

跃移砂粒起跳的受力机制

贺大良

刘大有

(中国科学院沙漠研究所)

(中国科学院力学研究所)

提 要

根据作者拍摄的高速电影摄影实验发现,沙粒起跳后垂直加速度均为负值,亦即沙粒跳离地面后再无大于重力的、向上的外力作用于其上,从而排除了八种起跳学说中的五种有关非接触力的起动学说,即:升力起动说、压差起动说、湍流起动说、负压起动说和涡旋起动说。在余下的三种有关接触力的起动学说中,作者估算后认为:跃移起跳是斜面飞升与冲击碰撞相结合作用的结果。在凸凹不平的地面上滚动的沙粒只需很小的速度(厘米/秒量级)就可离地而去,并从风中获取更多的能量。在地面上滚动或在空中飞行的沙粒,以不同的角度冲击其它颗粒,能以锐角和钝角反弹飞开。运动沙粒的动能只需有1/10转换为转动动能,就可使沙粒获得数百至上千转/秒的转速。

一、前 言

几十年前,沙粒的三种运动方式——即悬移、跃移和蠕移——就已为人类所认识。但是,几种运动方式的受力机制,尤其是跃移颗粒运动的受力机制,却始终没有得到完满地解决。跃移运动是沙粒运动方式中的主要方式。在略大于起沙风的风速下,以跃移方式运动的沙粒占了运动颗粒总数的大部分。它是埋压道路、农田的主要运动方式。它移速较快,能以风速的若干分之一的速度前进,是沙害突然产生的主要原因之一。它跳跃高度较高,在距地面十分之几米到几米的高度范围内跳跃前进,所经之处能打磨禾苗,使庄稼缺苗断垄。它能打磨汽车的表面油漆,一场风后公路上的汽车外壳被打磨得净光雪亮,严重之处甚至能磨断水泥电杆^①。跃移沙粒也是产生土壤风蚀的主要原因,挟沙气流对土壤的侵蚀速度远远地大于无沙气流^[1]。总而言之,沙粒的跃移运动是产生沙害的主要原因。因此,要想治理沙害,首先就应了解它运动的受力机制,从而设法驾驭它、控制它。几十年来,许多学者都曾对此难题做过不懈的努力,可惜至今仍未能最后解开这个谜。研究这一问题的困难主要在于:

1. 沙粒的运动密集而微小,用肉眼观测很难查清。
2. 运动着的跃移沙粒是以高速飞行的,虽然它们的绝对速度并不很大,但其相对速度却大得惊人。例如,一颗粒径0.2毫米的沙粒以5米/秒的速度运动,则飞过其粒径自身的时间只需要 4×10^{-5} 秒;而一架长7米的飞机以350米/秒超音速飞行,飞过其机身的时间是 2×10^{-2} 秒。即沙粒的相对速度是超音速飞机的500倍。
3. 近年来有人采用高速电影摄影机和频闪光光源对沙粒运动进行研究;观测困难的情况

① 贺大良,达板城的特大风 地理知识 1981年4月

有所改善,但因此又产生了新的问题。例如,沙粒粒径较小,为摄得较清晰的沙粒照片,希望成像较大。常采用的方法是使用长焦距镜头或加用近摄接圈。但是随之而来的问题是景场范围就必然很小。如果使用35毫米胶片拍摄的物像比为1:1,那么景场的大小也就只有35x24毫米²,而沙粒的飞行轨迹常常达到几十厘米至几米,也就是说,拍摄的画面尺度只有飞行轨迹的十分之一到几十分之一。尽管一幅画面上有很多颗粒的轨迹,但每一轨迹都只是零星片断的,而无法追踪一个颗粒由受力起跳到降落的完整轨迹。又如,飞行沙粒移过本身粒径所需时间只有10⁻⁵秒量级,亦即飞行沙粒的曝光时间就是它移过本身粒径所需的时间。曝光时间这样短,就要求人工照明光强极大。沙粒是由沙面上起跳的,在拍摄飞行沙粒的同时也要拍摄部分沙面。沙面上的沙粒一部分是固定不动的,它们的曝光时间等于摄影机的快门启闭时间,这个时间一般约为10⁻³秒量级。亦即,地面上沙粒的曝光量要比飞行沙粒大两个量级,其后果是——飞行沙粒曝光不足,而固定沙面曝光过度。结果沙面上一片白,看不清沙粒脱离地面瞬间的运动。

鉴于存在这些观测上的困难,过去很多学者只能在片断观测的基础上,根据物理学的基本理论对沙粒的运动机制进行推断。这个推断只能算得上假说,有待于经过更完善的观测手段的验证和提高,才能上升为理论。

二、过去的工作

几十年来,有关沙粒起跳的学说大致有以下八种:

1. 斜面飞升说:

G. R. 海斯特与 P. W. 尼古拉^[2]认为,跃移颗粒的飞升是由于沙面不平,在沙面上滚动的沙粒沿凹凸不平的斜面升入空中。W. S. Chepil^[3]还进一步认为,除了沙面不平外,沙粒本身具有的不规则棱角在滚动过程中与地面相撞也是使之借机跃入空中的原因。

2. 压差起动说:

W. S. Chepil^[3]、A. И 兹那明斯基^[4]等人认为,根据伯努利方程,不同高度上的风速差别产生的压力差是造成飞升的原因。

3. 升力起动说:

W. S. Chepil^[3]提出,沙粒在运动中的高速旋转可能是造成飞升的原因之一。E. F. Ford^[5]也提出了沙粒的旋转,但他认为旋转是由于风速梯度和沙粒不对称所造成的。田中贞雄^[6]用比重2.5—2.6的石英沙与比重1.17的硫酸颗粒在风洞中做了旋转速度的观测,发现转速700~800转/秒的沙粒大体上垂直上升,而转速200~400转/秒的沙粒都以40—50°角上升。不言而喻,沙粒的上升是与旋转的马革奴斯(Magnus)效应有关的。

4. 冲击起动说:

R. A. Bagnold^[7]认为,在风速接近临界起动风速时沙粒的冲击是促使其它沙粒起跳或自身反弹再次回到空中的原因。A. И. 伊万诺夫^[8]由分析沙粒的动量出发,认为冲击力可以比沙粒自身的重量大几十到几百倍,因而其它颗粒的冲击力是颗粒飞升的主要动力。凌裕泉与吴正^[9]用高速电影摄影机拍摄的结果证实了A. И. 伊万诺夫的计算,发现沙粒的冲击力是重力的几百到几千倍,因而推断冲击力是使沙粒起跳的可能原因。

5. 振动起动说:

Norman Hudson^[10]认为,沙粒飞升的原因除了其它颗粒冲击、颗粒滚动与地面的碰撞和压力梯度外,还可能是因为流体可将振动能量供给沙粒,其强度可达到发声的程度。当两个振动粒子相遇时,其中一个可弹入空中。Bisal 和 Nielsen^[11]也发现,风洞中显微镜观察台上固定小浅盘中的沙粒,随风速加大而振动加强,最后像弹射一样飞入空中。他们认为,颗粒的运动是由压力波动所引起的冲击力而造成的,其能量来源于流体介质的湍流频谱。对 0.59~0.84 毫米的沙粒,其平均振动频率为 1.8 ± 0.3 赫兹。

6. 湍流起动说:

Exner(转引自文献^[12])认为,沙粒的飞升是由于湍流扩散作用的结果。冯·卡门也认为,湍流的垂直分量对于颗粒的飞升是很重要的。

7. 负压起动说:

A. H. 伊万诺夫^[13]和 B. H. 仙科维奇^[14]认为,颗粒可由负压作用而脱离地表向上跃起,但只有在风速比较大时(>16 米/秒)这个力才具有最大作用(他称之为第二类型脱离),而冲击力的情况相反,在流速小时它是比较大的(他称之为第一类型脱离)。

8. 涡旋起动说:

H. A. Фукс^[15]在综述跃移颗粒起跳原因时认为,除了靠斜面飞升跳离层流层后受湍流垂直分量作用外,还可能是因为涡旋在局部突起地点的分离,由于分离的负压和离心力,就能使沙粒跳起。

综合以上各种学说,可以大致分为两大类,即以接触力为主的跃起学说:斜面飞升说、冲击起动说、振动起动说;以非接触力(气力)为主的跃起学说:升力起动说、压差起动说、湍流起动说、负压起动说和涡旋起动说。两类学说各抒己见、互相批驳、则真理必将寓于其中。

三、各种学说的评价

1. 在五种非接触力引起飞升的学说中,升力起动说是颇有影响的,尤其是在田中贞雄建立了沙粒飞升角度与颗粒转速之间的关系以后,似乎起跳原因就非升力莫属了。但如果把升力的量级估算一下,就会发现其中大有问题。为了定量地说明问题,我们以密度 $\rho_p = 2.6$ 克/厘米³, 粒径 $d = 0.2$ mm 的沙粒为例,估算它的升力。设气体密度为 1.2×10^{-3} 克/厘米³,沙粒以 1000 转/秒的转速在沙面上滚动(因而角速度 $\omega = 6283$ /秒,平动速度至少有 62.83 厘米/秒),气流速度为 150 厘米/秒(因而相对速度 $v = 87.2$ 厘米/秒)。这时作用在沙粒上的马革奴斯力 f_M 为

$$f_M = \frac{\pi}{8} d^3 \rho v \omega = 1.95 \times 10^{-3} \text{ 达因}$$

$$\text{而重力为 } \frac{\pi d^3}{6} \rho_p g = 10.8 \times 10^{-3} \text{ 达因}$$

升为约为重力的 18%。起跳前沙粒的沙面上滚动时,当地风速(紧贴沙面)实际上比 150 厘米/秒要小得多,滚动速度可能也不到 1000 转/秒。因此,马革奴斯力不可能是沙粒起跳的主要作用力。

我们为了探讨跃移沙粒飞升的原因,曾对数千个跃移沙粒飞行轨迹的起跳角和降落角进行了判读,结果表明,并不象某些人所描写的“跃移沙粒以近于垂直的大角度起跳”。事实是,多数跃移轨迹是以中等角度起跳的。之所以误认为是近于垂直起跳,可能的原因是由于人的视力错觉,对于垂直的线条有更大的敏感性所致。现在看来,文献^[6]观测到的现象是大有问题的,其实验结果的重复性如何大可怀疑!正是由于这种不可靠的观测数据引人误入歧途!

2. 压力起动说:此论点是以伯努利方程为基础的。应该指出,作为机械能守恒的伯努利方程,其应用是有一定限制条件的。即:“无粘性流动中,一条流线或一个流管内各点的机械能总和是常数。如果无粘性流动的不同流线来源于同一滞止条件,而且流动不存在间断,则上述常数对于不同流线也都相等,因而整个流场内机械能总和是常数。”应该看到:当考虑沙粒的底部和顶部之间的压差时,不能忽略粘性影响。因此它们具有的能量本来就不相同。

事实上,当一个球形颗粒(即使不旋转)处于流速不均匀的流场中时,其底部和顶部是有压差的。这个压差作用力的结果使颗粒受到额外的(马革奴斯力以外的)升力。这个力叫沙夫曼(saffman)力 f_s ^[16],其表达式为

$$f_s = 1.62\rho d^2(u_s - u_p) \sqrt{\nu \frac{du_x}{dy}}$$

其中 ρ 和 ν 分别为空气的密度(≈ 0.0012 克/厘米³)和运动粘度(≈ 0.04 厘米²/秒), u_s 和 u_p 分别为风速和沙粒速度的 x 方向分量。若 $(u_s - u_p)$ 以100厘米/秒计, $\frac{du_x}{dy}$ 以(3000厘米/秒)/厘米计,则 $f_s \approx 1.6 \times 10^{-3}$ 达因,约为重力的15%,远不足以使沙粒跳起。实际上沙面上的风速和风速梯度都远小于上述所取的值。连持有此论点的W. S. Chepil等人也只是把它作为一种飞升的辅助力量。

3. 对湍流起动说的论点持有不同意见之处主要在于,他们认为湍流的垂直分量远比水平分量小,粗略估计可认为垂直分量是水平分量的1/5。近地面处的水平分量本来就较小,因而垂直分量就更小,理论上地面处的垂直分量数值为零,不足以带动沙粒飞升。

4. 本文作者用高速电影摄影机研究沙粒跃移运动时发现^[17],沙粒跳离地面后垂直加速度的平均值均为负值,这说明所有非接触力的垂直分量总和小于重力,这些力量是不足以使沙粒从地面起跳的。因此,使沙粒起跳的主要因素只能是沙粒之间相互作用的力—接触力作用的结果。

5. 在三种可能引起沙粒飞升的接触力中振动起动的可能性不大,因为野外和室内风洞中沙粒起跳的过程与振动起动学说不符,振动起动学说认为两颗沙粒并排靠在一起,几经抖动后其中一颗突然向上飞起。而实际上沙粒是在沙面上滚动一段距离后再突然向上跃升的。

冲击起动说需要解释的是第一颗冲击颗粒由何而来?而斜面飞升说需要解释的则是为什么会有大角度的逆风起跳?如果分析一下沙粒起动的受力过程将会对上述问题的正确解释有所帮助。

四、沙粒起跳机制估算

1. 沙粒的跃起

在风力作用下,沙粒在沙面上滚动。风的推力和滚动过程中阻力的代数和决定了沙粒的加

速度。当滚动速度较低时,推力大于阻力,沙粒进一步加速。而随着沙粒的加速,沙粒的运动阻力会急剧增大,同时风的推力又会因风-沙之间的速度差不断减小而降低。因此,在达到一定速度后,沙粒加速的几率与减速的几率就基本上相等,这就是该风速下沙粒滚动的平均速度。

由于沙面上凹凸不平的特征,沙粒的滚动与在平坦地面上的滚动有很大差别。沙粒在滚动过程中常有小的跳跃发生。至少在以下情况会发生小的跳跃:如图1所示,当沙粒A沿沙粒B的表面滚动,若到达沙粒B的顶点时,沙粒A的速度超过某一临界值 V_{Acr} ,则绕过顶点以后就会脱离沙面平飞出去。而当速度 v_A 很大时,沙粒A可能在达到B的顶点之前就离开沙粒B斜飞出去。根据运动学原理可知,临界速度 V_{Acr} 可用下式计算:

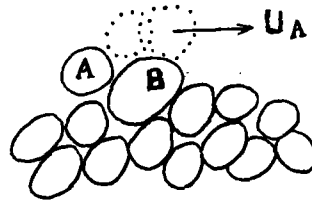


图1. 沙粒的跃起

Fig. 1 Saltation of sand grain

$$V_{Acr} = \sqrt{g(r_A + r_B)}$$

其中 r_A, r_B ~ 沙粒A与沙粒B的半径, g ~ 重力加速度。若 $r_A = r_B = 0.1$ 毫米,则临界速度 $V_{Acr} = 4.4$ 厘米/秒。若把沙粒A的运动看作是无滑移的滚动,则除了平动外,它必然还有转动,其角速度为 $\omega_A = V_A / r_A$ 。因此,与临界速度 V_{Acr} 对应的临界动能为 E_{Acr} (包括平动动能 $\frac{1}{2} m_A v_A^2$ 和转动动能 $\frac{1}{2} I_A \omega_A^2$, 其中 I_A 是沙粒A的转动惯量。若沙粒为球形,则 $I_A = \frac{2}{5} m_A r_A^2$)。此时

$$E_{Acr} = \frac{1}{2} m_A v_A^2 + \frac{1}{5} m_A v_A^2 = \frac{7}{10} m_A v_A^2$$

考虑到沙粒A沿沙粒B滚动时克服重力做功,这部分功可估计为 $m_A g r_B$, 大约是 $\frac{1}{2} m_A v_{Acr}^2$ 。因此,当沙粒A的机械能超过 $(\frac{7}{10} + \frac{1}{2}) (m_A r_A^2) = 1.2 m_A g (r_A + r_B)$ 时就可能飞离沙面,相当于滚动速度是4~5厘米/秒。这是很小的速度,说明沙粒在滚动过程中很容易飞离沙面。在滚动中,沙粒一旦出现小跳跃就会更多地加速。而沙粒速度越高、跳跃会越来越频繁,并且跃移距离越大。这是一种正反馈的过程。照此下去将会无限发展,这当然是不符合实际情况的。正反馈进行到一定程度,会出现另一种机理,它有削弱气动推力的作用:沙粒不断加速的结果,它与气流的相对速度减小了,致使气动推力减小。另一方面,沙粒不断加速,大量沙粒起跳后,它们将消耗气流能量,使流速降低,导致气动力的减小。因此正反馈到一定程度,会因上述两种机理而被削弱,最终被抑制,达到动态平衡。正反馈的现象恰好解释了为什么起跳几乎是同时突然发生的现象。

2. 沙粒的碰撞:

设一质量为 m_A 、半径为 r_A 的球形沙粒A,在平地上以速度 v_A 作无滑移的滚动,途中遇到质量为 m_B 、半径为 r_B 、中心距地面为 h 的球形沙粒B的阻挡,与之发生完全粗糙的完全弹性平

面碰撞^①。如图2所示,图中h为沙粒B的中心与平均地面的距离, O_A 与 O_B 为沙粒A与B的中心, $O_A P$ 与地面平行, $O_B P$ 垂直于地面,显然

$$\sin\alpha = \frac{O_B P}{O_B O_A} = \frac{h - r_A}{r_A + r_B}$$

$$\therefore \text{冲击角 } \alpha = \sin^{-1} \frac{h - r_A}{r_A + r_B}$$

由于沙粒B可能埋在其它沙粒之中,此时 $h < r_B$,也可能凸在沙面上,此时 $h > r_B$,所以 α 可以有各种取值。设沙粒B的质量 $m_B \gg m_A$, (如果 m_B 不大,但它的下面或背后是其它沙粒很稳定地支持着,以致沙粒B不会因碰撞而运动,则可以把沙粒B的质量连同它下面或背后支撑的质量合在一起,记为 m_B)。利用碰撞动力学的公式^[18],可以计算出不同冲击角度下碰撞后的沙粒A的两个速度分量的值:水平方向的 u_A' 和垂直方向的 v_A' 以及碰撞后的转动角速度 ω_A' 和起跳角,计算公式是

$$u_A'/u_A = 1 - \frac{2K_A}{1+K_A}(1+\sin\alpha) - \frac{2}{1+K_A} \cos^2\alpha$$

$$v_A'/u_A = \frac{2K_A}{1+K_A} \cos\alpha - \frac{2}{1+K_A} \cos\alpha \sin\alpha$$

$$r_A \omega_A'/u_A = -1 + \frac{2}{1+K_A} + \frac{2}{1+K_A} \sin\alpha$$

$$\theta = \arctg(v_A'/u_A')$$

其中 $K_A = I_A / m_A r_A^2$ 。对于球 $K_A = \frac{2}{5}$ 。设碰撞前水平速度为 u_A ,垂直速度 $v_A = 0$,转动角速度 $\omega_A = u_A / r_A$,则各种碰撞角度 α 下得到的 u_A'/u_A 、 v_A'/u_A 、 $r_A \omega_A'/u_A$ 及起跳角 θ 示于表1中

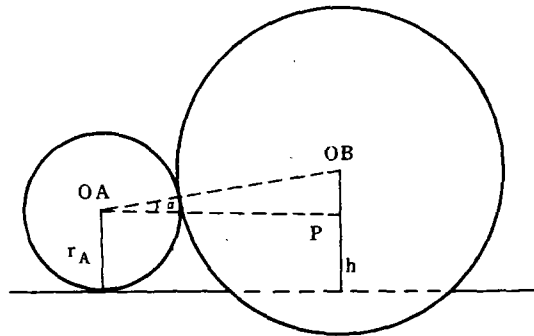


图2 球形沙粒的碰撞

Fig 2. Collision of spherical sand grain

① 完全粗糙的碰撞系指碰撞前后两球碰撞点的相对速度相等,但方向相反。完全弹性碰撞系指碰撞前后两球的机械能之和不变。

表 1

各种冲击角 α 下的垂直分速和起跳角^①

Tab. 1 The vertical component of velocity under different impact angle and saltant angle

α	23.58°	20°	15°	10°	5°	0°	-5°	-10°	-15°	-20°
u_A'/u_A	-1	-1.03	-1.05	-1.06	-1.04	-1	-0.939	-0.858	-0.756	-0.637
v_A'/u_A	0	0.078	0.195	0.318	0.445	0.571	0.693	0.807	0.909	0.996
$r_A\omega_A'/u_A$	1	0.917	0.798	0.677	0.553	0.429	0.304	0.181	0.059	-0.06
θ	180°	176°	170°	163°	156°	150°	144°	137°	130°	123°

-25°	-35°	-45°	-55°	-65°	-75°	-85°	-89°	-90°
-0.503	-0.202	0.118	0.427	0.691	0.885	0.987	0.9995	1
1.065	1.14	1.12	0.999	0.789	0.505	0.174	0.0349	0
-0.175	-0.391	-0.582	-0.742	-0.866	-0.951	-0.995	-0.9999	-1
115°	100°	84°	67°	49°	30°	10°	2°	0°

由表中计算结果可见:

- (1) 当冲击颗粒以 23.58° 至 -40° 与沙面相撞时, 反弹后的沙粒均为逆风大角度起跳。
- (2) 冲击角度约 -40° 至 -90° (垂直向下) 时, 沙粒以锐角向前反跳。
- (3) 冲击颗粒以 >23.58° 角度冲击沙面时, 碰撞后沙粒的垂直速度分量 $v_A' < 0$, 沙粒应向下跌。

3. 沙粒的旋转:

设一质量为 m_p 、直径为 d 的球形沙粒, 以 $v_p = 1$ 米/秒的速度飞行, 它的动能是 $\frac{1}{2}m_p v_p^2$ 。如果在一次碰撞后它的动能有 1/10 转化为转动动能, 即使碰撞前该沙粒的转动动能为零, 则碰撞后转动动能也有 $\frac{1}{10} \cdot \frac{1}{2}m_p v_p^2$, 由下式可推知沙粒转动角速度 ω_p 之值:

$$\frac{1}{10} \cdot \frac{1}{2}m_p v_p^2 = \frac{1}{2}I_p \omega_p^2$$

已知 $I_p = \frac{1}{10}m_p d^2$, 由此可得

$$\omega_p = v_p/d$$

设 $d = 0.2\text{mm}$, 已知 $v_p = 1$ 米/秒, 则 $\omega_p = 5000$ 弧度/秒, 即约 800 转/秒。

如果此颗沙粒连续发生二、三次以至更多的碰撞, 则可能达到的转速会更高。

五、结 论

由以上估算可见:

1. 沙粒的跃移起跳是斜面飞升与冲击碰撞相结合的结果。沙粒在风力推动下最初在沙面上滚动, 在翻越障碍时会发生小跳跃, 只需很小的速度就可离地而去。跳离沙面的沙粒会由风

① 冲击角 α 和起跳角 θ 以 X 轴方向为 0°, 逆时针角度为正, 顺时针方向为负。

中获得更大的速度,从而为再次更高的跃起积蓄了能量。

2. 沙粒以不同角度冲击其它颗粒,能以各种角度(锐角或钝角)反弹。

3. 沙粒碰撞过程中平动动能可能转化为转动动能,即使只有 $\frac{1}{10}$ 动能转换,沙粒也可获得数百转/秒的高速旋转。

参 考 文 献

- [1]贺大良等 地表风蚀物理过程风洞实验的初步研究 中国沙漠 vol. 6 No. 1 1986
- [2]G. R. Hiest and P. W. Nichola 关于细颗粒的风蚀作用 Bulletin of the American Meteorological Society Vol. 40 No. 2 1959
- [3]W. S. Chepil 风蚀动力学(1)风力作用下土壤运动的特征 Soil Science Vol. 60 No. 4 1945
- [4]A. H. 兹纳明斯基 沙地风蚀过程的实验研究和沙堆防止问题 科学出版社 1960
- [5]E. F. Ford 风沙的搬运 Transaction Ameri. geophysical Union Vol. 38 NO 2 1957
- [6]田中贞雄 柿. 沼计 Soil motion by the wind 农业气象 Vol. 16 No. 2 1960
- [7]R. A. Bagnold 风沙和荒漠沙丘物理学 科学出版社 1959
- [8]A. П. 伊万诺夫 沙粒起动与风沙流的形成 Известия А. И. Тсррсер. Биологн Наук No. 2 1963
- [9]凌裕泉等 风沙运动的动态摄影实验 地理学报 Vol. 35 No. 2 1980
- [10]Norman Hudson 风蚀及其控制 Soil Conservation chapter 14 1971
- [11]F. Bisal and K. F. Nielsen Movement of Soil particles in Saltation. Canad. Jour. Soil Sci. Vol. 42 No. 1 81—86 1962
- [12]河村龙马 风沙的研究 东京大学理工研究所报告 Vol. 5 No. 3—4 1951
- [13]A. И. 伊万诺夫 沙地风蚀的物理基础,《埃雷姆》出版社 阿什哈巴德 1972
- [14]B. H. 仙科维奇 沙漠风成地形基本形态成因 阿什哈巴德 《埃雷姆》出版社 1976
- [15]H. A. Фукс 气溶胶力学 科学出版社 1960
- [16]Soo, S. L. (苏绍里)Fluid Dynamics of Multiphase Systems. Blaisdell Publishing Co. Waltham 1967
- [17]贺大良等 沙粒跃移运动的高速摄影研究 中国沙漠 8卷 1期 1988
- [18]S. 查普曼、T. G. 考林 非均匀气体的数学理论 刘大有、王柏懿译 科学出版社 1985

Force Mechanism of Lifting Off Saltstion Sand Particles

He Dalian

Liu Dayou

(Institute of Desert Research Academia Sinica, Lanzhou)

(Institute of Mechanics Academia Sinica)

Abstract

According to experiment of high speed photography, we found that the vertical acceleration is always negative value after sand particle leaving ground surface, there is no upward external force smaller than gravity acting on the sand particle. Thus five out of eight lifting-off hypotheses of noncontacting force were precluded, such as buoyance force hypotheses, differential pressure hypotheses, turbulence hypotheses, negative pressure hypotheses and vortex hypotheses. Of the other three lifting-off hypotheses of contacting forces, the author considered the saltation lifting off as an interactive result between bevel flying and impact. The rolling sand particle which move on uneven surface can detach from ground surface with low velocity (cm/sec) and get more energy from wind. Those sand particles which roll on the surface or fly in the air impact other particles from different angles, and bounce back at acute or obtuse angle. If the 10% of kinetic energy of moving sand particles transformed into rotative energy, sand particles could obtain hundreds or more than thousand of rotations/second of rotative velocity.