

气溶胶粒子的降雨清除^{*}

姚克亚 郭俊 傅云飞 刘勇

(中国科学技术大学地球和空间科学系, 合肥 230026)

摘 要 讨论了雨滴在云下对气溶胶粒子的清除, 考虑了气溶胶粒子和雨滴之间的碰并系数, 雨滴谱以及气溶胶粒子谱对清除系数的影响。在 $0.1 < r < 1.0 \mu\text{m}$ 范围内, 利用不同的碰并系数表达式算得的降雨对该区间内气溶胶粒子的清除系数相差很大, 但对总质量清除系数影响不大; 雨滴谱的改变对总质量清除系数有很大影响; 不同的气溶胶粒子谱对总质量清除也有一定影响。雨滴谱用 Marshall-Palmer 分布; 气溶胶粒子谱用 Junge 分布 $n(r) = ar^b$ 算得清除系数与雨强关系为 $\Lambda = 0.51I^{0.78}$, 而气溶胶粒子谱改用三参数分布 $n(r) = ar^b e^{-cr}$ 得到清除系数与雨强的关系为 $\Lambda = 0.25I^{0.77}$ 。

关键词 碰并系数 雨滴谱 气溶胶粒子谱 雨清除系数

1 引言

悬浮在大气中的气溶胶粒子有相当大的一部分通过云和降水过程清除, 即所谓云内清除和云下清除。云下清除是指雨滴 (或其他降水粒子) 在降落过程中, 主要通过惯性碰并过程和布朗扩散作用, 捕获气溶胶粒子, 使之从大气中清除的过程。云下清除可以看作是一种指数衰减过程, 这种情况下, 空气中气溶胶粒子浓度变化率可以表示为^[1]

$$\frac{dn}{dt} = -\Lambda n, \quad (1)$$

其中, n 是物种 (气溶胶粒子) 浓度, Λ 是降雨清除系数 (s^{-1}), 它表示大气中气溶胶粒子在单位时间内被雨滴捕获后清除的比率。考虑到气溶胶粒子粒径很小, 在相对静止的大气中其降落末速度可以忽略, 作为一种近似, Λ 可以表示为^[2]

$$\Lambda = \int_0^\infty \pi R^2 V(R) E(r, R) N(R) dR, \quad (2)$$

式中, r 和 R 分别为气溶胶粒子和雨滴的半径, $N(R)$ 是半径为 R 的雨滴数密度, $V(R)$ 是雨滴下落末速度, $E(r, R)$ 是雨滴和气溶胶粒子的碰并系数。

若考虑多分散气溶胶, 则降雨对气溶胶的总质量清除系数 Λ 为

$$\Lambda = \frac{\int_0^\infty \left(\int_0^\infty \pi R^2 V(R) E(r, R) N(R) dR \right) m(r) dr}{\int_0^\infty m(r) dr}, \quad (3)$$

1999-05-10 收到

^{*} 中国科学院“九五”重大A项目KZ951-A1-403-01-01专题资助

其中, $m(r)$ 是粒径为 r 的气溶胶粒子质量密度。

研究^[3]表明, 清除系数 Λ 可以用降雨强度 I (mm/h) 进行参数化, 即

$$\Lambda = AI^B, \quad (4)$$

参数 A 和 B 取决于雨滴和气溶胶粒子谱分布 $N(R)$ 和 $n(r)$ 、雨滴下落末速度 $V(R)$ 以及雨滴和气溶胶粒子碰并系数 $E(r, R)$ 。下面将讨论这些因子对清除系数 Λ 的影响。

2 粒子谱

2.1 雨滴谱

Marshall-Palmer 公式被广泛用以描述雨滴数密度随尺度的分布:

$$N_1(D) = N_0 \exp(-\lambda D), \quad (5)$$

式中, $\lambda = 41I^{-0.21}$ (cm^{-1}), $N_0 = 0.08 \text{ cm}^{-4}$, D 是雨滴直径。许多观测表明, N_0 是雨强的函数, 而不是确定的常数, Joss 等^[4]发现, $0.03 \leq N_0 \leq 1.0 \text{ cm}^{-4}$ 。为了考察雨滴谱对清除系数的影响, 按公式 (5) 的形式变换 N_0 和 λ , 取

$$N_2(D) = N_0 \exp(-\lambda D), \quad (6)$$

式中, $\lambda = 35I^{-0.22}$ (cm^{-1}), $N_0 = 1 \text{ cm}^{-4}$, 和

$$N_3(D) = N_0 \exp(-\lambda D), \quad (7)$$

式中, $\lambda = 27I^{-0.27}$ (cm^{-1}), $N_0 = 0.03 \text{ cm}^{-4}$ 。

2.2 气溶胶粒子谱

气溶胶粒子谱常用 Junge 分布:

$$n(r) = \alpha r^{-\beta}, \quad (8)$$

式中, α 和 β 为系数, 不同天气条件下 α 和 β 有所不同。张维等^[5]在上海进行夏季大气气溶胶观测时给出: 雨天情况下, 对于细粒子, $\alpha = 4.04$, $\beta = 2.94$; 对于粗粒子, $\alpha = 11.49$, $\beta = 3.22$ 。

游荣高等^[6]针对我国城市气溶胶尺度谱提出了三参数经验公式:

$$n(r) = ar^b e^{-cr}, \quad (9)$$

在阴天, 风速小于 4 m/s 的情况下, 参数 a 、 b 、 c 分别取 $a = 121.354$, $b = -0.884$, $c = 2.406$ 。

3 碰并系数

Greenfield^[7]首先研究了各种大气清除机理的作用, 考虑了布朗扩散, 湍流应力扩散以及惯性碰并, 发现当粒子半径 $r < 0.1 \mu\text{m}$ 时, 布朗扩散控制粒子捕获, $r > 1.0 \mu\text{m}$ 时, 惯性碰并控制粒子捕获, 而对半径处于 $0.1 \mu\text{m} \leq r \leq 1.0 \mu\text{m}$ 范围的粒子, 清除系数相当低, 这个低值区称为 Greenfield 缺口。

当给定雨滴和气溶胶粒子谱分布后, 清除系数 Λ 取决于碰并系数 E , E 的表达式十分复杂, 常采取分段考虑。当气溶胶粒子半径 $r < 0.1 \mu\text{m}$ 时, Friedlander^[8] 导出近似关系式:

$$E_1 = 4Pe^{-1}(1 + 0.4Re^{1/6}Pe^{1/3}), \quad r < 0.1\mu\text{m}, \quad (10)$$

式中, $Pe = 2RV / D_B$ 是 Peclet 数, 其中 D_B 是气溶胶粒子扩散系数, $Re = 2RV / \nu$ 是雷诺数。

对于处于 $0.1 \mu\text{m} < r < 1.0 \mu\text{m}$ 之间的气溶胶粒子与雨滴碰并机制比较复杂, 目前还没有一个准确而又简单的公式来表示这个区间的碰并系数。

Zebe^[8] 对于亚微米粒子因扩散而被雨滴捕获给出以下公式:

$$E_2 \cong 3.18Pe^{-2/3}. \quad (11)$$

对于 $R < 1 \text{ mm}$ 的雨滴, Hample 等^[8] 所进行的实验结果与 Zebe 公式相当符合, 但两者的系数并不一致, Hample 给出的公式为

$$E_2 \cong 1.68Pe^{-2/3}. \quad (12)$$

Suneja^[9] 扩展 (11) 式到位势流的情况, 给出

$$E_2 \cong 2.18Pe^{-1/2} + 2I_1, \quad (13)$$

其中, $I_1 = r / R$ 。

彭红等^[10] 对 R 小于及大于 $500 \mu\text{m}$ 的雨滴对 $0.1 \mu\text{m} < r < 1.0 \mu\text{m}$ 的粒子的碰并使用的碰并系数为

$$E_2 = \begin{cases} 1.68Pe^{-2/3}, & R < 500\mu\text{m}, \\ \frac{S}{1+S^2}, & R \geq 500\mu\text{m}, \end{cases} \quad (14)$$

式中, S 是 Stokes 参数, $S = (2r^2\rho_p V) / (9\eta_a R)$, ρ_p 是气溶胶粒子质量密度, 计算中取 $\rho_p = 1.7 \text{ g/cm}^3$, η_a 是空气动力学粘性系数。

Slinn^[11] 提出了一个使用很方便的经验公式:

$$E_2 = 3r / R. \quad (15)$$

对于 $r > 1.0 \mu\text{m}$ 的粒子, 惯性碰并是主要过程, 对位势流近似中的惯性碰并, Slinn 给出:

$$E_3 = 1 - \exp(-S/b), \quad (16)$$

式中, b 是实验常数, 取 $b = 2$ 。

4 清除系数

为了考察碰并系数 E 、气溶胶粒子谱 $n(r)$ 和雨滴谱 $N(R)$ 对清除系数 Λ 的影响, 我们做了下面计算, 计算中取雨滴半径 R : $0.05 \sim 3.0 \text{ mm}$; 气溶胶粒子半径 r : $0.01 \sim 10$

μm , 雨滴下落末速度取为^[12]

$$V(R) = \begin{cases} 7.6R, & 0.05 \text{ mm} \leq R < 0.5 \text{ mm}, \\ 5.95R^{1/2}, & 0.5 \text{ mm} \leq R \leq 3.0 \text{ mm}, \end{cases} \quad (17)$$

式中, R 的单位为 mm , $V(R)$ 的单位为 m/s .

4.1 碰并系数对清除系数的影响

图 1 给出了对应不同的碰并系数 E_2 算得的降雨对半径为 $0.1 \mu\text{m} < r < 1.0 \mu\text{m}$ 之间的粒子的清除系数, 计算中气溶胶粒子谱分布取 (8) 式, 雨滴谱分布取 (5) 式.

若 E_2 用 (11) 式, 按 (4) 式拟合得到用雨强表示的清除系数为

$$\Lambda = 0.000049I^{0.56}, \quad (18)$$

Λ 的单位为 h^{-1} (下同).

E_2 用 (12)、(13)、(14)、(15) 式拟合的参数化公式则分别为

$$\Lambda = 0.000026I^{0.56}, \quad (19)$$

$$\Lambda = 0.0034I^{0.61}, \quad (20)$$

$$\Lambda = 0.028I^{1.01}, \quad (21)$$

$$\Lambda = 0.0043I^{0.61}. \quad (22)$$

图 2 则显示了用 (11)、(12)、(13)、(14) 和 (15) 式 5 种不同的 E_2 表达式计算的降雨对粒子总质量清除系数, 5 条线完全重合, 按 (4) 式拟合的总质量清除系数为

$$\Lambda = 0.51I^{0.78}. \quad (23)$$

从上述计算结果可以看出, 在 $0.1 \mu\text{m} < r < 1.0 \mu\text{m}$ 区间, 碰并系数 E_2 的选取对总质量清除系数的影响不敏感, 但对 $0.1 \mu\text{m} < r < 1.0 \mu\text{m}$ 亚微米粒子的清除有很显著的影响, 选取不同的 E_2 表达式, 算得的该区间清除系数值相差很大, 所以在计算大气中这一区间硫酸粒子的降雨清除时, 应当慎重选取 E_2 表达式.

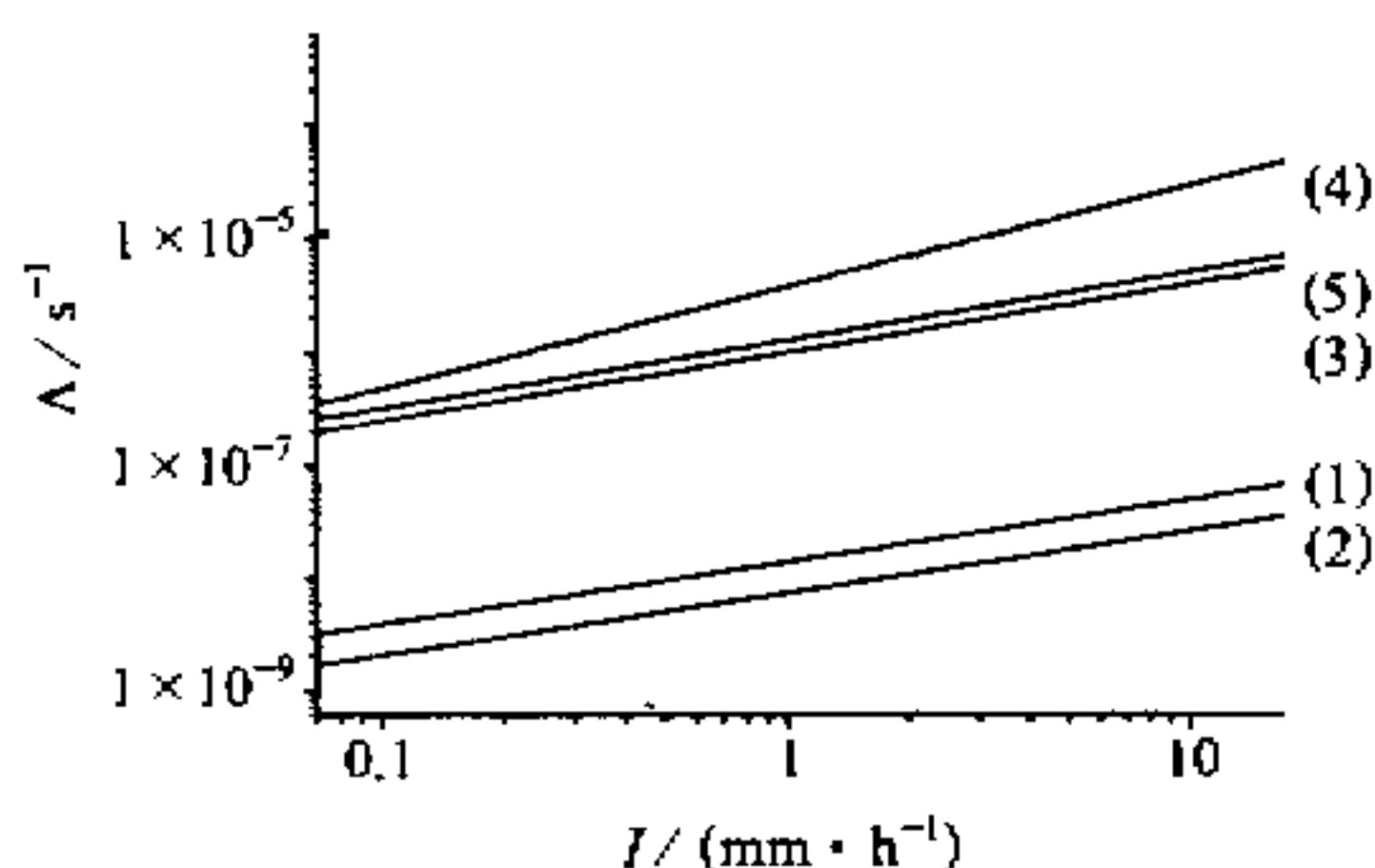


图 1 用不同的 E_2 公式计算的
 $0.1 \mu\text{m} < r < 1.0 \mu\text{m}$ 的粒子的清除系数
(1)、(2)、(3)、(4)、(5) 分别对应于
(11)、(12)、(13)、(14)、(15) 式

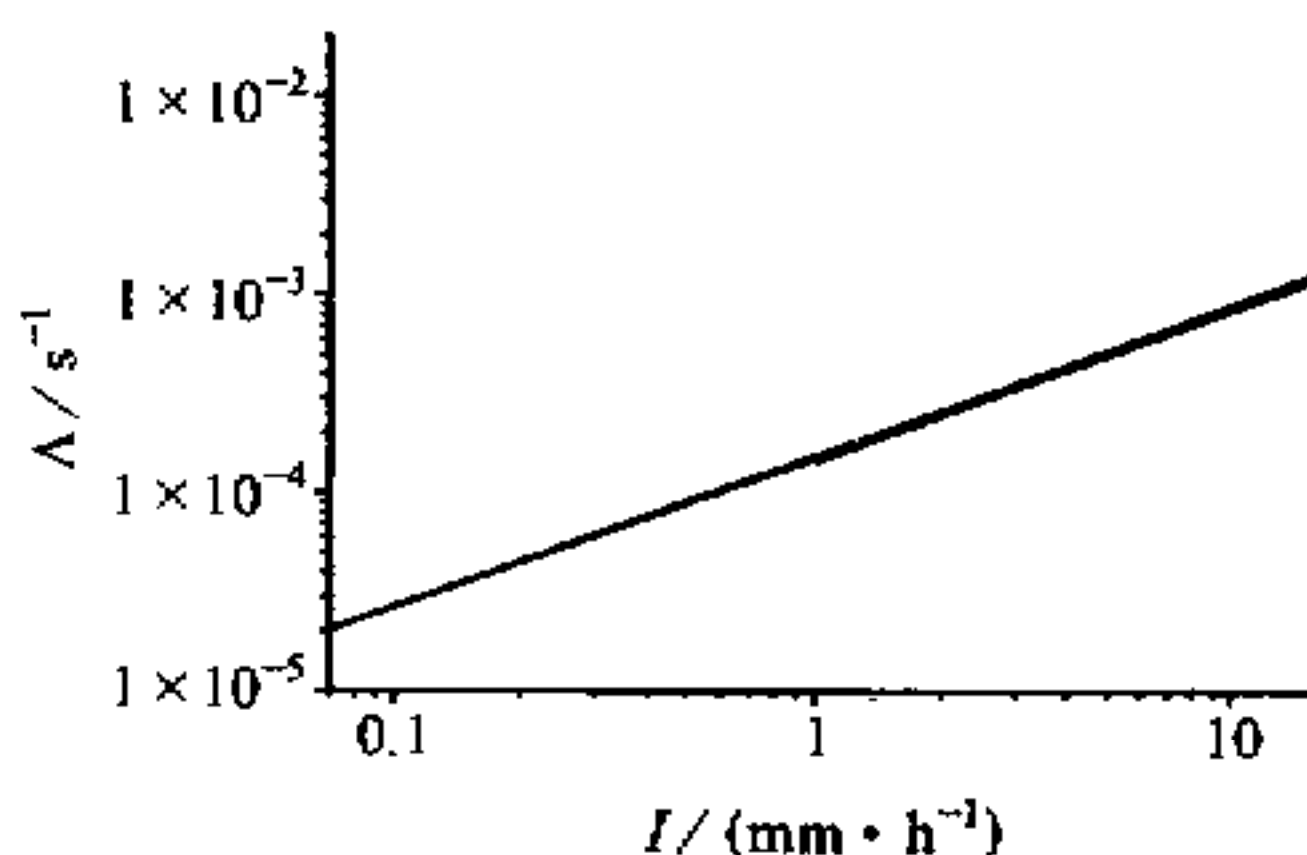


图 2 用不同的 E_2 计算的总清除系数
5 条线重合

4.2 雨滴谱对清除系数的影响

为了考察雨滴谱对粒子总质量清除系数的影响, 取 (5)、(6)、(7) 式的雨滴分布做了计算, 计算中气溶胶粒子分布取 (8) 式, E_2 取 (15) 式。

图 3 给出了计算结果, 按 (4) 式拟合的总质量清除系数与雨强的关系式分别为

$$\Lambda = 0.51I^{0.78}, \quad (24)$$

$$\Lambda = 11.56I^{0.79}, \quad (25)$$

$$\Lambda = 0.90I^{0.93}, \quad (26)$$

可以看出, 雨滴谱改变对总质量清除系数的影响很大, 在讨论某一地区降雨对气溶胶粒子总质量清除时应当了解其雨滴分布特征。

4.3 气溶胶粒子谱对清除系数的影响

图 4 显示了不同气溶胶粒子谱分布情况下算得的降雨对气溶胶粒子总质量清除系数。计算中气溶胶粒子谱分别取 (8) 式和三参数分布 (9) 式, 雨滴谱取 (5) 式。由图 4 可以看出, 不同的气溶胶粒子谱分布对于清除系数也有一定的影响, 用三参数气溶胶粒子谱计算, 按 (4) 式拟合的参数化公式为

$$\Lambda = 0.25I^{0.77}. \quad (27)$$

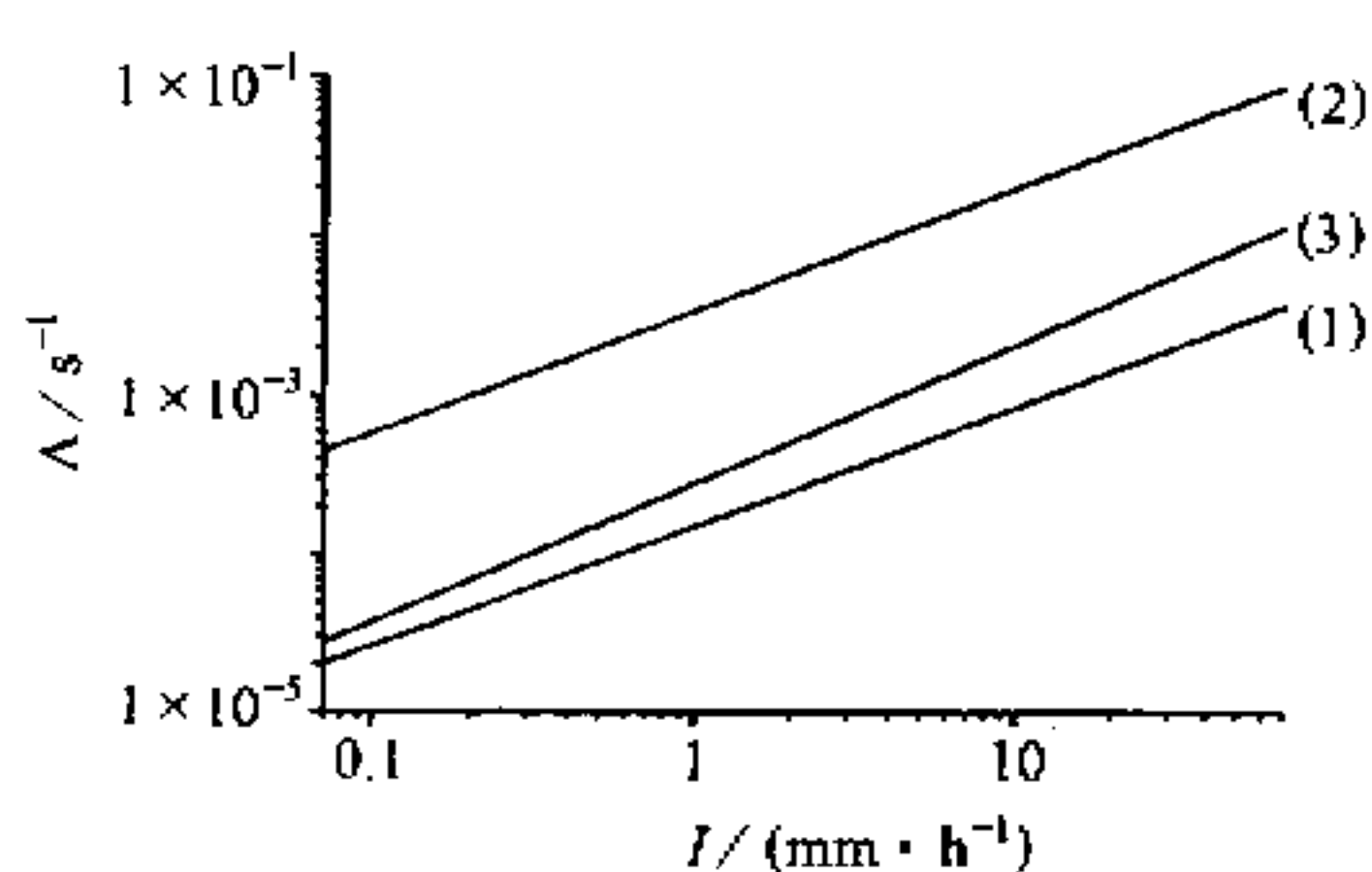


图 3 用不同的 $N(D)$ 公式计算的总清除系数
(1)、(2)、(3) 分别对应于 (5)、(6)、(7) 式

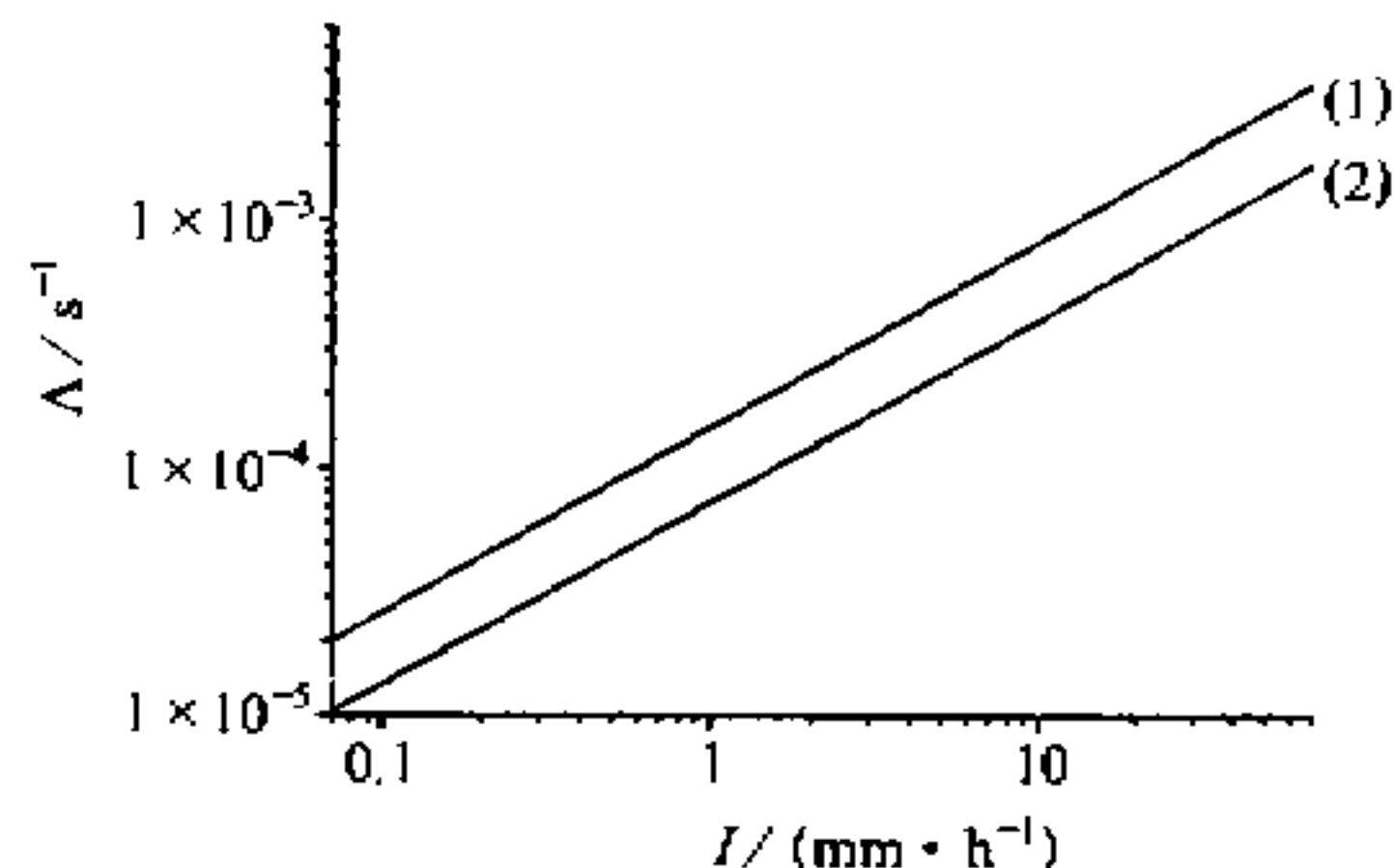


图 4 用不同的气溶胶粒子谱分布计算的总清除系数
(1)、(2) 分别对应于 (8)、(9) 式

5 结语

(1) $0.1 \mu\text{m} < r < 1.0 \mu\text{m}$ 区间粒子和雨滴碰并系数 E_2 表达式的选取, 对这一区间清除系数的计算有很大影响, 但对总质量清除系数的计算影响不大, 在计算降雨对气溶胶粒子总质量清除时, E_2 可以选取 (15) 式的简单形式。

(2) 雨滴谱改变对总质量清除系数影响很大, 计算某一地区降雨对气溶胶粒子总质量清除时, 应当了解其雨滴谱特征。

(3) 气溶胶粒子谱对总质量清除系数也有一定影响。

参 考 文 献

- 1 Pruppacher, H.R. and J.D. Klett, 1978, *Microphysics of Clouds and Precipitation*, D. Reidel Publishing Company.
- 2 Seinfeld, J.H., 1986, *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, John Wiley & Sons.
- 3 Scott, B.C., 1982, Theoretical estimates of the scavenging coefficient for soluble aerosol particles as a function of precipitation type: rate and altitude, *Atmospheric Environment*, **16**, 1753~1762.
- 4 Joss, J. and A. Waldvogel, 1969, Raindrop size distribution and sampling size errors, *J. Atmos. Sci.*, **26**, 566.
- 5 张维、邵德民、沈志来等, 1990, 上海夏季大气气溶胶观测和分析, *大气科学*, **14**(2), 225~231.
- 6 游荣高、任丽新, 1981, 大气气溶胶的浓度与谱分布变化的研究, *科学探索*, **1**, 11~22.
- 7 Greenfield, S., 1957, Rain scavenging of radioactive particulate matter from atmosphere, *J. Meteor.*, **14**, 115~125.
- 8 S. 图梅, 1984, 大气气溶胶 (中译本), 北京: 科学出版社, p94.
- 9 Suneja, S.K., 1973, Capture of particles by drops falling at high speeds, *J. Colloid Interface Sci.*, **44**, 509~516.
- 10 彭红、秦瑜, 1992, 降水对气溶胶粒子清除的参数化, *大气科学*, **16**(5), 622~630.
- 11 Slinn, W.G.N., 1977, Some approximations for the wet and dry removal of particles and gases from the atmosphere, *J. Wat. Air Soil Pollut.*, **7**, 513~543.
- 12 王永生等, 1988, 大气物理学, 北京: 气象出版社.

Rain Scavenging of Aerosol Particles

Yao Keya, Kuo Jun, Fu Yunfei and Liu Yong

(Department of Earth and Space of Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract A study for aerosol scavenging below clouds by raindrops is undertaken. The influences of the collision efficiency and size distributions of aerosols and raindrops on the wet scavenging coefficients are discussed. The different collision efficient expressions for aerosols ranging from $0.1\mu\text{m}$ to $1.0\mu\text{m}$ have evident impacts on the scavenging coefficient of the aerosols in this range, but have little effect on the scavenging of aerosols over the whole size range. The raindrop size distribution affects the scavenging coefficient greatly. The aerosol size distribution affects the scavenging as well. With the Marshall-Palmer distribution for raindrops, the aerosol size distribution $n(r) = ar^b$ and $n(r) = ar^b e^{-cr}$, the parameterization of the scavenging coefficient is $\Lambda = 0.51I^{0.78}$ and $\Lambda = 0.25I^{0.77}$, respectively.

Key words collision efficiency raindrop size distribution aerosol size distribution rain scavenging coefficients