

云化学模式及其若干研究进展

刘 小 红

(南京大学大气科学系)

提 要

本文从云的微物理过程、云中化学反应、云水、雨水对污染气体和气溶胶的清除过程,云化学模式等方面,总结介绍了近几年来云化学模式的若干研究进展。

一、引 言

目前,环境问题已引起人们的普遍关注,为了改善环境,更有效地改善大气质量,探索减轻和防止酸雨危害的对策,需要研究云和污染物相互作用的规律。

近10年来,在云化学研究中取得了很大进展。作为研究重要手段之一的云化学数值模拟要使模式包括云的动力过程、热力过程、微物理过程以及云的化学过程。

云化学模式强烈地依赖于云和降水的动力过程及云的微物理过程。一个完善的云化学模式需要将云动力过程、云微物理过程与云化学过程有机地结合起来;云化学模式还必须考虑不同云和降水系统时间、空间尺度的差异。由于时间、空间尺度的不同,这些系统内发生的微物理和动力过程也有很大的不同,从而也影响着发生于其中的化学过程;云化学模式中模式变量很多,不仅要包括大气动力过程、热力过程、微物理过程的变量,还要包括多种污染物在气相、液相、冰相中的浓度变量。由于云化学模式变量的多种性以及计算的复杂性,每个模式必须进行简化,但又要使模式能够描述云化学的主要特征。

下面将首先介绍云化学模拟中需要考虑的云微物理过程和云中化学过程,然后着重介绍云水、雨水对气体、气溶胶的清除过

程,最后介绍近几年来云化学模式的若干研究进展。

二、云微物理过程

云中水成物是云中化学反应的主要场所,各种水成物相互转化的微物理过程又决定了水成物中污染物浓度的变化,所以,云微物理过程是云化学模式的重要组成部分。

1. 水成物的种类

除了水汽,云中包含大小不同、各种形状和密度的多种水成物。由于一些云化学过程强烈依赖于云中水成物的大小,所以,对微物理过程进行详细描述是很必要的,但这又大大增加了计算量。在处理云微物理过程时,常常采用一个简便方法:将水成物分成几类,每类有各自特定的谱分布,并且对每类水成物之间相互转化的过程采用参数化处理^[1],一般将水成物分成五类:云滴、雨滴、冰晶、雪、霰。水成物的谱分布一般选择 Marshall-Palmer 分布。但由于云滴、冰晶较小,许多特性,例如下降末速度、气体在其中的溶解速率等,不明显依赖于其大小,故可以认为云滴、冰晶大小是均匀的。

2. 微物理过程

云中水成物之间存在多种质量交换和相互作用,例如:凝结—蒸发、冻结—融化,云水向雨水的自动转化,雨滴捕获云滴,雪

捕获冰晶和云滴等微物理过程。一般来讲,在建立化学模式中需考虑这些微物理过程。而另外一些过程,例如:水汽在雨滴或霰上的凝结或凝华,雨滴的破碎及冰晶的繁生等或相对于其它过程要慢很多,或对云化学模拟影响较小,一般认为可略。

在各种云化学模式中,云微物理过程的处理有很大的差别。如果考虑暖云,即不考虑冰相过程,只需要考虑云水和雨水两种水成物,微物理过程也很简单^[2-8];而有一些工作,如Rutledge等(1986a,b)^[9]^[10]、Hegg等(1984)^[11]、Taylor(1989a,b)^[12]^[13],考虑了比较详细的冰相过程。

三、云中化学反应

云中存在多种污染物,污染物之间发生气相、液相化学反应,而其中只有少数反应是重要的。 SO_2 和 NO_x 是空气污染中两种最重要的化学成分,这里以它们为例说明云化学模式中需要考虑的化学反应。

通过比较 SO_2 、 NO_x 各种反应的速率,可以得出在云化学模式中一般需要考虑以下反应: H_2O_2 液相氧化 SO_2 ; O_3 液相氧化 SO_2 ; NO_2 和OH自由基之间的气相氧化反应,生成的 HNO_3 可溶于水中; NO 与OH自由基的气相化学反应,生成的 HNO_2 溶解于水中; Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 液相催化 SO_2 和 O_2 的反应;如果大气中MHP和PAA的浓度达到ppbv的量级, SO_2 被MHP和PAA的液相氧化。

在描述以上几种反应时,首先要知道反应的速率常数(随温度而变化)。在各种文献中,这些速率常数的选择存在很大的差异,而这些差异又直接影响到云化学模式的计算结果^[14-19]。

在云化学模式中,如果所考虑的云系统(如层云)的持续时间较长^[6-8,20],则考虑了较详细的气相化学反应机理。

四、云水、雨水对污染气体、

气溶胶的清除过程

1. 成核清除

云凝结核可以由以下几部分组成:①硫酸盐,包括 H_2SO_4 和铵盐,其中 H_2SO_4 强烈影响云水的pH值。②碳酸盐,来自泥土,由碳酸镁和碳酸钙组成,碳酸盐在云水中起中和酸性的作用。③氯化物,来自海洋,由 NaCl 和 KCl 组成。④痕量金属,包括 Fe^{3+} 和 Mn^{2+} ,这些离子起催化作用,使云水中溶解的 SO_2 氧化成 H_2SO_4 ,导致云水酸化。

由于云凝结核的成分影响了云水中各离子的浓度,因此气溶胶的成核率(即总的气溶胶质量中成核的比率)是云化学模式中很重要的参数。Jensen和Charlson(1984)^[21]研究了气溶胶的成核清除过程,详细讨论了气溶胶成核率随一些物理、化学因子(如:上升气流速度、含水量、气溶胶浓度及谱分布)的变化。Flossmann等(1985^[22], 1987^[23], 1988^[24])对云中气溶胶清除过程进行了详细研究,结果表明成核清除是云中气溶胶清除的最重要的过程。

许多模式讨论了成核过程对硫酸盐总沉降的贡献,Hegg(1983)^[25]运用了参数化方法讨论了雨水的酸化过程,假设成核率为0.8,则成核过程对硫酸盐沉降的贡献可达50%以上。Hegg等(1984)^[11]的计算结果在20—60%之间,Taylor(1989b)^[13]的结果在30%左右。因此,气溶胶成核清除对酸雨的形成及其中的化学成分起重要影响,是云化学模式中必须考虑的重要因素。

2. 气溶胶粒子的其它清除过程

一般认为云内气溶胶清除主要是通过成核来完成,尺度小于 $0.1\mu\text{m}$ 的小颗粒不能做为云凝结核,它们主要是通过Brown运动和漂移作用被清除掉,但它们的贡献一般是可略的^[22]。

雨水对云下气溶胶粒子的冲刷是清除大

气溶胶的重要过程,冲刷机制主要是雨滴对气溶胶粒子的惯性重力碰并。雨滴对气溶胶粒子的收集效率(collection efficiency)依赖于气溶胶的大小,当气溶胶粒子小于 $1\mu\text{m}$ 时,收集效率急剧减小。Hales(1978)^[26]指出冲刷过程的处理可以使用类似气体清除的方法,清除系数依赖于降水速率。

Hegg(1983)^[25]运用一参数化方程来描述雨滴对云下硫酸盐气溶胶的冲刷。计算结果表明,这部分对硫酸盐总沉降的贡献一般小于10%,但是如果计算中使用Radke等(1980)^[27]观测到的气溶胶谱分布,则云下气溶胶的贡献可达30%。这方面工作之间还存在很大的差别,主要原因可能在于对硫酸盐气溶胶的谱分布了解不够,并且还要考虑湿度对气溶胶大小的影响,因为硫酸盐气溶胶是高度吸湿性的核。

3. 云水对污染气体的清除

一旦云滴形成,污染气体(如 SO_2 、 H_2O_2 、 O_3 、 NH_3 等)在云滴中溶解、电离并发生化学反应,从而使云滴中污染成分发生变化。在云化学模式中,污染气体从气相向液滴的质量输送过程是一个重要的问题。

气体被液滴的清除主要包括以下几个过程:气体向气液表面的气相扩散,气体从气液表面进入液滴,气体在液滴中的扩散以及气体在液相的化学反应。如果考虑液相化学反应的总速率,则必须判断以上哪个过程是速决过程^[28-29]。

要判断气体从气液相表面进入液滴的速率,必须知道气体的容度系数 α (accommodation coefficient)。测量结果表明,室温下 SO_2 气体的容度系数 $\alpha \geq 0.05$,从而说明该过程相对其它过程足够快。由于气体从气相向液相输送的总速率对于大于0.01的 α 并不敏感,故一般在云化学模式中认为 α 足够大,从而可以忽略所有气体在气液表面输送的影响。

气体在液相的输送过程一般都快于气体

在气相的输送。对于直径 $20\mu\text{m}$ 的液滴液相扩散的张驰时间为 $8 \times 10^{-3}\text{s}$,对于直径 1mm 的液滴为20s,考虑到云化学中液相化学反应的张驰时间一般大于1分钟,所以可以认为气体在液相的质量输送过程是不重要的。

Iribarne和Cho(1989)^[30]运用气体在气相的质量输送公式来讨论云化学中几种最重要成分(SO_2 、 H_2O_2 、 O_3 、 NH_3 、 CO_2 、 HNO_3) 在 25°C 云滴中达到溶解平衡所需要的张驰时间,计算结果表明:对于云滴(直径为 $20\mu\text{m}$),所有这几种气体的张驰时间都低于10s,远远小于液相化学反应的张驰时间,所以可以假设各种气体对云滴是溶解平衡的,这就是所谓的云滴的“平衡清除”(equilibrium washout)。

4. 雨水对污染气体的清除

Iribarne and Cho(1989)^[30]还讨论了以上几种气体在雨滴中达到溶解平衡所需要的张驰时间。计算结果表明,只有对于难溶性气体,例如 O_3 、 CO_2 ,才能使用平衡清除的概念,而对于可溶性气体,由于张驰时间较长,必须使用气体扩散运动方程来讨论雨滴对气体的清除。

雨滴对云下污染气体的冲刷是开展比较早的工作。Overton等(1979)^[31]运用拉格朗日方法研究了各种大小的雨滴对多种污染气体的清除及污染气体在雨滴内的液相化学反应。Kumar(1985, 1986)^{[32][33]}建立了一个云下气体清除的欧拉模式,该模式可以考虑多种污染气体在雨滴内的溶解及相互间的化学反应。

云下气体冲刷对总的酸沉降贡献大小,不同的工作之间差别较大。Hegg(1983)^[25]认为雨滴在云下的滞留时间较云内的滞留时间要短得多,所以云下气体冲刷是可略的。但是Taylor(1989b)^[13]给出云下的贡献可达30%,并指出这是由于相对比较高的云底(3km)和地面附近较高的污染气体浓度引起的。刘帅仁和黄美元(1989)^[34]对我国西

南地区的酸雨形成机制进行了研究,结果表明该地区的酸雨主要是由于云下气体冲刷造成的。因而这方面工作的进一步开展是有必要的。

五、云化学模式

以上讨论了建立云化学模式需要考虑的问题,由于问题的复杂性,不同的云化学模式在各个方面考虑的复杂性各不相同。例如 Tremblay 和 Leighton (1984)⁽²⁾, Walcek 等 (1986)⁽³⁵⁾ 都不同程度地考虑了云化学反应和云微物理过程,但都过分简化了云动力过程。而 Hane (1978)⁽³⁶⁾, Niewiadomski (1986)⁽³⁷⁾ 都考虑了复杂的云动力过程,但都没有考虑云中发生的化学反应。为了更好地模拟云中污染物的输送、转化和清除过程,必须将云动力过程与云微物理、云化学过程有机地结合在一起。下面介绍近几年来所发展的几类云化学模式。

1. 箱状模式

在云化学模式中最简单的是箱状模式。这类模式把系统做为一个整体,来考虑系统内污染物的化学演变。Hong 和 Carmichael (1983)⁽³⁸⁾ 把云做为一个 flow-through reactor 来研究云中硫酸盐的形成。Hong 和 Lee (1988)⁽³⁹⁾ 又将该模式推广到云内、云下两个系统的酸化过程。Chameides (1984)⁽²⁰⁾ 用箱状模式研究了海洋性层云的光化学反应,其中包括自由基的反应。这种模式虽不能说明系统内部的细节,但在了解系统化学组成的时间演变方面是很有用的。

2. 层云化学模式

层云的性质决定了在层云化学模式中可以将各变量看成是水平均匀的,仅是高度的函数。云内上升速度、气压、温度不随时间变化,在计算中可以预先给定。Qin 和 Chameides (1986)⁽⁴⁰⁾, Qin (1989)⁽⁴¹⁾ 建立了一个暖层云降水化学模式来研究云中可溶性气体的清除过程。模式在给定温度、

压力、上升速率垂直廓线下计算了水汽、云水、雨水以及可溶性气体在气相、液相的时间、高度分布。Lin 和 Chameides (1990)⁽⁴²⁾ 将其推广到包括云下气体的清除过程,模式讨论了云清洗 (rainout) 和雨冲刷 (wash-out) 在可溶性气体清除过程中的相对重要性,计算结果表明,雨冲刷起主导作用。

3. 积云化学模式

积云在空气污染物的化学转化、输送方面起十分重要的作用。近几年来发展了许多积云化学模式来研究积云内发生的化学过程^(2, 3, 5, 12, 13, 35, 43)。这些模式所考虑的化学过程都很相似,但由于所考虑的积云动力学过程和微物理过程有很大差别,模式结果也有很大的不同。

这些积云化学模式的化学过程主要考虑云凝结核的核化过程,其主要成分是 H_2SO_4 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4NO_3 , 考虑了 H_2O_2 、 O_3 液相氧化 S(IV) 生成 S(VI), 以及 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 液相催化氧化 S(IV)。

在积云微物理过程的处理上,多数模式只考虑暖云,有的还包括冰相的存在^(12, 13), 由雪和霰组成。Walcek 和 Taylor (1986)⁽³⁵⁾ 和 Lee (1986)⁽⁵⁾ 考虑了非降水云的情形,而 Tremblay 和 Leighton (1984, 1986)⁽²⁾⁽³⁾、徐家骝等⁽⁴⁴⁾ 考虑了降水云的情形。

在积云动力学处理上,模式之间也有很大的不同。Walcek 和 Taylor (1986)⁽³⁵⁾ 使用了一个定态的一维模式,假设空气块以均匀速度上升,云空气和云环境之间的相互作用使用云顶夹卷的公式来处理。显然假设空气块以均匀速度上升是很不符合实际的。Tremblay 和 Leighton (1984)⁽²⁾ 的一维模式中预先给定空气上升的速率廓线,云空气与云环境之间的交换用质量连续性方程来处理。显然,这个模式的动力学处理也过于简单。Lee (1986)⁽⁵⁾ 使用了同心圆柱的一维半云模式,而 Taylor (1990a, b)⁽¹²⁾⁽¹³⁾

的云模式对该云模式进行了修改。徐家骝等(1990)^[44]使用了二维面对称积云模式。Tremblay和Leighton(1986)^[3]使用了三维云模式,但计算量很大。

近几年来,积云化学模式已取得了许多结果。Walcek和Taylor(1986)^[35]的结果表明:在云内S(IV)的各种液相氧化机制中,在云底以上几公里内主要是 H_2O_2 液相氧化起作用,而在云的中高层 O_3 和PAA的氧化起作用。模式结果还表明:为了更好地预测云水的化学组分,必须对云化学参数、云微物理参数、云动力学参数进行更加细致的描述。Tremblay和Leighton(1986)^[3]的结果表明:如果云水的pH值很低, O_3 的氧化S(IV)并不重要,云中的 SO_4^{2-} 主要是由 H_2O_2 液相氧化生成的。他还将计算结果与实际观测进行了定量比较,发现模式计算值比实际观测的云水的离子浓度小,有时小到6.2倍,这说明了进一步完善云化学模式是很必要的。

4. 中尺度降水系统的云化学模式

中尺度气旋中的雨带是中尺度的降水系统,它的时间和空间尺度都不同于单个积云,对这些系统进行模拟是困难的,主要是目前对它的起源及动力过程还不甚了解。近几年发展的锋面雨带的云化学模式主要有Hegg等人(1984)^[11]的暖锋雨带的硫化学模式和Rutledge等(1986a, b)^{[9][10]}的狭窄冷锋雨带的硫、氮化学模式,这些模式都预先给定流场,计算结果给出化学组成在云水、雨水或冰相的二维定常分布。

Chaumerliac等(1987^[45], 1989^[46], 1990^[47])采用了气流过山的三维中- β 尺度模式来研究气流过山时地形强迫形成的地形云和降水的化学过程,结果表明了在云化学模式中,将云动力过程、微物理过程、云化学过程结合在一起研究的重要性。

5. 长距离输送中的云化学模式

近几年来,国外发展了许多空气污染物

的长距离输送模式(LRT)^[48--51],以及三维欧拉液沉降模式(RADM)^[52]。在这些模式中,除了考虑空气污染物的排放、输送、化学转化、干沉降外,还考虑了云以及云内发生的一些物理、化学过程,由于LRT模式的计算量很大,所以在LRT模式中云模式的处理都很简单。

七、总 结

近10年来,在云化学模式方面已取得了很大的进展,云动力学过程箱状模式发展到三维时变,微物理过程也从仅仅考虑液态水发展到考虑冰相过程,云化学处理也已比较详细地包含了云内化学反应。越来越多的模式将这三部分结合起来研究云中发生的硫酸盐和酸形成过程,经过不断完善和发展;云化学模式已成为研究酸雨形成机制的重要手段。但是目前各种云化学模式的结果与实际观测值相差还比较大,这说明云化学模式还存在许多问题。例如:云微物理过程如果考虑了冰相过程就会给模式带来很多不定因素,因为冰相过程的处理还很不成熟,冰晶与云中气体、气溶胶的相互作用更是不清楚。在云化学方面,有许多化学反应的反应机理还不清楚,一些化学反应的速率常数还很不确定,这些有待于实验室方面的工作。为了进一步完善、发展云化学模式,野外实际观测是很必要的,云化学模式可以利用实际观测的气体、气溶胶廓线做为初始场,并且通过将模式结果与实际观测相比较,找出云化学模式存在的不足,从而使其进一步完善。

致谢:本文是在南京大学大气科学系伍荣生先生、王明康先生的指导下完成的,在此向他们表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- (1) Ogura, Y. and Takahashi, T., Numerical simulation of the life cycle of a thunderstorm cell, Mon. Wea. Rev., 99, 896-911, 1971.

- [2] Tremblay, A. and Leighton, H., The influence of cloud dynamics upon the redistribution and transformation of SO_2 —A numerical simulation, *Atmos. Env.*, 18, 1885-1894, 1984.
- [3] Tremblay, A. and Leighton, H., A three-dimensional cloud chemistry model, *J. Climate and Appl. Meteorol.*, 25, 652-671, 1986.
- [4] Tremblay, A. and Leighton, H., Cumulus cloud transport, scavenging and chemistry: observation and simulations, 同[2], 21, 2345-2364, 1987.
- [5] Lee, I-Y, Numerical simulation of chemical and physical properties of cumulus clouds, 同[2], 20, 767-771, 1986.
- [6] Seigneur, C. et al., A study of atmospheric acid formation in different environments, 同[2], 18, 2109-2124, 1984.
- [7] Seigneur, C. et al., A theoretical investigation of sulfate formation in clouds, 同[2], 22, 101-113, 1988.
- [8] Seigneur, C. et al., Mathematical modeling of cloud chemistry in the Los Angeles basin, 同[2], 24, 989-1006, 1990.
- [9] Rutledge, S. A. et al., A numerical model for sulfur and nitrogen scavenging in narrow cold-frontal rainbands, 1. Model description and discussion of microphysical fields, *J. Geophys. Res.*, 91, 14383-14402, 1986a.
- [10] Rutledge, S. A. et al., A numerical model for sulfur and nitrogen scavenging in narrow cold-frontal rainbands, 2. Discussion of chemical fields, 同[9], 91, 14403-14416, 1986b.
- [11] Hegg, D. A. et al., A numerical model for sulfur chemistry in warm-frontal rainbands, 同[9], 89, 7133-7147, 1984.
- [12] Taylor, G. R., Sulfate production in midlatitude continental cumulus clouds. Part I: Cloud model formulation and base run analysis, *J. Atmos. Sci.*, 46, 1971-1990, 1989a.
- [13] Taylor, G. R., Sulfate production in midlatitude continental cumulus clouds. Part II: Chemistry model formulation and sensitivity analysis, 同[12], 46, 1991-2007, 1989b.
- [14] Pandis, S. N. and Seinfeld, J. H., Sensitivity analysis of a chemical mechanism for aqueous-phase atmospheric chemistry, 同[9], 94, 1105-1126, 1989.
- [15] Matin, L. R., Kinetic studies of sulfite oxidation in aqueous solution, *Acid Precipitation*, J. G. Calvert, Ed., Ann Arbor Sciences, 1983.
- [16] Matin, L. R. et al., The ion-catalyzed oxidation of sulfur: Reconciliation of the literature rates, 同[2], 21, 1487-1490, 1987a.
- [17] Matin, L. R. et al., The effect of ionic strength on the manganese catalyzed oxidation of sulfur (IV), 同[2], 21, 2267-2270, 1987b.
- [18] Maahs, H. G., Kinetics and mechanisms of the oxidation of S(IV) by ozone in aqueous solution with particular reference to SO_2 conversion in nonurban tropospheric clouds, 同[9], 88, 10721-10732, 1983.
- [19] Lind, J. A. et al., Oxidation of sulfur(IV) by organic peroxides, 同[9], 90, 1985.
- [20] Chameides, W. L., The photochemistry of a marine stratiform cloud, 同[9], 89, 4739-4755, 1984.
- [21] Jensen, J. B. et al., On the efficiency of nucleation scavenging, *Tellus*, 36B, 367-375, 1984.
- [22] Flossmann, A. I. et al., A theoretical study of the wet removal of atmospheric pollutants. Part I, 同[12], 42, 583-606, 1985.
- [23] Flossmann, A. I. et al., A theoretical study of the wet removal of atmospheric pollutants. Part. II, 同[12], 44, 2912-2923, 1987.
- [24] Flossmann, A. I. et al., A theoretical study of the wet removal of atmospheric pollutants. Part III, 同[12], 45, 1857-1871, 1988.
- [25] Hegg, D. A., The sources of sulfate in precipitation(1): parameterization scheme and physical sensitivities, 同[9], 88, 1369-

- 1374, 1983.
- [26] Hales, J.M., Wet removal of sulfur compounds from the atmosphere, 同(2), 12, 389-399, 1978.
- [27] Radke, L.J., et al., Scavenging of aerosol particles by precipitation, J. Appl. Met., 19, 715-722, 1980.
- [28] Schwartz, S.E. and Freiberg, J.E., Mass-transport limitation to the rate of reaction of gases in liquid droplets; Application to oxidation of SO_2 in aqueous solution, 同(2), 15, 1129-1144, 1981.
- [29] Schwartz, S.E., Mass-transport considerations pertinent to aqueous phase reactions of gases in liquid water clouds, Chemistry of multiphase atmospheric system, (ed W. Jaeschke), NATO ASI Series, Vol. G6 Spriger-Verlag, 1986.
- [30] Iribarne, J.V. and Cho, H.R., Model of cloud chemistry, 同(21), 41B, 2-23, 1989.
- [31] Overton, J.H. et al., Production of sulfate in rain and raindrops in polluted atmospheres, 同(2), 13, 355-367, 1979.
- [32] Kumar, S., An Eulerian model for scavenging of pollutants by raindrops, 同(2), 19, 769-778, 1985.
- [33] Kumar, S., Reactive scavenging of pollutants by rain; a modeling approach, 同(2), 20, 1015-1024, 1986.
- [34] 刘帅仁、黄美元, 云下雨水酸化过程数值模拟及重庆酸雨形成机理的探讨, 大气科学特刊, 245-257, 1988.
- [35] Walcek, C.J. and Taylor, G.R., A theoretical method for computing vertical distributions of acidity and sulfate production within cumulus clouds, 同(12), 43, 339-355, 1986.
- [36] Hane, C.E., Scavenging of urban pollutants by thunderstorm rainfall; Numerical experiment, 同(27), 17, 699-710, 1978.
- [37] Niewiadomski, M., A passive pollutant in a three dimensional field of convective clouds; Numerical simulations, 同(2), 20, 139-145, 1986.
- [38] Hong, M.S. and Carmichael, G.R., An investigation of sulfate production in clouds using a flow-through chemical reactor model approach, 同(9), 88, 10733-10743, 1983.
- [39] Hong, M.S. and Lee, I-Y, Numerical studies of acidification process within and below clouds with a flow-through chemical reactor model, 同(2), 22, 297-305, 1988.
- [40] Qin, Y. and Chameides, W.L., The removal of soluble species by warm stratiform clouds, 同(21), 38B, 285-299, 1986.
- [41] Qin, Y., Numerical simulation on the rainout-removal of sulfur dioxide and acidification of precipitation from stratiform clouds, Adv. in Atmos. Sci., 6, 75-87, 1989.
- [42] Xin Liu And Chameides, W.L., Model simulations of rainout and washout from a warm stratiform cloud, J. Atmos. Chem., 10, 1-26, 1990.
- [43] Cho, J. Geophy. Res. Sci., 94, 12895-12910, 1989.
- [44] 徐家骥等, 二维时变的积云化学模式, 环境科学学报, 第10卷, 第4期, 385-400, 1990.
- [45] Chaumerliac, N. et al., Sulfur scavenging in a mesoscale model with quasi-spectral microphysics: Two-dimensional results for continent and maritime clouds, 同(9), 92, 3114-3126, 1987.
- [46] Chaumerliac, N. et al., The potential for elucidating sulfate and acidity production in clouds using a mesoscale model with quasi-spectral microphysics, 同(21), 41B, 70-78, 1989.
- [47] Chaumerliac, N. et al., Mesoscale modeling of acidity production in orographic clouds and rain, 同(2), 24A, 1573-1584, 1990.
- [48] Carmichael, G.R. and Peter, L.K., An Eulerian transport/transformation/removal model for SO_2 and sulfate: I—Model development, 同(2), 18, 937-951, 1984a.
- [49] Carmichael, G.R. and Peter, L.K., An Eulerian transport/transformation/removal model for SO_2 and sulfate: II—Model calculation of SO_x transport in the

- eastern United States, 同(2), 18,953-967, 1984b.
- [50] Carmichael, G.R. et al., A second generation model for region-scale transport/chemistry/deposition, 同(2), 20,173-188, 1986.
- [51] Venkatram, A. et al., Source-receptor relationships, Env. Sci. Tech., 20, 1084-1091, 1986.
- [52] Chang, J.S. et al., A three-dimensional Eulerian acid deposition model: Physical concepts and formulation, 同(9), 92, 14681-14700, 1987.
- [51] Venkatram, A. et al., Source-receptor

Cloud chemistry model and some consequential advances in its researches

Liu Xiaohong

(Department of Atmospheric Science, Nanjing University)

Abstract

In the paper, some advances in the researches of cloud chemistry model is described summarily from the aspects of chemical reaction in cloud, the washout process of air pollutions and aerosols by cloud droplets and raindrops, cloud chemistry model and so on.