

热扩散和电场对风沙流发展过程的影响

岳高伟, 郑晓静

(西部环境教育部重点实验室, 兰州大学 力学系, 兰州 730000)

(刘宇陆推荐)

摘要: 建立了描述在来流水平风场和由于地表热扩散产生的垂向风场联合作用下的风沙流发展过程的基本方程 通过定量分析表明: 地表热扩散和风沙电场对风沙流发展过程的影响十分明显 在此基础上, 给出地表热扩散和风沙电场对风沙流中的沙粒跃移轨迹、输沙率以及风沙流达到充分发展的时间等的影响规律

关键词: 热扩散; 输沙率; 风沙电场; 跃移运动; 多场耦合

中图分类号: O359 **文献标识码:** A

引 言

与水土流失和风沙运动相关的环境力学问题越来越受到力学工作者的关注^[1,3] 而风沙运动中沙粒的跃移运动是风沙流中沙粒运动的主要形式, 约占运动沙粒总量的 75% 从越来越多的沙粒受来流风场的作用下逐步离开地表, 到形成稳定的风沙流的过程称为风沙流的发展过程 开展对风沙流发展过程的研究, 对人们更清楚地了解风沙运动规律, 采取相应有效措施防沙固沙是非常必要的 为此众多学者已经运用风洞模拟实验和野外观测等手段研究风沙流^[4,5] 虽然这些测量结果都能定性地描述风沙流的结构, 但不同学者测量的结果各不相同, 特别是对 0~4 cm 高度内的集沙量差别更大^[6,8] 对风沙流的理论模拟不仅能再现风沙运动的发生、发展、稳定及消亡过程, 而且对风沙层内气流速度沿高度的分布、床面起沙率、沙粒浓度、单宽输沙率和输沙率沿高度的分布等宏观物理量都能进行定量的描述^[9,12]

由于风沙流发展过程的复杂性, 相关的理论与实验研究不仅数量少, 而且已有理论模拟与实验结果存在较大差异 如: Anderson 等人^[9]在其理论模拟中没有考虑来流风场随时间的变化, 这对描述风沙流发展过程显然是不合适的 本文作者通过将 Anderson 的理论结果与 Shao^[10]的风洞实验结果比较, 发现 Anderson 的理论结果无论是在风沙流达到稳定的时间方面, 还是在达到稳定后的输沙率的预测方面与实验结果差别都较大, 相对误差分别为 38.89% 和 67.65% 同时, 在 Anderson 等人^[9]的研究中也没有考虑风沙电场对沙粒运动的影响 Zheng 等人^[13,14]的结果表明: 风沙电场对稳定风沙流及其沙粒跃移运动都有明显影响

收稿日期: 2005_01_11; 修订日期: 2006_10_24

基金项目: 科技部国家重点基础研究发展规划项目(G2000048702); 教育部重点科技项目资助课题

作者简介: 岳高伟(1977), 男, 河南临颖人, 博士研究生, 主要从事风沙两相流体动力学研究;

郑晓静(1958), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向: 工程问题的建模与仿真(联系人, Tel: +86_931_8912112; Fax: +86_931_8625576; E-mail: xjzheng@lzu.edu.cn)

除此之外,在现有关于风沙跃移运动的各种理论模拟中,一般都将来流风场简化为仅有水平方向风速的风场,至今没有发现有关考虑由于地表热扩散所产生的垂向气流对沙粒运动乃至风沙流发展过程影响的研究。而由于太阳辐射以及地表比空气更容易吸收热量等原因,使得地表温度一般都高于近地表层空气的温度。这种温度梯度使得热量从地表向空中传递,形成向上的垂向气流。这样,实际作用于沙粒的风场不仅有水平方向的速度,而且有垂直向上的速度。在一般情况下,这种垂向风速约在 1 m/s 左右^[15]。但在沙源充足地带,由于植被稀少,地表温度上升很快,使得地表和近地层空气的温差变化比较大,因此产生的垂向风速也会更大一些^[16]。这样,在研究风沙运动时仅仅考虑水平风速的作用是不够的。

本文通过考虑由于地表热扩散所引起的垂向风场影响,建立了描述热扩散温度场、风场和风沙电场作用下,沙粒与热扩散温度场和风场相互耦合作用的描述风沙流发展过程的数学模型。在所考虑的耦合作用中,沙床表面的热扩散将影响近地层的风场,而风场与受静电力作用的运动沙粒相互作用,不仅使得风沙流在自平衡机制下达到稳定(床面起沙量不再随时间增加),而且也将影响沙床表面温度乃至风场的风速。通过对热扩散方程和风场方程以及沙粒运动方程的联立求解,不仅给出沙粒跃移运动轨迹,而且可获得风沙流的宏观特性,如:跃移沙粒浓度、输沙率等沿高度的分布。考虑热扩散和风沙电场影响后所,得到的对风沙流发展过程的理论预测结果与实验结果有良好一致。计算结果表明:沙床地表热扩散和风沙电场都使得沙粒跃移运动轨迹的高度和跨度增大,风沙流发展过程加快,并使得输沙量增加。

1 基本方程

在无限大平坦沙床面上,考虑在来流水平风场和由于地表热扩散引起的垂向风场联合作用下的沙粒,从起动进入风沙流到由于风场和沙粒相互作用达到动态平衡的这一发展过程。为了简便起见,将对风沙流的分析限在二维情形。

1.1 沙粒跃移运动方程

图 1 给出了球形沙粒在风沙流场中的受力示意图。假设沙粒在位于 xOz 平面内作二维运动,来流风速与 x 轴的正方向一致, z 表示沙粒离沙床面的高度。当在风沙流中运动的某一粒径为 D_p 、质量为 m_p 的沙粒,受速度为 $\mathbf{V} = u(x, z, t)\mathbf{i} + w(x, z, t)\mathbf{k}$ 的风场施予的拖曳力 F_D 以及静电力 F_E 和自身重力 F_W 作用,以与沙床表面成角度 θ 的某一初始速度 v_0 起跳

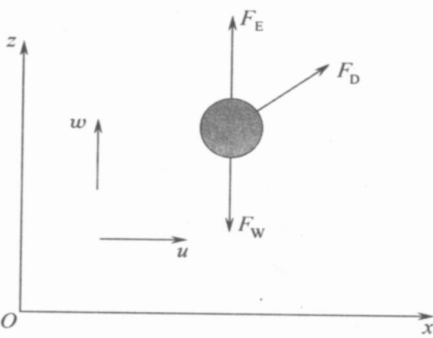


图 1 跃移沙粒受力示意图

后的跃移运动的初边值问题的基本方程可表示为^[13]

$$\begin{aligned}
 m_p x &= -\frac{a D_p^2}{8} \left[\frac{24}{D_p \sqrt{(x-u)^2 + (z-w)^2}} + \frac{6}{1 + \sqrt{D_p \sqrt{(x-u)^2 + (z-w)^2}}} + 0.4 \right] \\
 &\quad (x-u) \sqrt{(x-u)^2 + (z-w)^2}, \\
 m_p z &= -\frac{a D_p^2}{8} \left[\frac{24}{D_p \sqrt{(x-u)^2 + (z-w)^2}} + \right.
 \end{aligned} \tag{1a}$$

$$\left. \frac{6}{1 + \sqrt{D_p \sqrt{(x-u)^2 + (z-w)^2}}} + 0.4 \right\} \\ (z-u) \sqrt{(x-u)^2 + (z-w)^2} - m_p g + E_z q_p \quad (1b)$$

$$t = 0: x = 0, z = 0, x = v_0 \cos \alpha, z = v_0 \sin \alpha \quad (1c)$$

其中 ρ_a 为气流密度; u, w 分别为流场在水平和垂直方向的分速度; x, z 分别为沙粒在二维流场中的位置坐标; $\nu = T^{1.5} / [\rho_a (T + S)]$ 为风场气流的运动粘性系数, 其中, ν, S 为常量, T 为流场温度; g 为重力加速度; v_x, z 和 v_x, z 分别为沙粒在 x, z 方向上的速度和加速度; 由于风沙电场仅沿垂直分布, 取 $E_z = 51\,000(100z)^{-0.6}$ (见 Schmidt 等人的文献[17]); q_p 表示单颗沙粒带电荷量; v_0 为沙粒起跳速度 v_0 和床面之间的夹角

显然, 在沙床表面不同时刻将有众多沙粒从床面起跳. 设任一时刻 t , 沙床表面上单位时间单位面积起跳沙粒数为 $N(t)$, 则有^[9]

$$N(t) = N_a + N_j + N_r = \\ N_0 (\rho_a - \rho_c) + 0.95 \frac{v_{0\max} v_{im\max}}{v_{0\min} v_{im\min}} \exp\left[-\frac{v_0 - 0.56v_{im}}{(0.2v_{im})^2}\right] dv_0 dv_{im} + \\ 1.75 \frac{v_{0\max} v_{im\max}}{v_{0\min} v_{im\min}} v_{im} \exp\left[-\frac{v_0}{0.25v_{im}^{0.3}}\right] dv_0 dv_{im}, \quad (2)$$

这里 $N_a = N_0(\rho_a - \rho_c)$ 是在风力作用下单位时间内单位面积床面上起跳的沙粒数, 其中 $\rho_c = \rho_a u_*^2 = 1.29 \cdot 0.5^2 = 0.3225 \text{ N m}^{-2}$ 为风力直接吹起沙粒时的临界应力, $N_0 = 10^5 \text{ N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 为实验测得常数, $\rho_a = k^2 z^2 |u/z| |u/z|$ 为床面所受风的瞬时应力, N_r, N_j 分别为床面受到速度为 v_{im} 的跃移沙粒冲击时在单位时间单位面积的床面上以初速度 v_0 反弹、溅射的沙粒数^[9] $v_{0\min} = \sqrt{2gD_p}$ 和 $v_{0\max} = 5u_*$ 分别为沙粒起跳初速度的最小和最大值

设 $N(t)$ 颗沙粒以不同的初速度 v_0 和角度 α 起跳, 其起跳初速度分布函数为 $f(v_0, t)$, 则在任一高度区间 $[z, z + dz]$ 内的沙粒数 $N(t)$ 为

$$N(t) = \int_{v_{0\min}}^{v_{0\max}} N(t) f(v_0, t) \left[\frac{1}{|z|} + \frac{1}{|z|} \right] dv_0 \quad (3)$$

其中 z 和 z 分别表示处于上升和下降状态的沙粒速度在 z 方向上的分量. 这样, 在高度 z 处沙粒施予风场的单位体积力在水平和垂向的分量分别为

$$F_x(z, t) = \int_{v_{0\min}}^{v_{0\max}} N(t) m_p f(v_0, t) \left[\frac{x}{|z|} + \frac{x}{|z|} \right] dv_0, \quad (4a)$$

$$F_z(z, t) = \int_{v_{0\min}}^{v_{0\max}} N(t) m_p f(v_0, t) \left[\frac{z}{|z|} + \frac{z}{|z|} \right] dv_0 \quad (4b)$$

而在任一高度区间 $[z, z + dz]$ 内, 在单位时间与水平风向垂直的单位面积上, 所通过的沙粒质量, 即输沙率 $Q(z, t)$, 和在单位时间的水平风向垂直的单位宽度上, 所通过的沙粒质量, 即单宽输沙率 $Q(t)$, 可分别表示为

$$Q(z, t) = \int_{v_{0\min}}^{v_{0\max}} N(t) m_p f(v_0, t) \left[\frac{x}{|z|} - \frac{x}{|z|} \right] dv_0 \quad (5a)$$

$$Q(t) = \int_0^{v_{0\max}} N(t) m_p f(v_0, t) \left[\frac{x}{|z|} - \frac{x}{|z|} \right] dv_0 dz \quad (5b)$$

值得注意的是, 在风沙流发展过程中, 某一时刻的沙粒起跳初速度分布函数 $f(v_0, t)$ 是未知

的,其确定在下一节讨论

1.2 风场方程

考虑风场受沙粒施予的作用力 $\mathbf{F}(z, t) = F_x(z, t)\mathbf{i} + F_z(z, t)\mathbf{k}$ 以及地表热扩散的影响这样,风沙流场所需满足的连续性方程、动量方程和热扩散方程分别为:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \quad (6a)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = \mathbf{g}k - \nabla p + \mathbf{F}(z, t), \quad (6b)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T = F, \quad (6c)$$

这里, μ_a 为风场气流的动力粘性系数; $F = K_a / [(C_v) T]$ 为风场气流的热流扩散率,其中, K_a 和 C_v 分别为风场气流热传导系数和定容比热, ρ_a, p 和 T 分别为风场气流的密度、气压和气流温度,它们满足状态方程

$$p = \rho_a R T, \quad (7)$$

其中 R 为气体常数

把方程(7)代入方程(6b),消去变量 p 和 ρ_a , 整理后的方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{u}{x} + \frac{w}{z} \right) = 0, \quad (8a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{R}{\rho_a} \frac{\partial (\rho_a T)}{\partial x} + \frac{T^{1.5}}{\rho_a (T + S)} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_x(z, t), \quad (8b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{R}{\rho_a} \frac{\partial (\rho_a T)}{\partial z} + \frac{T^{1.5}}{\rho_a (T + S)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + F_z(z, t), \quad (8c)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{K_a}{\rho_a C_v} + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (8d)$$

相应的初始条件和边值条件分别表示为:

$$t = 0: w = 0, T = T_0, \rho_a = \rho_0, u(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right); \quad (9a)$$

$$z = \frac{D_p}{30}: u = 0, w = 0, T = T_a, \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0; \quad (9b)$$

其中 T_0 和 ρ_0 分别为风场气流的初始温度和密度; $\frac{\partial T}{\partial z}$ 为初始流场温度沿高度的变化率; T_a 为流场在 $z = D_p/30$ 处的气流温度值,它的确定与地面温度 T_s 有关 由于地面温度 T_s 是太阳辐射造成的,它的确定可由地表能量平衡方程确定^[16]

2 计算步骤

从以上的分析可知,颗粒的跃移运动和风速廓线都依赖于沙粒起跳速度的概率密度函数 $f(v_0, t)$,而在风沙流发展过程中, $f(v_0, t)$ 是未知的并与随时间变化的颗粒流及其起跳速度有关 在本文中,为了确定颗粒跃移的发展过程、输沙率、风速廓线及起跳速度概率密度函数,其计算流程(图2)如下:

1. 取初始床面温度 $T_s = 318 \text{ K}$, 初始颗粒起跳速度范围为 $v_{0\min} = \sqrt{2gD_p}$ 、 $v_{0\max} = 5u^*$ $\sqrt{2gD_p}$ 为颗粒达到床面以上一个粒径高度时的起跳速度 沙粒起跳角为 $v_0 < 0.3 \text{ m/s}$ 时,

$= 90$; 0.3 m/s $v_0 = 0.4 \text{ m/s}$ 时, $= 75$ 及 $v_0 = 0.4 \text{ m/s}$ 时 $= 40$ (见 Anderson 等人的文献[9])

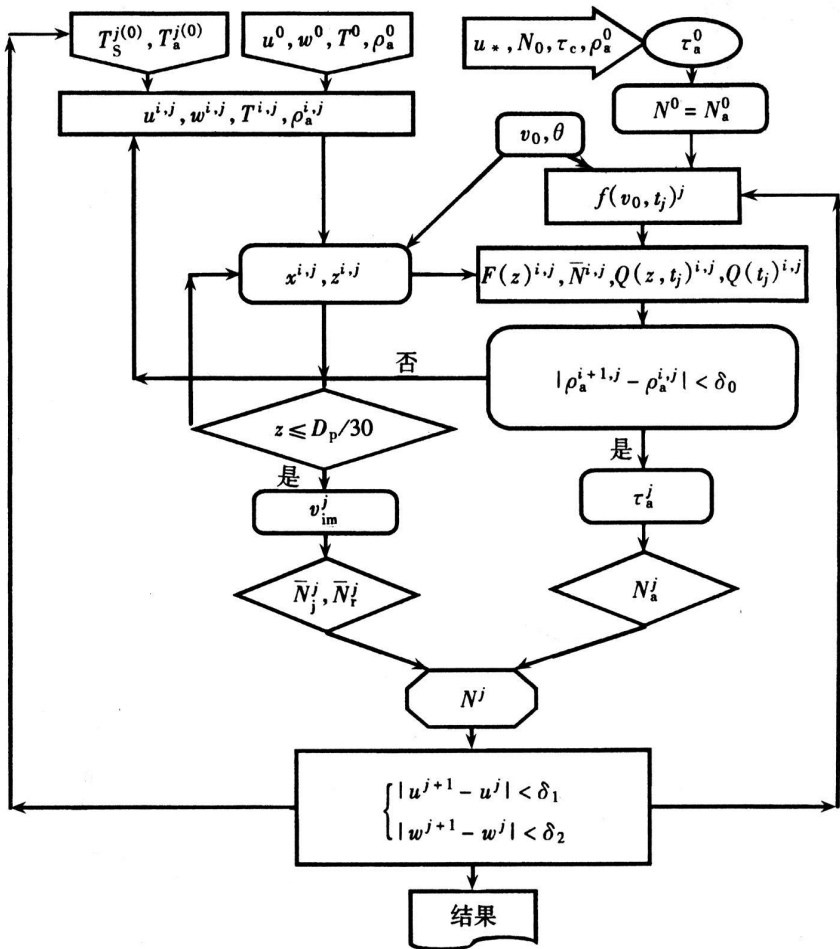


图2 计算流程图

2. 风沙流的持续发展时间 t 分为许多时间步, $t_j = t_0 + j \quad t(t_0 = 0, j = 1, 2, \dots)$, 其中 $t = 4 \sqrt{D_p/g}$ 的确定是由把起跳速度分为是部分中的最短跃移时间 在 t_j 时起跳速度 $v_0(k) (k = 1, 2, \dots, 10)$ 表示为 $v_0^j(k)$, 起跳颗粒数为 $N^j(k)$

3. 由于方程之间的耦合作用, 在求解方程(8)~(9)和方程(1)时采用迭代方法, 上标 i 表示第 i 次迭代 在 t_j 时刻流体密度为 $\rho_a^{0j}(x, z) = \rho_a^{j-1}(x, z)$, 起跳颗粒数为 $N^{0j}(k) = N_0(\rho_a^{j-1} - \rho_c)$ 求解方程(1)和方程(8)~(9)及方程(4)可得到在 t_j 时刻第 i 步的流体密度 $\rho_a^{i,j}(x, z)$ 和溅射颗粒数 $N^j(k)$, 其中 $\rho_a^{j-1}(x, z)$ 和 ρ_a^{j-1} 分别为下一时间步 t_{j-1} 时刻的流体密度和流体剪切应力 应该注意 $N^j(k)$ 中的 k 表示是以初始起跳速度 $v_0(k)$ 起跳的颗粒 重复上述过程直到

$$|\rho_a^{i+1,j}(x, z) - \rho_a^{i,j}(x, z)| < \epsilon, \quad (10)$$

这样就得到 t_j 时刻的流体密度 $\rho_a^j(x, z)$ 同时求解方程(2)和(5)得到床面起跳沙粒数 $N^j(k)$ 、输沙率沿高度的分布 $Q^j(z, t_j)$ 及单宽输沙率 $Q^j(t_j)$, 那么, 可得颗粒起跳速度的概率

密度函数 $f(v_0, t)$

$$f^j[v_0(k), t_j] = \frac{N^j(k) dv_0(k)}{\int_{k=1}^{10} N^j(k) dv_0(k)} \quad (11)$$

4. 复上述过程求解下一时刻的值直到满足

$$|u^{i+1,j}(x, z) - u^{i,j}(x, z)| < \epsilon_1, |w^{i+1,j}(x, z) - w^{i,j}(x, z)| < \epsilon_2 \quad (12)$$

即可认为风沙流达到平衡状态

这样, 风沙流稳定时的发展时间为 t_{j+1} , 可得到风速廓线 $u(x, z)$, 床面起跳颗粒数 $N(t)$, 沙率沿高度的分布, 单宽输沙率和颗粒起跳速度的概率密度函数 $f(v_0, t)$

3 计算结果及讨论

在本文中, TD 表示考虑地表热扩散影响; NTD 表示不考虑地表热扩散影响。为了确定本文模型的有效性, 采用 Shao 和 Raupach^[10] 的实验结果中的输沙率沿高度的分布 $Q(z, t)$ 和单宽输沙率 $Q(t)$ 与本文的模拟结果进行, 如图 3~ 图 4。其中摩阻风速和颗粒粒径与 Shao 和 Raupach^[10] 一样取为 $u_* = 0.5 \text{ m/s}$ 和 $D = 0.25 \text{ mm}$, 本文中单颗颗粒质量带电量为 $m_p = 2.168 \times 10^{-8} \text{ kg}$ 和 $q_p = +1.3 \times 10^{-12} \text{ C}$ (见 Schmit D. S. 等人的文献[17])

从图 3 可以看出: 单宽输沙率随时间发展过程与实验结果有一样的发展趋势, 可分为 3 个阶段, 即: 随时间呈指数增长的发展阶段、达到高峰后的衰减阶段和最后趋于稳定的平衡阶段。尽管不同模型都能在定性上反映出与实验测量一致的这 3 个阶段, 但不同模型所得结果, 无论是在风沙流达到动态平衡时的时间还是在达到高峰的峰值以及平衡阶段的稳定值是不同的。与 Shao 和 Raupach^[10] 的测量得到的达到动态平衡的时间约为 2.16 s 和最大单宽输沙率为 $Q = 0.0473 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的结果相比, Anderson 和 Haff^[9] 的计算结果偏离最大, 相对误差分别为 42% 和 68%。而由本文模型得到影响时的风沙流达到动态平衡时最大单宽输沙率为 $Q = 0.05412 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 与 Shao 和 Raupach^[10] 的测量结果的相对误差仅有 14.41%。而在 $q_p = 0$ 时本模型计算得到的风沙流的发展时间 2.15 s, 只比实验结果小 0.46%; 虽然考虑热扩散和电场都对沙粒施加一个向上的作用力, 但热扩散作用在沙粒上的力比电场力小得多, 因而在促使床面沙粒起跳进入风沙流, 使风沙流达到稳定, 热扩散作用也比电场力的作用小一些。从图 3 可以发现热扩散和风沙电场对风沙流的发展过程产生明显的影响。地表热扩散和风沙电场分别使风沙流达到动态平衡的时间减少并使得最大单宽输沙率相应增大。这是由于地表热扩散产生的垂直向上风速和风沙电场施予沙粒的向上的作用力, 都会增大沙粒的跃移高度, 增大并延长沙粒在空中的跃移时间, 使得风沙流的最大单宽输沙率增加, 沙粒对风场的反作用更为充分, 进而缩短风沙流的发展时间。由此可见, 地表热扩散和风沙电场对风沙流的影响不容忽视。

图 4 给出了利用本文模型模拟的输沙率沿高度的分布曲线与 Shao 和 Raupach^[10] 的测量结果的比较。从图 4 可以看出, 本文的模拟得到的输沙率更为接近 Shao 和 Raupach^[10] 的测量结果, 特别是在 7 cm 以上高度, 所得的预测结果与实验值吻合很好。例如在 10 cm 高度处, 本文计算得到的输沙率 $q_p \times 0$ 时为 $0.39 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 和 $q_p = 0$ 时为 $0.12 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 分别比实验结果大 8.64% 和小 65.7%。而 Anderson 和 Haff^[9] 得到的输沙率计算结果为 $0.01 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$, 与测量值的相对误差为 99.72%。从图 4 可以看出热扩散和风沙电场都能使输沙率增大。在 7 cm

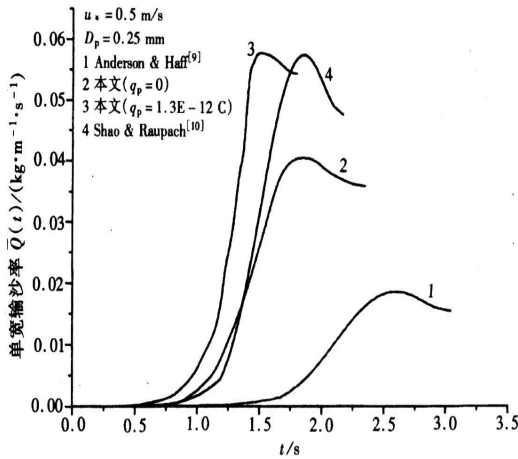


图3 单宽输沙率随时间发展过程

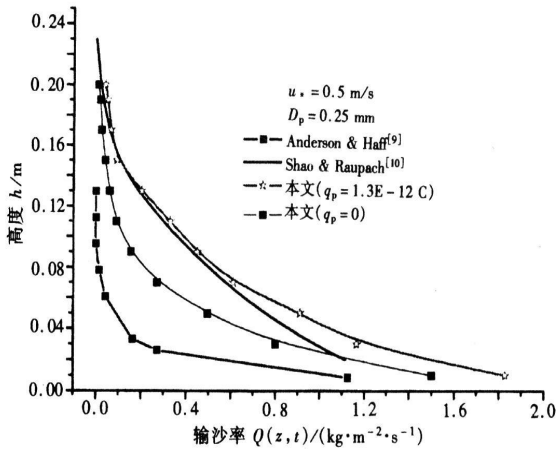


图4 输沙率(质量)沿高度的变化曲线

以下高度, 随高度的降低, 预测值逐步比测量结果大1 这可能是因为在采用集沙仪对输沙率测量时, 由于接近床面处的沙粒浓度较高, 撞击集沙口上下壁的沙粒未能有效收集, 使得实验值偏低的缘故1

图5 所示为在风沙流中追踪以 $v = 0.45 \text{ m/s}$ 起跳的沙粒的跃移轨迹1 本文分别考虑地表热扩散影响(TD) 和不考虑地表热扩散影响(NTD), 当考虑热扩散和电场影响时沙粒的跃移高度 $z = 3.933 \text{ 1 cm}$ 和跃移距离 $x = 8.57 \text{ cm}$, 与不考虑热扩散和电场影响时沙粒的跃移高度 $z = 3.311 \text{ 1 cm}$ 和跃移距离 $x = 5.3 \text{ cm}$ 相比, 分别增大 25.69% 和 61.7% 1 而考虑热扩散($q_p = 0$) 时沙粒的跃移高度 $z = 3.521 \text{ 8 cm}$ 和跃移距离 $x = 7.6 \text{ cm}$ 分别比不考虑地表热扩散影响($q_p = 0$) 的跃移高度 $z = 3.129 \text{ 2 cm}$ 和跃移距离 $x = 5.3 \text{ cm}$ 增大 12.55% 和 43.4% 1 在本文模拟中, 如果不考虑电场作用, 颗粒跃移高度和跃移距离都将减小1 这说明地表热扩散和风沙电场对沙粒运动轨迹有明显的影晌1

图6 和图7 分别给出风沙流场的垂向和水平的风速廓线1 由图6 可以看出, 受地表热扩散的影响, 净风场的垂直风速在近地表附近随高度增大, 大约在 30 cm 高处达到最大值, 约为

1.5 m/s¹ 然后,随高度缓慢减小,这是因为地表热扩散引起的温度梯度减小¹ 当风沙流达到动态稳定时,其垂向风速比净风场的垂直风速相应减小,此时的最大垂向风速仅为 1.1 m/s¹ 这主要是由于沙粒对垂向风速的反作用所致¹ 由于同时考虑地表热扩散和风沙电场作用时,沙粒起跳数增加并在风沙流中滞留的时间长,沙粒对垂直风速的作用增大,从而使垂直风速比净风场和仅考虑地表热扩散的垂直风速小¹ 在净风场情形,水平风速沿高度服从对数分布,而动态稳定时的风沙流场的水平风速则将明显偏离对数分布¹ 由图 7 可以看出,同时考虑地表热扩散和风沙电场作用的风沙流场的水平风速,明显小于净风场以及不考虑地表热扩散和风沙电场作用的风沙流场的水平风速¹ 如:在 10 cm 高度处不考虑地表热扩散和风沙电场作用的风沙流中的水平风速为 4.78 m/s,而同时考虑地表热扩散和风沙电场作用的风沙流场的水平风速仅为 2.933 m/s¹ 由上述分析可见,地表热扩散和风沙电场都使得达动态平衡时的风沙流的水平风速和垂直风速减小,而且其影响是明显的¹ 这是因为考虑热扩散和电场时,垂向风速和电场力对沙粒产生向上的作用力,使得更多沙粒进入风沙流,在输沙量增大(如图 3, 4)的同时,这些沙粒也对水平风速的反作用力变大,风速减小¹

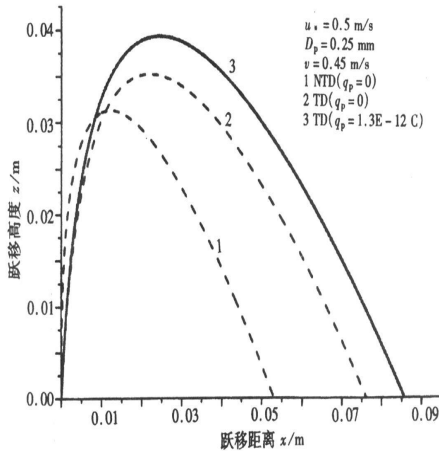


图 5 风沙流中以 $v = 0.45 \text{ m/s}$ 起跳的沙粒运动轨迹

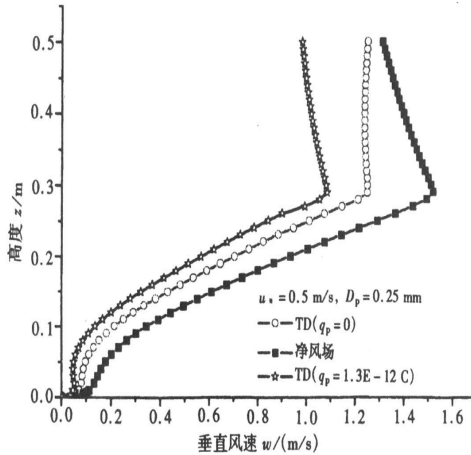


图 6 垂直风速沿高度的变化曲线

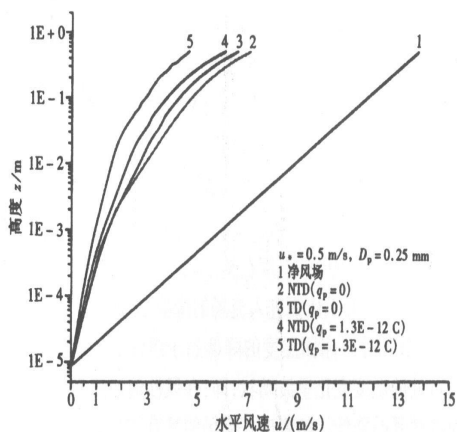


图7 水平风速沿高度的变化曲线

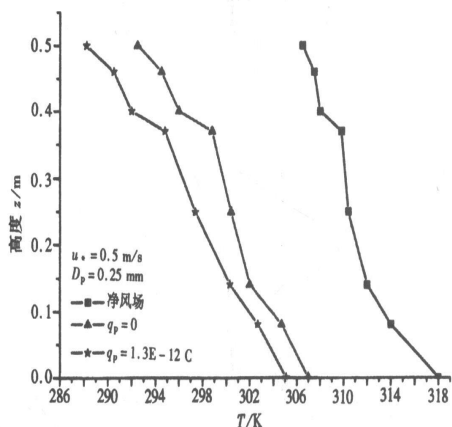


图8 初始状态和稳定风沙流中温度随高度的变化曲线

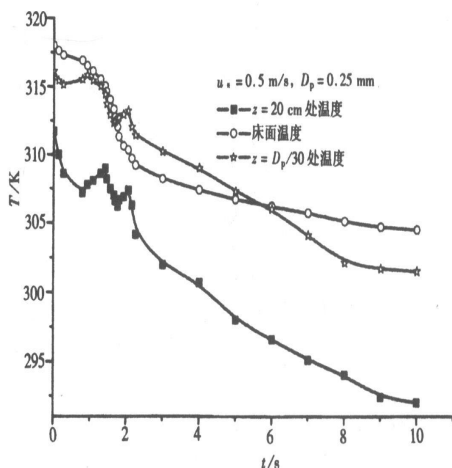


图9 沙床面及不同高度温度随时间的变化曲线

图8 给出了当初始地表温度 $T_s = 318\text{ K}$ 时, 在风沙流形成前后近地表层温度随高度的变化1 由图8 可见, 在无风沙流情形, 在来流摩阻风速为 0.5 m/s 时, 近地表层的温度随高度的

变化是缓慢的,在离地表高度 25 cm 的上方,温度的变化尤为缓慢¹ 而在风沙流形成后,特别是同时考虑地表热扩散和风沙电场作用,风沙流场的温度明显低于净风场情形¹ 如:在 40 cm 高处,风沙流形成后的温度为 292 K ($q_p = 1.3 \times 10^{-12}$ C),比风沙流形成前的温度 308 K 降低了 16 K¹ 不仅如此,温度随高度的变化也十分明显,在近地表层呈持续降低的趋势¹ 这是由于在地表热扩散和风沙电场的联合作用下,进入流场中的沙粒数增加,大量沙粒使温度降低¹

图 9 给出了床面温度及 $z = D_p/30$ 和 $z = 20$ cm 高度处温度,在风沙流发展过程中随时间的变化曲线¹ 由图 9 可见:沙床表面的温度在整个风沙流发展过程中随时间迅速降低,这是因为床面上层温度较高的沙粒离开了床面进入流场的缘故¹ 而当风沙流达到稳定状态(床面起跳沙粒和返回床面沙粒数相等),床面温度的降低趋于缓慢¹ 而在风沙流发展过程中高度 $z = D_p/30$ 及 $z = 20$ cm 处的温度变化呈波动状,即:在风沙流形成初期,此高度处的温度是降低的,这是由于气流使温度开始降低¹ 随着进入流场的具有较高温度的沙粒数增加,这些高度处的流场温度都有一定的回升¹ 在形成稳定风沙流后,流场温度的降低也趋于缓慢¹ 这说明近地表的温度与风沙流是相互影响的¹

4 结 论

本文建立了描述在来流水平风场和由于地表热扩散产生的垂向风场联合作用下的风沙流发展过程的基本方程,并实现了对这一发展过程的数值模拟¹ 通过与实验结果比较发现:由本文所建立的模型得到的结果比由已有模型给出的结果更接近实验值,说明本文模型的合理性¹ 定量分析表明:由于地表热扩散形成向上的垂向风速而风沙电场使沙床表面作跃移运动的沙粒受一向上的静电力,使得沙粒更容易进入风沙流,并使得沙粒跃移的高度和跨度有明显增大¹ 这样,在考虑地表热扩散和风沙电场影响后,计算模拟得到的风沙流达到平衡的发展时间缩短且单宽输沙率和给定高度的输沙率都有明显增加¹ 不仅如此,由于耦合影响,沙粒的跃移运动也将使风沙流中风场的水平风速和垂向风速降低,近地表的温度降低¹ 由此可见,地表热扩散和风沙电场对风沙运动的影响是值得考虑的重要因素¹

[参 考 文 献]

- [1] 姚德良,张强,李家春,等.高寒草甸地区陆面过程观测及耦合模式研究[J].应用数学和力学,2004,25(5):446_454.
- [2] 董飞,刘大有,贺大良.风沙运动的研究进展和发展趋势[J].力学进展,1995,25(3):368_391.
- [3] 王柏懿,陈强,戚隆溪.可侵蚀地表上方含尘大气运动的数值模型[J].力学学报,2004,36(3):265_271.
- [4] Li Z S, Ni J R. Sidewall effect of wind tunnel on aeolian sediment transport[R]. International Center for Arid and Semiarid Studies, Texas Tech University, Lubbock, Texas, USA, 2002: 45_49.
- [5] DONG Zhi_bao, LIU Xiao_ping, WANG Hong_tao, et al. Aeolian sand transport: a wind tunnel model [J]. Sedimentary Geology, 2003, 161: 71_83. (DOI: 10.1016/S6037-0738(03)00396-2)
- [6] Gerety K M, Slingerland R. Nature of the saltating population in wind tunnel experiments with heterogeneous size density sand [J]. Development in Sedimentology, 1983, 38: 115_131.
- [7] Rasmussen K R, Mikkelsen H E. On the efficiency of vertical array aeolian filed traps [J]. Sedimentology, 1998, 45(4): 789_800.
- [8] Nalpanis P, Hunt J C R, Barrett C F. Saltating particles over flat beds [J]. J Fluid Mech, 1993, 251: 661_685.

- [9] Anderson R S, Haff P K. Wind modification and bed response during saltation of sand in air[J]. *Acta Mech*, 1991, 1(Supp): 21_25.
- [10] Shao Y, Raupach M R. The overshoot and equilibration of saltation[J]. *J Geophys Res*, 1992, 97 (D18): 20559_20564.
- [11] Butterfield G R. Near bed mass flux profiles in aeolian sand transport: high_resolution measurement in a wind tunnel[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24(5): 393_412.
- [12] ZHENG Xiao_jing, HE Li_hong, WU Jian_jun. Vertical profiles of mass flux for windblown sand movement at steady state[J]. *J Geoph R*, 2004, 109: B01106. (DIO: 10. 1029/ 2003JB002656)
- [13] Zheng X J, Huang N, Zhou Y H. Laboratory measurement of electrification of wind_blow n sands and simulation of its effect on sand saltation movement[J]. *J Geophy Res*, 2003. 108(D10): 4322. (DIO: 10. 1029/ 2002JD002572)
- [14] Zheng X J, Huang N, Zhou Y Y. The effect of electrostatic force on the evolution of sand saltation cloud[J]. *The European Physical Journal E*, 2006, 19: 129_138.
- [15] Haltiner G J. *Numerical Weather Prediction* [M]. New York: John & Sons Inc, 1971.
- [16] 郑晓静, 岳高伟. 地表温度对颗粒跃移轨迹的影响[J]. *应用力学学报*, 2005, 22(2): 207_211.
- [17] Schmidt D S, Schmidt R A, Dent J D. Electrostatic force on saltating sand[J]. *J Geophy Res*, 1998, 103: 8997_9001.

E f f e c t o f T h e r m a l D i f f u s i o n a n d E l e c t r o s t a t i c F o r c e
o n t h e E v o l u t i o n o f W i n d _ B l o w n S a n d F l o w

YUE Gao_w ei, ZHENG Xiao_jing

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems,

Department of Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China)

Abstract: A theoretical model was suggested to mathematically describe the effect of thermal diffusion from a sand_bed on evolution of a wind_blow n sand flow. An upward wind field was engendered by the thermal diffusion and the coupling interaction among the horizontal and upward wind flow, saltating grains, and a kind of electrostatic force exerted on the grains were considered in this theoretical model. The numerical results show that the effect of the thermal diffusion on the evolution process of wind_blow n grain flow is quite obvious and very similar to the effect of the electrostatic force on the evolution. Not only the time for the entire system to reach a steady state (called the duration time), the transport rate of grains, the mass_flux profiles and the trajectory of saltating grains are affected by the thermal diffusion and the electrostatic force exerted on saltating grains, but also the wind profiles and the temperature profiles at the steady state are affected by the wind_blow n sand flow.

Key words: thermal diffusion; transport rate of grains; electrostatic field; wind_blow n grains; multi_field coupling