布在相对湿度大的锋区, 北部一直保持较好的湿度条件, 雪混合比的正差值区处于水汽密集带以东温度较低的地区。

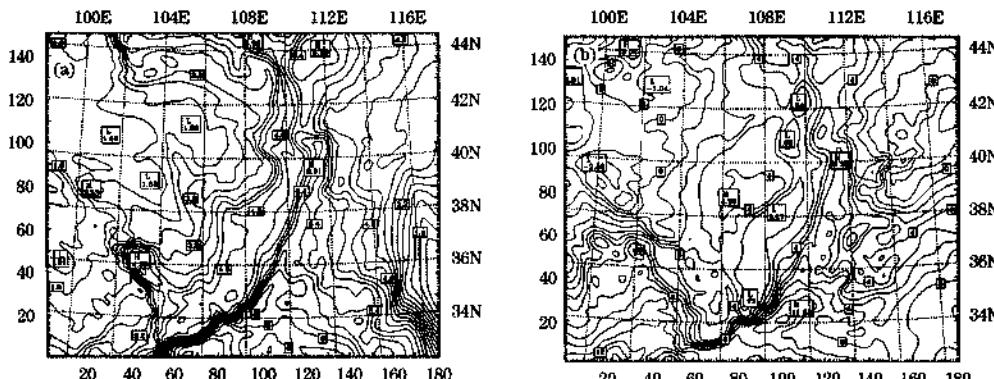


图7 控制试验4月10日02时850hPa水汽混合比分布图(a)和温度场(b)

## (2) 雨水混合比

类似雪混合比, 各个方案的雨水混合比高中心也处于700hPa高度附近, 利用700hPa上的雨水混合比, 基本可以分析各个方案雨水混合比的分布型。图8为各个敏感试验与控制试验4月10日02时700hPa雨水混合比差值图(将其它方案雨水混合比减去同时次方案A的雨水混合比)。

分析4月10日02时各个方案700hPa雨水混合比差值图, 可以看出各个图中负差值区的范围大于正差值区的范围,  $\alpha$ 值越大的方案的图中负差值区的范围也越大, 而 $\alpha$ 值较小的方案D与控制试验方案A差别不大。从图8可以看出, 4月10日02时模拟区域的北部基本为负差值区, 中部地区正差

值区基本分布在同时次700hPa水汽密集带的位置上, 南部地区正差值区的分布比中部和北部的要多, 水汽密集带以西较干的区域基本上是负差值区。

### 3.2.3 不同的云滴平衡水汽压对区域降水影响的物理机制分析

一般情况下, 云滴的凝结(或凝华)增长有一定的限度, 而要使这种凝结(或凝华)增长不断地进行, 还必须有水汽的扩散转移过程。在冰晶和过冷却水滴共存的混合云中, 在温度相同的条件下, 由于冰面饱和水汽压小于水面饱和水汽压, 当空气中的现有水汽压介于两者之间时, 过冷却水滴就会蒸发, 水汽就转移凝华到冰晶上去, 使冰晶不断增大, 而过冷却水滴则不断减小。敏感

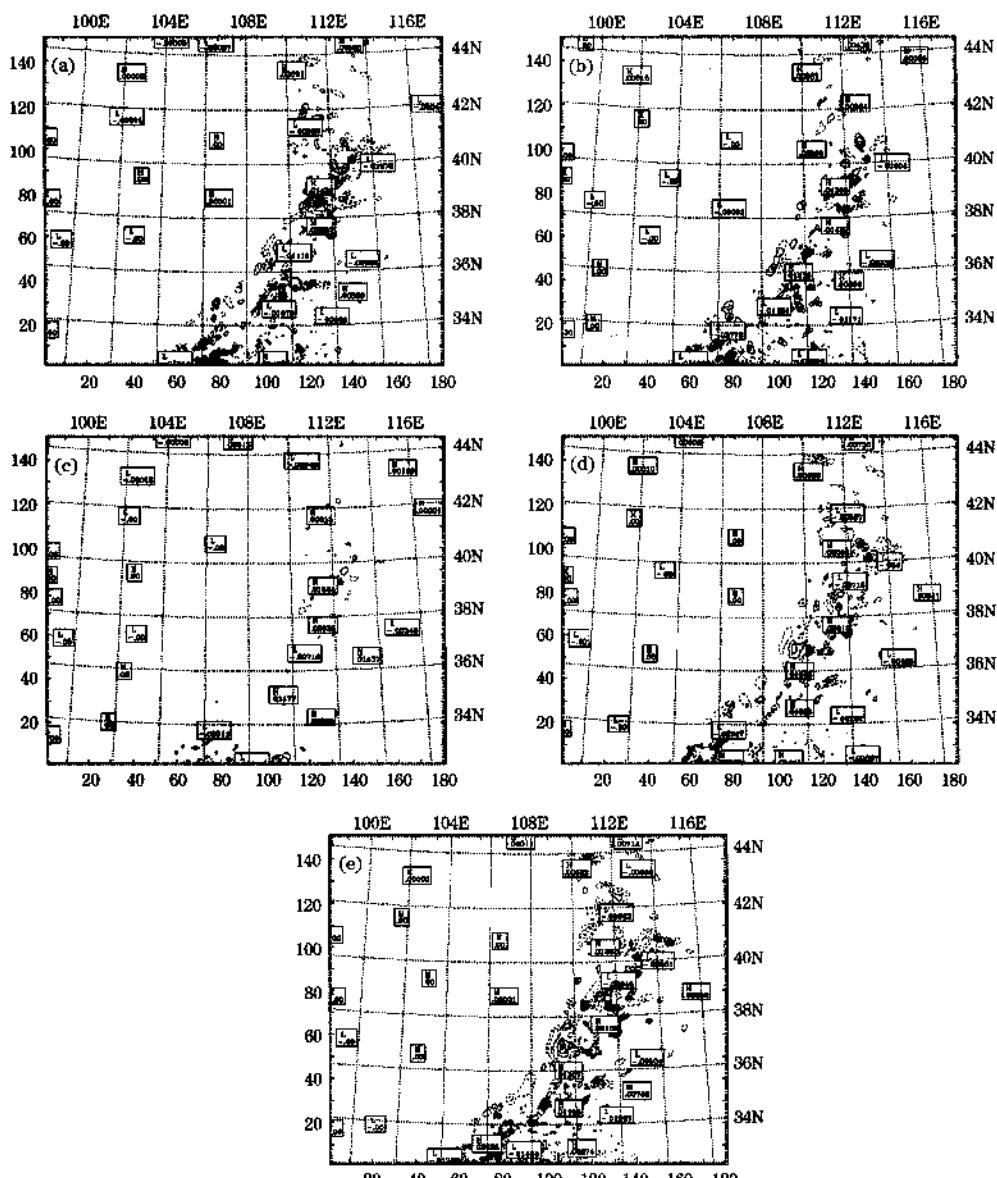


图3 方案 B (a)、C (b)、D (c)、E (d)、F (e) 与方案 A 4月 10 日 02 时 700hPa 雨水混合比差值  
实线为正值区；虚线为负值区

试验中各个方案与控制试验方案 A 的不同在于考虑了  $\alpha$  值，其物理意义是考虑云滴曲率和盐分的影响修正云滴表面的平衡水汽压，随着  $\alpha$  值的增加云滴表面的平衡水汽压也相应增加。因此在云滴表面的平衡水汽压越大的方案中，冰面与水面水汽压梯度越大，更有利于过冷水向冰晶的转化，从而产

生更多的以及尺度更大的冰晶质粒。

对于下落的冰晶，通过由过冷却水滴和冰晶组成的冷云中，不仅仅会发生上面谈到的“蒸凝过程”而增长，而且将因为冰晶和过冷却水滴的碰冻过程而增长。在碰冻过程中为冰晶碰撞的小水滴存在一定的尺度范围，过小的水滴不能为冰晶所碰撞。根据以

往研究讨论的给定硫酸铵盐质量的混和核与纯硫酸铵盐核凝结增长规律可知<sup>[11]</sup>，由于混合核里有不可溶的核，在  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  含量相同的情况下混合核比纯硫酸铵盐核的半径大，因此在相同的过饱和度下混合核凝结的水滴的尺度要大于纯硫酸铵盐核凝结的水滴，即在相同过饱和度下变性的沙尘气溶胶能增加云中较大水滴的数量。同时在碰冻过程中，冰晶的尺度必须大于某一临界值才能碰撞小水滴，考虑云滴表面的平衡水汽压的方案中冰面与水面水汽压梯度越大，越有利于过冷水向冰晶的转化，因水汽扩散而形成且增大的冰晶也会增多，这对碰冻过程是有利的，从而促进冰晶的增长。在云滴表面平衡水汽压较大的方案中会形成更多较大的冰晶或碰连体，这些质粒与其它冰晶和过冷却

水滴的碰撞机会相对多些，因此处于增长的优势地位冰晶或碰连体的数量增多，从而形成更多的雪晶质粒。

对于冷云降水，雪晶下降到  $0^{\circ}\text{C}$  层以下时开始融化成雨滴，不断碰并增大，离开云底降落到地面，即为雨，若整层大气的温度低于  $0^{\circ}\text{C}$ ，雪晶则保持固态形状降落到地面即为雪。图 9 为 4 月 10 日 02 时和 08 时 34~42°N、111°E 处温度剖面图。图 10 为 4 月 10 日 02 时和 08 时 700hPa 温度。由图可知北部和中部地区上空 700hPa 处温度低于  $0^{\circ}\text{C}$ ，这些地区 700hPa 高度上的雪晶保持固态形状，而南部上空 700hPa 处温度基本为  $0^{\circ}\text{C}$  及  $0^{\circ}\text{C}$  以上，其上空 700hPa 高度上部分雪晶始融化成雨滴。

从地面天气图可以看出：4 月 9 日 20

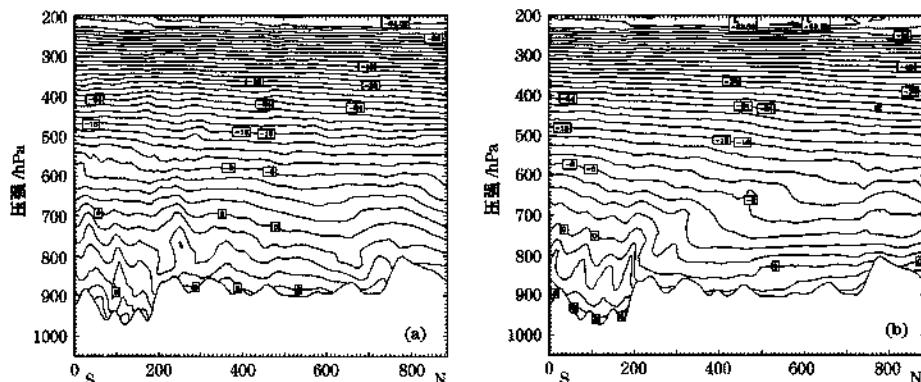


图 9 4 月 10 日 02 时 (a) 和 08 时 (b) 34~42°N、111°E 处温度剖面图

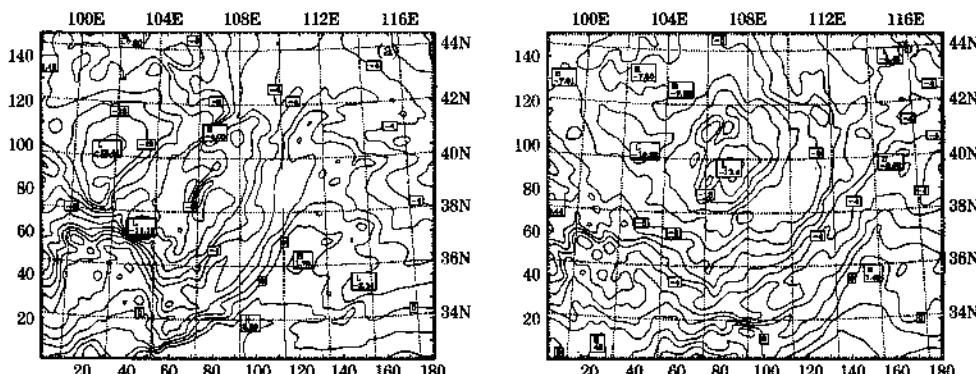


图 10 4 月 10 日 02 时 (a) 和 08 时 (b) 700hPa 温度场

时到10日02时锋区位置在107~111°E之间，4月10日02时到08时锋区位置在111~113°E之间；4月10日02时和08时模拟区域的中部和北部基本为固态降水，南部为雨夹雪。不同的云滴平衡水汽压对降水范围的影响需要同时考虑湿度和温度的影响。对于雪混合比，不同的云滴平衡水汽压使雪混合比的正差值区趋向于湿度较大以及温度适宜的地区，敏感试验的各个方案由于考虑云滴平衡水汽压使得过冷水向冰晶的转化加强，并且有利于碰撞过程，因而雪混合比差值图中正差值范围比控制试验方案中的大，并且较大的 $\alpha$ 值得正差值区分布在锋区和锋前这些相对湿度大以及温度足够低的区域。而对于同一次天气过程水汽条件是一定的，固态水成物的增加使得雨水混合比减小，各个方案的雨水混合比差值图中，在温度低的北部以及中部和南部的湿度较小的锋后等区域基本为雨水混合比负差值区，但由于南部700hPa温度为0°C及0°C以上，部分雪晶始融化成雨滴，雨水混合比增大，在南部有正差值区。综合分析敏感试验中各个方案与控制试验的雪混合比差值图和雨水混合比差值图可以看出：两者综合后的结果与敏感试验中各个方案与控制试验的降水差值图分布基本一致。

#### 4 结 论

(1) 与控制试验相比，敏感试验中的各个方案24小时区域降水量以及降水范围都有不同程度的增加。

(2) 考虑云滴表面平衡水汽压的敏感试验方案在湿度条件好并且温度适宜的地区局地降水有所加强。

(3) 不同的云滴平衡水汽压不同程度地影响冷云降水中冰晶蒸凝过程和冰晶与过冷液滴的碰撞过程从而影响区域降水。

#### 参 考 文 献

- [1] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策 [J]. 地理学报, 2000, 55 (5): 513-521.
- [2] 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 等. 沙尘暴研究的进展 [J]. 中国沙漠, 2000, 20 (4): 349-356.
- [3] 刘毅, 王明星, 张仁健. 中国气溶胶研究进展 [J]. 气候与环境研究, 1999, 4 (4): 406-414.
- [4] 刘毅, 周明煜. 北京沙尘质量浓度与气象条件关系研究及其应用 [J]. 气候与环境研究, 1998, 3 (2): 142-146.
- [5] 庄国顺, 郭敬华, 袁慧, 等. 2000年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响 [J]. 科学通报, 2001, 46 (3): 191-197.
- [6] Levin Zev, Eliezer Ganor, Victor Gladstein. The Effects of Desert Particles Coated with Sulfate on Rain Formation in the Eastern Mediterranean [J]. Journal of Applied Meteorology, 1996, 35 (9): 1511-1523.
- [7] Twomey S. Atmospheric Aerosols [M]. Elsevier Scientific Publishing Company, 1973.
- [8] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosol [J]. Science, 1992, 255: 423-430.
- [9] Langner J, Rodhe H, Crutzen P J, et al. Anthropogenic influence on the distribution of tropospheric sulfate aerosol [J]. Nature, 1992, 359: 712-716.
- [10] 肖辉, Gregory R. Carmichael, Yang Zhang. 东亚地区沙尘气溶胶影响硫酸盐形成的模式评估 [J]. 大气科学, 1998, 22 (3): 343-353.
- [11] 黄蔚薇, 杨军, 凌士兵, 等. 沙尘气溶胶表面变性对云滴形成过程的影响 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30 (2): 210-215.
- [12] Reisner J, Rasmussen R M, Bruintjes R T. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model [J]. Q. J. R. Meteorol. Soc., 1998, 124: 1071-1107.
- [13] Pruppacher H. R., J. D. Klett. Microphysics of clouds and precipitation [M]. Mass: D. Reidel Publishing Company, 1978, 141-142.
- [14] 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 1989, 229-233.