

文章编号: 0455-2059(2013)02-0276-08

混合颗粒点源扩散风洞试验研究

李青春, 薄天利, 傅林涛, 郑晓静

兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000

摘要: 针对沙尘的扩散问题开展了沙粒点源扩散风洞实验, 结果显示沙粒经点源扩散后质量沿高度的分布服从高斯分布, 这与已有点源扩散研究结果一致. 随着风速的变化, 沙粒垂向扩散的中心高度随风速的平方呈反比, 均方差随风速呈反比; 随着与点源距离的增加, 中心高度呈线性减小, 均方差呈线性增加. 同时, 根据实验结果给出了点源扩散分布质量沿高度分布的中心高度和均方差随风速、粒径和扩散距离的表征方程. 此外, 分析结果还表明混合沙粒扩散后不同高度处的平均粒径随高度呈线性递减, 这与已有的野外沙尘暴期间的粉尘粒径观测结果是一致的.

关键词: 平均粒径; 扩散; 沙尘暴; 重粒子

中图分类号: O359

文献标识码: A

Wind tunnel dispersion experiment on mixed sand particles from a point source

LI Qing-chun, BO Tian-li, FU Lin-tao, ZHENG Xiao-jing

Key Laboratory of Mechanics on Western Disasters and Environment with the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: The motion of particles, such as dispersion of dust and volcanic ash, in the atmosphere can lead to various environmental problems and endanger our daily life. In the paper, a dispersion experiment of mixed sand particles from a point source in wind tunnel was performed to enhance our understanding of the dynamics of sand particles in the atmosphere. The results revealed that the mass distribution of dispersed particles from the source point followed the Gaussian law at the vertical direction, which is consistent with previous studies. The Gauss mean value of dispersed particles was inversely proportional to the square of the friction speed, but decreased linearly with the distance of the dispersion downwind being away from the source point. In contrast, the mean square deviation was inversely proportional to the friction speed, and increased linearly with the distance of dispersion. Based on the experimental results, both the Gauss mean value and the mean square deviation were related to wind velocity, the averaged diameter of particles and the distance of dispersion, and explicit expressions were obtained correspondingly. Furthermore, the averaged diameter of dispersed particles along height at the vertical direction was analyzed and the results showed the averaged diameter decreased linearly with the height, which is in accordance with the observed results in the field during dust storms.

Key words: average diameter; dispersion; dust storm; heavy particle

颗粒的运动为我们的世界带来了美轮美奂的地貌风景, 同时也可能带来巨大的灾害. 比如沙尘暴、火山灰和矿物粉尘的扩散、大气沉降^[1], 涉及从亚微米(10^{-7} m)到毫米(10^{-3} m)的广泛粒径

范围^[2-3], 不仅影响人类的身体健康^[4-5]和财产安全^[6], 而且影响地球气候变化^[7]. 其中, 小粒径颗粒(量级大约为 $10^{-7} \sim 7 \times 10^{-5}$ m), 尤其是在亚微米和微米量级的颗粒, 易受到空气的干扰, 跟随性比

收稿日期: 2012-09-26; 修回日期: 2013-01-21

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(LZUJBKY-2011-11); 国家自然科学基金项目(11072097, 11232006, 11202088)

作者简介: 薄天利(1980-), 男, 宁夏银川人, 讲师, 博士, e-mail: btl@lzu.edu.cn, 研究方向为风沙环境力学, 通信联系人.

较好,在大气中可以存在更长的时间,从而对地球辐射和大气变化有着更显著的影响(相对于更大、更重的粒子)^[8].因而一直备受不同领域科学家的关注,开展了大量的研究工作.比如,文献[9]对矿物粉尘引起的辐射强迫的全球敏感性进行了实验并发现辐射强迫对于粉尘的粒径分布非常敏感;文献[10]利用2002年北京春季沙尘样本研究了沙尘传输路径对于亚洲沙尘暴沙尘化学组成的影响;文献[11]测量了Niger三次沙尘暴期间释放的不同粒径的粉尘通量,发现在沙尘暴期间释放的粉尘的粒径分布对于风速变化并不敏感.

但是,在沙尘暴中一些大粒径沙粒(量级大约为 $7 \times 10^{-5} \sim 10^{-3}$ m)在近地面大气中的运动高度将远高于一般风蚀过程的跃移高度,获得更多的能量,从而造成更大的破坏和释放更多的粉尘.一直以来,由于人们认为其只能在大气中存在较短时间,也不能被远距离输运,因而在大气中的扩散并没有引起重视.然而,一些研究表明,60~100 μm 的沙粒不仅可以被吹到几十米的高空^[12],也可以被远程运输到数千千米以外的地方^[13].人们依据现有的知识还不能合理而全面地解释这些现象.

近几年,全球火山爆发严重影响着人们的生活和工作,比如由于火山灰的扩散导致的空气中有害物质的增加、交通运输的不便.数值模拟是预报火山灰扩散的一个有效手段^[14-15].目前,尽管预报模式可以很好地预报小粒径火山灰的远程传输,但却低估了火山爆发附近地域的颗粒输运和沉积(这些颗粒主要是火山灰原始的大颗粒,也可能是有小颗粒结团而成的大颗粒),从而可能造成对火山灰释放量的低估^[15].因此,研究大颗粒物质在不同风速环境下的运动也是有意义的.

文献[16-18]分别在野外测量了平均粒径在49, 56, 100, 107 μm 的混合颗粒从离地表几米到十几米高度释放后的经大气扩散后的沉积分布情况,并给出了沉积分布随着颗粒源强度和高度、扩散距离、风速以及颗粒粒径的关系,但却不能给出颗粒在扩散过程中相关扩散参数(比如均值、均方差)随着风速、粒径和扩散距离等的变化,继而限制了对于大颗粒扩散的认识. Snyder等^[19]在一个特别制造的垂向风洞中实验测量了4种颗粒(46.5 μm 的空心玻璃球和铜颗粒、87 μm 的实心玻璃球和谷物颗粒)在湍流中的扩散情况.尽管他们测量的仍然是垂直于风向的扩散均方差,但是由于其垂向风洞产生的垂向风速是逆重力方向,颗粒在垂直于风向方向的扩散不受重力的影响,这与大气边

界层中的颗粒物质的实际扩散是不相同的,因此这样得到的结果与实际有所差异.另外,他们的实验采用的是单一粒径,而实际大气中扩散的颗粒,包括沙尘暴和火山灰扩散,都是混合粒径.

作者则通过风洞实验,研究了不同平均粒径下的混合沙粒的扩散,并且给出了扩散过程中扩散参数与风速、粒径和扩散距离的定量关系以及扩散后平均粒径随高度的变化规律,从而希望可以提高对沙尘暴或是火山灰扩散中的颗粒运动与沉积的认识.

1 实验设计、方法与过程

本文的实验是在兰州大学多功能环境风洞进行的.实验的主要目标是测量沙粒扩散后在下风向的垂向质量分布.本文采用的设计与文献[20]的风洞实验中测量烟羽中轴线不同高度质量分布的设计类似,即,在扩散沙粒中轴线的下风向不同位置处,测量扩散后的沙粒在垂向上的质量分布.

1.1 实验设计与材料

图1是风洞实验设计示意图.该风洞为直流下吹式,由动力段、整流段、实验段和扩散段四部分组成.全长85 m,洞体长55 m,实验段长20 m,实验段截面积1.3 m(宽)×1.45 m(高),风速由4 m/s至40 m/s连续可调.风洞中轴线风速廓线经测量沿高度满足对数关系,即 $u(z) = \frac{u_*}{k} \cdot \ln(z/z_0)$,其中 u_* 为摩阻风速, k 是卡门常数, z 是垂向高度($0 < z < 0.95$ m), z_0 是地表粗糙度,实验条件下风洞平均粗糙度为0.000 15 m.

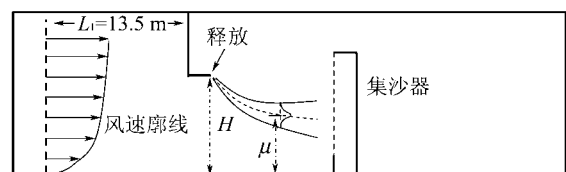


图1 风洞扩散实验设计示意图(二维)

Figure 1 Diagrammatic sketch of the wind tunnel experiment

实验材料的粒径分布由粒径分析仪(Master-sizer 2000全自动激光粒度仪)给出.测量实验材料采自巴丹吉林沙漠,经过筛选,得到了平均粒径 D 分别是0.16, 0.25, 0.45 mm的3组实验样本,其粒径变化服从对数高斯分布(图2).

1.2 实验方法

本文的主要实验目标是测量沙粒扩散后在下风向的垂向质量分布.测量时,释放点源和扩散物收集点都位于风洞中轴线上.点源释放位置布置在

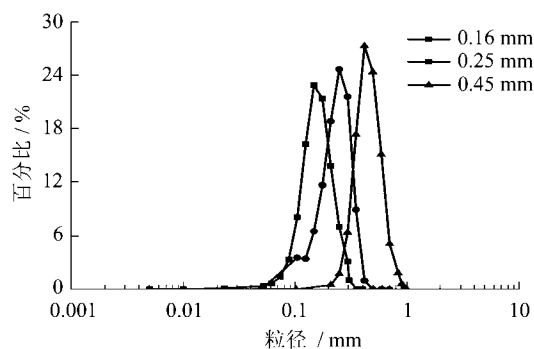


图2 经过筛选后3种沙样的粒径分布

Figure 2 Size distribution of the sieved sand materials

距风速入口约13.5 m, 因为此时风场经充分发展后达到稳定. 为了有效地收集到点源扩散后的沙粒, 本文采用了风沙实验中常用的垂向集沙仪^[21]. 尽管垂向集沙仪主要是针对跃移沙粒而设计的, 但由于其垂向的长度较大, 远大于沙粒的垂向扩散范围, 因而, 在实验中根据实验条件, 调整集沙仪与点源的距离和相对高度, 就可以实现如图1中所示对扩散沙粒分布的实验测量. 集沙仪迎风面的每个收集口高度为2 cm, 每个收集口收集到的沙粒将会进入集沙仪中对应的每一个收集管中. 每组实验完成后, 沙粒从集沙仪中取出, 称重并逐一记录集沙仪每一收集管子中的质量, 最终得到扩散沙粒在测量点处的垂向质量分布.

1.3 实验过程

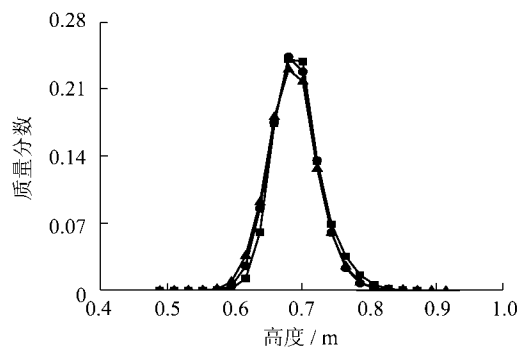
首先, 为保证实验结果的稳定性和可靠性, 在所有条件相同的情况下, 即, 平均粒径 $D = 0.16$ mm, 点源强度 $q = 1.4$ g/s, 来流风速 $u_* = 0.69$ m/s 和释放高度 $H = 0.7$ m, 进行了3次重复测量, 结果绘于图3a. 每次实验都是在风场完全稳定、沙源连续稳定释放, 并在同样的位置(点源下风向1 m处)收集, 采用同样的方法处理. 由图3a可见, 3次测得的垂向质量分布基本一致, 且可以用高斯分布

$$f(z) = \frac{A_0}{\sqrt{2\pi}\sigma_{pz}} \exp\left[-\frac{(z - \mu)^2}{2\sigma_{pz}^2}\right]$$

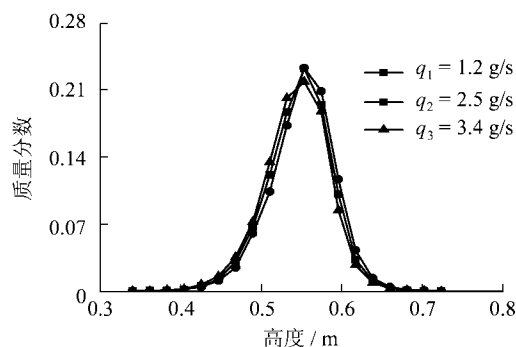
表征. 其中 $A_0 = 0.021$, 是拟合常数, σ_{pz} 是颗粒扩散高斯分布的均方差, μ 是高斯分布的均值, 其物理意义表示的是扩散沙粒的中心高度(图1). 这一实验得到的分布形式与文献[22]的理论研究结果定性一致. 定量上, 3次重复的均值和均方差的最大相对误差分别为2%和3%, 由此说明依本文实验装置和测量方法测得的数据是稳定的. 在后续讨论中, 每种情况都重复3次, 给出平均后的结果.

其次, 检验了点源强度对扩散分布的影响. 本文测量了其他实验条件相同(平均粒径 $D = 0.45$ mm,

来流风速 $u_* = 0.69$ m/s 和释放高度 $H = 0.7$ m) 而只有流量不同 ($q_1 = 1.2$ g/s, $q_2 = 2.5$ g/s 和 $q_3 = 3.4$ g/s) 时的颗粒扩散, 并将结果绘于图3b. 由图3b可见, 不同点源强度时得到的扩散后的垂向质量分布基本一致; 而定量上, 3个点源强度下的均值和均方差的最大相对误差都不超过2%, 由此可以排除流量对扩散的影响.



a 所有条件都相同



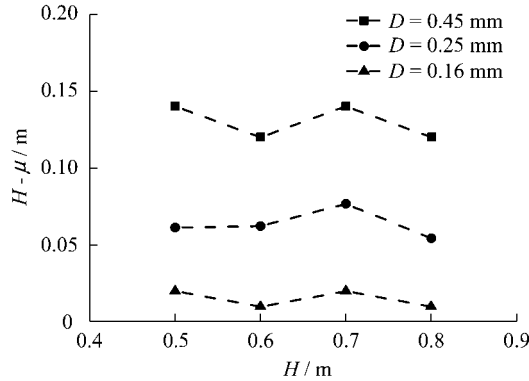
b 仅有点源强度不同

图3 点源扩散后在下风向1 m处测量得到的沙粒质量垂向分布

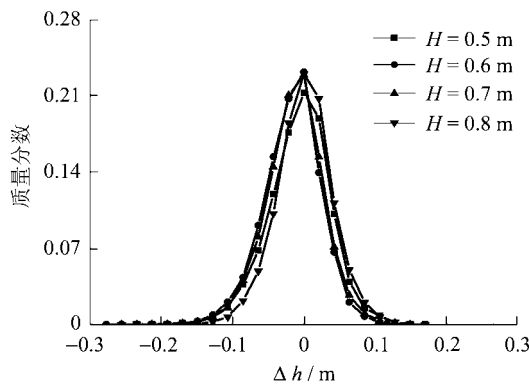
Figure 3 Mass distribution of dispersed particles along height collected at 1 m downwind away from source point

再次, 检验了点源高度对扩散分布的影响. 为此, 本文测量了同一风速下风洞中轴线上不同高度 (H 分别为0.5, 0.6, 0.7, 0.8 m) 处释放扩散物后在下风向1 m处得到的扩散质量垂向分布, 结果如图4所示. 图4a中给出的是点源高度与沙粒扩散的中心高度之差 ($H - \mu$) 随着点源高度的变化, 这个差值就是扩散沙粒的平均下落高度. 从图4a中可以看到, 虽然在不同粒径下, 扩散沙粒的平均下落高度随点源高度有些波动, 但这些波动相对较小, 因此, 可以近似认为平均下落高度不随点源高度变化. 图4b中给出的是不同点源高度下扩散质量相对于均值位置的分布, 即将在不同点源高度扩散后的分布减去其对应的均值后得到的相对分布情况. 定性上可以发现分布的范围和峰值随高

度变化很小,均方差的定量分析显示,不同高度下的相对误差不超过3%,可见点源高度对扩散没有影响.图4中 H 表示点源高度, μ 表示扩散沙粒的中心高度, Δh 表示在不同点源高度时,相对于中心高度 μ ,沙粒沿高度向上(正)和向下(负)的质量分布范围.



a 点源高度与沙粒扩散中心高度之差 $H - \mu$ 随着点源高度的变化



b 不同点源高度时扩散质量相对于均值位置的垂向分布

图4 点源高度与沙粒扩散中心高度之差 $H - \mu$ 随着点源高度的变化和不同点源高度时扩散质量相对于均值位置的垂向分布

Figure 4 Differential between release height and central height of sand diffusion under different release heights and 'absolute' distribution of different release heights in vertical direction

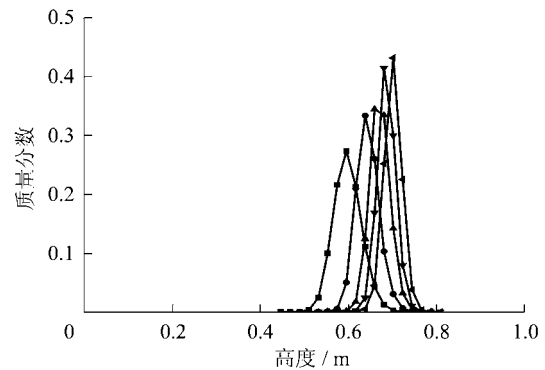
最后,在验证了稳定性和可靠性以及消除可能的影响后,本文测量了5种不同风速下的颗粒扩散垂向质量分布和同一风速情况下5个不同扩散距离处的垂向质量分布.即,前者是固定点源高度 $H = 0.7$ m,然后测量点源下风向1 m处,摩阻风速分别为0.53, 0.69, 0.85, 1.0, 1.17 m/s时的颗粒扩散垂向质量分布;后者是固定来流风速 ($u_* = 0.85$ m/s)和点源高度 ($H = 0.7$ m),测量点源下风向0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 m处的颗粒扩散垂向质量分布.

2 结果与讨论

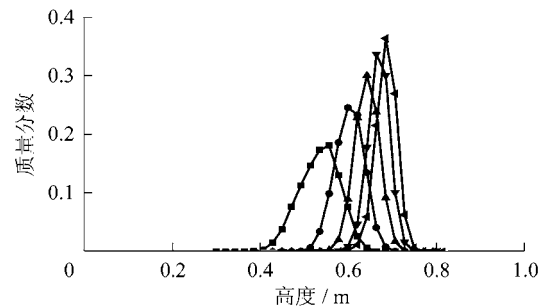
图5给出了当点源高度 $H = 0.7$ m,下风向测

点位置与点源的距离 $L = 1$ m,平均粒径分别为0.16, 0.25, 0.45 mm时,来流摩阻风速 u_* 分别为0.53, 0.69, 0.85, 1.00, 1.17 m/s时测点处垂向质量分布.由图5可见风速对于颗粒的垂向分布有着明显的影响,风速越大,颗粒质量分布集中程度越高,峰值越大,峰值对应的垂向高度越大;同时,平均粒径也明显影响质量分布:在相同风速下,平均粒径越大,颗粒垂向扩散范围就越大,峰值越小,峰值对应的垂向高度越小.因此,不管是扩散沙粒的中心高度还是均方差,都受到来流风速和颗粒平均粒径的影响,这里将不同粒径下得到的中心高度 μ 和均方差 σ_{pz} 的结果综合于图6中.

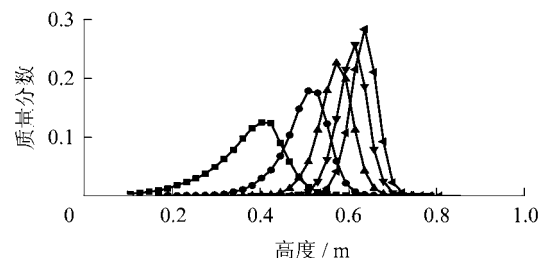
从图6a中可以看到扩散沙粒的中心高度随着风速的增大而增大,并逐步逼近点源高度;平均粒



a 平均粒径为0.16 mm



b 平均粒径为0.25 mm

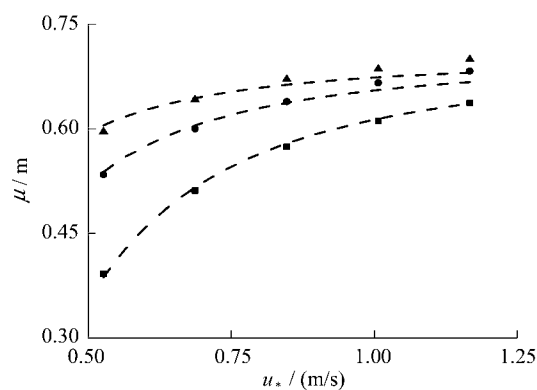
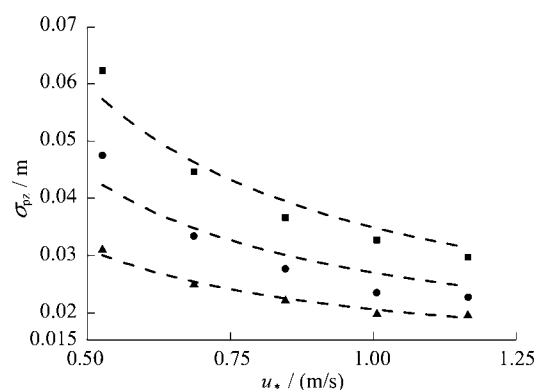


c 平均粒径为0.45 mm

— $u_* = 0.53$ m/s — $u_* = 0.85$ m/s — $u_* = 1.17$ m/s
— $u_* = 0.69$ m/s — $u_* = 1.00$ m/s

图5 不同风速条件下扩散质量的垂向分布

Figure 5 Vertical mass distributions of dispersed particles with the variation of wind velocity

a 沙粒扩散后的中心高度 μ b 均方差 σ_{pz}

三角形、圆形和方形分别代表平均粒径为 0.16 mm, 0.25 mm, 0.45 mm 的实验测量结果, 虚线是实验结果的拟合曲线

图 6 沙粒扩散后的中心高度 μ 和均方差 σ_{pz} 随风速的变化

Figure 6 Variation of μ and σ_{pz} with the change of wind velocity

径越小, 同一风速下, 中心高度越大, 越逼近点源高度. 而图 6b 中给出的均方差随风速的规律则与中心高度的相反: 随着风速的增大, 均方差逐渐降低; 平均粒径越小, 同一风速下, 均方差越小. 本文通过最小二乘法拟合了各个风速和粒径条件下的扩散沙粒中心高度 μ 和均方差 σ_{pz} , 结果显示, 不同粒径下, 中心高度随风速的平方呈反比, 均方差随风速成反比. 具体可以表示为

$$\mu(D) = H - \frac{A(D)}{u_*^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{pz}(D) = C_0 + \frac{B(D)}{u_*}. \quad (2)$$

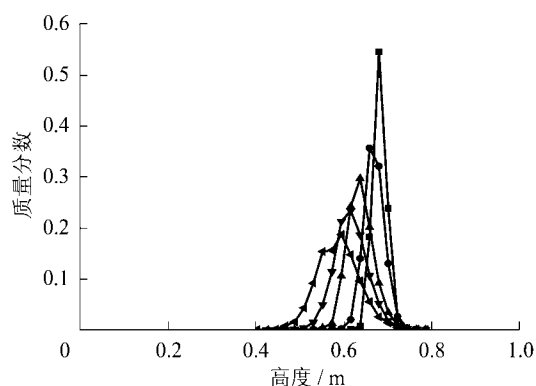
其中, $H = 0.7$ m, $C_0 = 0.01$ m, 对应不同的平均粒径 D (mm) 的 $A(D) = 0.19D$, 相应的, $B(D) = 0.06D$. $A(D)$, $B(D)$ 均为拟合系数, 这里所有拟合的 R^2 均大于 0.9. H 为点源高度, C_0 为扩散均方差的初始值, 也就是点源宽度. 这两个值不随实验条件改变, 如果将它们移到方程左边, 重写 (1), (2) 式, 可以得到新的表达:

$$\mu(u_*, D) = \mu(D) - H = -\frac{A(D)}{u_*^2}, \quad (3)$$

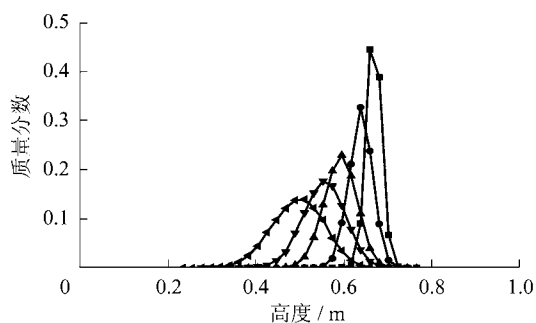
$$\sigma_{pz}(u_*, D) = \sigma_{pz}(D) - C_0 = \frac{B(D)}{u_*}. \quad (4)$$

从而 (3) 式给出了扩散沙粒中心高度相对于点源的下落距离, (4) 式则给出了实际的扩散均方差.

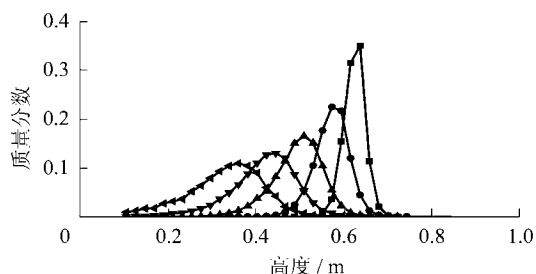
图 7 给出了当点源高度 $H = 0.7$ m, 来流摩阻风速 u_* 为 0.85 m/s, 粒径分别为 0.16, 0.25, 0.45 mm 时, 下风向扩散距离 $L = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ m 处的垂向质量分布. 由图 7 可以看到, 点源扩散质量垂向分布的沿程变化明显, 在来流摩阻风速为 $u_* = 0.85$ m/s 时, 随着扩散距离的增加, 颗粒质量分布集中程度降低, 垂向扩散范围明显增大, 峰值降低, 峰值对应的垂向高度越小; 同时, 平均粒径越大,



a 平均粒径为 0.16 mm



b 平均粒径为 0.25 mm



c 平均粒径为 0.45 mm

— $L = 0.5$ m — $L = 1.5$ m — $L = 2.5$ m
— $L = 1.0$ m — $L = 2.0$ m

图 7 不同下风向扩散距离处的垂向质量分布

Figure 7 Vertical mass distributions of dispersed particles with the variation of wind velocity

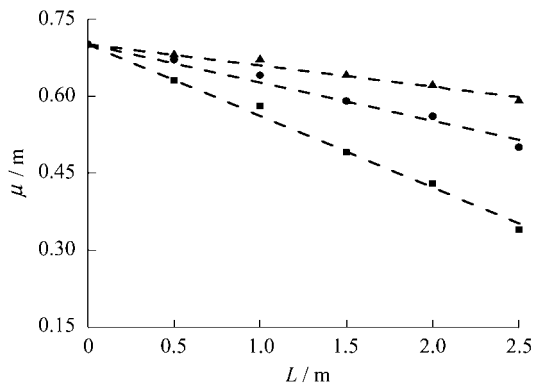
在同一风速下,垂向扩散范围越大,峰值越小,峰值对应垂向高度越小。

图8给出了扩散沙粒的垂向分布中心高度 μ 和均方差 σ_{pz} 随着扩散距离的变化。由图8可见随着扩散距离的增加,高斯分布的中心高度呈线性减小,这与Overcamp^[22]理论结果是定性一致的。而对于扩散均方差,实验得到的扩散均方差随扩散距离的变化与Hanna等^[23]关于烟羽扩散和Ogawa等^[20]的风洞气体扩散实验的结果定性上是一致的,即随着扩散距离增加,均方差呈线性增加。因此,类似于(3), (4)式,可由下列方程表示:

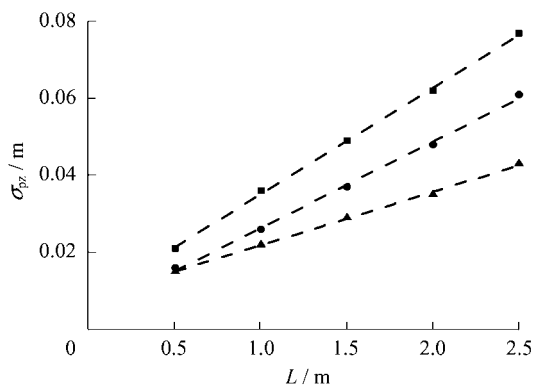
$$\mu(L) = A_1 L, \quad (5)$$

$$\sigma_{pz}(L) = B_1 L. \quad (6)$$

因为(3)式是在下风向1 m处测量得到的,因此,当 $L=1.0$ 时, (3)和(5)式应当相等,所以有 $A_1 = -\frac{A(D)}{u_*^2}$ 。实际上, (5)式是线性的,一旦知道在某一位置 L 处的系数 A_1 随风速和粒径的关系,就可以



a 沙粒扩散后的中心高度 μ



b 均方差 σ_{pz}

点源高度 $H=0.7$ m, 来流风速 $u_*=0.85$ m/s, 三角形、圆形和方形分别代表平均粒径为0.16 mm, 0.25 mm, 0.45 mm的实验测量结果, 虚线是实验结果的拟合曲线

图8 沙粒扩散后的中心高度 μ 和均方差 σ_{pz} 沿着扩散距离 L 的变化

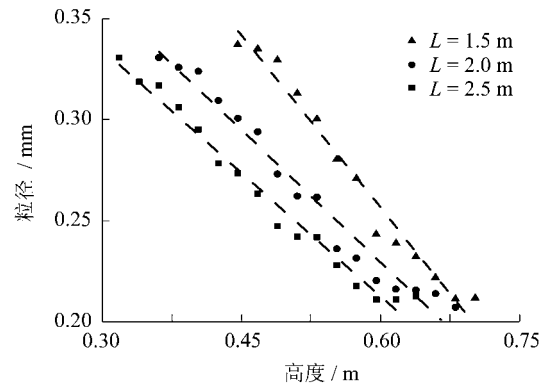
Figure 8 Variation of μ and σ_{pz} with the increase of the distance of dispersion L

得到整个沿扩散过程中扩散沙粒中心高度随着扩散距离、风速和粒径的变化。对于均方差, 类似于中心高度, 也可以得到 $B_1 = \frac{B(D)}{u_*}$ 。这样本文的结果就可表述为

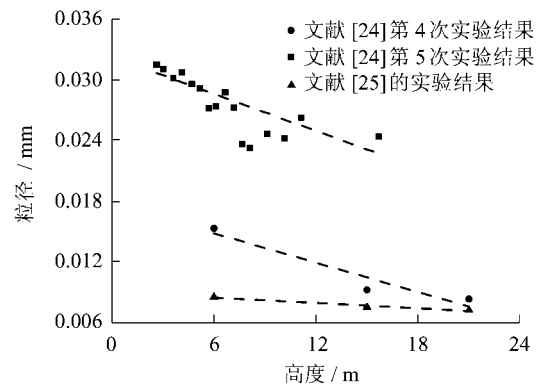
$$\mu(u_*, D, L) = -\frac{A(D)}{u_*^2} \cdot L, \quad (7)$$

$$\sigma_{pz}(u_*, D, L) = \frac{B(D)}{u_*} \cdot L. \quad (8)$$

此外, 本文除了分析以上关于扩散质量分布, 还分析了扩散后的沙粒粒径沿高度的变化(图9)。



a 风洞实验结果



b 野外沙尘暴测量结果

图9 混合颗粒平均粒径沿高度的分布

Figure 9 Distributions of the average diameter of dispersed particles along height

这是因为了解释放沙尘中不同粒径的贡献将有助于增进对沙尘释放机制认识^[11], 而研究不同粒径在大气边界层中的分布将增进人们对沙尘传输, 尤其是沙尘垂向通量变化的认识。具体处理过程如下: 首先, 在风洞中风速 $u_*=0.85$ m/s, 沙粒平均粒径为 $D=0.25$ mm时, 分别在点源下风向 $L=1.5, 2.0, 2.5$ m处采集扩散后不同高度处的沙样; 其次, 对每一下风向 L 处的不同高度收集得到的沙样进行粒径分析; 最后, 根据分析结果给出每一高度处的平均粒径, 继而得到整个沿高度的平均粒径分布。粒径分析显示不同高度收集到的沙样都服从对数高斯分布, 因此本文将粒径分布的高斯均值

作为该高度的平均粒径. 下风向不同距离处平均粒径沿高度变化的结果绘于图9a中, 可见, 混合颗粒扩散后, 其平均粒径随高度呈近似线性降低. 图9b中给出的野外沙尘暴期间测量到的平均粒径随高度变化的一些研究结果^[22-25], 这些结果表明沙尘暴中, 大气中扩散的粒子的平均粒径随高度呈近似线性降低. 比较图9a和9b, 可以发现风洞结果在定性上与野外测量结果是一致的, 这说明重粒子在主要依靠大气和重力作用扩散时, 其平均粒径沿高度呈近似线性降低.

3 结论

本文通过风洞实验研究了混合沙粒的点源扩散. 这些沙粒来自于巴丹吉林沙漠的天然混合沙, 经过简单筛选, 分成了平均粒径分别为0.16, 0.25, 0.45 mm的3组符合对数高斯分布的实验材料. 本文测量了每组粒径的材料在不同来流风速(摩阻风速分别为0.53, 0.69, 0.85, 1.0, 1.17 m/s)和同一风速下风向不同位置处(0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m)的垂向扩散质量分布. 实验结果表明, 不同平均粒径的颗粒在点源扩散后质量在垂向服从高斯分布, 与已有的理论研究一致. 所有的数据通过高斯拟合处理, 拟合均值和均方差作为刻画颗粒点源扩散的参数, 拟合均值表示扩散沙粒的中心高度. 结果显示: 随着风速的变化, 颗粒垂向扩散的中心高度随风速的平方呈反比, 均方差随风速呈反比; 随着与扩散距离的增加, 中心高度呈线性减小, 均方差呈线性增加. 在不同风速下和不同位置处, 随着平均粒径增大, 扩散沙粒中心高度越小, 而均方差则越大. 依据实验结果, 本文得到了混合沙粒点源扩散后的中心高度和均方差随风速、粒径和扩散距离的表达式. 同时, 本文的分析结果还表明混合颗粒扩散后不同高度处平均粒径随高度呈线性递减, 这与已有的野外沙尘暴期间的沙尘粒径观测结果是一致的.

参考文献

- [1] 刘佳, 管清玉, 张君弟. 大气沉降研究方法综述[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2010, 46(S1): 85-89.
- [2] SHAO Ya-ping. Physics and modeling of wind erosion[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [3] GISLASON S R, HASSENKAM T, NEDEL S, et al. Characterization of Eyjafjallajökull volcanic ash particles and a protocol for rapid risk assessment[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(18): 7307-7312.
- [4] GOUDIE A S. Dust storms: recent developments[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(1): 89-94.
- [5] 王金玉, 李盛, 王式功, 等. 沙尘污染对长期暴露人群呼吸系统症状的影响[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2012, 48(4): 61-65.
- [6] ZHENG Xiao-jing. Mechanics of wind-blown sand movements[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2009: 253-270.
- [7] MAHOWALD, M N, BAKER A R, et al. Atmospheric global dust cycle and iron inputs to the ocean[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(4): 15-22.
- [8] KOK J F. A scaling theory for the size distribution of emitted dust aerosols suggests climate models underestimate the size of the global dust cycle[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(3): 1016-1021.
- [9] MYHRE G, STORDAL F. Global sensitivity experiments of the radiative forcing due to mineral aerosols[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D16): 18193-18204.
- [10] SUN Ye-le, ZHUANG Guo-shun, WANG Ying, et al. Chemical composition of dust storms in Beijing and implications for the mixing of mineral aerosol with pollution aerosol on the pathway[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(D24): 997-1000.
- [11] SOW M, ALFARO S C, RAJOT J L, et al. Size resolved dust emission fluxes measured in Niger during 3 dust storms of the AMMA experiment[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, 9(12): 3881-3891.
- [12] DONG Zhi-bao, MAN Duo-qing, LUO Wan-yin, et al. Horizontal aeolian sediment flux in the Minqin area: a major source of Chinese dust storms[J]. Geomorphology, 2010, 116: 58-66.
- [13] BETZER P R, CARDER K L, DUCE R A, et al. Long range transport of giant mineral aerosol particles[J]. Nature, 1988, 336: 568-570.
- [14] FOLCH A, COASTA A, MACEDONIO G. Fall 3D: A computational model for transport and deposition of volcanic ash[J]. Computers & Geosciences, 2009, 35(6): 1334-1342.
- [15] STOHL A, PRATA A J, ECKHARDT S, et al. Determination of time and height-resolved volcanic ash emissions for quantitative ash dispersion modeling: the 2010 Eyjafjallajökull eruption[J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2011, 11(2): 5541-5588.

- tical and Biomedical Analysis, 2004, 34(5): 1125-1129.
- [2] US Pharmacopeial Convention. Pharmacopeia and national formulary[M]. Rockville: Consumers Union, 2005.
- [3] European Directorate for Quality Medicines. European Pharmacopoeia EP5.0[M]. 5 th ed. Strasbourg: Council of European Directorate for Quality Medicines, 2005.
- [4] 孙翠荣. 生物活性分子的快速识别[D]. 杭州: 浙江大学化学系, 2007.
- [5] 苟于强, 胡芳弟. 低温水解制备TiO₂/ACF复合光催化剂及其对茜素红S的降解应用[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2012, 48(4): 131-135.
- [6] 凌雪, 贾腊江, 柳小明. 春秋时期秦青铜器微量元素的激光剥蚀等离子体质谱[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2012, 48(1): 8-14.
- [7] JAIN N, PATHAK D P, MISHRA P, et al. Syntheses and antibacterial studies of some 2-[5-(Aryl)-[1, 3, 4]oxadiazole-2-ylsulfanyl] alkanolic acids[J]. Journal of the Iranian Chemical Society, 2009, 6(1): 77-81.
- [8] PFIZER I, HANDANYAN L A, MORRIS T A, et al. Novel crystal form of anhydrous 7-([1 alpha, 5 alpha, 6 alpha]-6-amino-3-azabicyclo[3.1.0]hex-3-yl)-6-fluoro-1-(2, 4-difluorophenyl)-1, 4-dihydro-4-oxo-1, 8-naphthyridine-3-carboxylic acid, methanesulfonic acid salt: USA, WO9639406[P]. 1995-06-06.
- [9] CHAVA S, GORANTLA S R, GOGULAPATHI V P R. A process for the preparation of telmisartan: India, WO2007010558[P]. 2005-07-19.
- [10] ADRIO J, CARRETERO J C, RUANO J L G, et al. An efficient synthesis of ofloxacin and levofloxacin from 3, 4-difluoroaniline[J]. Heterocycles, 1999, 51(7): 1563-1572.
- [11] WAN P H, LEE K J. Baylis-hillman route to several quinolone antibiotic intermediates[J]. Synthesis, 2006(6): 0963-0968.
- [12] BOWER J F, SZETO P, GALLAGHER T. Enantiopure 1, 4-benzoxazines via 1, 2-cyclic sulfamidates, synthesis of levofloxacin[J]. Organic Letters, 2007, 9(17): 3283-3286.
- [13] 吴健美. 药物微量未知成分及降解产物的质谱研究[D]. 杭州: 浙江大学化学系, 2010.

(责任编辑: 张勇)

(上接第282页)

- [16] HAGE K D. On the dispersion of large particles from a 15 m source in the atmosphere[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1961, 18(4): 534-539.
- [17] WALKER E R. A particulate diffusion experiment [J]. Journal of Applied Meteorology, 1941, 4: 614-621.
- [18] SPRIGG W A. Large particle diffusion from an elevated line source- a comparative evaluation of the theoretical model with field diffusion experiments[J]. Agricultural Meteorology, 1973, 12: 425-439.
- [19] SNYDER W H, LUMLEY J L. Some measurements of particle velocity autocorrelation functions in a turbulent flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1971, 48(1): 41-71.
- [20] OGAWA Y, DIOSEY P G, UEHARA K, et al. Wind tunnel observation of flow and diffusion under stable stratification[J]. Atmospheric Environment, 1985, 19(1): 65-74.
- [21] ZHENG Xiao-jing, HUANG Ning, ZHOU You-he. Laboratory measurement of electrification of wind-blown sands and simulation of its effect on sand saltation movement[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D10): 4322-4328.
- [22] OVERCAMP T J. A General gaussian diffusion-deposition model for elevated point sources[J]. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15(11): 1167-1171.
- [23] HANNA S R, BRIGGS G A, HOSKER R P J. Handbook on atmospheric diffusion[M]. Little Horwood: E Horwood, 1982: 107.
- [24] ALI A A, ALHAIDER M A. Airborne dust size analysis for tropospheric propagation of millimetric waves into dust storms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1987, GE-25(5): 593-599.
- [25] CHEN W, FRYREAR D W. Sedimentary characteristics of a haboob dust storm[J]. Atmospheric Research, 2002, 61(1): 75-85.

(责任编辑: 张勇)