

文章编号:1006-7639(2005)-02-0064-06

风沙起动形式与起动假说

董治宝

(中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘 要:风沙颗粒起动是风沙物理学与沙尘释放研究的重要内容,但是,这一领域的研究很不成熟。本文根据国内外目前的主要研究成果,讨论了风沙起动的形式,将风沙起动理论归纳为风压起动说、升力起动说、冲击起动说、压差起动说、振动起动说、斜面飞升说、猝发起动说、湍流起动说、负压起动说和涡旋起动说等 10 种假说。进一步将风沙起动假说归纳为以接触力为主的起动学说和以非接触力(气力)为主的起动说两大类。最后认为,风沙起动的影响因素是复杂的,各种学说都有其合理的成分,反映了真理的某个侧面,但试图仅仅靠某一种学说或某一种力来解释风沙的起动是不够完善的。风沙起动过程同时受多种力的作用,只是这些力所起的作用各异,在分析时要分清主次。再者,同一种力在不同性质(如不同密度、粒径和形状等)沙粒的起动过程中所起的作用也可能是不同的,在研究中还需要具体问题具体分析。风沙起动机制尚需全面、深入和科学的研究。

关键词:风成过程;颗粒起动;假说

中图分类号:P425.6

文献标识码:A

引 言

沙尘暴包括 5 个相互联系的过程:大风的形成、地表沙尘释放、沙尘在气流中扩散、沙尘输送和沉降过程。沙尘释放系指沙尘颗粒从地表进入大气的过程,是沙尘暴形成的关键环节,是沙尘暴研究中必须考虑的问题。这是因为:(1)沙尘释放过程决定沙尘的输送量和沉积量,只有准确地估算沙尘粒子的释放强度(释放量),才能确定大气中尘埃粒子以及气溶胶的浓度,进而研究它所带来的影响。(2)控制沙尘暴,人类实际上只能努力于防止风蚀、减缓地表沙尘的释放。所以沙尘暴的防治需要理解沙尘释放过程与机理。(3)地表风蚀导致沙尘颗粒的释放,使源区土壤中的细颗粒、有机质和其他养分丧失,导致土地沙漠化。(4)沙尘暴究竟是自然因素还是人为因素造成的?近年来学术界关于我国北方沙尘暴的主要源区和成因分歧颇甚。有的学者认为,我国北方的沙尘源区主要为原生沙漠,沙尘活动是一个自然过程,所以自然因素是产生沙尘暴的主要原因。而

另有一派学者则认为,我国北方的沙尘源区主要是由于不合理的人类活动造成的沙漠化土地,与原生沙漠无关,所以人为因素要对沙尘暴的产生负主要责任。这两种截然不同的观点在指导沙尘暴的防治时具有差异很大的导向。要澄清上述两种观点孰对孰错,需要理解不同地表类型的沙尘释放过程、机理与释放强度。(5)沙尘暴的预报和预警成为近年来研究的热门课题,不同领域的众多研究者在努力提高预报的可靠性。沙尘暴预报与预警的可靠性受很多因素的影响,目前已建立起一系列的预报沙尘输送和沉降的数值预报模式,但是由于对沙尘暴产生、发展的各种因子尚考虑不全、对已知模型因子之间的关系及其在沙尘暴形成中的作用机理尚缺乏清晰的认识,使得预报的结果差别很大。不论已有沙尘暴预报模型的形式如何,但都将地表沙尘的释放过程作为预报模型中不可缺少的重要模块。尽管近年来致力于沙尘暴预报模型研究的努力已很多,但是我们不能不看到,研究工作集中于沙尘输送过程的宏观监测与模拟预报,而对沙尘释放的微观过程在沙尘

收稿时间:2005-05-08; 改回日期:2005-05-25

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-341)资助

作者简介:董治宝(1966-),男,研究员,主要从事风沙物理研究。E-mail:zbdong@lzb.ac.cn

暴雨预报研究中几乎未进行专门的研究。

沙尘释放研究中首先遇到的问题就是风沙起动问题。风沙起动形式系指风沙颗粒以什么样的方式脱离地表进入气流。当吹过沙质地表的风力足够强时,沙粒便会起动进入气流中,由于风沙起动的随机性,沙粒以不同的形式进入气流。目前关于风沙起动形式的研究仅有一些直接的实验观察和简单的理论推测,很不成熟。沙粒起动形式取决于风沙起动机制,由于不同研究者观察到的风沙起动形式和认识不同,导致了关于风沙起动的多种假说。

1 风沙起动形式

在风沙运动过程中,一些沙粒在风力作用下直接起动,这种起动叫气动起动或流体起动。一旦沙粒脱离地表进入气流,就在气流中很容易被风加速,从而从气流中获得动量。一部分沙粒会获得足够的动量,以致于当它们返回地表与地表撞击时会发生回弹或使其它地表颗粒因颗粒冲击而起动进入气流,称之为回弹起动和溅射起动或冲击起动。

关于沙粒是如何脱离地表进入气流目前有两类代表性观点。有的研究者,包括风沙物理学的奠基人拜格诺(R. A. Bagnold)认为,在风力作用达到一定强度时,地表沙粒开始运动,运动首先表现为沿地表的滚动,当滚动经过一段距离后,沙粒积累了足够的能量而脱离地面进入气流^[1]。还有的研究者,如比萨尔(F. Bisal)和尼尔森(K. C. Nielsen)认为,风沙颗粒起动进入气流之前,首先是围绕某一位置振动,然后进入气流^[2]。有的研究者,如安德森(R. S. Anderson)等认为,持前一类观点的研究者是根据沙粒起动的观察结果,而持后一类观点的研究者大都是根据土壤颗粒起动的观察结果,沙粒之间与土壤颗粒间的结合力是有很大的差异的,从而导致在风力作用下起动形式的不同^[3]。威廉斯(J. J. Williams)根据其风洞模拟实验结果认为,风沙颗粒既可以通过滚动,也可以通过溅射的方式进入气流,在进入气流之前,沙粒首先要发生原地振荡。他发现,沙面的最初扰动与半组织骤风有关,骤风起源于边界层的猝发性质。由骤风产生的运动颗粒与周围颗粒的碰撞促使更多的沙粒起动^[4]。尼克林(W. G. Nickling)通过风洞实验认为,风沙并非通过滚动的方式进入气流,他发现,风沙起动过程中,沙粒首先表现为快速的级联碰撞,最容易起动的沙粒与其下风向的较难起动的沙粒发生碰撞,使其起动进入气流。级联碰撞的

强度与频率与沙粒的粒径、形状、分选和排列特征有关^[5]。

刘贤万应用高速摄影方法在风洞中对风沙起动过程进行了实验研究。他认为,以拜格诺为代表的观点是欠妥的,在风沙起动进入气流之前,沙粒运动首先表现为滑移。滑移与滚动的区别是,前者不是一直紧贴在颗粒表面,而是在颗粒及颗粒集团之间进行的一种滑翔运动。颗粒的滑移运动是颗粒在两个暴露的颗粒或颗粒群体之间,做最大垂直距离在两个粒径范围、水平移动距离在几个到几十个粒径范围内的滑翔、飘荡运动。滚动是一种不脱离沙面的运动,受众多沙粒的阻滞,滚动将会衰减,很快就会停下来。只有当风力达到一定强度后,颗粒不仅发生滚动,更重要的是发生普遍的滑移。由于滑移的初级碰撞,沙面才不再平静,地表沙粒不断进入气流^[6]。

所以,尽管风沙起动形式是风沙运动研究中首先遇到的问题,而且半个多世纪以来,许多学者都曾对该问题的研究做过不懈的努力,可惜至今仍未最后解开这个谜。研究这一问题的困难在于问题本身的复杂性和研究手段的限制。在风沙运动过程中,气流中,特别是贴地层气流中的沙粒密集而微小,用肉眼观测无法查清。运动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。一颗粒径 0.2 mm 以 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 运动沙粒的相对速度相当于一架 7 m 长,以 $350\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 运动的超音速飞机相对速度的500倍!

鉴于上述困难,以往很多研究者只能在片段观测的基础上,根据物理学的基本理论对风沙起动的机制进行推断,提出各种假说,这些假说有待于经过更完善的观测手段的验证与提高,才能上升为理论。

2 风沙起动假说

根据已有关于风沙起动的研究成果,风沙起动假说大致可以归纳为以下10种。应当指出,这样归纳仅仅是为了叙述的方便,实际上有些学说的本质是一致的,只是考虑问题的侧重点不同。

2.1 风压起动说

风压起动又称为流体起动,在风沙起动理论中占有相当重要的地位,风沙物理学中关于沙粒起动风速计算公式的建立都是基于风压起动说,其核心观点是风沙起动产生于风对沙粒迎风面的压力。早在1941年,拜格诺认为,风沙是在沙粒迎风面压力直接作用下起动的^[1]。这里的压力实际上是气流的

拖曳力,亦即沙粒在风的作用下,迎风面与背风面的压差产生的力,与沙粒对气流的阻力是一对作用力与反作用力,与沙粒迎风面积和拖曳力系数有关,还受边界层沙粒周围气流湍流发育程度的影响。伊万诺夫也认为,当颗粒所受的风的正压力与接触表面的摩擦力不平衡时就会产生倾覆力矩,倾覆力矩导致风沙颗粒的运动^[7]。在大气边界层的剪切流中,完全暴露和部分暴露于气流中的光滑圆球表面压力的纵向分布基本形式是相似的。迎风面为正压,尔后逐步减小,大约在 45° 处为零,背风面表面气流压力为负值。拜格诺与伊万诺夫观点的不同之处是:拜格诺认为,使单颗沙粒起动必须的最小风速不是肯定的,受近地层边界层中湍流发展程度的控制。伊万诺夫认为,拜格诺的结论受其实验环境条件的限制,使单颗沙粒起动必须的最小风速是确定的。风压起动说在解释较粗沙粒的起动时,似乎是合理的,但很难解释细沙的起动机制,因为细沙的迎风面积是极小的,甚至没有。

2.2 升力起动说

升力起动说又称为马格努斯(Magnus)起动说,其核心观点是,沙粒的起动类似于飞机的起飞。沙粒的高速旋转使沙粒顶部和底部气流速度发生改变,产生马格努斯力(升力)。切皮尔(W. S. Chepil)指出,沙粒在运动中的高速旋转可能是造成飞升的原因之一。田中贞雄用密度为 $2.5\sim 2.6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的石英沙和 $1.17\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的硫酸颗粒在风洞中作了旋转速度的观测,发现转速 $700\sim 800\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ 的沙粒基本上垂直上升,而转速 $200\sim 400\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ 的沙粒都以 $40^\circ\sim 50^\circ$ 的角度上升。据此,他认为,沙粒的上升与旋转沙粒的马格努斯效应有关^[8]。升力起动说也是颇有影响的,尤其是在田中贞雄建立了沙粒飞升角度与旋转速度的关系之后,似乎沙粒起动原因就非升力莫属了。但如果把升力的量级估算以下,就会发现升力起动说也是大有问题的。贺大梁和刘大有曾估算了沙粒旋转产生的升力,他们发现,粒径为 0.2 mm 并以 $1\,000\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ 高速滚动的沙粒,当风速为 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,所产生的马格努斯力约为沙粒重力的 18% ^[7]。实际上沙粒起动前,当地(紧贴沙面)风速要远比 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 小,沙粒在起动进入气流前的旋转速度也远 $<1\,000\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ 。因此,马格努斯力不可能是风沙起动的主要作用力。贺大梁和刘大有为了探讨沙粒飞升的原因,还对数千颗飞升沙粒的起跃角和降落角进行了判读,结果表明,并不象某些研究者所观察到的跃移沙粒以

近于垂直的大角度起跳。”事实是,多数沙粒是以中等角度飞升的^[7]。所以,目前形成的关于风沙起动机制的认识在很大程度上与观察水平有关,这一领域的突破,研究手段的革命是很重要的。

2.3 冲击起动说

冲击起动说的核心观点是地表沙粒的起动是由运动沙粒的冲击作用所致,也是风沙起动研究中占主导地位的学说。拜格诺在最早的风洞实验中发现,在风洞顶部供沙器供沙的条件下,亦即挟沙风条件下,沙面上沙粒的起动风速有所降低。据此,他认为,冲击力是一个重要起动力,并将冲击作用下的起动风速定义为冲击起动风速。伊万诺夫从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,因而是沙粒飞升的主要动力^[7]。凌裕泉和吴正用高速电影摄影机拍摄的结果证实了伊万诺夫的计算,发现沙粒所受的冲击力是重力的几百倍到几千倍,因而推断冲击力是使沙粒起动的可能原因^[9]。上述估算和实验结果使冲击起动说广为接受,甚至有学者认为,一旦风沙运动发生之后,冲击起动就是沙粒脱离地表进入气流的主要机制。有鉴于此,风沙物理学中的很多理论、模型及数值模拟研究都建立在冲击起动基础上。但是,也有的学者对冲击起动说提出质疑。董治宝等用激光粒子动态分析仪在风洞中对贴地层的沙粒颗粒运动速度的测量结果表明,在风沙流中,沙粒的冲击速度实际上很低,在高空高速运动的沙粒冲击地表的概率很小。由于贴地层风沙流中沙粒的浓度比较大,高速运动的沙粒在冲击地表前发生颗粒间空中碰撞的概率比较大,从而使冲击沙粒的动量分散,不足以冲击起更多的沙粒。再者,很细沙粒的冲击作用也是难以想象的。实际上,冲击起动说的倡导者伊万诺夫就曾意识到,对于细沙,冲击作用是比较弱的^[10]。

2.4 压差起动说

压差起动说的核心观点是,由于地表沙粒顶部和底部之间存在风速差,根据伯努利定律,颗粒顶部风速大,压力小,而颗粒底部风速小,压力大,从而使沙粒受到向上的压力。这个压差作用力的结果使沙粒受到马格努斯力之外的额外升力,这个力叫沙夫曼(Saffman)力,颗粒因此可能起动、上升而脱离地表。切皮尔和兹纳门斯基在风洞实验中发现,在风沙起动过程中,有相当一部分颗粒几乎垂直地进入气流,他们据此将风沙起动归因于沙粒上下的压差^[7-8]。压差起动说是以伯努利方程为基础的,作为机械能守恒

的伯努利方程的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。”但是,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,它们具有的能量本来就不相同。贺大梁和刘大有对沙粒所受的沙夫曼力计算结果表明,该力不到沙粒重力的 15%,远不足以使沙粒起动^[7]。压差起动说的倡导者切皮尔等也只是将沙夫曼力作为风沙起动的辅助力。刘贤万认为,由于沙土颗粒十分细小,其顶部和底部的速度差,即压差也应很小,所以,除具有特殊形状的轻质大颗粒和碎片,如凸面向上的贝壳之外,一般情况下沙夫曼力是可以忽略的^[6]。

2.5 振动起动说

哈德逊(N. Hudson)在分析风沙起动的原因时认为,风沙起动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,还可能是因为气流可将振动能量供给沙粒,其强度可达到发声的程度^[11]。当两个振动沙粒相遇时,其中一个可弹入气流中,这就是振动起动。比萨尔和尼尔森发现,风洞中显微镜观察台上固定小浅盘中的沙粒,在风力不大时就开始振动,且振动随风速的加大而加强^[2]。当风力达到一定强度时,颗粒经常出现 3~5 次急剧振动后,突然停止振动,最后象弹射一样飞入空中。他们认为,在这种情况下,沙粒的起动是由压力波动所引起的冲击力造成的,其能量来自于气流的湍流频谱。莱尔斯(L. Lyles)和克劳斯(K. Krauss)在风洞实验中发现,当平均风速接近临界起动风速时,一些颗粒(粒径 0.59~0.84 mm)开始来回振动,其平均振动频率为 1.8 ± 0.3 Hz,他们认为,这和包含有湍流运动最大能量的频带有关^[12]。刘贤万认为,沙粒振动能量来自风的作用力和弹性力,振动是一种有约束的阻尼运动,当沙粒在气流脉动的作用周期下,如果受迫振动终于发生共振,那么发生弹性跳起是完全可能的。不过这种作用的概率不会大,而且振动本身并不产生能量,能量还是来自气流的平均运动和湍流脉动^[6]。所以,沙粒振动只不过是起动前的一种动作,一种摆脱周围颗粒约束的运动。

2.6 斜面飞升说

斜面飞升说的倡导者海斯特(G. R. Hiest)和尼古拉(P. W. Nichola)认为,风沙作用下沙粒脱离地

表是由于沙面不平,在沙面上滚动的沙粒沿凹凸不平的斜面升入气流中^[13]。切皮尔还进一步认为,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气流中的一个原因^[8]。

贺大梁和刘大有认为,风沙起动主要是斜面飞升与冲击碰撞相结合的结果。沙粒在凹凸不平沙面上的滚动与平坦地面上的滚动有很大差别,沙粒在凹凸不平沙面上的滚动过程中常有小的跳跃发生^[7]。他们根据运动学原理对沙粒飞升的临界滚动速度进行了计算,结果表明,当滚动速度为 $0.04 \sim 0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,沙粒就可能飞离沙面。这是很小的速度,说明沙粒在滚动过程中很容易飞离沙面。在滚动过程中,沙粒一旦出现小跳跃就会更多地被加速。沙粒速度越高,跳跃会越频繁,跳跃距离越大,形成一个正反馈过程。正反馈发展到一定程度,会出现另一种机理,它有削弱气动推力的作用:沙粒不断加速使它与气流的相对速度减小,致使气动推力减小。另一方面,沙粒不断加速将消耗气流能量,使风速降低,导致气动推力减小。

2.7 猝发起动说

猝发起动说是借鉴流水中的湍流猝发现象及其在泥沙起动中的作用发展而来的,其主要思想可以归纳如下。

早期的流体力学研究认为,对于光滑的边壁来说,在床面上存在着一层稳定的层流层(近壁层流层)。如果床面的泥沙颗粒小于近壁层流层的厚度,则这些颗粒将始终受到近壁层流层的掩隐,湍流作用无法穿过层流层而直接影响床面泥沙。爱因斯坦(H. A. Einstein)和李煊(Huan Li)的实验表明,近壁层流层并不是完全稳定的流区,它可能不断经受成长、消亡和再成长的周期性变化^[14]。通过这一变化脉动可以不时深入直达边壁,并影响那里的泥沙颗粒。一旦上游主流区出现一个随机扰动(具有旋涡流态,并有一个向边壁方向的平均运动),接着就会在下游的边壁上出现一个低速带的举升,由于低速带的纵向流速比上部周围流体的流速低而引起振动。振动的增长很快,经过 3~10 个周期后,低速带的水流结构便崩解,形成所谓的湍流猝发。猝发体中出现小涡旋的杂乱运动,并产生向外传播的压力波。

在此,假定由于边壁区以外的大尺度扰动,在近壁处产生一个马掌形的涡流,这个涡流随着水流向前运动的过程可以说明湍流猝发过程。马掌形的涡

流形成之后,受水流的扰动将会沿水流方向越来越拉长成为 U 形环涡流,环的尖端离开边壁不断进入流速越来越大的区域。在马掌形涡流拉长的过程中,涡度不断加大,与此同时,一股低动量的水在环的两臂之间上升进入更高的流区,最终在某一高度范围内形成一层水平的强剪切层,表现为在纵向流速分布上出现一个板凳状的转折。这样的流速分布是不稳定的,会使涡流崩解破碎,形成湍流猝发,产生向外传播的压力波。低动量的水体离开边壁后所留下的空间将由周围的水体来填补,其中一部分来自高速流区。这样的补充水流受压力波的加速作用,把高动量的流体引向边壁,以与边壁成 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的微小角度扫荡床面。但是,横扫边壁的水流因受边壁的阻尼作用会迅速减速,加上远离边壁处水流的扰动作用,一个新的马掌形涡流又会在床面形成,从而开始一个新的猝发周期。

所以,猝发过程是由近壁层流低速带的扰动、举升、崩解和主流区高速带的扫荡等构成的似循环过程,其发生频率与流体摩阻速度的 3 次方成正比,随着床面粗糙度的增大,低速带举升的角度增大(可至垂直),而高速扫荡流体的减速也随之加快,垂直脉动加强^[15]。低速带的举升和崩解使当地产生极高的湍流应力,此应力对紧靠边界处脉动能量的传递起着决定性作用。据格拉斯(A·J·Grass)的实验,当低速带经过各点时,雷诺应力的峰值可以达到当地平均脉动剪切力的 5 倍。高速流体深入边壁时也会造成很高的脉动剪切力,不过其作用仅限于紧接边壁的流区^[16]。低速带的举升主要是带动悬浮质起悬,而高速带的扫荡主要是推动蠕移质和跃移质的起跳。

湍流猝发在泥沙运动及起动中的作用已为水槽实验所证实,在风沙起动和运动中的作用尚未经实验证明。特别是由于气流和水流的密度相差 2 000 多倍,我们除了可以断定,气流中的猝发作用比流水中的弱之外,其低速带的举升和高速带的扫荡作用还很不清楚^[6]。他山之石,可以攻玉,在风沙起动研究中借鉴泥沙起动研究的思想、理论、方法和成果是不无益处的。

2.8 湍流起动说

湍流起动说的核心观点是,在湍流中,由于空气的内部运动,风速和风向始终在变化,会出现瞬时垂直运动的气流,向上运动的气流会带动沙粒脱离地表进入气流中。冯卡门认为,湍流的垂直分量对沙

粒起动是非常重要的。埃克斯纳认为,沙粒起动是气流湍流扩散作用的结果^[7]。对湍流起动说持有不同意见者不乏其人,他们认为,湍流的垂直分量远比水平分量小,粗略估计可以认为,垂直分量约为水平分量的 1/5。近地表风速的水平分量本来就很小,垂直分量则更小,理论上近地表处风速的垂直分量接近于零,不足以带动沙粒进入气流。

2.9 负压起动说

伊万诺夫和仙科维奇认为,沙粒可由负压作用而脱离地表进入气流^[7]。杜宁指出,在较高风速下,地表湍流边界层内,离表面 2 mm 高处,负压力梯度可达 9.8 Pa,可以使沙粒脱离地面^[7]。负压起动说的倡导者都承认,只有在风速比较大 ($>16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 时,负压起动才起作用。实际上,风沙起动风速远 $<16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,例如一般沙丘沙的起动风速为 $5\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,负压起动是不起作用的。

2.10 涡旋起动说

据贺大梁、刘大有在综述风沙起动的成因时认为,沙粒除了靠斜面飞升脱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方的分离,分离产生的负压和离心力能够使沙粒起动^[7]。

综合以上各种风沙起动学说,可将其大致分为两类。一类是以接触力为主的起动学说:冲击起动说、振动起动说和斜面飞升说。另一类是以非接触力(气力)为主的起动说:风压起动说、升力起动说、压差起动说、湍流起动说、负压起动说、涡旋起动说和猝发起动说。贺大梁和刘大有用高速电影摄影机研究风沙运动时发现,沙粒脱离地表后垂直加速度的平均值为负(表 1),这说明所有非接触力的垂直分

表 1 不同飞行阶段风沙颗粒加速度的水平分量和垂直分量之平均值^[17]

Tab.1 The mean value of vertical and horizontal acceleration of blown sand particles during different stages

飞行阶段 / 平均颗粒数	水平加速度分量 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	垂直加速度分量 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
起跳 / 19	33.0	- 15.3
平飞 / 30	27.5	- 13.8
降落 / 8	12.8	- 10.6

量总和小于重力,这些力是不足以使沙粒起动的,因此断言,使沙粒起动的主要力只能是沙粒之间相互作用的力——接触力^[17]。他们通过对各种接触力的对比分析后认为,在 3 种可能引起风沙起动的接触力中,振动起动的可能性不大,因为野外和风洞中风

沙起动过程与振动起动学说不符。振动起动说认为,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突然向上跃升的。这种断然将接触力与非接触力在风沙起动过程中的作用分割开来是不科学的,风毕竟是产生风沙运动的唯一动力、是必要条件。

在过去的几十年里,各种风沙起动学说各抒己见,既有相互补充,又有相互批驳。我们应当承认,风沙起动的影响因素是复杂的,各种学说都有其合理的成分,反映了真理的某个侧面,但试图仅仅靠某一种学说或某一种力来解释风沙的起动是不够完善的。风沙起动过程同时受多种力的作用,只是这些力所起的作用各异,在分析时要分清主次。再者,同一种力在不同性质(如不同密度、粒径和形状等)沙粒的起动过程中所起的作用也可能是不同的,在研究中还需要具体问题具体分析。总之,风沙起动机制尚需全面、深入和科学的研究。

参考文献:

- [1] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. London: Methuen, 1941. 265.
- [2] Bisal F, Nielsen K C. Movement of soil particles in saltation[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1962, 42:81-86.
- [3] Anderson R S, Haff P K. Wind modification and bed response during saltation of sand in air [J]. Acta Mechnica Supplementum, 1991, 1: 21-52.
- [4] Williams J J. Aeolian entrainment thresholds in a developing boundary layer[D]. University of London, 1986.
- [5] Nickling W G. The initiation of particle movement by wind[J]. Sedimentology, 1998, 35: 499-511.
- [6] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 1995. 210.
- [7] 贺大梁,刘大有. 跃移沙粒起跳的受力机制[J]. 中国沙漠, 1989, 9(2): 14-21.
- [8] Chepil W S. Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement by wind[J]. Soil Science, 1945, 60: 305-320.
- [9] 凌裕泉,吴正. 风沙运动的动态摄影研究[J]. 地理学报, 1980, 35(2):
- [10] Dong Z, Liu X, Li F, et al. Impact/entrainment relationship in a saltating cloud[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27(6): 641-658.
- [11] Hudson N. Soil Coservation[M]. London: Batsford, 1971. 320.
- [12] Lyles L, Krauss K. Threshold velocities and initial particle motion as influenced by air turbulence[J]. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, 1971, 14:563-566.
- [13] Hiest G R, Nichola P W. On the erosion of fine particles by wind [J]. Bulletin of American Meteorological Society, 1959, 40(2): 232-243.
- [14] Einstein H A, Huon Li. The viscous sublayer along a smooth boundary [J]. Journal of Engineering Mechanics Division, Proceedings of American Society of Civil Engineers, 1956, 82(EM2): 27.
- [15] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社, 2003. 687.
- [16] Grass A J. Structural factors of turbulent flow over sooth and rough boundaries [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1971, 50(2): 233-235.
- [17] 贺大梁,高有广. 沙粒跃移运动的高速摄影研究[J]. 中国沙漠, 1988, 8(1): 18-29.

The Entrainment Modes of Blown Sand Particles and the Corresponding Theoretical Hypotheses

DONG Zhi-bao

(Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The entrainment process of blown sand particles is an important research subject in the aeolian physics and dust emission. However, it is a poorly understood field. Summarizing the research achievements in both China and abroad, the entrainment modes of blown sand particles are discussed in this paper. The corresponding theories are classified into 10 kinds of hypotheses, they are aerodynamic drag hypothesis, aerodynamic lift hypothesis, saltating impact hypothesis, pressure gradient hypothesis, vibration hypothesis, incline surface flight hypothesis, burst hypothesis, turbulent lift hypothesis, negative pressure hypothesis and vortex hypothesis. The hypotheses are categorized into two groups: the contact force entrainment hypothesis and the non-contact force hypothesis. Consequently, it is concluded that the aeolian particle entrainment is a complex process, every hypothesis may contain some appropriate elements, but can not cover all the aspects. The significance of the various forces in entraining sand particles to a great extent depends on the condition involved. Comprehensive, systematic and in-depth insight is needed in the future work.

Key words: aeolian process; particle entrainment; hypothesis