

# 适用于大中尺度污染物输送模式的 粒子干沉降参数化方案

王喜全

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要** 用“二层”模式给出一个适用于污染物输送模式的粒子干沉降参数化方案, 它比较详细地考虑了近地面层的气象条件, 地表特性和气溶胶粒子的物理、化学特性等。从计算值与观测值的比较来看, 计算值的离散范围能涵盖所有的观测结果, 因而从总体上看此参数化方案是合理的, 能够描述粒子总污染物干沉降的主要物理过程及机制。

**关键词** 污染物输送 干沉降 参数化

## 1 引言

气溶胶粒子干沉降是粒子态污染物和沙尘清除的重要过程。它依赖于近地面层的气象条件(如风速、稳定度等), 地表特性(如地表粗糙度、植被结构等)和气溶胶粒子的物理、化学特性(如粒子尺度、布朗扩散率、密度等)。在现有的大、中尺度污染物输送模式中, 有几种处理这一过程的方法。一种方法设某一尺度区间的粒子沉降速度为常数; 另一种方法是用半经验公式计算沉降速度。这两种方法简单实用, 但不能同时考虑上述各种因子的影响。

粒子态污染物干沉降的研究主要有两种模型, 一种是所谓的阻力模型, 另一种是所谓的“二层”模型。本文的研究主要以“二层”模型为基础, 针对大中尺度污染物输送模式的粒子干沉降建立参数化方案。该方案以最贴近地面的风场、温度场等作为输入资料, 连同地表拖曳系数、表面系数, 计算出模式最底层粒子态污染物的干沉降速度。

## 2 气溶胶粒子干沉降“二层”模式

将大气边界层分为贴地表面层和近地面层两个层次(图1, 参见文献[1])。在贴地表面层中, 其厚度 $\delta$ 与地表状况及粗糙物的形状有关, 粒子的沉降速度主要由粘性效应和粗糙物性质及粒子的物理性质决定, 而与空气的层结状况无关。至于近地面层, 其厚度 $h$ 一般在几十米到一百米之间, 粒子的沉降主要由湍流、重力和大气热力稳定度决定。现有的大中尺度污染物输送模式的最低层就处于这个层次。本文的主要目的就是求出这一层次上的污染物粒子的干沉降速度。

在高度 $h$ 上粒子通量可表示为

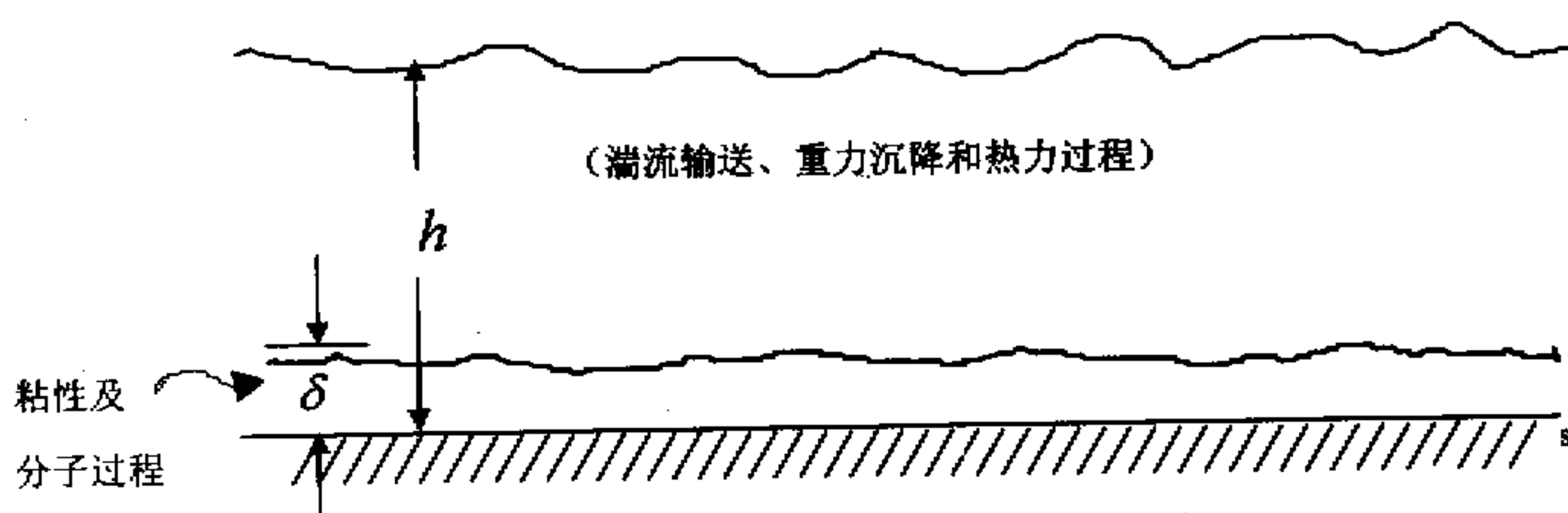


图1 边界层示意图

$$\Phi_h = K_{sl}(n_h - n_s) + K_{dh}n_h, \quad (1)$$

其中,  $h$ 、 $\delta$ 、 $s$  表示层次的标号,  $n$  为粒子的数密度,  $K_{sl}$  为近地面层粒子湍流输送速率,  $K_d$  为粒子的漂移速度 (如重力、电力及其它漂移速度)。常用气象符号意义的说明从略。

在高度上粒子通量可表示为

$$\Phi_\delta = K_{il}(n_\delta - n_s) + K_{d\delta}n_\delta, \quad (2)$$

其中,  $K_{il}$  为地表层粒子输送速率。

若假定沉降过程稳定, 即  $\Phi_s = \Phi_\delta = \Phi_h$ , 则有

$$\Phi_h = K_{dep}(n_h - n_s) + K_{dh}n_h, \quad (3)$$

其中,  $K_{dep}$  为总体输送速度, 其具体表达式由 (1)、(2) 式消去未知量  $n_\delta$  得

$$K_{dep} = \frac{(n_h - n_s)^{-1}}{[1 + (K_{il} + K_{d\delta})/K_{sl}]} [K_{il}(n_h - n_s) - n_h(K_{d\delta} - K_{dh})]. \quad (4)$$

若再假定接收面为完全吸收面, 即  $n_s = 0$ , 则有

$$\Phi_h = V_{dep}n_h, \quad (5)$$

其中,

$$V_{dep} = K_{dep} + K_{dh}, \quad (6)$$

这里

$$K_{dep} = \frac{K_{sl}(K_{il} + K_{d\delta} - K_{dh})}{K_{sl} + K_{il} + K_{d\delta}}. \quad (7)$$

若假设  $K_d$  只由重力沉降单一决定, 且  $K_{dh} = K_{d\delta} = V_g$ , 则 (6)、(7) 式最终简化为

$$V_{dep} = K_{dep} + V_g, \quad (8)$$

$$K_{dep} = \frac{K_{sl}K_{il}}{K_{sl} + K_{il} + V_g}. \quad (9)$$

考虑沉降物的反弹现象, 引入参数  $0 < f \leq 1$ , 则有

$$K_{\text{dep}} = \frac{K_{\text{il}}(K_{\text{sl}}f)}{K_{\text{sl}} + (K_{\text{il}}f) + V_g} \quad (10)$$

根据常值通量层的特点及将粒子沉降与动量输送相比拟, (10) 式中  $K_{\text{sl}}$  和  $K_{\text{il}}$  及  $V_g$  的一般表达式采用如下形式:

$$K_{\text{sl}} = A_p C_D u_h = A_p \frac{u_*^2}{u_h}, \quad (11)$$

$$K_{\text{il}} = C_{D0}^{1/2} G u_*, \quad (12)$$

$$V_g = \frac{2}{9} (\rho_p r^2 g / \eta) \{1 + (\lambda / r) [A + B \exp(-cr / \lambda)]\}, \quad (13)$$

其中,  $A_p$  为粒子通量与动量通量比率;  $C_{D0} = (u_* / u_\delta)^2$ ;  $G$  是粒子在地表层的沉降效率, 它决定于地表层及粒子的特性。  $u_*$  是摩擦速度, 下面确定它在不同温度层结下的表达式。

先定义层结参数:

$$R_b = \Delta z \frac{g}{\theta_s} \frac{\Delta \theta}{u_h^2}, \quad (14)$$

其中,  $\Delta z$  为模式最底层高度或格距 (参数化方案的参考高度),  $\Delta \theta$  为模式最底层与地表位温 ( $\theta_s$ ) 的差值。

对于近中性层结 ( $-0.005 < R_b < 0.005$ ), 有

$$u_* = k u_h / \ln(\Delta z / z_0). \quad (15)$$

对于不稳定层结 ( $R_b < -0.005$ ), 有

$$u_* = k u_h / [\ln(\Delta z / z_0) - \Psi_m(\Delta z / L)], \quad (16)$$

其中,

$$\Psi_m = \ln \left[ \frac{1+x^2}{2} \left( \frac{1+x}{2} \right)^2 \right] - 2 \arctan x + \frac{\pi}{2},$$

$$x = \left( 1 - 15 \frac{\Delta z}{L} \right)^{1/4},$$

为避免迭代运算, 将  $\Delta z / L$  近似为  $R_b$ , 即  $\Delta z / L = R_b$ 。

对于稳定层结 ( $R_b > 0.005$ ), 有

$$u_* = k u_h / \ln(\Delta z / z_0) (1 - R_b / 0.51)^{1/2}. \quad (17)$$

下面的主要任务就是根据不同的地表状况及粒子特性确定参数  $C_{D0}$  和  $G$  的参数化形式。为此, 将地表面分为光裸地面、水面和植被三大类, 分别求其参数化形式。

(1) 光裸地表面  $C_{D0}$  和  $G$  参数的确定

根据表面粗糙雷诺数  $z_{0+} (= z_0 u_* / \nu)$  将地表面分为光滑流 ( $z_{0+} < 0.13$ ), 完全粗糙流 ( $z_{0+} > 2$ ) 和过渡流 ( $0.13 \leq z_{0+} \leq 2.0$ ) 三类。由于在地表面层流动受层结作用的影响可以略去, 因而在处理  $C_{D0}$  和  $G$  的过程中将略去层结的影响, 摩擦速度  $u_*$  都用

中性层结的表达式(15)式代替。

$G$ 可分为三种过程作用的结果, 即

$$G = G_{\text{dif}} + G_{\text{int}} + G_{\text{imp}}, \quad (18)$$

其中,  $G_{\text{dif}}$  是粒子布朗扩散率,  $G_{\text{int}}$  是粒子截获率,  $G_{\text{imp}}$  为粒子惯性沉降率。因  $G_{\text{int}}$  起作用的同时  $G_{\text{imp}}$  也将增强, 因而这里只对  $G_{\text{imp}}$  进行参数化, 其结果取自文献[2]。对于过渡流, 采用光滑流和粗糙流的内插值。详细结果列于表 1。

表 1  $C_{D0}^{-1/2}$  和  $G$  的表达式

| 表面特征分类 | $C_{D0}^{-1/2}$         | $G$                                                                                            |
|--------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 光滑流    | 13.5                    | $Sc^{-2/3} + 4.72 \times 10^{-3}/St$                                                           |
| 过渡流    | $6.432z_{0+}^{-0.3634}$ | $\frac{1}{1.5z_{0+}^{0.2}} Sc^{-0.538z_{0+}^{0.106}} + 2.25z_{0+}^{-0.3634} \times 10^{-3}/St$ |
| 完全粗糙流  | 5                       | $\frac{5}{7.3z_{0+}^{0.25}} Sc^{-1/2} + 1.75 \times 10^{-3}/St$                                |

注: 表中  $Sc = \nu/D$  为施密特数,  $D = K_r(1 + Ar/\lambda)/6\pi r\mu$  为粒子扩散率,  $St = V_g u_*^2 / g\nu$  为粒子斯坦顿数。

## (2) 水面 $C_{D0}$ 和 $G$ 参数的确定

由于受水面风速观测资料的限制, 且多数结果只是针对中性层结条件的, 因而对水面  $C_{D0}$  和  $G$  的参数化及  $K_{s1}$  的确定只给出中性层结条件下的公式。对于水面或洋面, 先由  $u_* = C_D^{1/2} u_h$  求出摩擦速度, 再由  $z_0 = 0.015u_*^2 / g$  求出粗糙度和  $z_{0+}$ , 最后根据  $z_{0+}$  的取值将水面看成光滑表面、完全粗糙面或过渡性表面处理, 根据表 1 计算  $C_{D0}$  和  $G$  的值。实验和观测表明, 水面拖曳系数  $C_D$  随风速变化, 如下式<sup>[3]</sup>。

$$C_D = (0.60 + 0.089u_h) \times 10^{-3}. \quad (19)$$

## (3) 植被表面的 $C_{D0}$ 和 $G$ 参数的确定

植被表面作为特殊的完全粗糙面, 其上发生的粒子沉降过程极为复杂。为了使之适应大中尺度的需要, 我们采用 Giorgi 给出的简化方案<sup>[4]</sup>, 即

$$C_{D0}^{-1/2} = 2.5, \quad (20)$$

$$G = (\eta / C_D)^{1/2}, \quad (21)$$

其中,  $\eta = \text{I} + \text{II} + \text{III} + \text{IV}$ , 为单个粗糙物平均粒子收集率;  $\text{I} = C_v Sc^{-1.3}$  表示粒子的扩散效率,  $\text{II} = R^2 / 2$  为粒子的截获率,  $\text{III} = St_a^{3.2} / (St_a + 0.6)^{3.2}$  为粒子惯性碰并率,  $\text{IV} = A_{sm} R_{sm} \ln(1 + R_{sm})$  为叶片表面组织吸收率。  $C_D = 0.2 \sim 0.5$  为单个粗糙物平均局地拖曳力系数,  $C_v / C_D = 1/4 \sim 1/3$ ,  $A_{sm} = 10^{-5} \sim 10^{-4}$ ,  $R = r/a$ ,  $a$  为粗糙物的尺度,  $St_a = V_g u_* / ga$  为粒子斯坦顿数。此式只是针对片状植被得出的, 这对大多数植被来说具有很强的代表性。

## 3 影响粒子干沉降的主要因子分析及讨论

影响粒子干沉降的因素很多, 过程又十分复杂, 但大致可分为三大类, 即气象因

素、地表状况和粒子特性, 下面分别讨论它们对于沉降的影响。

### 3.1 气象因子的影响

从理论上讲, 大气的流动状态(光滑流和粗糙流)、大气和地表相互作用微气象因素(如摩擦速度、粗糙度)、相对湿度、太阳辐射、大气稳定度、温度和风速等都对粒子沉降有影响。鉴于现有条件, 我们忽略了相对湿度和太阳辐射的影响; 又由于边界层中各种微气象因子是相互关联的, 我们只给出粒子沉降速度随风速、粗糙度和大气稳定度变化的结果, 至于其它因素要么是影响不大, 要么可以归结为这三种主要因素的相互作用。

#### 3.1.1 风速的影响

图 2 给出了气溶胶粒子在中性层结条件下在陆地、水面和植被表面上的沉降速度  $v_d$  随风速  $u_h$  的变化曲线。风速变化范围为  $1 \text{ m/s}$ 、 $5 \text{ m/s}$  和  $10 \text{ m/s}$ ; 纵坐标为沉降速度  $v_d$ ; 横坐标为粒子半径, 其尺度范围为  $10^{-2} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 。这其中包括了大气气溶胶的三大类, 即凝结核 ( $r < 10^{-1} \mu\text{m}$ ); 聚集态粒子 ( $10^{-1} < r < 10^0 \mu\text{m}$ ) 和大粒子 ( $r > 2 \mu\text{m}$ ) 及特大粒子。将陆地和水面沉降面看成完全的汇, 且不考虑粒子的反弹现象, 即  $f=1$ ; 而在植被表面上考虑粒子在叶片上的反弹现象, 且设与粒子的斯坦顿数有关, 即  $f = e^{-St_d^{1/2}}$ 。从图 2 可见, 对于半径为  $10^{-2} \sim 30 \mu\text{m}$  粒子, 其沉降速度  $v_d$  呈现出风速增大粒子沉降速度亦增大的现象; 而对于半径大于  $30 \mu\text{m}$  的粒子来说, 重力沉降成为粒子沉降的主导因素, 几乎不受风速影响。需要指出的是, 对于植被表面, 半径为  $3 \sim 30 \mu\text{m}$  的粒子, 在相同的风速下粒径增大沉降速度减小, 这是由于在此区间粒子增大, 叶面对粒子的反弹亦增大的缘故, 从而造成粒子沉降速度随粒径增大而减小的现象; 对于一定尺度的大粒子也会出现风速增大而沉降速度减小的现象。对于植被表面,

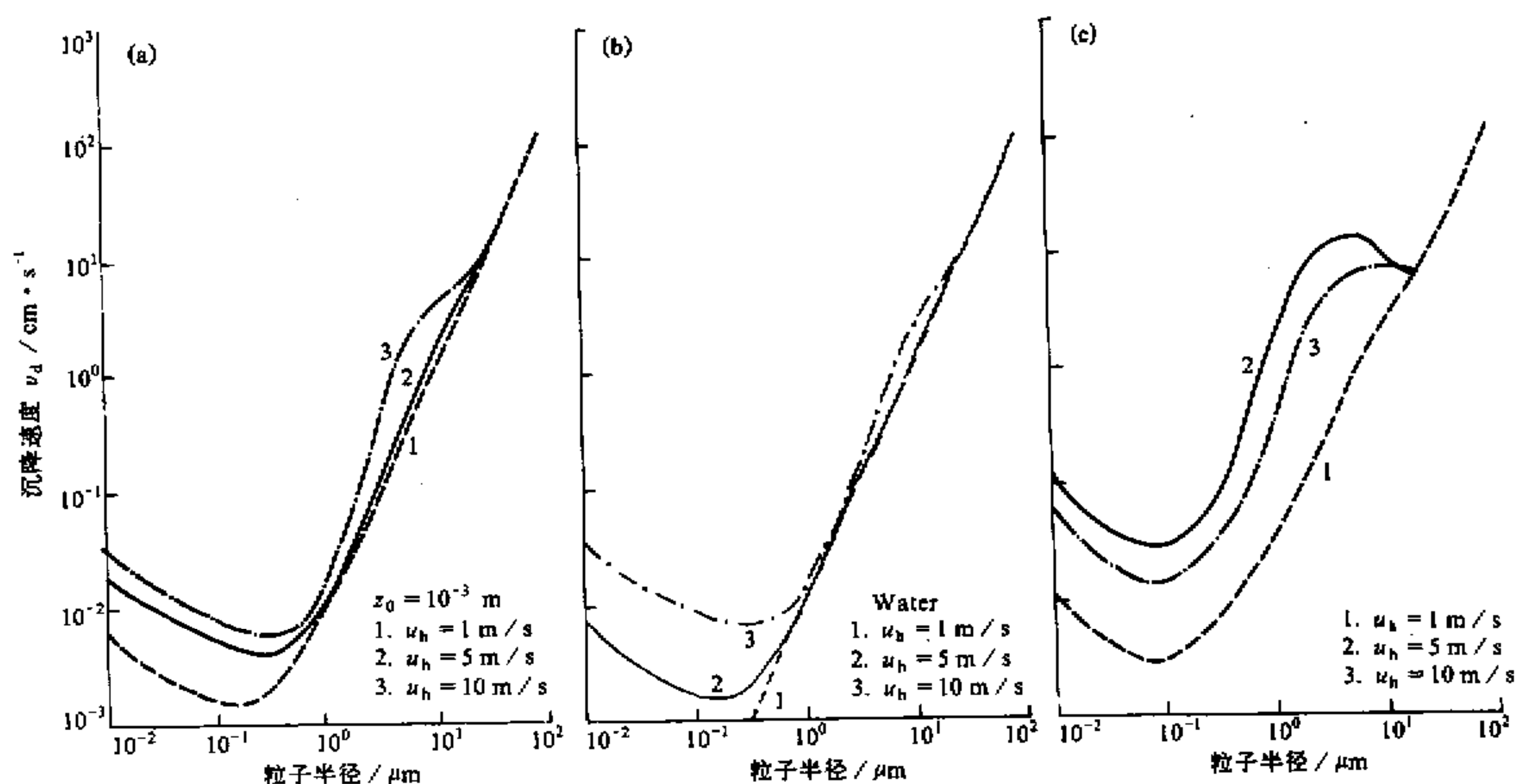


图 2 气溶胶粒子在中性层结条件下的沉降速度  $v_d$  随风速  $u_h$  的变化曲线  
(a) 陆地; (b) 水面; (c) 植被表面

风速对尺度在  $10^{-2} \sim 30 \mu\text{m}$  的粒子的影响程度几乎相等; 但对陆面和水面, 随风速的增加小粒子和大粒子的沉降速度增加比较明显, 而  $1 \mu\text{m}$  左右的粒子的沉降速度增加却不明显, 反映出这一尺度范围的粒子在陆地和水面的沉降速度对风速不敏感的特点。

### 3.1.2 稳定度的影响

图 3 给出了气溶胶粒子在陆地上沉降速度随稳定度变化曲线, 曲线 1、2 和 3 分别表示强不稳定、中性和强稳定三种大气稳定度情形。对于水面和植被表面, 曲线分布大致与图 3 相同, 这里从略。从图 3 可看出, 粒子 (半径  $r < 30 \mu\text{m}$ ) 的干沉降速度随大气的不稳定性的增加而增加, 特别对于半径为  $< 10^{-1} \mu\text{m}$  和  $2 \sim 10 \mu\text{m}$  的粒子更加明显, 而对半径为  $0.3 \sim 2.0 \mu\text{m}$  和  $> 30 \mu\text{m}$  的粒子的影响极小或可以忽略。这也说明在陆地上尺度为  $1 \mu\text{m}$  左右的粒子的沉降速度与气象条件的变化不明显的特点。但从总体上看, 在正常的大气条件下, 与风速的影响相比, 稳定度的影响不能算是一个主要因素, 都可用中性条件的沉降速度代替, 这一结果与 Sehmel 等人的结果<sup>[5]</sup>相符。

### 3.1.3 粗糙度的影响

图 4 给出了陆地上粒子沉降速度  $v_d$  与粗糙度  $z_0$  关系的一组曲线。曲线 1、2、3 分别代表粗糙度为  $10^{-5} \text{ m}$  (冰面或光滑泥面),  $10^{-4} \text{ m}$  (沙漠) 和  $10^{-3} \text{ m}$  (雪地或耕地)。由图 4 可见, 对于大粒子 ( $r > 0.2 \mu\text{m}$ ), 风速为  $5 \text{ m/s}$  时沉降速度随粗糙度的增加而增加。但对小粒子 ( $r < 0.2 \mu\text{m}$ ), 我们的研究还表明, 当风速为  $5 \text{ m/s}$  时, 沉降速度随粗糙度的增加而减小; 当风速为  $1 \text{ m/s}$  时沉降速度随粗糙度的增加而增加。造成这种现象的原因是风速为  $1 \text{ m/s}$  和  $5 \text{ m/s}$  时流动状态不同 (由粗糙雷诺数  $z_0 u_* / \nu$  决定), 即风速为  $1 \text{ m/s}$  时流动为光滑流, 而风速为  $5 \text{ m/s}$  时为粗糙流。这

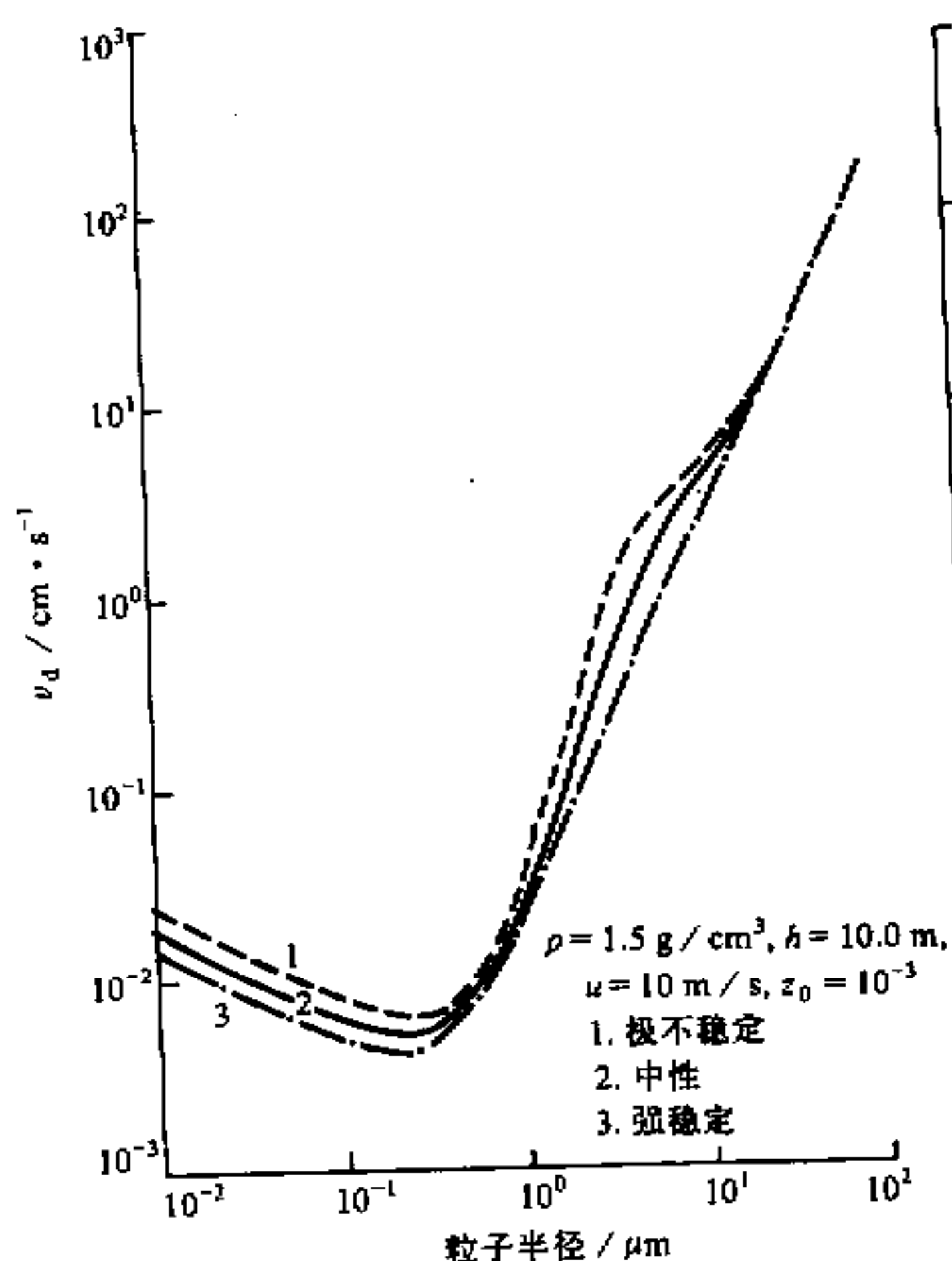


图 3 气溶胶粒子在陆地上沉降速度随稳定度的变化

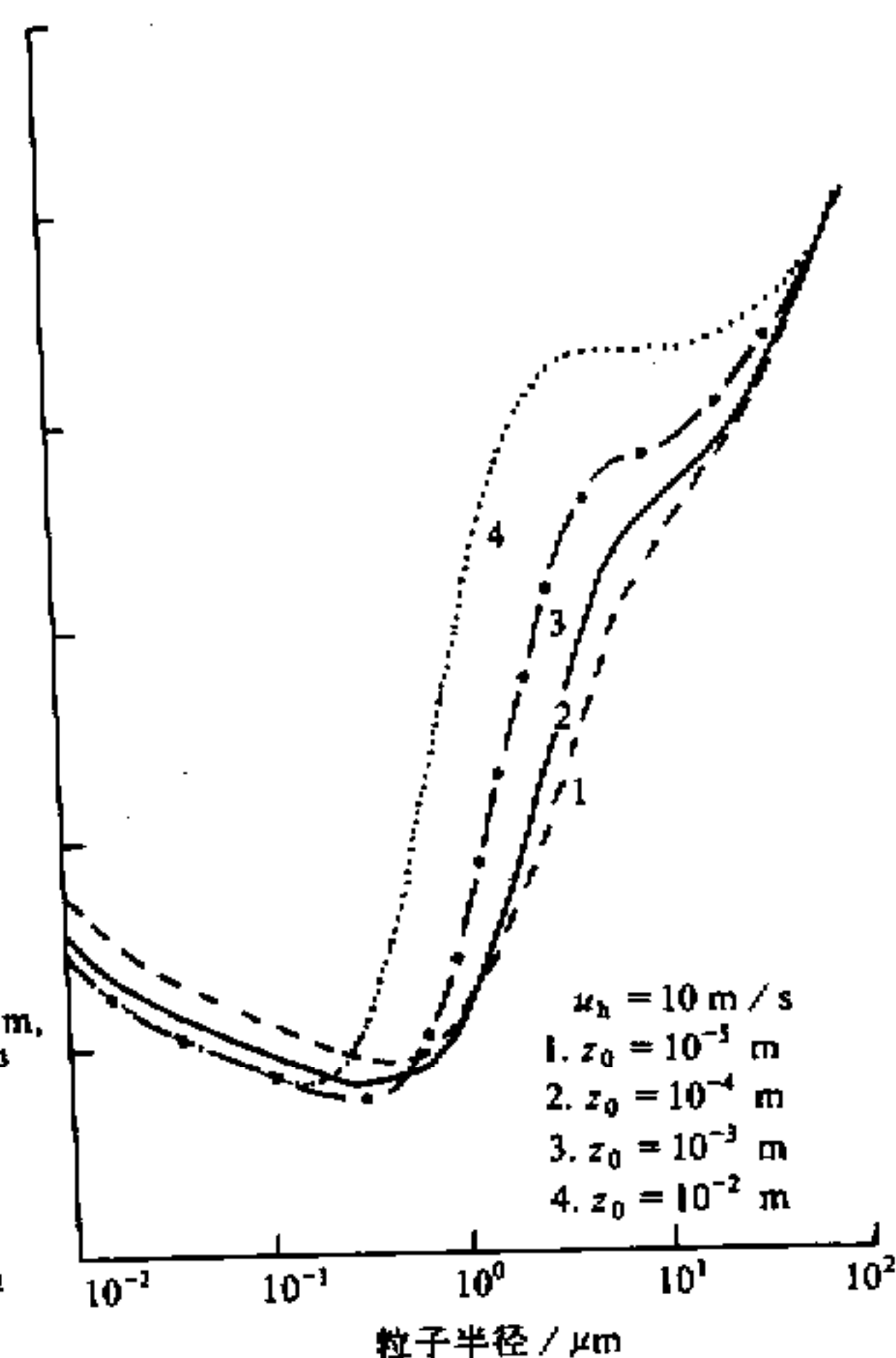


图 4 陆地上粒子沉降速度与粗糙度的关系

反映了流动状态对粒子干沉降速度的影响。观测亦表明了粗糙度变化对粒子干沉降没有简单的单调关系。

### 3.2 表面特性对粒子沉降速度的影响

表面特性也是千差万别的, 这里只分为三大类, 即光裸地面、水面和植被表面。对于陆地表面, 决定其特性的因素主要由流动状况(光滑流和粗糙流)和表面粗糙度决定; 对于水面则只由流动状态决定, 因其粗糙度决定于大气的风速状况; 除以上两种因子外, 对于植被表面, 对沉降有重大影响的还有植被的结构和植物叶片表面指数。

由于陆地、水面和植被的粗糙度不同, 而粗糙度又是一个比较重要的因素, 因而不好将这三种表面作直接的比较, 但从总体上说, 在植被表面上更有利于  $< 1 \mu\text{m}$  的粒子的沉降(图5)。下面只对植被表面参数变化对粒子沉降速度的影响进行讨论。

对于有片状叶子的植被表面, 参数  $a$  和  $A_{sm}$  是两个主要参数,  $a$  为叶片迎风截面半径,  $A_{sm}$  是叶片毛状物粒子收集率的比例系数。对于自然界的叶片植物来说,  $a$  的变化范围为  $10^{-1} \sim 10^2 \text{ mm}$ ,  $A_{sm}$  在  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  之间变化。图6给出了粒子在植被表面的沉降速度随植被指数  $a$  和  $A_{sm}$  的变化曲线。由图6可见, 植被指数  $a$  的作用更大; 对半径  $< 30 \mu\text{m}$  的粒子,  $a$  减小, 粒子的沉降速度增大; 但对于特大粒子,  $a$  减小沉降速度呈下降的现象, 这可能是由于  $a$  的减小, 叶片对大粒子的反弹作用增强的缘故。

### 3.3 粒子的物理特性对沉降速度的影响

实际上粒子的沉降速度不仅受物理特性的影响, 而且还受其化学特性的影响。我们这里只考虑物理特性的影响, 并且只讨论气溶胶粒子的尺度和密度的作用。研究表明,

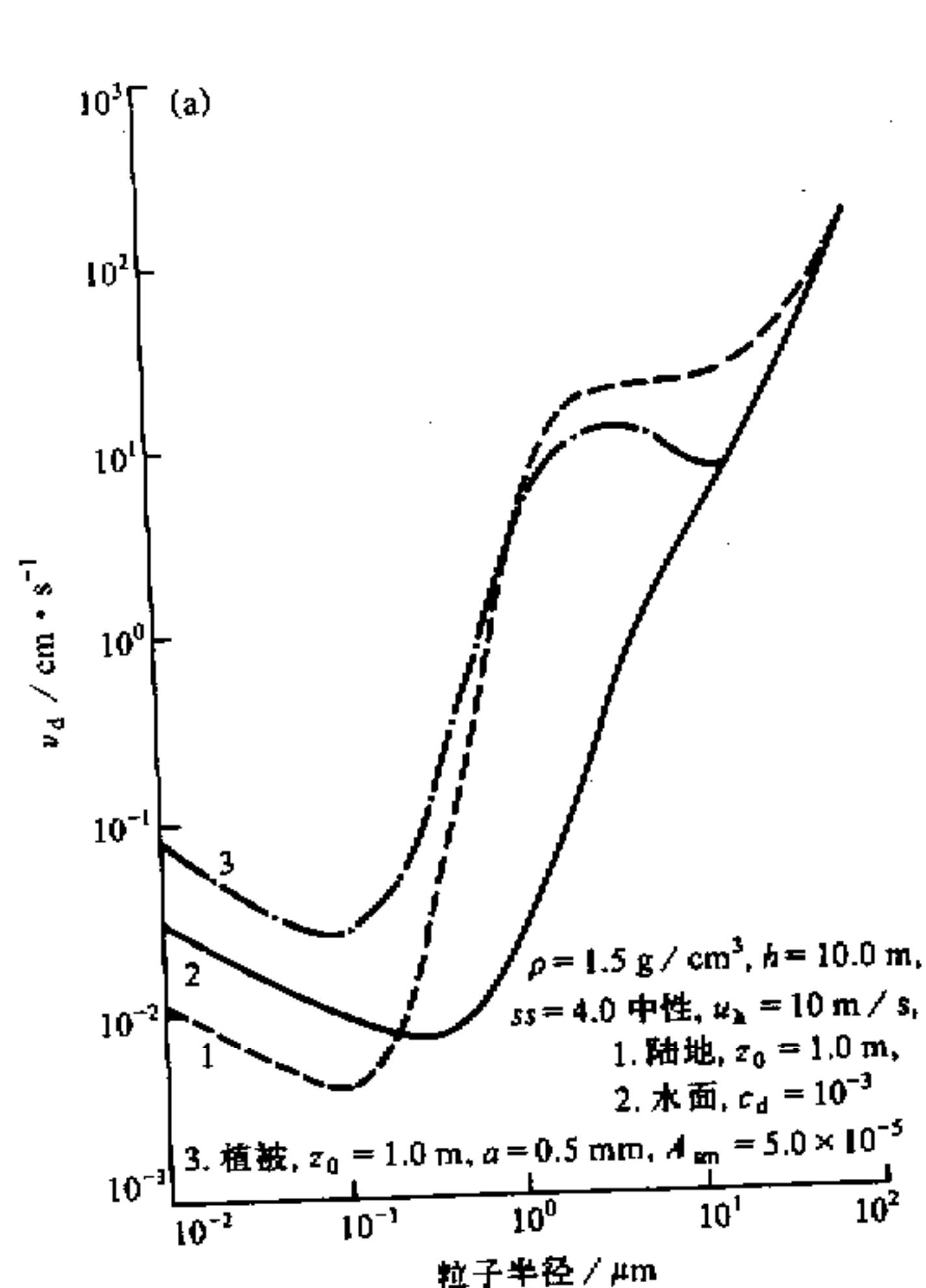


图5 在相同气象条件下粒子分别在陆地、水面和植被上的沉降速度

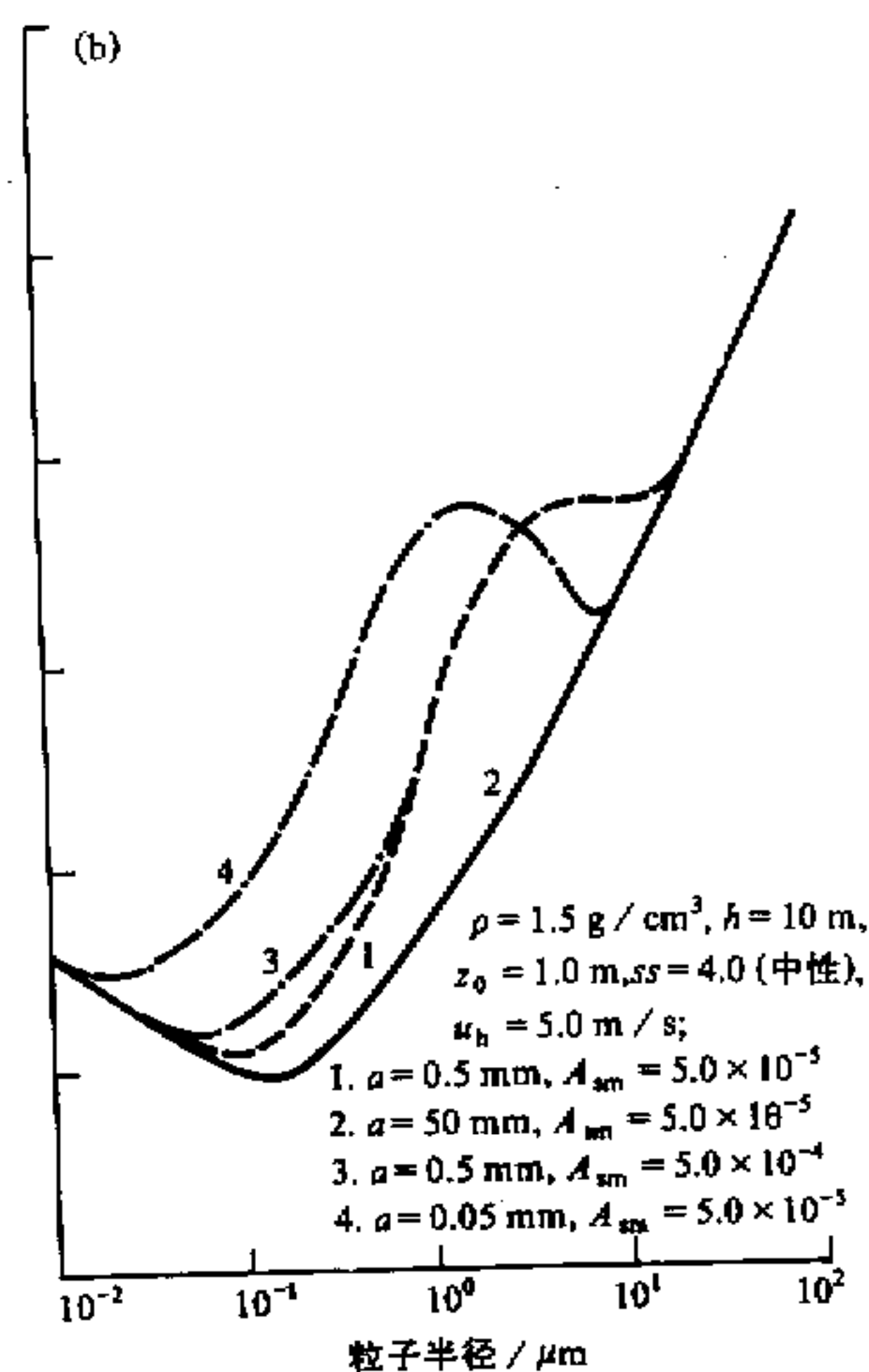


图6 粒子在植被表面的沉降速度随植被指数  $a$  和  $A_{sm}$  的变化

密度的变化对粒子半径  $< 0.1 \mu\text{m}$  的粒子几乎没有影响, 只对较大的粒子有作用, 而且粒子的尺度越大其影响就越显著。对于粒子半径  $< 0.3 \mu\text{m}$  的粒子, 随尺度的增加, 沉降速度减小, 这时沉降速度主要由粒子的布朗扩散率决定; 对于大粒子 ( $0.3 \sim 10 \mu\text{m}$ ), 其粒子的沉降速度随尺度的增加而增加, 这时粒子扩散作用可以忽略, 只由惯性沉降率 (截获率, 由  $St$  数决定)、重力沉降和湍流扩散率决定, 此区间的决定因素较难确定, 同时这一区间的粒子亦是大气颗粒物 (如沙尘) 长距离输送最感兴趣的部分; 对于特大粒子 ( $r > 10 \mu\text{m}$ ), 其沉降速度几乎由重力沉降决定。

### 3.4 此方案的计算值与观测值及与其它方案的比较

关于粒子的干沉降速度有许多观测结果, 而且不同的作者观测的结果有很大的差异。对于小于  $0.01 \mu\text{m}$  的粒子, 干沉降速度主要由粒子的扩散率 ( $D$ ) 决定, 其结果由  $Sc^a$  数决定 ( $a$  可取  $-1/2$ ,  $-2/3$ ,  $-1$  或其它值); 对于大于  $2 \mu\text{m}$  的粒子, 其干沉降速度与粒子的重力沉降具有相同量级; 从现有的观测数据来看, 此两段尺度范围的粒子干沉降速度比较一致。但对  $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$  的粒子, 不同作者观测的干沉降速度有巨大差别, 相差可达  $2 \sim 3$  个数量级。特别值得指出的是, 对这段尺度范围的粒子的干沉降速度, 已有的实验室 (风洞) 观测值一般比野外场地实测值偏小, Sehmel<sup>[5]</sup> 实验值为  $3 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ , 而多数野外场地观测值为  $10^{-1} \sim 10^0 \text{ cm/s}$ 。因此, Garland<sup>[6]</sup> 的野外场地观测指出, 在常规的气象条件下此区间段的粒子干沉降速度不超过  $0.1 \text{ cm/s}$ , 也就是说其干沉降速度的合理值应为  $10^{-2} \text{ cm/s}$  的量级; 此外他还指出了造成野外场地观测值偏大的可能原因和未加特别重视的因素。计算值与观测值的难于比较的原因还有, 要么关于气象条件或粒子特征或表面特殊性的资料不全面, 要么所给的粒子沉降速度只是某一尺度范围粒子沉降速度的平均值。鉴于上述各种原因, 下面的比较是不全面的和初步的, 只供参考。

由于水面上粒子干沉降速度的资料很少或极为有限, 加之此参数化方案并没有考虑水面风大时水滴浪花的破碎及粒子在临界面内的凝结增长, 以及粗糙度随风速变化, 因而我们这里只对计算值和实验值在非植被粗糙表面观测值及植被表面的观测值进行比较。

表 2 给出了小粒子 ( $r < 1 \mu\text{m}$ ) 在非植被表面干沉降速度的实验值、观测值与计算

表 2 小粒子 ( $r < 1 \mu\text{m}$ ) 干沉降速度的实验值、观测值与计算值的比较

| 沉降物            | 半径/<br>$\mu\text{m}$ | 风速/<br>$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | 稳定度 | 参考高度/<br>$\text{m}$ | 粗糙度/<br>$\text{m}$   | 实测值/<br>$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ | 计算值/<br>$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ |
|----------------|----------------------|---------------------------------------|-----|---------------------|----------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 受根核            | 0.0825               | 51.5                                  | 中性  | $4 \times 10^{-3}$  | $2.1 \times 10^{-5}$ | 0.152*                                  | 0.112                                   |
| TCP            | 0.55                 | 8.7                                   | 中性  | $3 \times 10^{-3}$  | $2.1 \times 10^{-5}$ | 0.015*                                  | 0.010                                   |
| TCP            | 0.55                 | 4.4                                   | 中性  | $3 \times 10^{-3}$  | $2.1 \times 10^{-5}$ | 0.0016*                                 | 0.0051                                  |
| polystyrene 粒子 | 0.30                 | 61.0                                  | 中性  | $3 \times 10^{-3}$  | $2.1 \times 10^{-5}$ | 8.4*                                    | 1.5                                     |
| Pb             | 0.005~0.02           | 0.5                                   | 中性  | 1.0                 | $1.0 \times 10^{-3}$ | 0.0065**                                | 0.0045                                  |
| Pb             | 0.005~0.02           | 2.2                                   | 中性  | 1.0                 | $1.0 \times 10^{-3}$ | 0.0186**                                | 0.0140                                  |
| Pb             | 0.005~0.02           | 3.66                                  | 中性  | 1.0                 | $1.0 \times 10^{-3}$ | 0.053**                                 | 0.021                                   |
| 硫酸盐            | 0.35                 | 3.0                                   | 稳定  | 1.0                 | $1.0 \times 10^{-3}$ | 0.012***                                | $2.4 \times 10^{-3}$                    |
| 硫酸盐            | 0.35                 | 3.0                                   | 不稳定 | 1.0                 | $1.0 \times 10^{-3}$ | 0.030***                                | $2.8 \times 10^{-3}$                    |

注: \* 为文献[7]实验室实测值; \*\* 为文献[8]在土壤上的观测值; \*\*\* 为文献[9]在雪地上的实测值

值的比较。下垫面包括了干性土壤、沙土和积雪表面,这些都是典型的非植被覆盖的表面。从实测值和计算值的比较来看,对于风洞实测值和土壤、沙土表面观测值,计算值与其符合比较好;但对积雪表面,计算值比观测值明显偏低,这与参数化方案没有考虑积雪表面的细微结构有关,如表面突出冰针对粒子的截获作用等。

对于大粒子 ( $r > 1 \mu\text{m}$ ),干沉降速度与粒子的重力沉降具有相同的量级,即主要由重力沉降决定。但前面的结果也指出,除重力沉降以外,其它因素的综合作用对干沉降的影响在一定的条件下也能达到重力沉降的量级,特别是对半径为  $1 \sim 10 \mu\text{m}$  的粒子沉降速度的影响更是如此,因而此区间内其它因素的影响特别是风速的影响是不能忽略的。由于该区间粒子的沉降速度具有  $10^{-1} \sim 10^0 \text{ cm/s}$  的量级,几个厘米的差异足可以对粒子的长距离输送造成可观的影响。表 3 给出了大粒子 ( $r > 1 \mu\text{m}$ ) 在各种表面干沉降速度的实验值、观测值与计算值的比较,其中粒子半径为  $1 \sim 20 \mu\text{m}$ ,涵盖了自然界中大粒子气溶胶的尺度范围,风速为  $1 \sim 10 \text{ m/s}$ ,包括了近地面层经常遇到的风速范围。从计算结果来看,此参数化方案能比较合理地描述大粒子的干沉降过程。

表 3 大粒子 ( $r > 1$ ) 干沉降速度的实验值、观测值与计算值的比较

| 沉降物        | 半径/<br>$\mu\text{m}$ | 风速/<br>$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | 稳定度 | 参考高度/<br>$\text{m}$  | 粗糙度/<br>$\text{m}$   | 表面 | 密度/<br>$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 实测值     | 计算值    |
|------------|----------------------|---------------------------------------|-----|----------------------|----------------------|----|----------------------------------------|---------|--------|
| Lycopodium | 16.0                 | 8.6                                   | 中性  | $5.0 \times 10^{-2}$ | $3.5 \times 10^{-3}$ | 风洞 | 1.0                                    | 24.0*   | 16.7   |
| Lycopodium | 16.0                 | 6.5                                   | 中性  | $5.0 \times 10^{-2}$ | $3.5 \times 10^{-3}$ | 风洞 | 1.0                                    | 16.0*   | 13.2   |
| Lycopodium | 16.0                 | 4.0                                   | 中性  | $5.0 \times 10^{-2}$ | $3.5 \times 10^{-3}$ | 风洞 | 1.0                                    | 11.5*   | 9.0    |
| Lycopodium | 16.0                 | 2.1                                   | 中性  | $5.0 \times 10^{-2}$ | $3.5 \times 10^{-3}$ | 风洞 | 1.0                                    | 6.2*    | 5.3    |
| 硫酸盐        | 3.5                  | 3.0                                   | 中性  | 1.0                  | $1.0 \times 10^{-4}$ | 雪地 | 1.5                                    | 0.322** | 0.225  |
| 气溶胶        | 1.1                  | 6.0                                   | 中性  | 1.5                  | $1.0 \times 10^{-2}$ | 黑麦 | 2.0                                    | 0.04*** | 0.057  |
| 气溶胶        | 1.8                  | 6.0                                   | 中性  | 1.5                  | $1.0 \times 10^{-2}$ | 黑麦 | 2.0                                    | 0.08*** | 0.127  |
| 气溶胶        | 2.2                  | 6.0                                   | 中性  | 1.5                  | $1.0 \times 10^{-2}$ | 黑麦 | 2.0                                    | 0.12*** | 0.187  |
| 气溶胶        | 2.8                  | 6.0                                   | 中性  | 1.5                  | $1.0 \times 10^{-2}$ | 黑麦 | 2.0                                    | 0.28*** | 0.3077 |
| 气溶胶        | 3.5                  | 6.0                                   | 中性  | 1.5                  | $1.0 \times 10^{-2}$ | 黑麦 | 2.0                                    | 0.50*** | 0.497  |
| 气溶胶        | 4.4                  | 6.0                                   | 中性  | 1.5                  | $1.0 \times 10^{-2}$ | 黑麦 | 2.0                                    | 0.85*** | 0.812  |
| 气溶胶        | 5.6                  | 6.0                                   | 中性  | 1.5                  | $1.0 \times 10^{-2}$ | 黑麦 | 2.0                                    | 1.4***  | 1.326  |
| 气溶胶        | 7.0                  | 6.0                                   | 中性  | 1.5                  | $1.0 \times 10^{-2}$ | 黑麦 | 2.0                                    | 2.0***  | 2.010  |
| 气溶胶        | 8.9                  | 6.0                                   | 中性  | 1.5                  | $1.0 \times 10^{-2}$ | 黑麦 | 2.0                                    | 2.7***  | 3.019  |

注: \* 为文献[7]的实验室实测值; \*\* 为文献[9]在雪地上的实测值; \*\*\* 为文献[10]在黑麦草地上的观测值

对于粒子在植被表面的干沉降速度,不同作者的结果具有很大的差异。对于小粒子 ( $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ ) 其差别从  $10^{-3} \text{ cm/s}$  到  $1 \sim 2 \text{ cm/s}$ ,多数作者的值超过  $0.1 \text{ cm/s}$ 。结果不确定的原因之一是:观测值实质上给出的是质量平均值,由于大粒子的混入,很容易使平均值增大。鉴于此,Allen 等<sup>[11]</sup>设计的观测方案克服了上述缺点,给出小粒子干沉降速度值为  $0.1 \pm 0.03 \text{ cm/s}$ 。图 2c 给出了风速为  $1 \text{ m/s}$ 、 $5 \text{ m/s}$  和  $10 \text{ m/s}$  粒子在植被表面干沉降速度随尺度的变化曲线。由于报道结果的离散性和没有其它相关参数的描述,又由于多数结果只是某一尺度范围粒子的质量平均值,不可能作出像表 2、3 的

——对应的对比, 因而只标出  $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$  的观测值的变化范围和少数几个大粒子的观测值。从计算值的离散范围来看, 其涵盖了所有的观测结果。因而从整体上看, 此参数化方案是合理的, 能够描述干沉降的主要物理过程和机制。

### 参 考 文 献

- 1 Brutsaert, Wt., 1992, Application of self-preservation in the diurnal evolution of the surface energy budget to determine daily evaporation, *J. Geophys. Res.*, **18**, p377.
- 2 Liu, B.Y.H. and Pui, D.Y.H., 1981, Aerosol sampling inlets and inhalable parameters, *Atmospheric Environment*, **15**, 589~600.
- 3 熊康, 1990, 西太平洋热带海域湍流通量化及海面粗糙度  $z_0$  和曳力系数  $C_D$  的观测研究, *大气科学*, **14**, 475~482.
- 4 Giorgi, F., 1989, Two-dimensional simulations of possible mesoscale effects of nuclear war fires I. Model Description, *J. Geophys. Res.*, **1**, 127.
- 5 Sehmel, G.A., 1980, Particle and gas dry deposition: a review, *Atmospheric Environment*, **14**, 983~1011.
- 6 Garland, J. A. and Cox L. C., 1982, Deposition of small particles to grass, *Atmospheric Environment*, **16**, 2699~2702.
- 7 Chamberlain, A.C., 1967, Deposition of lycopodium spores and other small particles to rough surfaces, *Proc. R. Soc. Lond.*, **A296**, 45~70.
- 8 Little, P. and Wiffen, R.D., 1977, Emission and deposition of petrol engine exhaust pb-I. Deposition of exhaust lead to plant and soil surfaces, *Atmospheric Environment*, **11**, 437~447.
- 9 Ibrahim, M., 1983, An experimental and theoretical investigation of the dry deposition of particles to snow, pine trees and artificial collectors, *Atmospheric Environment*, **17**, 781~788.
- 10 Clough, W.S., 1975, The deposition of particle on moss and grass surfaces, *Atmospheric Environment*, **9**, 1113~1119.
- 11 Allen, A.G., R.M. Harrison and K.W. Nicholson, 1991, Dry deposition of fine aerosol to a short grass surface, *Atmospheric Environment*, **25**, 2671~2676.

## A Scheme of Parameterization for Dry Deposition Fit for Large and Meso-Scale Pollution Transportation Model

Wang Xiquan

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

**Abstract** Dry deposition is the important process of scavenging of gross particle pollutants and sand dust. In this paper, a scheme of parameterization for dry deposition of particle which is fit for the pollution transport model is reached with a "two-layer" surface layer model. It includes the detailed meteorological conditions, the characteristics of surface and the physical and chemical properties of aerosol particles. According to the comparison between the numerical results and observed data, the scheme is reasonable in general, it can describe the main physical processes and mechanics about the dry deposition of the gross particle pollutants.

**Key words** pollution transportation dry deposition parameterization