

杨素英, 马建中, 胡志晋, 等. 2011. 华北地区气溶胶混合状态对暖云微物理特征的影响[J]. 大气科学学报, 34(5): 606-613.

Yang Su-ying, Ma Jian-zhong, Hu Zhi-jin, et al. 2011. Influence of aerosols mixing state on the microphysics of warm clouds in North China[J]. Trans Atmos Sci, 34(5): 606-613.

华北地区气溶胶混合状态对暖云微物理特征的影响

杨素英¹, 马建中², 胡志晋², 金莲姬¹, 许潇锋¹, 高蒙¹

(1. 南京信息工程大学 中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室, 江苏 南京 210044; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 在 UW_{yo} 单组分气溶胶的绝热气块分档云模式基础上, 发展了多种化学组分气溶胶的绝热气块分档云模式。利用 2006 年春季华北地区地面气溶胶分级采样的离子成分分析数据和同时段高空气溶胶、云微物理飞机观测资料, 研究了气溶胶混合状态对暖云微物理特征的影响。模拟结果表明, 华北地区气溶胶内部混合比外部混合有利于增加云凝结核数浓度、降低气块水汽最大饱和比、增加云滴数浓度。气溶胶的混合状态不同, 形成的云滴谱的特征差异较大, 主要体现在云滴谱的平均尺度和峰值的突出程度; 云滴谱相对离散度在 0.3 附近变化, 且随着云滴数浓度的增加, 云滴谱相对离散度呈现减小的趋势。气溶胶混合状态能够影响暖云微物理特征, 从而影响大气辐射和降水过程, 在天气和气候变化的研究中应予以关注。

关键词: 气溶胶; 混合状态; 云微物理; 云模式

中图分类号: P401 文献标识码: A 文章编号: 1674-7097(2011)05-0606-08

Influence of aerosols mixing state on the microphysics of warm clouds in North China

YANG Su-ying¹, MA Jian-zhong², HU Zhi-jin², JIN Lian-ji¹, XU Xiao-feng¹, GAO Meng¹

(1. Key Laboratory for Atmospheric Physics and Environment of China Meteorological Administration, NUIST, Nanjing 210044, China;
2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: An adiabatic bin-sized cloud parcel model is developed by incorporating the multi-chemical-component (MCC) aerosol effects into the UW_{yo} single-chemical-component (SCC) parcel model. The effects of aerosols mixing state on the warm cloud microphysics in North China are investigated by using the model based on the data of ion component analysis of ground aerosol grade sampling and the aerosol and cloud microphysics observation in high latitude in North China in spring 2006. It is found that in North China the aerosol internal mixing increases the CCN number concentration and the cloud droplet number concentration (CDNC) and decreases the maximum saturation ratio of water vapor in air parcel. It is also shown that the different aerosols mixing states in North China can affect the cloud droplet spectra (CDS) characteristics especially the CDS's average size and the peak value prominence degree; the relative dispersion value of CDS is near 0.3 and it decreases with increasing CDNC. It is indicated that aerosol mixing state can influence the microphysics of warm clouds, and thus affects atmospheric radiation and precipitation. This should attract more attentions in weather and climate change research in the future.

Key words: aerosols; mixing state; cloud microphysics; cloud model

收稿日期: 2010-05-10; 改回日期: 2010-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41105096; 41075029; 40975086); 科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX)201006036); 南京信息工程大学校科研基金(20090218)

作者简介: 杨素英(1975—), 女, 辽宁葫芦岛人, 博士, 讲师, 研究方向为气溶胶间接气候效应, yangsuying75@gmail.com.

0 引言

大气气溶胶通过充当云凝结核 (cloud condensation nuclei, CCN) 或者冰核改变云滴数浓度和谱分布, 进而改变云的反照率和云的寿命, 从而改变大气辐射平衡, 引起气候变化 (Lohmann and Feichter, 2005; IPCC 2007), 即气溶胶间接气候效应。但是由于不同背景大气中气溶胶的浓度和理化特性差异较大, 因此到目前为止气溶胶间接气候效应仍存在很大的不确定性 (IPCC, 2007)。气溶胶数浓度、化学成分的尺寸分布和混合状态、云内过饱和度, 是影响气溶胶活化并造成间接气候效应的主要因素 (Ghan et al., 1998; Yin et al., 2000; 赵春生等, 2005; Zhang et al., 2006; Anttila, 2010; Wex et al., 2010), 其中关于气溶胶化学成分及混合状态对云微物理特征的影响是研究的一项重要内容 (Ghan et al., 1998; McFiggans et al., 2006; Anttila, 2010; Wex et al., 2010)。大气中气溶胶化学成分复杂, 既有硫酸盐、硝酸盐、海盐等无机气溶胶, 还包含复杂多样的有机成分。城市和农村背景的大气气溶胶多以外混合状态存在 (Anttila, 2010)。由于不同化学成分的气溶胶粒子吸湿特性和集中出现的粒径范围不同, 这就影响了气溶胶粒子活化过程, 进而影响了云滴数浓度等微物理特征 (Yin et al., 1999; Mircea et al., 2002; Nenes et al., 2002; Snider et al., 2003; 赵春生和石阪隆, 2004; Ervens et al., 2005; Zhao et al., 2005)。

最初关于气溶胶—云相互作用的研究, 大都假设气溶胶由单一化学成分构成 (Snider et al., 2003; Zhang et al., 2006)。随着研究的不断深入, 逐渐认识到气溶胶的混合方式 (内部或者外部混合) 对云微物理过程也有很大影响 (Ghan et al., 1998; 赵春生等, 2005; Anttila, 2010; Wex et al., 2010)。但是近年来有关气溶胶内部混合效应的研究开展较多, 而有关外部混合效应的研究相对不足。Ghan et al. (1998) 和赵春生等 (2005) 对硫酸铵与海盐气溶胶粒子间的外部混合形式对云滴数目的影响进行了研究。研究表明外部混合的海盐和硫酸盐气溶胶在污染较重的条件下会降低云滴数目。Anttila (2010) 对比了不同背景气溶胶的外部混合和内部混合状态对云滴数浓度高低的影响, 认为城市和农村环境下的气溶胶多表现为高度的外部混合状态, 内、外部混合的气溶胶产生得云滴数浓度的差异较大。Wex et al. (2010) 研究表明, 用气溶胶内部混合形式计算

CCN 数浓度时, 会高估 CCN 的数浓度, 认为从吸湿特性角度来看气溶胶主要表现为外混合状态, 特别是刚刚形成的大陆背景气溶胶。

到目前为止, 有关气溶胶混合状态对 CCN 和云微物理特征的影响研究开展相对不足, 而有关中国华北区域背景下气溶胶混合方式对云微物理特征影响的相关研究, 还很少见报。为了更好地评估中国地区特别是华北地区气溶胶的间接气候效应, 深入探索大气污染对该地区降水形成机制的影响, 有必要利用该地区详细的气溶胶地面和高空观测资料, 研究气溶胶混合方式对暖云微物理特征的影响。

本文在原始单组分 (硫酸铵、氯化钠或含有不可溶核) 绝热气块分档云模式基础之上, 发展了包含多种化学组分气溶胶的内部混合、外部混合形式的绝热气块分档云模式, 并以 2006 年春季华北地区高空气溶胶谱、云微物理飞机观测资料为初始条件, 模拟研究了该地区气溶胶混合状态对云微物理特征的影响。由于华北地区可溶性有机碳气溶胶对云微物理特征有一定程度的影响 (Yang et al., 2011), 因此本文以有机碳气溶胶和硫酸铵两种化学成分为例, 研究气溶胶内部、外部混合状态对暖云微物理过程的影响特征。

1 模式介绍和模拟初始条件

1.1 多化学组分气块分档云模式

以 Wyoming 大学绝热气块分档云模式 (简称 UWyo 气块云模式) 为基础 (Snider et al., 2003), 根据文献 (Mircea et al., 2002; Nenes et al., 2002; Ervens et al., 2005) 的研究结果, 对传统 Köhler 方程加以改进发展, 主要考虑了硫酸盐、硝酸盐、海盐等多种无机气溶胶、可溶性有机物及不可溶核的作用。该模式以拓展的 Köhler 方程为基础, 认为气溶胶粒子随气块从云下附近水汽未饱和状态开始做上升运动 (气块上升速度保持不变), 在上升过程中每一档的气溶胶粒子在未活化前进行吸湿生长, 气溶胶粒子与环境湿空气处于一种平衡状态, 满足拓展 Köhler 方程

$$S_{eqj} = 1 + \frac{2\sigma_{s,j}M_w}{RT\rho_w r_i} - \frac{3M_w\phi_s}{4\pi\rho_w(r_i^3 - r_{Nj}^3)} \times \left(\sum_{\text{无机物}} \frac{v_l m_l}{M_l} + \sum_{\text{有机物}} \frac{v_l m_l}{M_l} \right). \quad (1)$$

式中: 右边第 2 项为 Kelvin 项, 反映曲率项的作用; 右边第 3 项为水活性项, 反映溶质的作用, 考虑了可溶性无机 (有机) 物质的作用; v_l 、 m_l 、 M_l (v_l 、 m_l 、

M_l) 分别表示第 l (l') 种无机(有机)气溶胶可离解的离子数目、溶质质量及分子量; $\sigma_{s,i}$ 为第 i 档液滴表面张力; ϕ_s 为溶液中盐的渗透系数, 数值为 1.0; $r_{N,i}$ 为干核半径。该方程的导出满足两个假设: 1) 液滴水活性不受不可溶核的影响; 2) 液滴体积近似为溶液体积和不可溶核体积之和 (Pruppacher and Klett, 1997)。

其中云滴表面张力与可溶解的有机碳浓度有如下关系 (Shulman et al, 1996):

$$\sigma_{s,i} = \sigma_w - 0.01877T \ln(1 + 628.14m_i) \quad (2)$$

式中: m_i 表示每千克水中溶解的碳的摩尔数。

当某一档气溶胶粒子活化后, 该档粒子进行凝结生长, 满足凝结生长方程

$$\frac{dr_i}{dt} = \frac{S - S_{eq,i}}{r_i \left(\frac{\rho_w RT}{p_v^* D_v M_w} + \frac{L \rho_w ((LM_w/RT) - 1)}{k_a T} \right)} \quad (3)$$

式中: S 表示环境水汽饱和比; p_v^* 为饱和水汽压; D_v 为空气中水汽扩散系数; L 为水汽潜热系数; k_a 为空气热传导系数。

模式假定气块在上升过程中与周围的环境没有热量和质量的交换, 气块中温度的变化决定于绝热膨胀和因水汽凝结带来的潜热释放两个物理因子, 满足以下关系

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{gV}{c_p} - \frac{L}{c_p} \frac{dw_v}{dt} \quad (4)$$

式中: V 表示气块的上升速度; g 为重力加速度; c_p 为定压比热; w_v 为水汽混合比。

其中气块中水汽混合比的变化等于液态水混合比的变化

$$\frac{dw_v}{dt} = -\frac{dw_c}{dt} \quad (5)$$

其中: w_v 和 w_c 分别代表水汽混合比和液态水混合比。

而液态水混合比由水汽在气溶胶粒子上的凝结速率 $\frac{dr_i}{dt}$ 、气溶胶粒子的个数 n_i 和液滴半径 r_i 决定, 具体关系如下:

$$\frac{dw_c}{dt} = \frac{4\pi\rho_w}{\rho_a} \sum_{i=1}^n n_i r_i^2 \frac{dr_i}{dt} \quad (6)$$

式中: n_i 表示在第 i 档具有半径 r_i 的粒子数浓度; ρ_w 为水密度; ρ_a 为空气密度。

模式中气溶胶尺度分布和化学组分满足如下条件: 尺度分布满足 5 个对数分布; 半径从 0.004 ~ 4

μm , 以前后半径之比为 1.09 进行分档。化学成分为硫酸盐、硝酸盐、海盐等多种无机气溶胶、可溶性有机物及不可溶核, 粒子形状为球形。

$$\frac{dn_i}{d \ln r_i} = \sum_{k=1}^5 \frac{N_k}{\sqrt{2\pi \ln \sigma_k}} \exp \left[-\frac{\left(\ln \frac{r_i}{R_k} \right)^2}{2(\ln \sigma_k)^2} \right] \quad (7)$$

其中: N_k 、 R_k 、 σ_k 分别为第 k 模态的特征数浓度、特征半径和特征方差。

发展后的气块分档云模式能够用于研究多化学组分气溶胶内部混合、外部混合形式对云微物理特征的影响研究。

1.2 初始气溶胶特征

1) 气溶胶混合状态

气溶胶的外部混合状态是相对内部混合状态而言的, 两者都是不同化学成分气溶胶粒子存在的主要形式。气溶胶内部混合方式是指某一尺度的气溶胶粒子按照一定的质量比将不同化学成分进行混合; 气溶胶外部混合方式是指某一尺度范围的气溶胶粒子按照一定的数浓度比值将不同化学成分的气溶胶粒子进行混合。外部混合形式体现了不同化学成分的气溶胶粒子由于化学性质的差异, 导致了彼此吸湿性存在差异, 在水汽含量一定时由于彼此争食有限水分, 影响了云滴的形成; 内部混合的气溶胶粒子不存在争食水份, 只是通过改变气溶胶的吸湿特性来影响云滴的形成, 因此气溶胶内部、外部混合形式在气溶胶活化过程中的作用不同。

2) 初始干气溶胶的谱分布

本文所用的华北地区低空干气溶胶谱(图 1 中虚线)来自国家自然科学基金重点项目“华北地区大气污染对气溶胶和云微物理特征的影响”在 2006 年春季在天津—唐山一带区域进行的飞机观测资料。将该背景下飞机观测得到的相对湿度小于 60% 条件下的低空气溶胶谱作为初始干气溶胶谱, 并对其进行了对数拟合, 得到 5 个对数正态分布。其具体分布参数和分布特征如表 1 和图 1(实线)所示。气溶胶粒子半径范围为 0.004 ~ 1.2 μm 。按前后档半径之比等于 1.0997 进行分档, 共分 61 档。

表 1 初始干气溶胶谱特征参数

Table 1 Parameters of initial dry aerosol spectra

对数正态分布	N_i / cm^{-3}	$R_i / \mu\text{m}$	$\ln \sigma_i$
1	90 000	0.0045	0.39
2	5 000	0.020	0.42
3	2 500	0.065	0.38
4	590	0.18	0.46
5	5	1.1	0.25

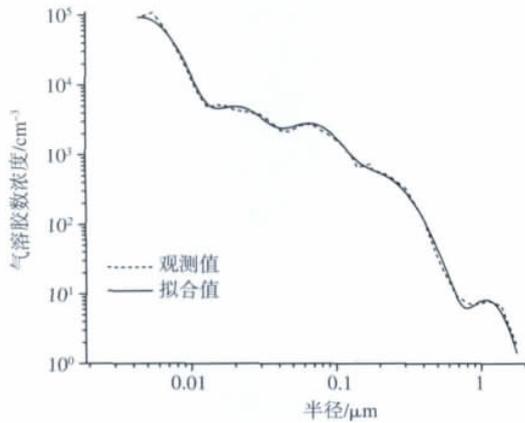


图 1 华北地区背景下低空干气溶胶谱

Fig. 1 Dry aerosol spectra in the low atmosphere in North China

3) 初始干气溶胶化学组分

研究表明华北地区气溶胶无机成分主要是硫酸盐,有机物(organic compound, OC)集中出现在直径小于 $1.1 \mu\text{m}$ 的范围也是主要的化学成分。在 OC 中主要考虑可溶性有机物(water soluble organic carbon, WSOC)的作用。因此以硫酸铵和 WSOC 为例,研究华北地区气溶胶混合状态对云微物理特征的影响。相关研究结果表明,可溶性有机物在 OC 中的质量百分含量范围在 20% ~ 60%,云滴中有机物主要成分包括多羟基脂肪酸化合物、一元羧酸、二元羧酸物质以及不饱和多元酸(Decesari et al., 2000);北京地区细粒子气溶胶 WSOC 以二元羧酸为主(黄晓锋等 2004)。由于采样数据中缺少可溶性有机物质量浓度和化学成分资料,本研究假定华北地区可溶性有机气溶胶化学成分为二元羧酸,分子量为 118,离解的离子总数为 3.0,密度为 1.57 g/cm^3 (Nenes et al. 2002)。其他化学成分的化学信息来自于文献(Metzger and Lelieveld 2007)。

1.3 描述云滴谱的特征物理量(北京大学地球物理系大气物理教研室云物理教学组,1984)

平均半径

$$\bar{r} = \frac{\sum n_i r_i}{N} \quad (8)$$

方差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum n_i (r_i - \bar{r})^2}{N}} \quad (9)$$

离散度表示的是云滴谱相对平均半径的偏离程度的平均状况,在统计学上表示为方差和平均半径之比:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{r}} \quad (10)$$

峰度表示云滴谱峰值突出的程度。正态分布的峰度为 3,当该值大于 3 时表明云滴谱很突出。

$$C_t = \frac{\sum n_i (r_i - \bar{r})^4}{N} / \sigma^4 \quad (11)$$

2 模拟结果与讨论

采用下面两组共 4 种方案进行模拟研究,第一组包括方案 1、方案 2,第二组包括方案 3 和方案 4,其中方案 1、方案 3 分别是硫酸铵气溶胶和 WSOC 气溶胶的外部混合方案 2 和方案 4 换算相对应的内部混合方案,通过两组方案的模拟结果的对比分析,研究华北地区气溶胶混合状态对云的影响。

方案 1: 10% WSOC + 90% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的内部混合;

方案 2: 10% 的 WSOC + 90% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 外部混合;

方案 3: 40% WSOC + 60% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 内部混合;

方案 4: 40% 的 WSOC + 60% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 外部混合;

方案 5: 100% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 。

模式运行初始时刻的各物理参数均来自于 2006 年春季飞机在天津—唐山一带进行航测得到的观测资料。模拟初始高度在云底(云底高度为 2 100 m)之下附近,为 2 090 m,温度 272.19 K,大气压强 756.41 hPa,相对湿度 99%,观测得到的云层厚度为 200 m。上升速度没有观测,层状云云底附近一般上升速度较小,模拟时分别假设为 0.3 m/s、0.5 m/s、0.7 m/s、1.0 m/s。气块通过 200 m 云厚的时间,即模式模拟的时间对应上述升速分别为 11 min、7 min、4.8 min 和 3.3 min。在云底附近这么短的时间内,气块内外湿热交换小,可近似采用绝热假定。

由于研究对象为低空薄云(云的厚度 200 m 左右),云滴尺度较小,因此该模式在研究过程中忽略云滴间的碰并作用,主要考虑液滴平衡生长和活化后凝结生长过程。

2.1 气溶胶混合状态对 CCN 过饱和度谱的影响

大气气溶胶能够参与云降水物理过程(Hobbs, 1993),研究气溶胶混合状态对暖云微物理特征影响,一般首先从研究其对 CCN 数浓度的影响开始。CCN 是指在大气实际可能出现的水汽过饱和度下

能够活化形成云滴的气溶胶粒子。过饱和度越大, CCN 数浓度越高(Twomey, 1959)。

图 2 为硫酸铵和 WSOC 外部混合方案(方案 2 和方案 4)及其对等的内部混合方案(方案 1 和方案 3)形成的 CCN 过饱和度谱。从图 2 可以看出, 在过饱和度一定时两者的内、外部混合均能增加 CCN 数浓度(与纯硫酸铵气溶胶粒子产生的 CCN 数浓度比较而言), 并且 WSOC 含量越高, CCN 数浓度越高, 其中方案 2 对应的 CCN 数浓度较纯硫酸铵增加了 3%~6%, 而方案 4 增加的变化范围是 6%~26%(表 2)。

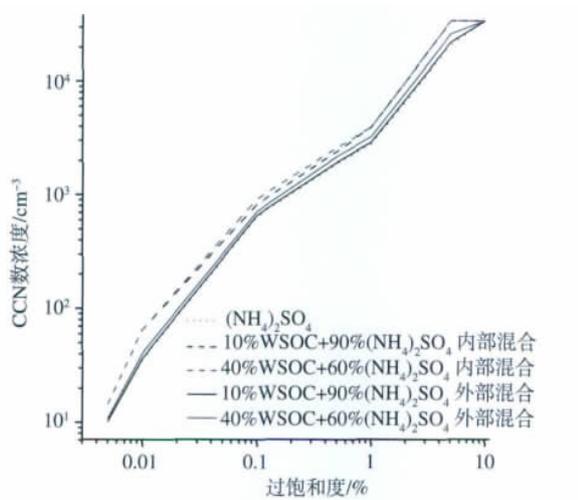


图 2 硫酸铵和 WSOC 混合气溶胶产生的 CCN 活化谱

Fig. 2 CCN spectra of aerosols mixed with ammonium sulfate and WSOC

表 2 不同过饱和度下硫酸铵和 WSOC 混合产生的 CCN 数浓度增加的百分比

Table 2 Percentage of CCN number concentration for aerosol mixed with ammonium sulfate and WSOC at different saturation ratios

过饱和度	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
0.005	42	0	42	6
0.01	85	4	85	15
0.1	29	3	44	12
0.5	28	3	38	15
1	41	4	41	17
5	65	6	65	26
10	0	0	0	0

在相同过饱和度下, 两者的外部混合产生的 CCN 数浓度比对等的内部混合产生的 CCN 数浓度低, 且两者的外部混合方案造成的 CCN 数浓度增加的幅度比后者小, 两者增加的幅度差值的变化范围分别为 25%~81%(方案 1、方案 2)和 23%~70%

(方案 3、方案 4)(表 2), 说明两者的内部混合状态更有利于增加 CCN 数浓度。Wex et al. (2010) 的研究结果也表明外部混合比内部混合产生的 CCN 数浓度低。

由上述的分析可知, 硫酸铵与 WSOC 的内部混合形式与其对等的外部混合形式形成的 CCN 过饱和度谱存在一定程度的差异, 结合 WSOC 和硫酸铵气溶胶粒子的临界过饱和度的尺度分布(图 3), 可以发现该差异形成的原因。图 3 中显示硫酸铵与 WSOC 的内部混合气溶胶能够显著降低其临界过饱和度, 并与纯 WSOC 的临界过饱和度相接近, 因此在相同的过饱和度条件下, 两者外部混合时, 具有最低临界饱和比的 WSOC 气溶胶先活化, 产生的 CCN 数浓度最多, 而具有最高临界饱和比的硫酸铵气溶胶粒子最后活化, 产生的 CCN 数浓度最少; 两成分内部混合的气溶胶粒子的临界饱和比居中, 形成的 CCN 数浓度居中, 因此 WSOC 和硫酸铵的外部混合通过明显减少活化的硫酸铵气溶胶粒子数浓度, 使 CCN 数浓度比其内部混合形式形成的 CCN 数浓度明显偏低。

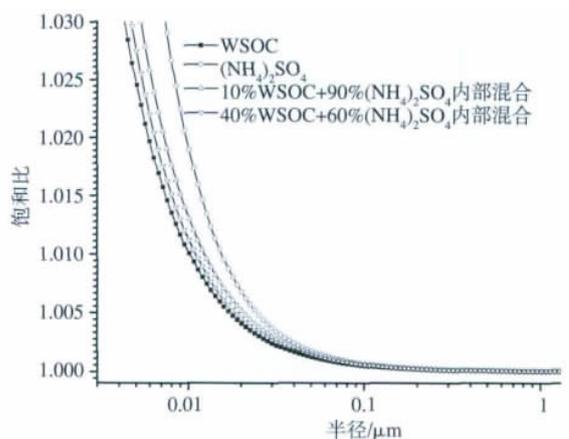


图 3 WSOC 和硫酸铵内部混合气溶胶的临界过饱和度的尺度分布

Fig. 3 Distribution of the critical saturation ratio of aerosols internally mixed with ammonium sulfate and WSOC

2.2 气溶胶混合状态对气块水汽最大过饱和比的影响

在绝热气块中, 水物质总量(即气块中水凝物含量和水汽量之和)为定值, 由于不同化学组分气溶胶粒子吸湿特性存在差异及彼此争食水份, 因此能够造成气块中水凝物含量和饱和比存在一定的差异。同时, 气块的上升速度能够决定气块的绝热冷却率和饱和水汽压减小的速率, 进而控制气块中水

汽饱和比和可凝结水量的变化速率。因此,本文给出了不同上升速度下内部混合、外部混合的气溶胶凝结成云过程的模拟结果。

图 4 为硫酸铵与 WSOC 不同混合方案得到的气块水汽最大饱和比随上升速度的分布。由图 4 可以看出,上升速度一定时 WSOC 和硫酸铵的外部混合形式的气溶胶粒子对应的气块水汽最大饱和比随着 WSOC 含量的增加而减小,在上升速度较小时(0.3 m/s)气块水汽最大饱和比与纯硫酸铵得到的相接近(两者对应的气块最大过饱和度均为 0.061%)随着上升速度的增加,最大过饱和度小于硫酸铵所对应得最大过饱和度,上升速度越大,前者降低气块最大过饱和度的程度越显著,如在上升速度为 1.0 m/s 时,前者对应的过饱和度比后者的数值小 0.01%。

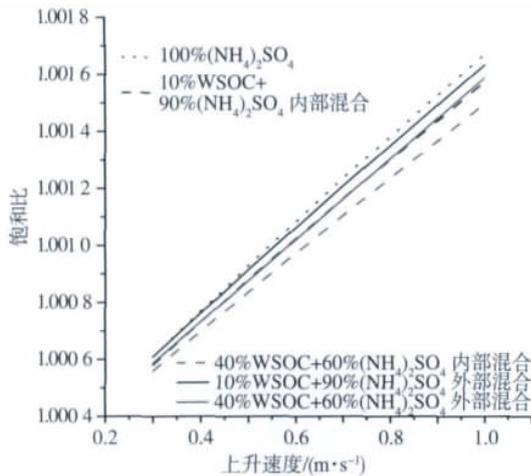


图 4 硫酸铵和 WSOC 混合产生的气块水汽最大饱和比随上升速度的分布

Fig. 4 Maximum saturation ratio of aerosol mixed with ammonium sulfate and WSOC at different updraft speeds

硫酸铵与 WSOC 的外部混合形式(方案 2 和方案 4)与其对等的内部混合形式(方案 1 和方案 3)所对应的气块最大过饱和度存在一定的差异,其中内部混合形式对最大过饱和度的减小作用比其外部混合形式的作用更为明显,即两者的内部混合形式有降低气块最大过饱和度。

2.3 气溶胶混合状态对云滴数浓度的影响

以硫酸铵和 WSOC 不同混合方案为初始条件模拟得到的云滴数浓度随上升速度的分布列于图 5。由图 5 可以看出,硫酸铵和与 WSOC 内部混合的气溶胶粒子产生的云滴数浓度随上升速度的增加而明显增多。在同一上升速度下,两者内部混合的气

溶胶产生的云滴数浓度明显多于纯硫酸铵气溶胶产生的云滴数浓度,并且 WSOC 的含量越高产生的云滴数浓度越多,例如在上升速度为 0.5 m/s 时 WSOC 含量由 10% 增加至 40% 时造成云滴数浓度增加的百分比数值从 6.51% 增加至 12.79% (表 3)。

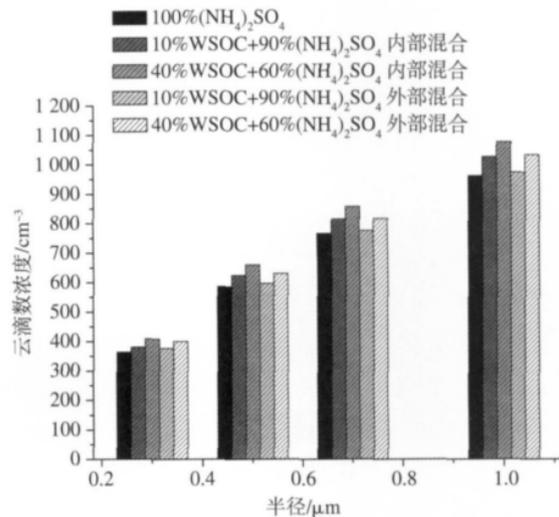


图 5 硫酸铵和 WSOC 混合产生的云滴数浓度随上升速度的分布

Fig. 5 Cloud droplet number concentration of aerosol mixed with ammonium sulfate and WSOC at different updraft speeds

表 3 不同上升速度不同混合形式的 WSOC 云滴数目增加的百分比(与纯硫酸铵进行比较)

Table 3 Increased percentage of CDNC of aerosol mixed with WSOC at different updraft speeds (compared with pure ammonium sulfate)

上升速度 / (m · s ⁻¹)	云滴数目增加百分比 /%			
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
0.300	4.71	3.65	12.42	10.11
0.500	6.51	1.91	12.79	7.64
0.700	6.37	1.12	11.86	6.62
1.000	6.71	1.18	11.93	7.50

硫酸铵与 WSOC 外部混合形式产生的云滴数浓度随着上升速度的增加而增多。在相同的上升速度下,WSOC 与硫酸铵的外部混合产生的云滴数浓度比纯硫酸铵气溶胶粒子产生的云滴数浓度明显偏多,并且 WSOC 气溶胶含量越高,活化形成的云滴数浓度越多,但云滴数浓度的增加的幅度随上升速度的增加而减小(表 3),该特征与两者的内部混合形式产生的云滴数浓度的分布特征相反。

对比两组方案产生的云滴数浓度的差异,可

以研究硫酸铵与 WSOC 的内部混合形式和外部混合形式对云滴数浓度影响的差异。从图 5 还可以看出,在上升速度一定时,两者的内部混合形式比对应的外部混合形式更有利于增加云滴数浓度;上升速度越大,WSOC 与硫酸铵的内部混合气溶胶粒子产生的云滴数浓度增加幅度越高,而两者外部混合的气溶胶粒子产生的造成云滴数浓度增加的幅度却在减小(表 3),且气溶胶内、外部混合气溶胶产生的云滴数浓度的差异越大。

由于云内初始云滴数浓度多少决定于气块水汽最大饱和比和气溶胶粒子的临界过饱和比的高低的综合作用,因此通过综合分析内部、外部混合过程中气块水汽最大饱和比和气溶胶粒子的临界过饱和比量值的高低,可以给出气溶胶内、外部混合产生的云滴数浓度差异的原因。虽然两种成分的外部混合的气溶胶产生的气块水汽最大饱和比高,但具有最低临界饱和比的 WSOC 最先活化,消耗气块中大量水汽,在剩余少量有限的水汽条件下,硫酸铵气溶胶临界饱和比高,只有较大尺度的粒子才能成为云滴,因此产生的云滴数浓度低,最终结果造成两者外部混合的气溶胶产生的云滴数浓度比对应的内部混合气溶胶产生的云滴数浓度偏低。即由两种成分的气溶胶临界饱和比高低差异较大和活化过程中彼此竞争有限的水汽决定了 WSOC 和硫酸铵的外部混合气溶胶比对应的内部混合气溶胶产生云滴数浓度少。

2.4 气溶胶混合状态对云滴谱的影响

选用的云滴谱取自气块最大饱和比高度之上、云底之上附近 2 180 m 高度处的模拟结果。Yang et al. (2011) 指出,在 2 180 m 高度云滴最小尺度大于 1 μm ,因此定义该高度处半径大于 1.0 μm 的液滴为云滴。本文给出了云滴形成初始阶段的云滴谱的模拟结果。

由于在不同上升速度下不同方案产生的云滴谱间的差异类似,因此只给出了上升速度为 1.0 m/s 时的模拟结果,且模拟结果分为两组,通过两组对比分析,来分析气溶胶内部、外部混合状态对云滴谱的影响特征。

表 4 给出的是反映云滴谱特征的总浓度、平均半径、方差、离散度和峰度等几种特征量的模拟结果的统计值。由表 4 可以看出,同一上升速度下,气溶胶混合状态不同,模拟得到的云滴谱的特征参数存在一定差异。其中从方案 1 和方案 3 对应的云滴谱的特征参数可以看出,硫酸铵和 WSOC 的内部混合的气溶胶,会随着 WSOC 含量的增加云滴浓度增

加,云滴平均尺度减小,云滴谱趋于变窄,云滴向平均尺度集中(离散度变小),云滴谱的峰更加突出;从方案 2 和方案 4 可以看出当两种气溶胶处于外部混合时形成的云滴谱表现出,随着 WSOC 气溶胶浓度的增加,云滴浓度增加,云滴谱平均尺度增大,谱变窄,向平均尺度集中,峰变得平缓些。综合两组的研究结果可见,硫酸铵和 WSOC 两种成分的混合形式不同,形成的云滴谱的特征差异很大,该差异集中体现在云滴谱平均尺度和峰的突出程度上。

表 4 硫酸铵和 WSOC 混合气溶胶产生的云滴谱的特征量分布

Table 4 Properties of CDS of aerosol mixed with ammonium sulfate and WSOC

	总浓度/ cm^{-3}	平均半径/ μm	方差/ μm	离散度	峰度
方案 1	949.07	2.77	0.87	0.31	5.60
方案 2	798.57	2.83	0.86	0.30	7.82
方案 3	964.23	2.77	0.85	0.30	6.00
方案 4	928.80	2.86	0.82	0.29	6.75

同时从两组方案的离散度的模拟结果看出,云滴谱离散度的数值在 0.3 附近变化,随着云滴数浓度的增加,云滴谱相对离散度呈现减小的趋势。Zhao et al. (2006) 对华北地区的飞机观测资料分析表明,随着云滴数浓度的增加,云滴谱的相对散度趋向一个比较窄的变化区域。而 Ma et al. (2010) 对该地区春季较薄的(厚度 200 ~ 300 m)非降水层状暖云的观测结果也显示,随着云滴数浓度的增加,云滴谱的相对散度明显呈现减小的趋势。

3 结论

在 UWyo 单组分绝热气块分档云模式基础上,发展了含有硫酸盐、硝酸盐、海盐、WSOC 及不可溶核等多种化学组分的绝热气块分档云模式。改进后的绝热气块分档云模式能够较好地模拟不同化学组分气溶胶粒子对 CCN 和暖云微物理特征的影响,该模式具有一定的实用价值。利用改进后的模式,以 2006 年春季华北地区地面气溶胶分级采样的离子成分分析数据和同时段高空气溶胶、云微物理飞机观测资料为基础,研究了气溶胶混合状态对暖云微物理特征的影响。具体结论如下。

1) WSOC 和硫酸铵的内、外部混合气溶胶能够增加 CCN 数浓度(与纯硫酸铵气溶胶产生的 CCN 数浓度相比),并且 WSOC 含量越高,CCN 数浓度越高,两者的外部混合产生的 CCN 数浓度比对应的

内部混合产生 CCN 数浓度偏低,增加的幅度偏小。

2) WSOC 和硫酸铵的内、外部混合的气溶胶呈现出气块中水汽最大饱和比随着 WSOC 含量的增加而减小的特征,其中两者的内部混合形式更有利于降低气块水汽最大饱和比。

3) WSOC 和硫酸铵的混合状态不同产生的云滴数浓度的量值和变化幅度的差异较大,其中 WSOC 与硫酸铵外部混合气溶胶产生的云滴数浓度的增加幅度随上升速度的增加而减小,而两者的内部混合气溶胶产生的云滴数浓度随上升速度的变化特征与之相反,内部混合形式比对等的外部混合形式更有利于增加云滴数浓度; WSOC 和硫酸铵气溶胶临界饱和比高低差异较大及在活化过程中彼此竞争有限的水汽,共同决定了 WSOC 和硫酸铵的外部混合气溶胶比对等的内部混合气溶胶产生云滴数浓度偏少。

4) 硫酸铵和 WSOC 两种成分的混合形式不同,形成的云滴谱的特征差异很大,该差异集中体现在云滴谱平均尺度和峰的突出程度上。云滴谱离散度的数值在 0.3 附近变化,随着云滴数浓度的增加,云滴谱相对离散度呈现减小的趋势。

参考文献:

北京大学地球物理系大气物理教研室云物理教学组. 1984. 云物理学基础[M]. 北京: 农业出版社.

黄晓锋, 胡敏, 何凌燕. 2004. 北京市大气气溶胶 PM_{2.5} 中水溶性有机酸的测定[J]. 环境科学, 25(5): 21-25.

赵春生, 石坂隆. 2004. 层积云覆盖的海洋边界层云详细微物理过程的数值模拟[J]. 气象学报, 62(1): 87-95.

赵春生, 彭大勇, 段英. 2005. 海盐气溶胶和硫酸盐气溶胶在云微物理过程中的作用[J]. 应用气象学报, 16(4): 417-425.

Anttila T. 2010. Sensitivity of cloud droplet formation to the numerical treatment of the particle mixing state [J]. J Geophys Res, 115, D21205. doi: 10. 1029/2010JD013995.

Decesari S, Facchini M C, Fuzzi S, et al. 2000. Characterization of water-soluble organic compounds in atmospheric aerosol: A new approach[J]. J Geophys Res, 105: 1481-1489.

Ervens B, Feingold G, Kreidenweis S M. 2005. Influence of water-soluble organic carbon on cloud drop number concentration [J]. J Geophys Res, 110, D18211. doi: 10. 1029/2004JD005634.

Ghan S J, Guzman G, Abdul-Razzak H. 1998. Competition between sea salt and sulfate particles as cloud condensation nuclei [J]. J Atmos Sci, 55: 3340-3347.

Hobbs P V. 1993. Aerosol-Cloud-Climate Interactions [M]. Missouri: Academic Press.

IPCC. 2007. Climate change: The physical science basis [M]. New York: Cambridge University Press.

Lohmann U, Feichter J. 2005. Global indirect aerosol effects: A review [J]. Atmos Chem Phys, 5: 715-737.

Ma J Z, Chen Y, Wang W, et al. 2010. Strong air pollution causes haze-clouds over China [J]. J Geophys Res, 115, D18204. doi: 10. 1029/2009JD013065.

McFiggans G, Artaxo P, Baltensperger U, et al. 2006. The effect of physical and chemical aerosol properties on warm cloud droplet activation [J]. Atmos Chem Phys, 6: 2593-2649.

Metzger S, Lelieveld J. 2007. Reformulating atmospheric aerosol thermodynamics and hygroscopic growth into fog, haze and clouds [J]. Atmos Chem Phys, 7: 3163-3193.

Mircea M, Facchini M C, Decesari S, et al. 2002. The influence of the organic aerosol component on CCN supersaturation spectra for different aerosol types [J]. Tellus Ser B: Chem Phys Meteorol, 54: 74-81.

Nenes A, Charlson R J, Facchini M C, et al. 2002. Can chemical effects on cloud droplet number rival the first indirect effect? [J]. Geophys Res Lett, 29, 1848. doi: 10. 1029/2002GL015295.

Pruppacher H R, Klett J D. 1997. Microphysics of Clouds and Precipitation [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Shulman M L, Jacobson M C, Charlson R J, et al. 1996. Dissolution behavior and surface tension effects of organic compounds in nucleating cloud droplets [J]. Geophys Res Lett, 23: 277-280.

Snider J R, Guibert S, Brenguier J. 2003. Aerosol activation in marine stratocumulus clouds: 2. Köhler and parcel theory closure studies [J]. J Geophys Res, 108 (D15), 8629. doi: 10. 1029/2002JD002692.

Twomey S. 1959. The nuclei of natural cloud formation Part II: The supersaturation in natural clouds and the variation of cloud droplet concentration [J]. Geofis Pura Appl, 43: 243-249.

Wex H, McFiggans G, Henning S, et al. 2010. Influence of the external mixing state of atmospheric aerosol on derived CCN number concentrations [J]. Geophys Res Lett, 37, L10805. doi: 10. 1029/2010GL043337.

Yang S Y, Ma J Z, Hu Z J, et al. 2011. Influence of multi-chemical-component aerosols on the microphysics of warm clouds in North China [J]. Sci China Earth Sci, 54(3): 451-461. doi: 10. 1007/s11430-010-4075-z.

Yin Y, Levin Z, Reisin T, et al. 1999. Seeding convective clouds with hygroscopic flares: Numerical simulations using a cloud model with detailed microphysics [J]. J Applied Meteor, 39: 1460-1472.

Yin Y, Levin Z, Reisin T G, et al. 2000. The effects of giant cloud condensation nuclei on the development of precipitation in convective clouds: A numerical study [J]. Atmos Res, 53: 91-116.

Zhang L, Michelangeli D V, Taylor P A. 2006. Influence of aerosol concentration on precipitation formation in low-level warm stratiform clouds [J]. Aerosol Sci, 37: 203-217.

Zhao C S, Ishizaka Y, Peng D Y. 2005. Numerical study on impacts of multi-component aerosols on marine cloud microphysical properties [J]. J Meteor Soc Japan, 83: 977-986.

Zhao C S, Tie X X, Brassuer G, et al. 2006. Aircraft measurements of cloud droplet spectral dispersion and implications for indirect aerosol radiative forcing [J]. Geophys Res Lett, 33, L16809. doi: 10. 1029/2006GL026653.