

海盐气溶胶和硫酸盐气溶胶在云微物理过程中的作用*

赵春生¹⁾ 彭大勇¹⁾ 段 英²⁾

¹⁾ (北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871)

²⁾ (河北省人工影响天气办公室, 石家庄 050021)

摘 要

利用大气气溶胶和云分档模式研究海盐气溶胶和硫酸盐气溶胶在云微物理过程中的作用, 计算结果表明: 云中液态水含量随高度的分布并不随海盐、硫酸盐的数目以及云团上升速度的变化而变化; 随着云滴数目的增加, 云滴的有效半径会减小; 硫酸盐对云滴数目影响起主导作用, 海盐在水汽相对充足情况下增加了云滴数目, 在水汽相对不足的情况下减少了云滴数目; 硫酸盐粒子浓度特别强的情况下(人类活动污染比较严重时), 如果水汽相对不足, 云滴数目会明显小于硫酸盐粒子浓度; 而海盐粒子的存在, 加剧了水汽的供应不足, 从而可以在很大程度上进一步降低云滴数目。也就是说, 在有些情况下, 如果不考虑海盐气溶胶的作用, 硫酸盐气溶胶对云特性的影响会被过高估计。

关键词: 海盐 硫酸盐 大气气溶胶 云微物理

引 言

云在全球能量与水循环中具有非常重要的作用。云的反照率与云滴数浓度的关系十分密切, 而云滴数浓度又决定于云凝结核(CCN)浓度和云内水汽状况^[1]。

硫酸盐粒子是海洋上空 CCN 的主要来源之一。海洋中二甲基硫(DMS)的排放可以增加硫酸盐气溶胶的数浓度, 进而改变云滴数浓度, 从而增大海洋上云的反射率, 而海洋上层云覆盖了海洋表面的 25%, 它对于全球的辐射平衡有很大的影响, 这就是所谓的 DMS-云-气候假设^[2-4]。最近的观测和研究发现, 随着人类活动的影响, 硫酸盐气溶胶有增加的趋势^[5-6], 全球已经形成北美、欧洲和东亚 3 个硫酸盐的高值中心^[7]。Twomey 曾做过云中液态水含量不随 CCN 数目而变化的假定^[5]。人们普遍认为, 硫酸盐气溶胶的增加, 将导致云滴数目的增加和云滴半径的减小^[1, 5]。

硫酸盐气溶胶对于云和气候的影响被人们广泛认识和研究, 但是准确估计硫酸盐气溶胶对云特性的影响需要全面了解包括气溶胶和云的微物理过程。近期有研究表明海盐粒子在此过程中有不可忽略的作用^[8]。本文研究的目的是利用详细的气溶胶和云微物理分档模式, 来定量评估海盐气溶胶和硫酸盐气溶胶对海洋上云微物理特征的影响。

国内在云的分档模式方面也做了一些研究。肖辉等^[9-10]利用云分档模式研究了盐

* 国家自然科学基金项目 40005001 和 40475003 共同资助。

2003-11-10 收到, 2004-04-20 收到再改稿。

核谱和浓度 碰并过程 大气层结等对云滴谱形成的作用。许焕斌等^[11]的研究指出一些重要的云-降水物理过程应当用分档方法来处理,这在学科发展上和实际应用中都是有必要的。赵春生等^[12-13]建立的气溶胶分档模式最初是研究海洋边界层中大气气溶胶的发生发展,并应用到研究海洋 DMS 对于 CCN 的影响。本文利用该模式研究海洋上硫酸盐气溶胶和海盐气溶胶粒子对海洋云微物理特性的影响。

1 模式介绍

本模式中的分档气溶胶模式最初由赵春生等^[12-13]建立并用来研究遥远海洋大气边界层中气溶胶产生和发展的演变过程,后来改进的微物理模式可用来研究 CCN 的生长过程和云物理过程。模式考虑的微物理过程有凝结、蒸发过程,粒子的核化过程和粒子间的相互凝并过程。模式中粒子共分 4 种类型,分别为硫酸盐粒子、海盐粒子、混合粒子(包括硫酸盐和海盐)及云滴,各分为 100 档。其中前 3 种气溶胶粒子半径范围为 $0.01 \sim 4 \mu\text{m}$,云滴粒子半径范围为 $0.02 \sim 1330 \mu\text{m}$ 。模式中各微物理过程的处理如下:

1.1 CCN核化过程

每个时步模式都由当时的水汽浓度和温度显式计算过饱和比,为了保证计算的稳定性,我们采用可变步长的方法。当过饱和比超过临界饱和比时,凝结核(CN)就被核化成相应大小的含水粒子,进行凝结生长过程。平衡过饱和比随半径变化的关系由 Kohler 方程计算得到^[11]:

$$\frac{e_r}{e_{\text{sat},w}} = \exp\left[\frac{2 M_w \sigma_w}{RT \rho_w r} - \frac{\nu \Phi_s m_s M_w / M_s}{(4\pi r^3 \rho''/3) - m_s}\right] \quad (1)$$

式(1)中, e_r 是液滴表面的饱和蒸汽压, $e_{\text{sat},w}$ 是水面的饱和蒸汽压, M 是水分子量, M_s 是盐分的分子量, σ_w 是液滴的表面张力, ρ_w 是水密度, r 是云滴半径, ν 是溶解于水中盐的离子数, Φ_s 是渗透系数, m_s 是盐粒子质量, ρ 是液态盐溶液的密度。

平衡过饱和比最大值,即临界过饱和比为:

$$\left[\frac{e_r}{e_{\text{sat},w}} - 1\right]_c = \left(\frac{4A^3}{27B}\right)^{1/2} \quad (2)$$

其中, $A = \frac{2 M_w \sigma_w}{RT \rho_w}$, $B = \frac{3 \nu \Phi_s m_s M_w}{4 \pi M_s \rho_w}$ 。

1.2 凝结(蒸发)过程

粒子的凝结生长过程的处理方法采用赵春生等的计算方法^[12-13]。云滴的生长速率决定于准稳态的质量和热量的扩散输送过程。经 CCN 活化的粒子通过凝结过程的生长速率采用 Pruppacher 和 Klett 的计算方法^[11]:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{4\pi r f_{\nu} [SS + 1 - \exp\left(\frac{2 \sigma_w M_w}{RT \rho_w r} - \frac{\nu \Phi_s m_s M_w}{M_w M_s}\right)]}{\frac{\rho_w RT}{e_{\text{sat},w} D_v M_w} + \frac{L \rho_w}{k_a T} \left(\frac{L M_w}{TR} - 1\right)} \quad (3)$$

式(3)中, SS 是每个时步由温度和水汽含量计算的过饱和比, k_a 是热扩散系数, L 是水的凝结潜热, D_v 水汽扩散系数。

1.3 碰并过程

本模式考虑多组分粒子,碰并过程主要考虑两种:布朗运动和重力碰并(由沉降速度不同引起)。布朗运动对小粒子作用明显而重力收集过程是大于几个微米的粒子间碰并的主要机制。不同碰并机制的过程在粒子浓度方程的碰并项中表现为不同的碰并核。本模式中碰并系数的确定和对于碰并过程的计算方法采用赵春生等的计算方案^[13]。体积为 v 的粒子由于碰并带来的浓度在 Δt 时间内变化方程为:

$$v_k C_k^{t+\Delta t} = \frac{v_k C_k^t + \Delta t \sum_{j=1}^{k-1} \left(\sum_{i=1}^{k-1} f_{i,j,k} \beta_{k,j} v_i C_i^{t+\Delta t} C_j^t \right)}{1 + \Delta t \sum_{j=1}^{N_B} (1 - f_{k,j,k}) \beta_{k,j} C_j^t} \quad (4)$$

其中, C 是粒子的数浓度, β 是碰撞粒子的碰并核, f 是碰并参数。

1.4 干沉降过程

虽然重力沉降过程仅对于大粒子比较明显,但它对于一个完善的气溶胶云模式是非常重要的。本模式中不同大小粒子有着不同的下落速度,下落速度的计算公式采用 Pruppacher 等人的计算方法^[1]。

2 海盐和硫酸盐气溶胶对云滴数目的影响

2.1 模拟设计

O' Dowd 等的观测结果^[14]指出,硫酸盐的数浓度分布模态可以用平均半径 $0.08 \mu\text{m}$, 标准偏差 1.4 的对数正态分布来表示。后来 O' Dowd 等对海盐的观测^[15]表明,海盐可以用 3 个对数正态分布来表示,分别为 film 模态, jet 模态和 spume 模态,并且随着水平风速的变化,海盐粒子的浓度也会不同(如表 1 所示)。

表 1 海盐粒子浓度随水平风速的变化

风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	film 模态浓度/ cm^{-3}	jet 模态浓度/ cm^{-3}	spume 模态浓度/ cm^{-3}
2	3.0	0.63	2.1×10^{-6}
5	5.7	0.84	3.4×10^{-6}
10	17.1	1.36	7.6×10^{-6}
15	51.1	2.21	1.7×10^{-5}

根据以上观测结果,应用模式计算过程中,我们对硫酸盐浓度分别取 100, 300 和 1000 cm^{-3} 。由于海盐 3 个模态中第三个模态数量级相对前两个很小,因此海盐只考虑前两个模态。模式运行初始时刻,设置温度为 280 K,大气压强为 1000 hPa,相对湿度为 100%。

2.2 结果与分析

图 1 给出的是根据寇拉曲线计算的硫酸盐粒子活化比随最大过饱和比的变化曲线。由图 1 可以看出:当最大过饱和比较低($0\% \sim 0.3\%$)的时候,硫酸盐粒子随最大过饱和比的变化很显著。而当最大过饱和比较高的时候,由于硫酸盐粒子绝大部分都已经被

活化,所以基本不随最大过饱和比的变化而变化。

图2给出的是硫酸盐粒子浓度分别在100,500和1000 cm⁻³情况下,随着上升速度和海盐粒子浓度的不同,最大过饱和比的变化。由图2可以看出:增加硫酸盐和海盐浓度都会导致最大过饱和比的降低,这是由于增加的粒子吸湿增长所造成的;增大上升速度将导致最大过饱和比的升高。

图3是在不同的海盐和硫酸盐情况下,活化粒子总数随上升速度的变化。从图中可以看出:当硫酸盐粒子浓度相对较低而且上升气流强,绝大部分硫酸盐粒子被活化,

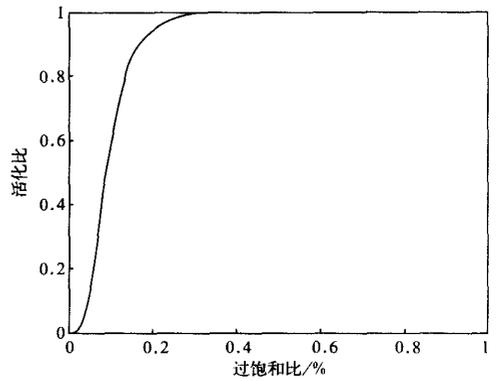


图1 由寇拉曲线计算出的不同过饱和比情况下硫酸盐粒子(平均半径0.08 μm,标准偏差1.4的对数正态分布)的活化比

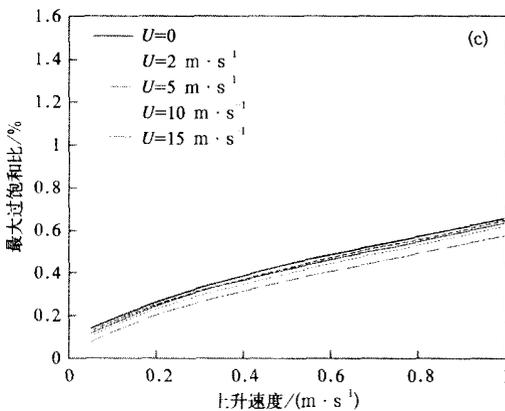
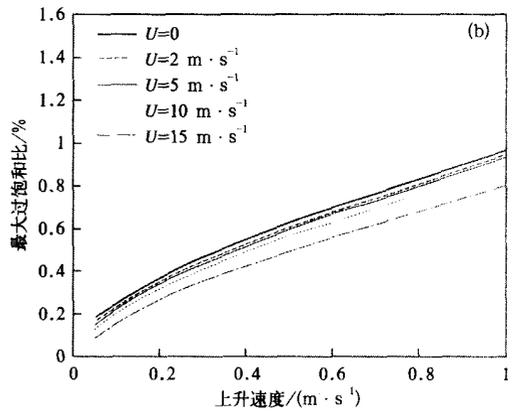
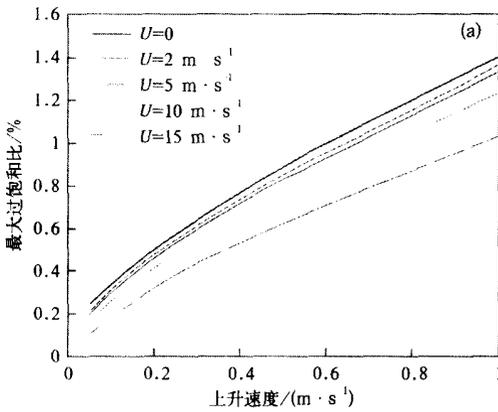


图2 硫酸盐粒子浓度分别为(a) 100 cm⁻³, (b) 300 cm⁻³, (c) 1000 cm⁻³情况下,最大过饱和比随上升速度和海盐粒子浓度(以水平风速表示,见表1)的变化

我们称为“水汽相对充足”的情况,此时增加海盐粒子的浓度将导致活化的粒子总数增加;而如果硫酸盐粒子浓度相对较高而且上升气流弱,相当数量的硫酸盐粒子不能被活化,我

们称为“水汽相对不足”的情况,此时增加海盐粒子的浓度将导致活化的粒子总数减少。从物理意义上来讲,当硫酸盐粒子浓度低而上升气流强时,海盐粒子的活化数目显著增大,从而导致总的粒子活化数目的增加;而当硫酸盐粒子浓度高而上升气流弱时,海盐粒子相对很少,但是由于海盐粒子相对比硫酸盐粒子大,会先活化吸收相对不足的水汽从而导致最高过饱和比较低,也就使得硫酸盐的活化数目大大降低,从而使总的粒子活化数目降低。

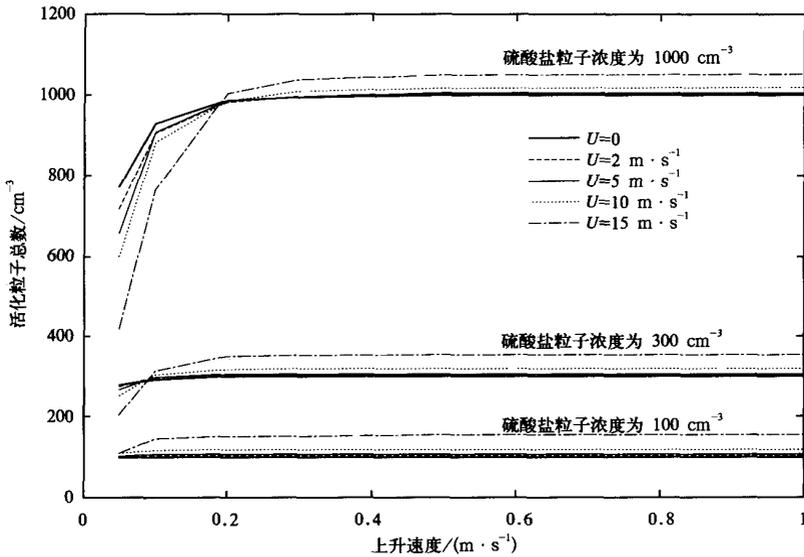


图3 活化粒子总数与垂直风速和硫酸盐粒子浓度的关系

3 海盐和硫酸盐气溶胶对云微物理特性的影响

3.1 模拟设计

将 O' Dowd 等的观测结果^[14-15]作为初始条件来研究海盐和硫酸盐在云形成过程中的作用。在模式计算过程中,硫酸盐浓度取 100, 300, 1000, 5000 cm^{-3} 分别代表清洁大气、典型大气、污染大气和严重污染大气的情况。海洋上空最经常出现的层云和层积云,根据观测^[16]高度约为 1.2 km。因此,模式运行初始时刻,设置各物理参数(云底)为:温度为 280 K,大气压强为 880 hPa,相对湿度为 100%。据观测数据^[16],云厚度约为 0.5 km 左右,我们根据这个高度,再由云团上升速度的不同来决定模式模拟的时间。

3.2 模拟结果及分析

(1) 首先,我们取云团上升速度为 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 运行模式,当云团上升到云顶即 500 m 时所得云内微物理特征和海盐、硫酸盐浓度的关系如表 2 所示。其中最大过饱和比为云团上升过程中所达到的最大过饱和比,有效半径是云滴谱的三阶矩与二阶矩的比值,平均半径和标准偏差是将云滴在云顶时的尺度分布做一个对数正态分布的拟合所得到的正态

表 2 云团上升速度 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,云顶各微物理特性随模拟初始条件的变化

模拟初始条件		最大过饱和比/ %	液态水/ $(10^{-6} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3})$	有效半径/ μm	云滴数目/ cm^{-3}	平均半径/ μm	标准偏差
硫酸盐浓度/ cm^{-3}	水平风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$						
100	0	0.8746	2.0272	16.8934	97.11	16.81	1.107
	2	0.8713	2.0318	16.7061	100.6	16.62	1.107
	5	0.8610	2.0325	16.5516	103.5	16.47	1.108
	10	0.8226	2.0352	15.9705	115.3	15.88	1.115
	15	0.7363	2.0448	14.6593	149.3	14.55	1.112
300	0	0.6428	2.0510	11.7039	295.5	11.62	1.107
	2	0.6408	2.0537	11.6599	298.5	11.57	1.110
	5	0.6368	2.0536	11.6189	301.3	11.52	1.111
	10	0.6245	2.0533	11.4606	312.7	11.36	1.123
	15	0.5837	2.0515	11.0495	346.7	10.96	1.118
1000	0	0.4640	2.0361	7.7859	994.7	7.729	1.154
	2	0.4568	2.0384	7.7702	997.2	7.722	1.123
	5	0.4550	2.0383	7.7584	999.8	7.708	1.130
	10	0.4442	2.0382	7.7175	1011	7.661	1.142
	15	0.4326	2.0383	7.6147	1043	7.545	1.175
5000	0	0.2499	2.0350	4.0695	4799	3.170	2.474
	2	0.2416	2.0362	4.0790	4803	3.225	2.393
	5	0.2415	2.0363	4.0825	4805	3.242	2.375
	10	0.2333	2.0362	4.0275	4814	3.145	2.429
	15	0.2303	2.0363	3.9898	4843	3.076	2.490

分布的平均半径和标准偏差。

由表 2 可知: ① 云中液态水含量随初始海盐、硫酸盐粒子数目的变化非常小, 最大值与最小值相差不到 2%, 基本上可以视为与初始干粒子的浓度无关。这说明云中液态水含量主要取决于水汽条件。如果能确定云中的云滴数目和大气气象条件, 即可以粗略地估计云滴的半径。这一特点对于研究云顶的辐射特性以及卫星应用有着重要的意义。② 在 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的上升速度情况下, 水汽相对充足, 因此云滴的数目主要取决于硫酸盐粒子和海盐粒子的数目之和。由于硫酸盐粒子数目明显多于海盐粒子数目, 云滴数目跟硫酸盐数目关系最为明显, 云滴数目跟初始硫酸盐粒子数目为同一量级, 而且相差很小。海盐粒子的作用为简单地增加了云滴数目。③ 硫酸盐粒子的增加, 即大气污染程度的增加, 明显地增加了云滴数目, 由于液态水含量不变, 因此明显减小了云滴的半径, 而海盐粒子对云滴半径的影响不大。

(2) 取云团上升速度为 $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 运行模式, 当云团上升到云顶即 500 m 时所得云内微物理特征和海盐、硫酸盐浓度的关系如表 3 所示。

表 3 云团上升速度 $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 云顶各微物理特性随模拟初始条件的变化

模拟初始条件		最大过饱和比 / %	液态水 / ($10^{-6} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	有效半径 / μm	云滴数目 / cm^{-3}	平均半径 / μm	标准偏差
硫酸盐浓度 / cm^{-3}	水平风速 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)						
100	0	0.4823	2.0289	16.9129	93.07	16.83	1.116
	2	0.4776	2.0222	16.7294	93.22	16.50	1.121
	5	0.4678	2.0194	15.8862	100.7	15.75	1.120
	10	0.4417	2.0155	15.1172	113.5	15.07	1.123
	15	0.3877	2.0164	14.7513	147.3	14.63	1.129
300	0	0.3580	2.0504	11.7998	286.5	11.70	1.116
	2	0.3573	2.0451	11.7216	293.0	11.57	1.212
	5	0.3516	2.0364	11.6304	295.5	11.49	1.120
	10	0.3390	2.0416	11.5311	303.5	11.37	1.154
	15	0.3140	2.0399	11.2729	333.6	11.08	1.237
1000	0	0.2533	2.0354	7.5333	969.1	6.623	2.080
	2	0.2521	2.0363	7.5147	957.2	6.637	2.047
	5	0.2502	2.0364	7.4791	953.9	6.547	2.098
	10	0.2423	2.0364	7.4403	939.8	6.500	2.093
	15	0.2257	2.0365	7.1800	937.6	5.915	2.402
5000	0	0.1215	2.0339	3.5250	3630	2.122	3.016
	2	0.1204	2.0346	3.5398	3626	2.159	2.980
	5	0.1199	2.0347	3.6130	3526	2.233	2.984
	10	0.1166	2.0347	3.7126	3341	2.370	2.835
	15	0.1103	2.0348	3.7726	3251	2.393	2.935

由表 3 可知: ① 对于这种条件下, 硫酸盐对云滴的影响与表 2 相同, 即增加硫酸盐粒子的结果是增加了云滴的数目, 减小了云滴的半径。但是海盐粒子的影响比较复杂。对于清洁和典型大气, 海盐的影响与表 2 相同, 海盐粒子的增加直接增加了云滴的数目。但是对于后两种情况, 由于水汽相对不足, 海盐粒子增加导致的过饱和比的减少使得硫酸盐粒子活化为云滴的数目减少, 从而减少了云滴的数目。② 与表 2 相比, 在减小了云团上升速度后, 对于水汽相对充足的清洁大气和典型大气, 云滴的数目和半径变化都不大。而对于后两种情况, 云滴的数目和半径均有比较明显的减少。但是云内液态水含量仍然变化不大, 最大值和最小值差别不到 2%。

4 结 论

综合所作的数值模拟结果, 可以得出以下结论:

(1) 云中液态水含量基本上与海盐和硫酸盐粒子的初始数目, 以及云团上升速度无

关。由于液态水含量不变,随着云滴数目的增加,云滴的有效半径减小。

(2) 硫酸盐气溶胶粒子对云微物理特性影响很大,云滴数目与硫酸盐数目同量级。水汽相对充足情况下,数值上差别也不大;水汽相对不足情况下,由于水汽供应不足,云滴数目与硫酸盐数目有明显差异。海盐粒子的作用分两个方面:一方面海盐粒子半径较大,在云的形成初期可以活化为云滴;另一方面由于海盐的活化吸收水汽导致过饱和比的降低,又会减少由硫酸盐活化的水滴数目。

(3) 硫酸盐粒子浓度特别强的情况下(人类活动污染比较严重时),如果水汽相对不足,云滴数目会明显小于硫酸盐粒子浓度;海盐粒子的存在,加剧了水汽供应不足,从而可以在很大程度上进一步降低云滴数目。这一结果表明如果不考虑海盐气溶胶粒子,硫酸盐气溶胶粒子对于云微物理特性的影响可能被大大高估了。

参考文献

- 1 Pruppacher H R, Klett J D. *Microphysics of clouds and precipitation*. Kluwer academic Publishers, 1997.
- 2 Shaw G. Bio-controlled thermostasis involving the sulfur cycle. *Climate Change*, 1983, **5**:297 ~ 303.
- 3 Nguyen B C, Bonsang B, Gaudry A. The role of the ocean in the global atmospheric sulfur cycle. *J Geophys Res*, 1983, **88**: 10903 ~ 10914.
- 4 Charlson R J, Lovelock J E, Andreae M O, et al. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature*, 1987, **326**:655 ~ 661.
- 5 Twomey S. *Atmospheric Aerosols*. Elsevier Scientific Publishing Company, 1973.
- 6 Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosol. *Science*, 1992, **255**: 423 ~ 430.
- 7 Langner J, Rodhe H, Crutzen P J, et al. Anthropogenic influence on the distribution of tropospheric sulfate aerosol. *Nature*, 1992, **359**:712 ~ 716.
- 8 Ghan S J, Guzman G, Razzak H A. Competition between sea salt and sulfate particles as cloud condensation nuclei. *J Atmos Sci*, 1998, **55**: 3340 ~ 3347.
- 9 肖辉,徐华英,黄美元. 积云中云滴谱形成的数值模拟研究(一). *大气科学*, 1988, **12**(2):121 ~ 130.
- 10 肖辉,徐华英,黄美元. 积云中云滴谱形成的数值模拟研究(二). *大气科学*, 1988, **12**(3):312 ~ 319.
- 11 许焕斌,段英. 云粒子谱演化研究中的一些问题. *气象学报*, 1999, **57**(4):450 ~ 460.
- 12 赵春生. 遥远海洋边界层中大气气溶胶的产生和演变过程的数值模拟.[博士学位论文]. 北京:北京大学, 1996.
- 13 赵春生,张代洲,秦瑜. 海洋边界层中大气气溶胶产生和发展的数值模拟. *自然科学进展*, 1998, **8**(4):440 ~ 447.
- 14 O' Dowd C D, Jennings S G. Submicron particle, radon, and soot carbon characteristics over the northeast Atlantic. *J Geophys Res*, 1993, **98**: 1123 ~ 1135.
- 15 O' Dowd C D, Consterdine I E, Lowe J A. Marine aerosol, sea-salt, and the marine sulfur cycle: A short review. *Atmos Environ*, 1997, **31**: 73 ~ 80.
- 16 Hobbs P V. *Aerosol-Cloud-Climate Interactions*. Academic Press INC, 1993.

THE IMPACTS OF SEA-SALT AND NSS-SULFATE AEROSOLS ON CLOUD MICROPROPERTIES

Zhao Chunsheng¹⁾ Peng Dayong¹⁾ Duan Ying²⁾

1) (*Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871*)

2) (*Weather Modification Office of Hebei Province, Shijiazhuang 050021*)

Abstract

Impacts of nss-sulfate and sea-salt on marine clouds microphysical properties are investigated using a multi-component size-resolving aerosol model. Numerical results show that the vertical distribution of liquid water content remains almost constant as sea salts number and updrafts increase. The effective radius decreases as cloud drops number increases. The number of cloud drops is dominated by nss-sulfate. Sea-salt plays a critical role in cloud microphysical processes. Due to its large radius sea-salt particles are activated into cloud drops in the initial cloud development. Sea-salt activation decreases supersaturation by consuming water vapor and suppresses nss-sulfate activation. Sea salts can enhance cloud drops number concentration under the case of larger updrafts and decrease under the case of low updrafts. Nss-sulfate indirect forcing may be overestimated in some conditions (such as updraft is low) because of the presence of sea-salt particles.

Key words: Sea-salt Nss-sulfate Aerosol Cloud microphysics