

赵海波, 郑楚光. 降雨过程中气溶胶湿沉降的数值模拟[J]. 环境科学学报, 2005, 25(12): 1590 - 1596

ZHAO Haibo, ZHENG Chuguang. Numerical simulation of wet removal of aerosols when raindrop falling[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(12): 1590 - 1596

降雨过程中气溶胶湿沉降的数值模拟

赵海波*, 郑楚光

华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074

收稿日期: 2004-02-18 修回日期: 2005-10-13 录用日期: 2005-10-13

摘要: 为了参数化降雨湿去除气溶胶的过程, 首先定量计算了雨滴和气溶胶的碰撞效率与它们尺度之间的依存关系, 以及雨滴尺度谱满足对数正态分布时气溶胶的清除系数与其尺度的依存关系; 然后利用多重 Monte Carlo 算法模拟了降雨过程中气溶胶尺度谱的时间演变过程, 考察了气溶胶湿沉降过程与降雨类型和雨强的相关性. 当雨滴尺度谱和气溶胶尺度谱均满足对数正态分布时, 数值模拟的结果表明, 典型的小雨、中雨和大雨过程对中等尺度气溶胶的湿去除效果均不理想, 但都可以有效地湿去除大尺度气溶胶和小尺度气溶胶; 3 种降雨类型对大尺度气溶胶的湿去除效果均依次好于小尺度气溶胶和中等尺度气溶胶; 对于任何尺度的气溶胶, 雨强的增加将有利于其湿沉降.

关键词: 湿去除; 通用动力学方程; 清除系数; 碰撞效率; 布朗扩散; 拦截; 惯性碰撞

文章编号: 0253-2468(2005)12-1590-07 中图分类号: P401; X513 文献标识码: A

Numerical simulation of wet removal of aerosols when raindrop falling

ZHAO Haibo*, ZHENG Chuguang

State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

Received 18 February 2005; received in revised form 13 October 2005; accepted 13 October 2005

Abstract: In order to parameterize wet removal of aerosols by precipitation, collision efficiency between aerosol and raindrop as a function of aerosol size and raindrop size is quantitatively calculated, as well as scavenging coefficient of aerosol as a function of aerosol size for log-normal raindrop size distribution. Then multi-Monte Carlo method was used to simulate time evolution of aerosol size distribution when raindrop falling, and the relations were researched between the effect of aerosol wet scavenging and precipitation style as well as rainfall intensity. Numerical simulations showed that, for log-normal raindrop size distribution and log-normal aerosol size distribution, (a) three typical precipitation styles, light, moderate and heavy precipitation, have a weak effect of aerosol wet on scavenging for intermediate aerosols, however scavenging effectively large aerosols and small aerosols; (b) any precipitation styles scavenge large aerosols more effectively than small and intermediate aerosols (both in that order); (c) any size aerosols are scavenged more effectively by raindrop so long as rainfall intensity increases.

Keywords: wet removal; general dynamic equation; scavenging coefficient; collision efficiency; Brownian diffusion; interception; inertial impaction

降雨过程对大气环境中的气溶胶有着显著的去清除效果, 这个过程也称为云下清除或气溶胶的湿沉降. 采用清除系数(scavenging coefficient)来研究气溶胶的湿沉降是一种较为直观简便且被广泛使用的方法(Mircea *et al.*, 1998; Mircea *et al.*, 2000; 彭红等, 1992). 清除系数(λ)表示尺度为 d_p 的气溶胶被雨滴所清除的速率, 单位为 s^{-1} . Mircea 等(1998)得到了清除系数与雨强(rainfall intensity)的指数形式的经验表达式, Mircea 等(2000)通过数值分析得到了清除系数与雨强的线性形式的经验表达

式, 其中的经验系数均取决于当地的气溶胶尺度谱和雨滴尺度谱等因素. 彭红等(1992)分析了碰撞效率、雨滴尺度谱和气溶胶尺度谱等对清除系数的影响, 得到了我国两广地区降雨过程中的经验平均碰撞效率, 以及不同组分气溶胶清除系数与雨强的经验关系式. 但以上工作的研究对象是整个气溶胶群, 无法分析特定尺度气溶胶的湿沉降过程, 也无法得到气溶胶尺度谱随时间的演变过程.

因为气溶胶的光散射、电荷吸附、毒性、放射性、沉积率、捕捉策略等都与其尺度谱紧密相关, 因此

基金项目: 国家重点基础研究专项经费(No. 2002CB211602); 国家自然科学基金重点项目(No. 90410017)

作者简介: 赵海波(1977—), 男, 讲师(博士), E-mail: klinmannzhb@163.com; * 通讯作者(责任作者)

Foundation item: Special Fund of the National Priority Basic Research of China (No. 2002CB211602); National Natural Science Foundation of China (No. 90410017)

Biography: ZHAO Haibo(1977—), male, lector(Ph. D.), E-mail: klinmannzhb@163.com; * Corresponding author

气溶胶尺度谱是相关科学和工程领域的关键参数之一。可以利用气溶胶尺度谱的时间演变过程来量化气溶胶在降雨过程中的湿沉降过程,考虑湿沉降的通用动力学方程(General Dynamic Equation, GDE)或粒数衡算方程(Population Balance Equation, PBE)描述如下(Jung *et al.*, 2002):

$$\frac{\partial n_p(d_p, t)}{\partial t} = - (d_p) n_p(d_p, t) = \int_{D_{d, \min}}^{D_{d, \max}} n_p(d_p, t) K(d_p, D_d) E(d_p, D_d) dD_d \quad (1)$$

式中, $n_p(d_p, t)$ 为气溶胶尺度谱函数(量纲为 $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$), 表示 t 时刻、单位体积内尺度为 d_p (尺度量纲一般为 μm) 的气溶胶的数目浓度。 $n_d(D_d)$ 为雨滴尺度谱函数, D_d 为雨滴尺度。 $K(d_p, D_d)$ 为碰撞核(collision kernel)或碰撞概率, 表示气溶胶(d_p)与雨滴(D_d)在同一时刻几何轨道发生交叉而碰撞的概率,

$$K(d_p, D_d) = D_d^2 |U(D_d) - U(d_p)| n_d(D_d) / 4 \quad (2)$$

其中, $U(D_d)$ 和 $U(d_p)$ 分别为尺度 D_d 的雨滴和尺度 d_p 的气溶胶颗粒的末速度;雨滴末速度可以采用 3 段式公式近似计算(盛裴轩等, 2003):

$$\begin{cases} U(D_d) = 30.78 D_d^2 \times 10^6 & D_d < 100 \mu\text{m} \\ U(D_d) = 38 D_d^2 \times 10^6 & 100 \mu\text{m} < D_d < 1000 \mu\text{m} \\ U(D_d) = 133.046 D_d^{0.5} & D_d > 1000 \mu\text{m} \end{cases} \quad (3)$$

并且 $U(D_d)$ 的最大值为 $9.17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 气溶胶末速度如下计算:

$$U(d_p) = \rho_p d_p^2 g C_c / 18 \mu_a \quad (4)$$

式中, ρ_p 为气溶胶的密度, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, μ_a 为空气的动力粘度, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, g 为重力加速度, C_c 为 Cunningham 滑移修正系数,

$$C_c = 1 + 2.493 \frac{d_p}{\lambda} + 0.84 \frac{d_p}{\lambda} \exp\left[-0.435 \frac{d_p}{\lambda}\right] \quad (5)$$

式中, λ 为大气中气体分子的平均自由程。理论上同一时刻轨道交叉的两颗粒可能由于湍流扩散、布朗扩散、范德华力、热泳、静电捕集等作用而滑移开来, 这可由碰撞效率 $E(d_p, D_d)$ 描述。

对于单分散性分布的气溶胶尺度谱, 式(1)存在指数形式的理论分析解。对于某些简单函数形式

(如指数分布、对数正态分布和伽马分布等)的多分散性分布的初始气溶胶尺度谱, 如果清除系数(d_p)为气溶胶尺度 d_p 的简单函数(如 $(d_p) = a d_p^c + b d_p^d + \dots$), 则式(1)也存在理论分析解, 如 Jung 等(2002)利用矩方法得到了受布朗扩散机制所主导的、呈对数正态分布的、亚微米尺度的气溶胶颗粒湿沉降过程的理论分析解。但是, 一方面这些理论解无法直接提供气溶胶几何平均尺度、气溶胶总数目、气溶胶几何标准偏差(分散度)等关键信息; 另外一方面, 对于某些具有复杂分布的多分散性气溶胶群或者 (d_p) 较为复杂, 则式(1)为一个典型的部分积分微分方程, 不仅很难在数学上得到理论解, 而且利用普通的数值方法计算时或者难以求解, 或者存在较大的离散误差。Jung 等(2003)利用矩方法描述了全尺度范围内气溶胶的湿沉降过程, 但是为了满足矩方法的特殊要求, 对碰撞效率、气溶胶尺度谱、雨滴尺度谱、雨滴和气溶胶末速度、碰撞核等都进行了一定的简化或假设。

综上所述, 前述研究者虽然成功地利用清除系数整体上分析了气溶胶群的湿沉降效果与外部因素的关系, 但是特定尺度气溶胶的湿沉降过程, 或者说气溶胶尺度谱时间演变的细节信息, 仅仅利用清除系数是无法获取的, 这些信息必须通过求解考虑湿沉降的通用动力学方程来得到, 而该方程的数学求解存在若干困难。本文试图通过多重 Monte Carlo (Multi-Monte Carlo, MMC) 算法描述降雨过程中气溶胶尺度谱的动力学演变过程, 以揭示典型降雨类型和雨强等外部因素对各个特定尺度气溶胶的湿去除效果的影响。

1 多重 Monte Carlo 算法简介(Introduction of multi-Monte Carlo method)

为了减少计算代价, 多重 Monte Carlo 算法在求解通用动力学方程的过程中引入加权虚拟气溶胶的概念, 认为体积相同或相近的气溶胶具有同样的属性和动力学行为, 这些气溶胶能够被适当数目的虚拟气溶胶所代表, 每颗虚拟气溶胶具有一定的数目权值, 代表相应数目的实际气溶胶。该算法跟踪虚拟气溶胶的湿沉降过程, 虚拟气溶胶的演变过程可以代表这些实际气溶胶的演变过程, 虚拟气溶胶的总数目比实际气溶胶总数目少得多。

多重 Monte Carlo 算法基于时间驱动 Monte Carlo 技术, 时间步长 Δt 必须小于等于某一虚拟气溶胶

发生一次湿沉降事件的时间尺度中的最小值, 即 $t = 1/\max(\lambda_i)$, 其中 λ_i 为编号为 i 、尺度为 d_{pi} 、数目权值为 W_{pi} 的虚拟气溶胶的清除系数; t 是实时设置且可调的; 然后在一个 t 内, 对于每一颗虚拟气溶胶, 均通过满足均匀分布的随机数 $R(0, R)$ 来判断其是否发生湿沉降事件: $R < \lambda_i t$, 则虚拟气溶胶 i 将在 t 内湿沉降, 否则认为其将继续演变.

清除系数的计算中需要对雨滴尺度谱进行部分积分, 这种积分计算可能耗费大量的计算代价或者造成一定的数值误差, 甚至完全无法求解. 为了避免这个积分计算, 类比虚拟气溶胶的概念, 本算法引入加权的虚拟雨滴的概念. 如果虚拟雨滴 i 的数目权值为 W_{di} , 尺度为 D_{di} , 虚拟雨滴总数目为 N_{df} . 此时清除系数的计算如下:

$$(d_p) = \int_{D_{d,\min}}^{D_{d,\max}} K(d_p, D_d) E(d_p, D_d) dD_d = \sum_{i=1}^{N_{df}} \left[\frac{D_{di}^2}{4} U(D_{di}) - U(d_p) \right] E(d_p, D_{di}) W_{di} \quad (6)$$

多重 Monte Carlo 算法的另外一个重要特点是, 即使实际气溶胶数目由于湿沉降事件的发生而不断减少, 但模拟过程中可以同时保持计算区域体积不变和虚拟气溶胶总数目不变, 即同时具有常数目法和常体积法的特点. 该算法通过调整相关虚拟气溶胶的数目权值来实现常数目和常体积的特点并体现湿沉降的实际后果. 假如虚拟气溶胶 i 将要发生湿沉降事件, 则首先通过一个随机过程从虚拟气溶胶数列中随机选取一颗虚拟气溶胶 j , 把虚拟气溶胶 j 分裂成 2 颗虚拟气溶胶 k 和 m , $W_{pj} = 2W_{pk} = 2W_{pm}$, 且 $d_{pj} = d_{pk} = d_{pm}$, 其中 W_{pj} 、 W_{pk} 和 W_{pm} 为相应虚拟气溶胶的数目权值, d_{pj} 、 d_{pk} 和 d_{pm} 为相应虚拟气溶胶的尺度; 把虚拟气溶胶 k 和 m 分别取代虚拟气溶胶 i 和 j . 这些处理实际上相当于把一个随机选择的虚拟气溶胶的一半来填充虚拟气溶胶 i 湿去除所留下的空缺.

2 数值模拟(Numerical simulation)

2.1 碰撞效率和清除系数的定量分析

由式 1 可知, 清除系数取决于气溶胶与雨滴的碰撞概率、碰撞效率和雨滴尺度谱. 碰撞效率

$E(d_p, D_d)$ 集中描述了湿沉降的几种主要机制: 布朗扩散(Brownian diffusion)、拦截(interception)和惯性碰撞(inertial impaction)等. 这些机制非常复杂, 各种外部因素(如气溶胶尺度谱、雨滴尺度谱、气溶胶和雨滴本身的物理化学特性、雨水含水量甚至环境温度等)均影响气溶胶的湿去除效果. Mircea 等(1998)认为碰撞效率为常数是不恰当的. Slinn(1983)从 Navier-Stocks 方程出发、使用无量纲分析并耦合实验数据得到了碰撞效率的半经验表达式:

$$E(d_p, D_d) = \left\{ \frac{4}{ReSc} [1 + 0.4 Re^{1/2} Sc^{1/3} + 0.16 Re^{1/2} Sc^{1/2}] \right\}_{\text{Brownian diffusion}} + \left\{ 4 \frac{d_p}{D_d} \left[\frac{\mu_a}{\mu_w} + (1 + 2 Re^{1/2}) \frac{d_p}{D_d} \right] \right\}_{\text{interception}} + \left\{ \left[\frac{w}{p} \right]^{1/2} \left[\frac{St - S^*}{St - S^* + 2/3} \right]^{3/2} \right\}_{\text{inertial impaction}} \quad (7)$$

式中, Re 为基于雨滴半径的雨滴雷诺数, $Re = D_d U(D_d) \rho_a / 2\mu_a$, 其中 ρ_a 为大气密度; Sc 为气溶胶的 Schmidt 数, $Sc = \mu_a / (\rho_a D_{diff})$, 其中 D_{diff} 为气溶胶的扩散系数, $D_{diff} = k_b TC_c / (3 \mu_a d_p)$, 其中 k_b 为 Boltzmann 常数 ($= 1.38054 \times 10^{-23}$), T 为大气环境的绝对温度, 单位为 K; w 和 μ_w 分别为雨滴密度和动力粘度; St 为气溶胶的 Stokes 数, $St = 2 \rho_p U(D_d) C_c / D_d$, ρ_p 为气溶胶的弛豫时间尺度, $\rho_p = \rho_p d_p^2 / (18\mu_a)$; S^* 为一个无量纲参数, $S^* = [1.2 + (1/12) \ln(1 + Re)] / [1 + \ln(1 + Re)]$. 需要注意的是, 当 $St < S^*$ 时, 认为碰撞效率 $E(d_p, D_d)$ 的惯性碰撞部分等于零. $0 \leq E(d_p, D_d) \leq 1$. 对于通常大气环境中的降雨过程, $T = 296.15 \text{ K}$, $\rho_a = 1.193 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\mu_a = 1.83245 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, $w = 997.45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\mu_w = 9.591 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, $\rho_p = 2270 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (燃煤发电厂飞灰的典型材料密度), $k_b = 6.73 \times 10^{-8} \text{ m}$.

依据式(7), 把气溶胶尺度和雨滴尺度作为 2 个自变量, 可以得到碰撞效率的曲线, 如图 1a 所示; 而雨滴直径固定为 1 mm 时和气溶胶尺度固定为 $0.5 \mu\text{m}$ 时碰撞效率的变化曲线分别如图 1b 和图 1c 所示. 由图 1a 和图 1b 可见, 布朗扩散机制主要对尺度很小的气溶胶 ($< 0.01 \mu\text{m}$) 起作用, 这些气溶胶在布朗力的作用下作无序运动, 被尺度大得多的雨滴捕集而被湿去除, 气溶胶越小, 碰撞效率越

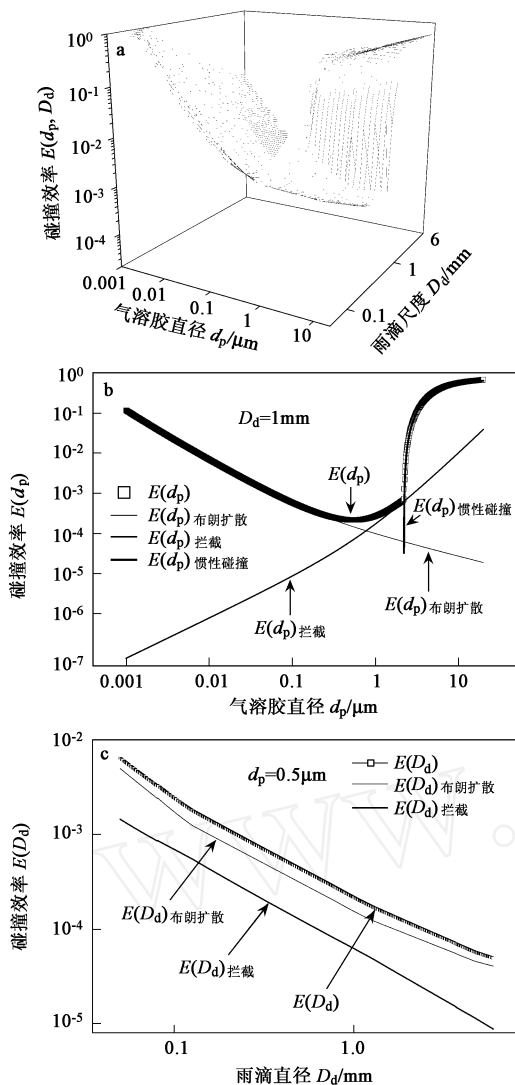


图1 碰撞效率 $E(d_p, D_d)$ 与气溶胶尺度 d_p 和雨滴尺度 D_d 的关系

Fig. 1 Collision efficiency as a function of aerosol particle size and raindrop size

高. 如果液滴的流线正好与气溶胶的轨迹交叉, 则气溶胶被液滴拦截, 这种机制对于任何尺度的气溶胶均起作用, 但对湿去除效果的贡献取决于气溶胶与雨滴的尺度比值, 一般来说该机制对任何尺度的气溶胶的影响能力均较小. 对于尺度较大的气溶胶 ($> 2 \mu\text{m}$) 而言, 其与雨滴的碰撞主要是由于惯性作用, 气溶胶越大则碰撞效率越高. 中间尺度气溶胶 ($> 0.01 \mu\text{m}$ 且 $< 2 \mu\text{m}$) 的湿去除效果很差, 通常称之为“Greenfield gap”(Greenfield, 1957); 这是由于布朗扩散机制和惯性碰撞机制均对其影响很小, 加之拦截机制也对其并无显著影响, 所以碰撞效率非常低. 由图 1a 和图 1c 可见, 当 $d_p = 0.5 \mu\text{m}$ 时, 随着

雨滴尺度的不断增加, 碰撞效率将不断衰减, 这一方面是由于雨滴雷诺数的增加导致布朗扩散机制的影响力下降; 另一方面由于雨滴尺度的增加导致气溶胶尺度与雨滴尺度之间的差距进一步加大而使得拦截机制的影响削弱; 图 1c 中碰撞效率的惯性碰撞部分在 $0.05 \text{ mm} < D_d < 6 \text{ mm}$ 范围内均等于零.

雨滴尺度谱也是影响清除系数的一个重要因素. 实际的雨滴尺度谱也可由拟合的对数正态分布所代表(Feingold *et al.*, 1986):

$$n_d(D_d) = \frac{N_d}{\sqrt{2} \ln_{\text{de}}} \exp\left[-\frac{\ln^2(D_d/D_{\text{dg}})}{2 \ln^2_{\text{de}}}\right] \frac{1}{D_d} \quad (8)$$

其中, N_d , D_{dg} , \ln_{de} 分别为雨滴总数目、雨滴几何平均尺度和雨滴几何标准偏差. 本文假设雨滴尺度谱不随时间而变动. 雨水含水量(water content, w_1)和雨强(precipitation intensity, J)是描述降雨过程的两个重要参数, 均与雨滴尺度谱有关(假设雨滴为规则球形), 可由下式表示(Mircea *et al.*, 1998):

$$w_1 = \frac{1}{6} \int_{D_d} w D_d^3 n_d(D_d) dD_d$$

$$J = 3.6 \int_{D_d} U D_d^3 U(D_d) n_d(D_d) dD_d \quad (9)$$

典型的小雨、中雨和大雨的参数如表 1 所示(Feingold *et al.*, 1986), 其中 3 种降雨类型是按照雨强来界定的.

表 1 降雨类型

降雨类型	雨强 $J / (\text{mm h}^{-1})$	雨滴数目 N_d / m^{-3}	雨滴几何平均尺度 $D_{\text{dg}} / \text{mm}$	雨滴几何标准偏差 \ln_{de}
小雨	1	172.00	0.72	2.0
中雨	10	285.45	1.22	2.0
大雨	100	473.73	2.08	2.0

依据式(6), 可以得到典型的小雨、中雨和大雨时清除系数与气溶胶尺度的关系, 如图 2 所示. 可见, 几种降雨条件下, 清除系数与气溶胶尺度的依存曲线非常类似于特定雨滴尺度时碰撞效率与气溶胶尺度的依存曲线(图 1(b)), 这表明碰撞效率对清除系数的影响非常明显.

2.2 降雨类型对气溶胶湿去除效果的影响

实际环境中气溶胶尺度谱也可以近似为对数正态分布(Jung *et al.*, 2002):

$$n_p(d_p, t) = \frac{N_p}{\sqrt{2} \ln_{\text{pg}}} \exp\left[-\frac{\ln^2(d_p/d_{\text{pg}})}{2 \ln^2_{\text{pg}}}\right] \frac{1}{d_p} \quad (10)$$

式中, N_p , d_{pg} , \ln_{pg} 分别为 t 时刻气溶胶的总数目、

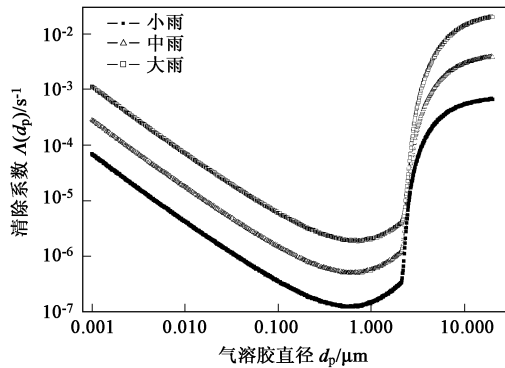


图2 雨滴尺度谱满足对数正态分布时清除系数与气溶胶尺度的关系

Fig. 2 Scavenging coefficient as a function of aerosol particle size when log-normal raindrop size distribution

几何平均尺度和几何标准偏差. 本文的数值模拟均假设气溶胶尺度谱满足对数正态分布.

利用考虑湿沉降的多重 Monte Carlo 算法求解式 (1), 可以得到不同气溶胶初始尺度谱、不同雨滴尺度 (不同的降雨类型和雨强) 时气溶胶尺度谱随时间演变的详细信息, 包括不同时刻的气溶胶尺度谱曲线、气溶胶几何平均尺度、气溶胶几何标准偏差等, 从而考察不同降雨类型和雨水含水量或雨强对特定尺度的气溶胶的湿去除效果的影响.

采用多重 Monte Carlo 算法求解式 (1), 考察了不同类型的降雨过程对气溶胶的湿去除效果, 结果如图 3 所示, 其中 a、c 和 e 分别为小雨、中雨和大雨过程中几个特定时刻处的气溶胶尺度谱曲线, b、d 和 f 分别为小雨、中雨和大雨过程中气溶胶尺度谱的几个关键统计量 (气溶胶的总数目 N_p 、几何平均体积 $v_{pg} (= d_{pg}^3/6)$ 和几何标准偏差 σ_{pg}) 随时间的演变曲线, 此时初始时刻气溶胶的总数目 $N_{p,0} = 10^6 \text{ m}^{-3}$, 几何标准偏差 $\sigma_{pg,0} = 1.3$, 几何平均尺度 $d_{pg,0}$ 分别为 0.01、0.5 和 5 μm ; 雨滴尺度谱满足对数正态分布, 小雨、中雨和大雨的雨强分别为 1、10 和 100 mm h^{-1} .

由图 3 可知, 对于 $d_{pg,0} = 0.01 \mu\text{m}$ 的气溶胶, 主要受布朗扩散所主导而被雨滴所捕集, 而且越小的气溶胶越易被捕集, 所以, 虽然气溶胶的总数目不断减少, 但气溶胶的平均体积不断增大, 气溶胶尺度谱曲线不断偏移向粒径较大的一端. 对于 $d_{pg,0} = 5 \mu\text{m}$ 的气溶胶, 则与之正好相反, 它们主要由于惯

性作用与雨滴碰撞而被湿去除, 气溶胶尺度越大, 惯性则越大, 也越易与雨滴碰撞, 所以尺度较大的气溶胶迅速被雨滴所清除; 表现在图中为气溶胶总数目不断减少且气溶胶平均体积也不断减少, 气溶胶尺度谱曲线逐渐偏移向粒径较小的一端; 对于处于“Greenfield gap”区域的中等尺度气溶胶 (本文中的 $d_{pg,0} = 0.5 \mu\text{m}$ 的气溶胶), 很难被降雨过程湿去除, 难以判断气溶胶平均尺度、气溶胶尺度谱曲线的演化趋势.

综上所述, 对于任意尺度的气溶胶, 大雨依次比中雨和小雨具有更好的湿去除效果, 这是由于雨强的增加间接增加了雨水含水量, 即单位体积内雨滴总体积 (进而总表面积) 增加, 使得捕集气溶胶的机会增加; 3 种降雨类型对大尺度气溶胶的湿去除效果都要好于对小尺度气溶胶的湿去除效果; 另外, 3 种降雨类型对于中等尺度气溶胶的清除效果均不理想, 相比较而言, 大雨的清除效果稍微好一些. 实际上, 降雨对气溶胶的清除效果直接与气溶胶的清除系数相关, 如图 2 所示, 雨强的增加使得任何尺度的气溶胶的清除系数均增加, 其中大尺度和小尺度气溶胶的清除系数增加尤为明显, 只有直径在 2 μm 左右的气溶胶的清除系数增加不明显, 从而导致雨强越大, 对小尺度和大尺度气溶胶的湿去除效果越好, 而对中等尺度气溶胶没有明显的湿去除效果. 另外, 对于任何一种降雨类型, 大尺度气溶胶的清除系数都要明显地依次大于小尺度和中等尺度气溶胶的清除系数, 这也是为什么降雨对大尺度气溶胶的湿去除效果依次强于小尺度和中等尺度气溶胶的原因.

值得注意的是, 对于小尺度和中等尺度气溶胶来说, 其尺度谱的演变过程基本符合“自保持”曲线, 即气溶胶尺度谱曲线在不同时刻仍然保持初始时刻的对数正态分布形式 (如图 3a、3c 和 3e 所示), 但是对于大尺度气溶胶, 其尺度谱并不严格保持“自保持”状态, 这是由于清除系数在该气溶胶尺度范围内急剧上升的缘故. 而 Jung 等 (2003) 所采用的矩方法认为气溶胶尺度谱始终具有“自保持”曲线, 这必将导致较大的误差.

降雨对气溶胶的湿去除是一个非常复杂的过程, 本文采用的微物理模型还没有考虑气溶胶的不规则形状、雨滴和气溶胶的冷凝/蒸发或核化结晶 (Ackerman *et al.*, 1995)、凝并 (Zhang *et al.*, 2004) 等现象. 另外, 不同化学成分气溶胶的湿沉降过程

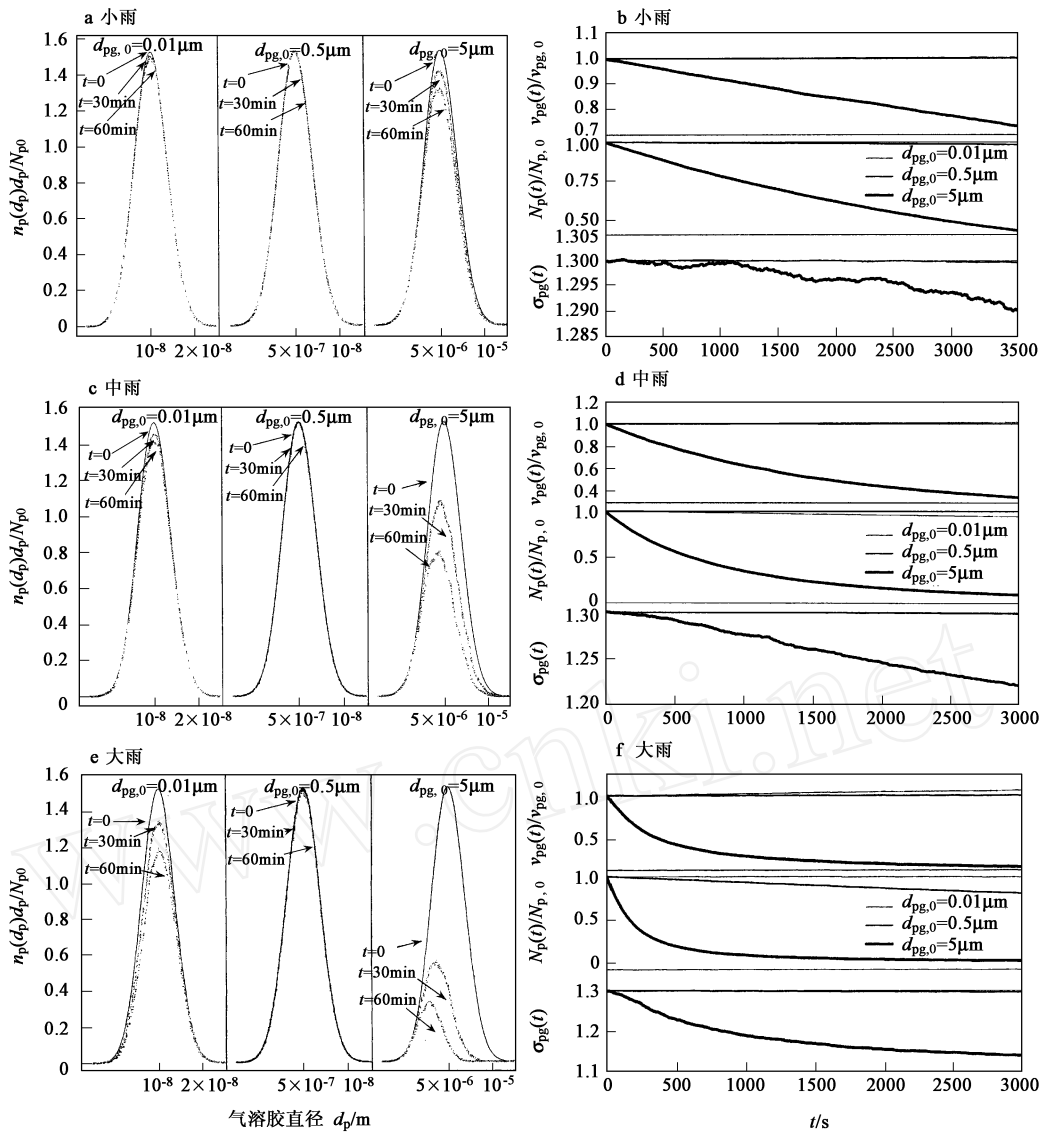


图3 不同降雨类型下气溶胶的湿去除过程(a、c、e. 不同降雨类型下气溶胶尺度谱的时间演变过程; b、d、f. 不同降雨类型下气溶胶的总数目、几何平均体积和几何标准偏差随时间的演变曲线)

Fig. 3 The wet scavenging of aerosols by different precipitation styles(a, c, e. The time evolution of aerosol size distribution when different precipitation styles; b, d, f. The time evolution of aerosol number concentration, geometric mean volume and geometric standard deviation when different precipitation styles)

也存在差异 (Chate *et al.*, 1997), 如吸湿性气溶胶的尺度和密度等物理属性与空气湿度、悬浮高度等有关 (Chate *et al.*, 2003), 当然, 雨滴的尺度、密度和酸碱度等也与高度、空气湿度和大气化学成分等密切相关 (徐玲等, 1992; 王明康等, 1994; 秦瑜, 1992), 对这些因素的描述需要建立相应的微化学模型 (王明康等, 1994; 秦瑜, 1992).

本文只考虑了布朗扩散、拦截和惯性碰撞 3 种气溶胶湿沉降机制, 实际上, 静电捕集也是一种重要而复杂的湿沉降机制 (Andronache, 2004; Tinsley

et al., 2001). 另外, 如何改善“Greenfield gap”区域的气溶胶的碰撞效率也是一个重点问题.

仿照降雨对气溶胶的湿去除, 可以发展有效的人工喷淋过程来对火电厂产生的大量飞灰颗粒特别是危害极大的可吸入颗粒物进行清除.

3 总结 (Conclusions)

1) 利用清除系数参数化气溶胶湿沉降过程的方法无法得到特定尺度气溶胶的湿沉降过程的细节信息, 针对此缺点, 本文采用所发展的一种随机算

法-多重 Monte Carlo 算法求解考虑气溶胶湿沉降的通用动力学方程, 获得了气溶胶尺度谱时间演变的细节信息.

2) 利用多重 Monte Carlo 算法对降雨过程中气溶胶湿沉降的数值模拟表明, 大雨对于任何尺度的气溶胶的湿去除效果依次强于中雨和小雨; 3 种降雨类型对大尺度气溶胶均具有很好的湿去除效果, 对于小尺度气溶胶也有一定的湿去除效果, 但对中等尺度气溶胶的湿清除效果不明显; 雨强增加将改善气溶胶的湿去除效果.

致谢: 感谢北京大学大气科学系秦瑜教授对本文的指导.

参考文献 (References):

- Ackerman A S, Hobbs P V, Toon O B. 1995. A model for particle microphysics, turbulent mixing, and radiative transfer in the stratocumulus-topped marine boundary layer and comparisons with measurements [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 52(8), 1204—1236
- Andronache C. 2004. Diffusion and electric charge contributions to below-cloud wet removal of atmospheric ultra-fine aerosol particles [J]. *Journal of Aerosol Science*, 35(12): 1467—1482
- Chate D M, Kamra A K. 1997. Collection efficiencies of large water drops collecting aerosol particles of various densities [J]. *Atmospheric Environment*, 31(11): 1631—1635
- Chate D M, Rao P S P, Naik M S, *et al.* 2003. Scavenging of aerosols and their chemical species by rain [J]. *Atmospheric Environment*, 37(18): 2477—2484
- Feingold G, Levin Z. 1986. The lognormal fit to raindrop spectra from frontal convective clouds in Israel [J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25(10), 1346—1364
- Greenfield S. 1957. Rain scavenging of radioactive particulate matter from the atmosphere [J]. *Journal of Meteorology*, 14(2): 115—125
- Jung C H, Kim Y P, Lee K W. 2002. Analytic solution for polydispersed aerosol dynamics by a wet removal process [J]. *Journal of Aerosol Science*, 33(5): 753—767
- Jung C H, Kim Y P, Lee K W. 2003. A moment model for simulating raindrop scavenging of aerosols [J]. *Journal of Aerosol Science*, 34(9): 1217—1233
- Mircea M, Stefan S. 1998. A theoretical study of the microphysical parameterization of the scavenging coefficient as a function of precipitation type and rate [J]. *Atmospheric Environment*, 32(17): 2931—2938
- Mircea M, Stefan S, Fuzzi S. 2000. Precipitation scavenging coefficient: influence of measured aerosol and raindrop size distributions [J]. *Atmospheric Environment*, 34(30): 5169—5174
- Peng H, Qin Y. 1992. The Parameterization of the influence of precipitation on the washout of aerosol particles [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 16(5): 622—630 (in Chinese)
- Qin Y. 1992. Numerical simulation of pollutant removal by precipitation in south China during spring [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 12(1): 68—77 (in Chinese)
- Sheng P X, Mao J T, Li J G, *et al.* 2003. *Atmospheric physics* [M]. Beijing: Peking University Press: 332—333 (in Chinese)
- Slinn W G N. 1983. Precipitation scavenging [A]// Raderson D. *Atmospheric Sciences and Power Production-1979* [C]. Washington DC: Division of Biomedical Environmental Research, US Department of Energy: Chapter 11
- Tinsley B A, Rohrbaugh R P, Hei M. 2001. Electroscavenging in clouds with broad droplet size distributions and weak electrification [J]. *Atmospheric Research*, 59-60(1): 115—135
- Xu L, Qin Y. 1992. The parameterization of wet removal processes of gases under cloud base [J]. *Environmental Chemistry*, 11(1): 1—11 (in Chinese)
- Wang M K, Liu X H, Ren C S. 1994. Numerical simulation of scavenging and acidification in cumulus clouds [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 18(2): 224—232 (in Chinese)
- Zhang L M, Michelangeli D V, Taylor P A. 2004. Numerical studies of aerosol scavenging by low-level, warm stratiform clouds and precipitation [J]. *Atmospheric Environment*, 38(28): 4653—4665

中文参考文献:

- 彭红, 秦瑜. 1992. 降水对气溶胶粒子清除的参数化 [J]. *大气科学*, 16(5): 622—630
- 秦瑜. 1992. 华南地区春季降水对污染物的清除及其酸化的数值模拟 [J]. *环境科学学报*, 12(1): 68—77
- 盛裴轩, 毛节太, 李建国, 等. 2003. *大气物理学* [M]. 北京: 北京大学出版社, 332—333
- 徐玲, 秦瑜. 1992. 云下气体清除过程参数化 [J]. *环境化学*, 11(1): 1—11
- 王明康, 刘小红, 任传森. 1994. 积云的清除作用与其酸化的数值模拟 [J]. *大气科学*, 18(2): 224—232