0254-6124/2013/33(4)-374–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Cai Huangbing, Chen Chuxin. Physics of wind-blown sand and the threshold wind speed of dust storms on Mars. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(4): 374-380

火星表面风沙物理过程及沙尘暴的起动风速*

蔡黄兵 陈出新

(中国科学技术大学地球和空间科学学院 中国科学院近地空间环境重点实验室 合肥 230026)

摘 要 通过建立风吹动地表沙粒运动的模型并根据大气湍流边界层风速廓线规律, 计算了火星上沙尘暴的起动风速和沙尘暴发生时空中悬浮沙尘粒径的大小, 并对沙粒从地面跳起进入气流的方式进行了验证. 发现当大气为中性层结时, 火星沙尘暴的起动需要离地面 2 m 高处的风速达到 28.7 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. 在起动临界风速下, 地表沙粒需要滚动一个粒径的距离才能跳起, 沙尘暴发生后, 火星大气中悬浮沙尘的粒径小于 30 μm.

关键词 火星, 沙尘暴, 风沙物理, 跃移, 临界风速

中图分类号 P 353

Physics of Wind-blown Sand and the Threshold Wind Speed of Dust Storms on Mars

CAI Huangbing CHEN Chuxin

(*CAS Key Laboratory of Geospace Environment, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026)

Abstract The planet Mars is most closely related to Earth in its size and character. From the comparative planetology point of view, what happens on Mars is of importance to our human being on the Earth. There exist dust storms on both Earth and Mars. The dust storm on Mars is different from that on Earth in its scale. However, in some aspects, they are similar on these two planets, like the mechanism for the generation of dust storm. In this paper, a model of wind-blown sand at the surface of sanded ground is constructed, and the threshold wind speed for dust storms to start on Mars is calculated based on the wind profile of atmospheric turbulent boundary layer. It is concluded that the wind speed of 28.7 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ at 2 m height is needed for a dust storm to start on Mars, and the suspended dust particles' diameter is less than 30 μm when wind speed is at the threshold value. It is also found that sands need to roll a distance of one particle's diameter before saltation.

Key words Mars, Dust storm, Wind-blown sand, Saltation, Threshold wind speed

---

* 国家自然科学基金项目 (41074118, 41121003), 中国科学院知识创新项目 (KZCX2-EW-QN501) 和中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-01) 共同资助

2012-03-16 收到原稿, 2012-09-17 收到修定稿

E-mail: chb@mail.ustc.edu.cn. 通讯作者陈出新, E-mail: chuxin@ustc.edu.cn

0 引言

在人造行星探测器到达火星之前, 通过天文望远镜观察到火星是一个常年被黄褐色云雾笼罩着的星体 [1]. 1971 年, Mariner 9 号飞船到达火星, 传回的照片显示火星正在经历一次全球范围的沙尘暴 [2]. 1997 年 9 月, Mars Global Surveyor 飞船进入绕火星飞行轨道, 此后几年间的观测资料都表明火星上常年有大大小小不同规模的沙尘暴发生 [3−4], 并且在 2001 年 6 月到 7 月间观测到一次全球沙尘暴 [5−7].

沙尘暴之所以在火星上如此常见, 是因为火星上存在有利于沙尘暴形成的条件. 首先, 整个火星表面都是沙漠化的, 地势多为平原和盆地, 只在北半球有几座非常高的山 [8]. 其次, 火星两个极区在其冬季都被大气中二氧化碳凝华成的干冰覆盖 [9], 当春夏来临的时候, 干冰升华, 导致极盖区边缘产生很强的温差, 从而导致强风的出现, 另外, 释放出来的大量二氧化碳气体也能形成很强的风 [10]. 与地球上的沙尘暴不同之处是, 火星每隔一些年数会发生一次全球性的沙尘暴. 这种全球沙尘暴一般由一个区域沙尘暴开始, 然后向大范围扩散, 再联合其他区域沙尘暴, 最终遍及全球, 使整个火星陷入黄沙漫天、不见天日的状态. 火星全球性沙尘暴一般发生于南半球夏季, 这时候火星离太阳最近, 与北半球夏季相比, 地表吸收到的太阳辐射更强, 温度更高, 对流更为强烈, 沙尘可以依靠跨越赤道的增强对流圈从南半球输运到北半球 [11]. 南半球的 Hellas 盆地往往是全球沙尘暴的起源地, 一般认为是其斜坡地势使风力增强, 风速最先在这里达到扬沙的临界值 [12].

火星表面需要多大风速才能将沙粒从地面吹起来以及能维持多大粒径的尘粒悬浮于空中, 这需要用行星大气湍流边界层理论和风沙相互作用的物理机制来解释. Bagnold 等 [13] 最早对风沙物理机制进行了系统的研究, 其将风引起的沙尘运动分为三种: 一种称为蠕移, 是指风吹动较大颗粒沙子在地表滚动, 但不能脱离地面; 第二种称为跃移, 即风将沙粒从地面吹起, 以形似抛物线轨迹运动一段距离后又掉落到地面上; 第三种称为悬移, 指较小尘粒进入气流后长时间悬浮于大气中. Bagnold 根据实验观察认为, 沙粒从地面跳起进入气流之前, 先要在地面滚动一段距离, 积累了足够动量之后通过与地表其他沙粒碰撞后起跳. 也有人认为沙粒可以直接被风吹起, 在起跳之前, 先在原位置有微小振动, 待风速超过临界值后直接跳起. 本文将建立一个沙粒在地表运动的微观模型并根据数值计算结果对此进行验证.

一般而言, 沙粒粒径越小, 受到的重力越小, 起动所需要的风速就越小. 然而, 沙粒越小, 其表面积与体积比越大, 沙粒之间通过表面相互接触产生的分子凝聚力相对重力也就越大, 凝聚力的束缚不利于沙粒脱离地面. 因此, 最容易起动的沙粒粒径应该在某个固定值附近, Bagnold 通过实验得出地球上粒径为 $80\,\mu$m 的沙粒具有起动所需临界风速的最小值, 在火星上为 $100\,\mu$m[14]. 当沙粒被风吹起之后, 不再受到凝聚力束缚, 因此, 其粒径越小越容易被大气湍流维持悬浮于空中. 沙尘暴过程中被输送到高空并在水平方向传播很远距离的尘粒粒径都小于 $80\,\mu$m, 这些微小尘粒是通过最先发生跃移的较大沙粒在掉落到地面上时与地面碰撞溅射起来的. 跃移起来的较大沙粒在空中被风加速一段距离后获得一定速度, 与地面发生碰撞时产生的碰撞力足以克服微小尘粒受到的凝聚力. 因此, 只要满足三个条件: (1) 地表存在各种不同粒径的沙尘, (2) 风速达到使沙粒发生跃移的临界值, (3) 大气边界层湍流不被抑制, 沙尘暴就能够发生. 如前所述, 这些条件在火星上都是满足的.

1 风–沙物理模型及计算方法

1.1 大气湍流边界层风速廓线

要得到离地面某一高度的风速, 需要利用风速廓线理论. 行星大气边界层都具湍流结构, 湍流能量是依靠风速切变和对流来维持的. 风速切变的产生是因为地面对在其表面吹过的风有摩擦阻力作用, 这种摩擦阻力又通过分子粘性和湍流的雷诺应力向上传递. 对流的产生则是由于地表附近温度随高度递减速率快于绝热递减率导致的不稳定层结. 当对流本身是一种无规则流动的不稳定层结时, 湍流能量也会由于不稳定性而增强.

当大气为中性层结时, 水平风速廓线规律为

$$\begin{cases} \bar{u}(z) = \dfrac{\tau_{\mathrm{w}}}{\mu} z, \quad z \leqslant \delta, \\ \bar{u}(z) = \dfrac{u_*}{\kappa} \ln\left(\dfrac{z}{\delta}\right) + \dfrac{\tau_{\mathrm{w}}}{\mu}\delta, \quad z > \delta. \end{cases} \tag{1}$$

其中, τ_{w} 为地表摩阻, μ 为大气动力学粘性系数, $\kappa = 0.4$ 为 Kalman 常数; δ 为最靠近地面的一个极薄气层的厚度, 该气层被称为层流子层, 由于该气层内

速度剪切非常大, 分子粘性的作用远大于雷诺应力, 处于层流状态. δ 的大小约为几个毫米, 只有当地面粗糙度小于 δ 时, 式 (1) 才适用, 对于沙粒粒径不超过 δ 的沙面, 该式是适用的. 本文取 $\delta = 2\,\mathrm{mm}$.

式 (1) 中,

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_\mathrm{a}}}, \tag{2}$$

称为摩擦速度, 其具有速度量纲, 并且在距离地面约 100 m 的近地面层内近似不变, 可认为是一个常数, 其中, ρ_a 为空气密度,

$$\tau = -\rho_\mathrm{a}\overline{u'v'} \tag{3}$$

为雷诺应力. 在大气湍流边界层中总具有正值, $\bar{u}'$ 和 $\bar{v}'$ 分别为水平和垂直方向的湍流平均扰动速度, 其大小是相当的. 另外, 由于层流子层和其外部的湍流层相互耦合, 雷诺应力与地表摩阻大小相等, 即

$$\tau = \tau_\mathrm{w}. \tag{4}$$

1.2 风对沙粒的作用力

当沙粒和空气有相对运动速度时, 空气会对沙粒产生拖拽力, 其表达式为

$$\boldsymbol{F}_\mathrm{d} = \frac{1}{2}\rho_\mathrm{a} C_\mathrm{d} A|\boldsymbol{V}_\mathrm{r}|\boldsymbol{V}_\mathrm{r}. \tag{5}$$

其中, $\boldsymbol{F}_\mathrm{d}$ 为拖拽力, $\boldsymbol{V}_\mathrm{r}$ 为空气相对沙粒运动的速度矢量, $A = \pi d_\mathrm{p}^2/4$ 为沙粒横截面积, C_d 为拖拽系数. C_d 只是沙粒在风中运动时雷诺数的函数, 这里采用文献 [15] 给出的关系式, 即

$$C_\mathrm{d} = 24(1 + 0.15R_\mathrm{e}^{0.687})/R_\mathrm{e}, \tag{6}$$

$$R_\mathrm{e} = \frac{\rho_\mathrm{a} d_\mathrm{p} u}{\mu}. \tag{7}$$

其中, R_e 为雷诺数, d_p 为沙粒粒径, u 为风速.

在大气边界层底部, 尤其是靠近地表的气层内, 风速剪切较大, 沙粒顶端风速大于底端风速, 这样会对沙粒产生向上的抬升力, 有

$$F_\mathrm{lift} = \frac{1}{2}C_\mathrm{l}\rho_\mathrm{a} A(u_\mathrm{top}^2 - u_\mathrm{bot}^2). \tag{8}$$

其中, u_top 为沙粒顶端风速, u_bot 为沙粒底端风速, 当沙粒还在地面上时, 其底端风速为零, C_l 为抬升系数, 取 $C_\mathrm{l} = 0.85C_\mathrm{d}$[16].

1.3 沙粒起动风速的计算

采用一种理想化的模型, 认为沙面主要由相同粒径的球形沙粒按图 1 所示的形式堆叠而成, 在沙面最

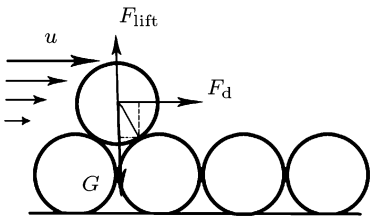


图 1 沙粒静止时的受力

Fig. 1 Force diagram of stationary sand

上层的沙粒受到风对其施加的拖拽力、抬升力以及重力. 这里选取稍大的沙粒 (大于 100 μm), 不考虑沙粒之间分子凝聚力的作用, 并忽略摩擦力以及其他可能出现的力, 例如浮力、沙粒之间摩擦产生的静电力等.

在风的拖拽力作用下, 如图 1 所示的沙面, 上层沙粒最容易起动的方式是绕下层沙粒滚动, 要开始滚动, 必须满足如下合力矩不小于零的条件:

$$F_\mathrm{d} r\cos(\pi/6) + (F_\mathrm{lift} - G)r\sin(\pi/6) \geqslant 0. \tag{9}$$

其中, $r = d_\mathrm{p}/2$ 为沙粒半径, G 为沙粒受到的重力.

根据式 (1) 描述的风速廓线规律, 沙面之上的层流子层内的风速为

$$\bar{u}(z) = \frac{\tau_\mathrm{w}}{\mu}z, \quad z \leqslant \delta,$$

并且沙粒粒径远小于 δ, 因此, 沙粒顶端风速为

$$u_\mathrm{top} = 2\tau_\mathrm{w} r/\mu. \tag{10}$$

底端风速为零. 用来计算拖拽力的风速取沙粒截面内的平均值, 即

$$u = \tau_\mathrm{w} r/\mu. \tag{11}$$

将式 (10) 和式 (11) 代入式 (9) 取平衡态, 可得到

$$\frac{\tau_\mathrm{w}}{\mu} = \left(\frac{\rho_\mathrm{p} g}{1.925 C_\mathrm{d}\rho_\mathrm{a} r}\right)^{1/2}. \tag{12}$$

再由式 (11) 得到

$$u = \left(\frac{\rho_\mathrm{p} g r}{1.925 C_\mathrm{d}\rho_\mathrm{a}}\right)^{1/2}. \tag{13}$$

其中, ρ_p 为沙粒密度. 得到沙粒截面内风速的平均值 u 之后, 由式 (11) 求出

$$\tau_\mathrm{w} = \mu u/r. \tag{14}$$

再由摩擦速度的定义式 (2) 和式 (4), 可得

$$u_* = \sqrt{\tau_\mathrm{w}/\rho_a}. \tag{15}$$

得到 $\tau_{\rm w}$ 和 u_* 的值, 就可以根据风速廓线规律式 (1) 得到距离地面高度为 z 处的风速.

从式 (6) 和式 (7) 可以看到, 拖拽系数 $C_{\rm d}$ 与风速 u 有关, 因而不能直接用式 (13) 得到 u 的值, 在计算的时候采用迭代法, 先给出一个 u 的估计值 u_0, 然后将这个估计值代入式 (6) 和式 (7), 得到一个 $C_{\rm d}$ 值, 再由这个 $C_{\rm d}$ 代入式 (13) 得到一个新的 u 值 u_1, 如果 $|(u_1-u_0)/u_1|\geqslant 0.001$, 则继续用 u_1 来计算 $C_{\rm d}$, 一直循环到 $|(u_1-u_0)/u_1|<0.001$, 最后得到的 u 即是所需要的.

1.4 沙粒起跳模型

沙粒起动后, 开始绕着下层沙粒滚动, 滚动过程中沙粒的速度、位移和受到的力如图 2 和图 3 所示. 当沙粒开始绕下层沙粒 1 滚动时, 向心力由所受合力指向沙粒 1 圆心的分量提供. 若在绕沙粒 1 滚动过程中合力提供的向心力不小于所需的向心力, 则沙粒不能脱离地表, 然后与沙粒 2 碰撞. 由于沙粒比较坚硬, 可以认为碰撞过程是完全弹性碰撞. 在碰撞瞬间, 指向沙粒 2 圆心方向的速度分量在很短的时间内降为零 (见图 4), 根据冲量定理, 这将产生很大的碰撞力, 若碰撞力与沙粒受到的其他力的合力在垂直向上方向上有不小于零的分量, 则沙粒就能起跳 (见图 5). 由于碰撞时间极短, 只要碰撞时速度不是很小, 碰撞力一般都会比较大, 能够使沙粒跃起.

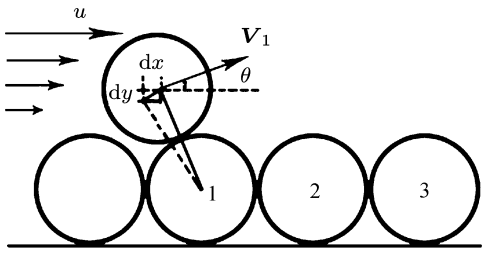


图 2 滚动沙粒的位移和速度

Fig. 2 Displacement and velocity of rolling sand

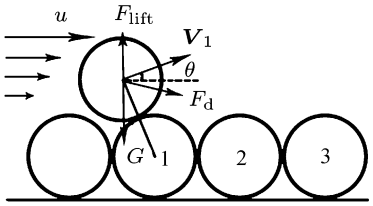


图 3 滚动沙粒的受力

Fig. 3 Force diagram of rolling sand

根据动能定理的微分和积分方式可以计算出沙粒绕下层沙粒 1 滚动的速度 V_1 为

$$F_{{\rm d}x}{\rm d}x+(F_{{\rm d}y}+F_{\rm lift}-mg){\rm d}y={\rm d}E_k. \tag{16}$$

其中, $F_{{\rm d}x}$ 和 $F_{{\rm d}y}$ 分别为拖拽力在水平和垂直方向上的分量, E_k 为动能, 有

$$E_k=\frac{1}{2}mV_1^2. \tag{17}$$

各分力分别为

$$F_{{\rm d}x}=\frac{1}{2}\rho_{\rm a}C_{\rm d}A(u^2+v^2-2uv\cos\theta)^{1/2}(u-v\cos\theta), \tag{18}$$

$$F_{{\rm d}y}=\frac{1}{2}\rho_{\rm a}C_{\rm d}A(u^2+v^2-2uv\cos\theta)^{1/2}(-v\sin\theta), \tag{19}$$

$$F_{\rm lift}=\frac{1}{2}\rho_{\rm a}C_{\rm l}Au_{\rm top}^2. \tag{20}$$

其中, v 为速度 $\boldsymbol{V}_1$ 的模; θ 为 $\boldsymbol{V}_1$ 与水平方向的夹角, 其变化区间为 $[\pi/6,-\pi/6]$, 并且有 ${\rm d}x=-2r\cos\theta{\rm d}\theta$, ${\rm d}y=-2r\sin\theta{\rm d}\theta$, 在 $[\pi/6,\theta_1]$ 区间内对式 (16) 积分, 得到

$$\int_{\pi/6}^{\theta_1}[-2r\cos\theta F_{{\rm d}x}-2r\sin\theta(F_{{\rm d}y}+F_{\rm lift}-mg)]{\rm d}\theta=\int_0^{E_{k1}}{\rm d}E_k. \tag{21}$$

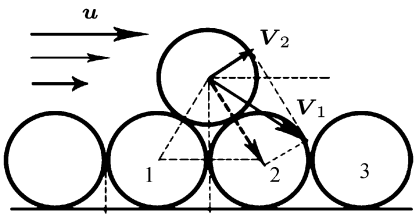


图 4 滚动沙粒的碰撞

Fig. 4 Collision of rolling sand

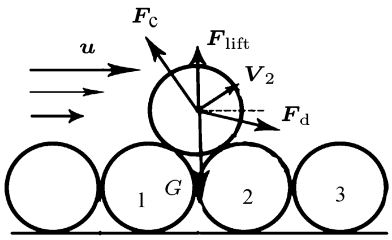


图 5 沙粒碰撞瞬间受力

Fig. 5 Force diagram when sand collides

其中, $\theta_1 \leqslant -\pi/6$, E_{k1} 为沙粒滚动到与水平方向夹角为 θ_1 时的末动能.

积分式 (21) 可以用数值方法求得. 将积分区间分为许多个小区间, 并认为在每个小区间内沙粒受到的力是不变的. 首先, 用 1.3 节计算出的风速 u 和沙粒速度的初值 $v = 0$ 代入式 (18)~(21), 计算出第一个小区间内沙粒动能的增量, 得到沙粒动能, 然后利用动能计算出速度大小, 再将所得的速度值代入来计算第二个小区间内的动能增量. 各个小区间内动能增量的累积即为沙粒的末动能, 由末动能即可算出末速度的大小.

1.5 悬浮尘粒粒径大小的计算

在近地面层内, 湍流通量 $\tau = -\rho_{\mathrm{a}}\overline{u'v'} = \rho_{\mathrm{a}}u_*^2$ 为常量, 并且 $\bar{u}'$, $\bar{v}'$ 和 u_* 的大小是相当的. 从地面跳起的沙粒在空中受到湍流扰动施加的拖拽力, 如果向上的拖拽力不小于沙粒受到的重力, 则沙粒就能够被湍流携带到高处或维持悬浮于空中. 在此, 计算风速为起动临界风速时空中悬浮尘粒粒径的大小分布.

根据向上湍流扰动施加的拖拽力等于重力的条件, 有

$$\frac{1}{8}C_{\mathrm{d}}\rho_{\mathrm{a}}\pi d_{\mathrm{p}}^2\bar{v}'^2 = \frac{1}{6}\pi d_{\mathrm{p}}^3\rho_{\mathrm{p}}g. \tag{22}$$

由于 $\bar{v}' \approx u_*$, 用 u_* 代替 $\bar{v}'$, 得到

$$d_{\mathrm{p}} = \frac{3C_{\mathrm{d}}\rho_{\mathrm{a}}u_*^2}{4\rho_{\mathrm{p}}g}. \tag{23}$$

其中, C_{d} 用式 (6) 和式 (7) 计算, 风速 u 取 1.3 节得到的风速 $\bar{u}(z)$, d_{p} 的计算同样要用到类似 1.3 节所述的迭代法. 空气密度 ρ_{a} 随高度有较大变化, 而近地面层内温度变化不大, 有

$$\rho_{\mathrm{a}}(z) = \frac{p_{\mathrm{s}}}{RT_0}\exp\Big(-\frac{z}{H}\Big). \tag{24}$$

其中, p_{s} 为地表气压, T_0 为温度, R 为气体常数, H 为标高, $H = RT_0/g$.

1.6 用于计算的参数

火星表面重力加速度 $g = 3.7\,\mathrm{m{\cdot}s^{-2}}$, 沙粒密度取火星平均密度, $\rho_{\mathrm{p}} = 3.9\times10^3\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$. 火星大气主要由 95% 的二氧化碳及 3% 的氮气和 2% 的氩气组成, 气体常数 $R = 192\,\mathrm{m^2{\cdot}s^{-2}{\cdot}K^{-1}}$, 近地面层内平均气温 $T_0 = 200\,\mathrm{K}$, 地面平均气压 $p_{\mathrm{s}} = 700\,\mathrm{Pa}$, 标高 $H = 10\,378\,\mathrm{m}$. 空气密度利用式 (24) 计算, 动力学粘性系数为 200 K 时二氧化碳气体的动力学粘性系数 $\mu = 1.01\times10^{-5}\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-1}{\cdot}s^{-1}}$.

2 计算结果与分析

2.1 沙粒起动风速

根据 1.3 节所述的模型及计算方法, 选取不同沙粒粒径, 计算其起动的临界风速, 并给出从 1 m 到 100 m 内风速随高度变化的曲线 (见图 6) 以及离地面 2 m 高处的起动临界风速 (见图 7). 从图 6 和图 7 的数据可以看出, 风速随高度以对数规律递增, 在离地面越近的地方, 风速剪切越大. 粒径在 100 μm 以上的沙粒起动临界风速与粒径成正比, 其中, 粒径为 100 μm 的沙粒起动需要 2 m 高处的风速达到 $28.7\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$.

2.2 沙粒起跳方式

对于不同粒径沙粒, 根据式 (21) 可以计算在风

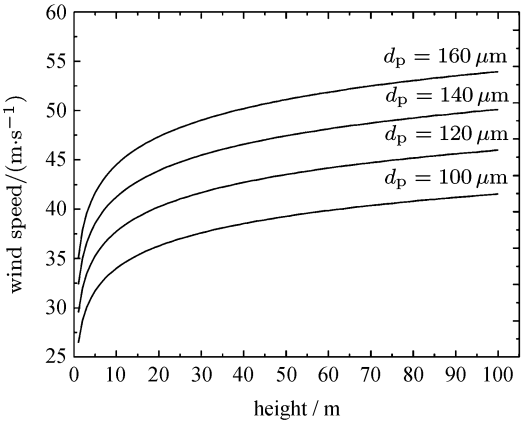


图 6 各粒径沙粒起动临界风速廓线

Fig. 6 Threshold wind profile of sands of different diameter

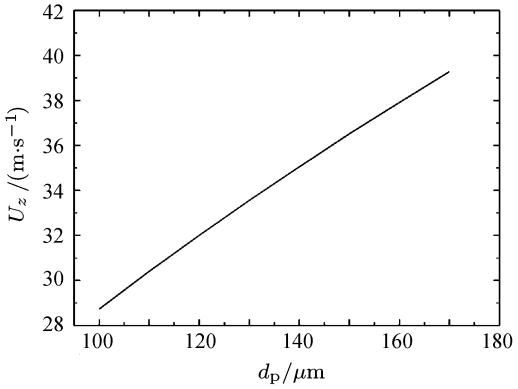


图 7 两米高处各粒径沙粒的起动风速

Fig. 7 Threshold wind speed at 2 m height versus particle diameter

速为各自起动临界风速时沙粒绕下层沙粒 1 滚动过程中的速度, 并发现滚动到一定位置时合外力不足以提供所需向心力, 此时沙粒的速度 V_1 及其与水平方向的夹角 θ_1 列于表 1 中. 表 1 同时还给出了由 1.3 节计算出的各粒径沙粒起动所需的摩擦速度. 从表 1 中可以看出, 沙粒已经基本滚过一个粒径的距离, 速度方向斜向下, 因此会与沙粒 2 发生碰撞, 通过碰撞来起跳.

如果风速大于起动临界风速, 则沙粒起跳方式有所不同. 表 2 给出了粒径为 100 μm 的沙粒, 在不同摩擦速度下滚动到合外力刚好不足以提供所需向心力时的速度及角度. 可以看出, 风速越大, 沙粒滚动的距离越小. 当摩擦速度为 164 cm·s^{-1} 时, 沙粒没有滚动, 而是直接起跳, 这是因为风对沙粒的抬升力已经超过了沙粒的重力.

综上可知, 当风速为起动临界风速时, 沙粒需要滚动大约一个粒径的距离然后通过碰撞起跳, 如果是较强的骤风吹过地面, 沙粒可以被直接抬起.

表 1 临界风速下各粒径沙粒滚动末速度

Table 1 Terminal velocity of rolling sands of different diameter at threshold frictional velocity

粒径大小 $d_{\rm p}/\mu$m	起动摩擦速度 $\mu_*/$(cm·s^{-1})	$V_1/$(cm·s^{-1})	$\theta_1/(^\circ)$
100	131	1.06	−24.45
120	143	1.16	−24.15
140	154	1.26	−23.99
160	164	1.35	−23.69

表 2 大于临界风速时 100 μm 粒径沙粒滚动末速度

Table 2 Terminal velocity of rolling sand of 100 μm diameter at different frictional velocity

粒径大小 $d_{\rm p}/\mu$m	起动摩擦速度 $\mu_*/$(cm·s^{-1})	$V_1/$(cm·s^{-1})	$\theta_1/(^\circ)$
100	143	0.87	−5.25
100	154	0.54	19.05
100	164	0.07	30.00

2.3 悬浮尘粒粒径大小

根据 1.5 节所述方法来计算火星沙尘暴发生时空中悬浮尘粒粒径的大小. 当风速为 100 μm 粒径沙粒的起动风速时, 摩擦速度为 1.31 m·s^{-1}, 此时从 1 m 到 100 m 高度内, 能够被湍流维持悬浮的尘粒为 25∼31 μm, 并且随高度增加, 悬浮粒径越变越小 (见图 8).

3 总结与讨论

根据中性层结时的风速廓线及沙粒起动模型得到了火星上沙粒起动的临界风速, 例如, 粒径为 100 μm 的沙粒起动需要距地面 2 m 高处风速达到 28.7 m·s^{-1}, 并且根据沙粒滚动模型得出结论, 认为在临界风速下, 沙粒要在地表滚动一个粒径的距离然后通过碰撞发生跃移. 从结果也可以看出, 第一次跃移的速度都比较小, 只有 1 cm·s^{-1} 左右, 不过沙粒跃移到空中之后被风加速, 能够获得更大速度, 因而掉落到地面后通过碰撞能够被反弹到更高位置, 或者溅射起其他沙粒.

当风速为 100 μm 粒径沙粒的起动风速时, 火星近地面层内的湍流能够维持粒径 30 μm 以下的尘粒悬浮于空中, 并且越到高处悬浮粒径越小. 由于受到凝聚力的束缚, 这些小的尘粒并不是最先起动的, 而是由 100 μm 粒径的沙粒与地面碰撞时溅射起来的. 从悬浮粒径随高度的分布可知, 各种粒径的尘粒被风吹起之后, 只有较小粒径的那部分能够继续被湍流携带到更高处, 并且越到高处粒径越小, 由此可知, 空气中尘粒的数量密度会随高度增加而降低.

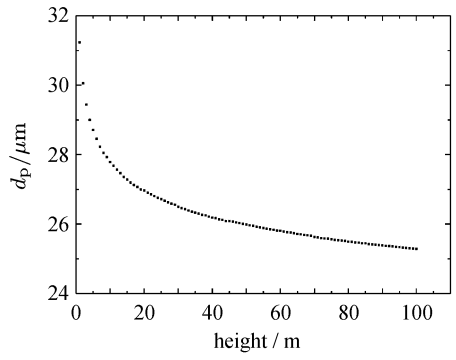


图 8 悬浮尘粒粒径的高度分布

Fig. 8 Diameter of suspended particle versus height

以上结论是根据中性层结时的风速廓线而得出的, 对于大气不稳定层结时的情况, 只在此做一下定性说明. 火星上的沙尘暴一般多发于夏季, 此时大气中存在很强的对流, 中性层结时的风速廓线规律不再适用, 而需要加入不稳定度的修正. 根据 Monin-Obukov 理论, 当摩擦速度相同时, 不稳定层结时平均风速要小于中性层结时的情况, 因而起动风速比中性层结时要小. 另外, 由于强对流的存在, 水平平均风速的剪切较小, 空中尘粒的数量密度不再出现分层现象, 并且可以随着对流传输到非常高的位置.

参考文献

[1] Gifford F A. A study of Martian yellow clouds that display movement [J]. *Monthly Weather Rev.*, 1964, **92**(10):435-440

[2] Steinbacher R H, Kliore A, Lorell J, *et al.* Mariner 9 science experiments: Preliminary results [J]. *Science*, 1972, **175**(1):293-294

[3] Cantor B A, James P B, Caplinger M, Wolff M J. Martian dust storms: 1999 Mars Orbiter Camera observations [J]. *J. Geophys. Res.*, **106**(E10):23 653-23 687

[4] Huiqun Wang. Dust storms originating in the northern hemisphere during the third mapping year of Mars Global Surveyor [J]. *Icarus*, 2007, **189**(1):325-343

[5] Smith M D, Conrath B J, Pearl J C, Christensen P R. Thermal emission spectrometer observations of Martian planet-encircling dust storm 2001A [J]. *Icarus*, 2002, **157**(1):259-263

[6] Strausberg M J, Wang H, Richardson M I, *et al.* Observations of the initiation and evolution of the 2001 Mars global dust storm [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**(E02006)

[7] Cantor Bruce A. MOC observations of the 2001 Mars planet-encircling dust storm [J]. *Icarus*, 2007, **186**(1):60-96

[8] Christensen P R, Bandfield J L, James F, *et al.* Morphology and composition of the surface of Mars: Mars Odyssey THEMIS results [J]. *Science*, 2003, **300**(1):2056-2060

[9] Kelly N J, Boynton W V, Kerry K, *et al.* Seasonal polar carbon dioxide frost on Mars: CO_2 mass and columnar thickness distribution [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**(E03S07)

[10] Toigo A D, Richardson M I, Wilson R J, *et al.* A first look at dust lifting and dust storms near the south pole of Mars with a mesoscale model [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(E7):5050

[11] Zurek R W, Martin L J. Interannual variability of planet-encircling dust storms on Mars [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(1):3247-3259

[12] Magalhaes J A, Young R E. Downslope windstorms in the lee of ridges on Mars [J]. *Icarus*, 1995, **113**(2):277-294

[13] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes [M]. London: Methuen, 1941

[14] Greeley Ronald, Iversen James D. Wind as a Geological Process on Earth, Mars, Venus and Titan [M]. Oxford: Cambridge University Press, 1985

[15] Clift R, Gauvin W H. Motion of entrained particles in gas streams [J]. *Can. J. Chem. Eng.*, 1971, **49**(1):439

[16] Chepil W S. The use of evenly spaced hemispheres to evaluate aerodynamic forces on a soil surface [J]. *Trans. Am. Geophys. Univ.*, 1958, **39**(1):379