

风沙运动的三种形式及其测量

贺大良 申健友 刘大有

(中国科学院) (中国科学院)
(兰州沙漠研究所) (力学研究所)

提 要

叙述并评价了风沙运动三种形式中现有的测量仪器,并提出了研制、改进的方向。对常风下三种风沙运动方式中占绝大多数的跃移运动的观测仪器,作者认为:目前通用的惯性集沙仪是现有各类集沙仪器中最好的。对惯性集沙仪的收集效率进行了测定并提出了影响收集效率的因素。

一、前 言

风沙的三种运动形式——蠕移、跃移和悬移——久已为人所熟知,R. A. Bagnold 还对它们之间的相对比例做过研究^[1]。但由于风沙运动的形式不仅与粒径大小有关,还受到风速大小、空气温度(影响粘滞系数、从而影响迎面阻力及最终沉速)制约,三种运动形式之间的比例不可能是固定不变的。这就给风沙运动的量测技术(测量仪器的原理、仪器的构造和检定等)带来了困难问题——没有一种仪器是可供比较的标准仪器。致使对某种仪器的工作效率无法做出估价,野外观测的资料无法对比,有时甚至在野外就无法进行测量。本文就是从分析和评价现有的测量仪器出发,对各种仪器的改进方向提出看法,进而对三种运动方式的分布规律做了探讨。

二、沙粒的蠕移及其测量

蠕移运动是当沙粒较大,不能被风直接吹起时的运动形式。地面上的沙粒在风力和其它沙粒冲击的推动下,走走停停,时断时续地前进。在翻越障碍时也能短时间离开地面,但主要是在地面上滚动和滑动。当风速增加时蠕移移动的距离加长了,停顿的机会减少,整个表面好像都在缓缓向前蠕动。风速再增加,蠕移颗粒就可能较长时间地跳离地面,从而过渡到跃移运动。为了区分蠕移运动与跃移运动,可制定如下规定:颗粒运动过程中,凡离开地面的高度与沙面平均粗糙度属同一量级时可视为蠕移运动,否则应视为跃移运动。蠕移运动在风速不够大时(不

能使多数颗粒跃移)或颗粒粒配分布不均匀时是重要的。因为根据埃里定律^[2]:流体所能带动的最大颗粒粒径与流速的6次方成正比;即当风速增大一倍时,其所能带动的最大蠕移沙粒重量要增大 $2^6=64$ 倍。当粒配不均匀时,流速稍有增加,它所能带动的最大蠕移颗粒粒径就急剧增长,而总输移量仍与流速的3次方成正比,从而使大颗粒的重量在总输移量中所占的比例增大。

关于蠕移量的测量:目前只限于在室内风洞中进行。例如,拜格诺在他的风洞中用“沙阱”测量蠕移量^[1]。他认为蠕移量约占总输沙量的1/4左右。

我们在自己的风洞中^[3]也安装了一个蠕移捕集器,如图1所示。蠕移捕集器的结构是:在风洞底板上由洞中心线起向边缘开一个宽0.8厘米的狭缝,缝长40厘米,方向与风向垂直,蠕移沙粒就由此缝漏下而绝大多数跃移颗粒将由上面跃过而不至落在缝中。收集蠕移沙粒的容器是一个长40厘米、宽10厘米、高7厘米(均为内径尺寸)的抽屉,抽屉内壁呈倒漏斗状并贴满光滑的胶带纸,一者是为收集方便,防止壁面粘留蠕移沙粒。二者也可提高密封性。我们的风洞是个负压风洞,洞内的静压小于洞外,如果不密封就要有气流由洞外流入。这样非但蠕移沙粒不会由狭缝落入蠕移捕集器中,相反还会由洞外向洞内倒灌沙粒。为了加强密封性,抽屉与洞底连接的滑动面采用带有一定锥度的燕尾槽联接。这样当抽屉推上后会越推越紧,足以保证其密封性。

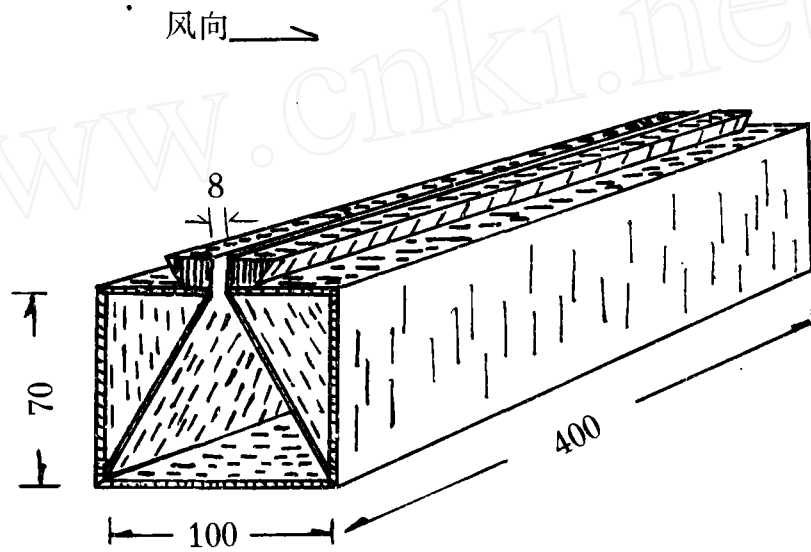


图1、蠕移捕集器

Fig. 1 Creep load trap

在使用蠕移捕集器时还有一点要注意的:即狭缝的前方附近不能有沙堆,否则前移之沙堆会自动滚入狭缝中。正常情况下蠕移捕集量应为:

$$\text{蠕移捕集量} = \text{蠕移捕集器捕集量} \left(1 - \frac{\text{狭缝宽度}}{\text{跃移沙粒平均跃距}} \times 100\%\right)$$

其中 $\left(1 - \frac{\text{狭缝宽度}}{\text{跃移沙粒平均跃距}} \times 100\%\right)$ 即为蠕移捕集器的捕集效率。我们的蠕移捕集器上狭缝宽度为0.8厘米,而当沙堆前移至缝口时,狭缝前后两侧会形成溜泻坡,跃移沙粒落在狭缝前后坡上都会自动滑入蠕移捕集器中,无形中增大了狭缝宽度,造成观测误差。为此,我们测蠕移

量时在上风铺沙距狭缝至少保持 30 厘米距离。这 30 厘米内用胶粘上沙粒,以模拟平沙地的粗糙面,防止沙粒在光板地上过快迁移。若沙粒平均跃距为 40 厘米,则蠕移捕集器因跃移运动而产生的相对误差约为 2% 左右。蠕移捕集量依下式换算为单位时间、单位宽度上的值。

$$\text{蠕移量〔克/米·分〕} = \text{蠕移捕集量〔克〕} \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{\Delta T}$$

式中 L~缝长〔厘米〕, ΔT ~捕集时间〔分〕。

我们在沙漠所风洞中做了宁夏中卫县沙坡头沙和青海共和县龙羊峡沙两种沙样的蠕移量与风速关系的试验。两种沙样的平均粒径分别为 0.184mm 和 0.234mm, 粒配分布详见参考文献^[4], 这里不再赘述。试验结果列于表 1a、表 1b 中, 以上都是室内风洞中得到的资料, 至于野外的情况应该具有相同的规律, 可惜目前尚无法测量。仅有的办法是用集沙仪在测量跃移量的同时测定蠕移量(二者之和的总量), 但由于集沙仪本身在气流中产生的涡漩常常在松散的沙面上掏蚀成穴, 观测时间一久, 集沙仪下部沙面常常被掏蚀空, 致使蠕移沙粒从仪器下面溜走。因此, 安装集沙仪时, 须捣固地面, 必要时在局部地面上撒些水, 并注意在集沙数量足够的条件下尽量缩短观测时间。

表 1a 蠕移沙量与风速关系(沙坡头砂)

Tab. 1a Relation between creep sand bischarge and wind velocity (Shapotou area)

风速(米/秒)	8.3	9.5	11.4	13.2	13.7	15.8	17.7
电离移沙量 (公斤/米·小时)	1.17	1.46	3.9	3.05	3.9	5.52	8.75

表 1b 蠕移沙量与风速之关系(龙羊峡砂)

Tab. Relation between creep Sand bischarge and wind velocity (Longyang Gorge area)

风速(米/秒)	8.1	12.3	17.0
蠕移沙量 (公斤/米·小时)	1.47	2.85	7.1

三、沙粒的悬移及其测量

沙粒的悬移运动是指微小沙粒的最终沉速小于气流向上的垂直脉动速度分量, 致使该部分沙粒长时间地悬浮在空中, 随风运行、缓慢下落, 且有新的颗粒不断补充。但是, 尽管这个定义十分清晰明白, 遗憾的却是缺乏观测手段——在风沙流中很难捕捉到悬移运动的砂粒。实际测量中有人干脆就把集沙仪上面几格的集沙量算做是悬移量^①, 这显然是不合适的。一是不严格, 到底多大高度以上的集沙量算悬移沙? 二是不准确, 既然是随风飘浮, 无把握能百分之百的捕到它。这个显而易见的问题至今还无人深究。

我们曾试以环保部门常用的仪器——采尘仪来捕捉悬移颗粒。1985 年到 1986 年在沙风

① 郭世武, 1990, 嫩江沙地土壤风蚀与土地沙漠化的基本特征, 中国沙漠, 10 卷 4 期。

洞实验室中和北京市大兴县榆垓乡辛庄沙地试用了两种采尘仪。一种是环保部门目前通用的青岛崂山产KB—120型空气采样器,另一种是上海宏伟仪器厂产的FC—A型粉尘采样器。这两种仪器的原理都是用一定抽气速率的真空泵抽取含尘空气,所抽气体通过一滤膜(通常采用49型超细玻璃纤维膜或过氯乙稀膜),尘粒附着在滤膜净重。经过一段试用,我们感到此种环保仪器很不适用于风沙天气中悬移运动的测量,其原因是:

1、49型超细玻璃纤维和过氯乙稀滤膜吸水性极强,有时抽气过滤后附着尘埃的重量尚不及吸附水气的重量大。为此,在抽气前后都要用干燥器长时间脱水干燥,少则一天、多则三天。有时脱水干燥后在称重过程中滤膜也会吸水而引起重量变化,用做野外观测极其不便。

2、风沙观测中尘埃密度多数情况下远大于环境监测中的尘埃密度,因此在风沙观测时滤膜很快达到饱和。其结果是,单位时间的集尘效率随时间加长而下降。缩短测尘时间又会因采尘量太小而增大了观测误差。

3、滤膜对大颗粒吸附不牢。在观测中经常发现较大的颗粒振落在滤膜边缘处,形成一明显的“黄圈”,稍一振动,“黄圈”即自行掉落。而在风天进行野外观测时取下或移动滤膜,振动是难以避免的。吸附不牢的直接后果是采尘量小而不准和脉动量极大。在风洞中的多次采尘观测中悬移量只占三种输沙方式的0.002%以下,其中必有很大部分未能测到,而在各次采尘量之间的脉动量可以相差一个量级之多。

有鉴于此,我们认为用采尘仪采集悬移物质在用做测定其物质成份为目的时是可行的,而用于测量悬移物质的数量大小则是不适当的。研究一种新的测量沙尘悬移运动数量的新仪器,首先是研究一种测量大颗粒悬移物(100 μ —10 μ)的新仪器,乃是当务之急!

四、沙粒的跃移及其测量

跃移是介于蠕移运动和悬移运动之间的运动形式,它的物理机制至今尚未完全弄清,要给跃移运动做精确的定义尚为时过早,但是可以简单地下个定义,即跃移是沙粒作连续跳跃形式的运动。当然,三种运动形式的相对比例随风速大小、粒径、沙的比重、空气密度和粘滞性而变。

众所周知,在多数沙漠地区中,常风下跃移运动是沙粒运动的主要形式。它的数量多,据研究^[1]常风下可占到风沙运动总输移量的1/2以上,甚至达到3/4。它的移速较快,能以风速几分之一速度运动。我们应用高速摄影机研究跃移运动时发现^[5],在以5米/秒的风速吹刮平均粒径0.2mm的沙粒时,其水平分速在起跳阶段约为1米/秒,而降落阶段时可近于3米/秒。粗略估计沙粒跃移的平均移速约为风速的30%—40%,亦即在平坦沙面上每秒可移动1.5—2米,或每分钟可移动90—120米、每小时移动5—7公里。在沙源丰富时,这种宏观上的大规模运动危害极大。有鉴于此,通常都认为跃移是风沙危害的主要运动形式。

跃移运动的测量方法历来受到人们的重视,目前至少有三种仪器可供使用:

1. 粘沙法取沙装置^[6](图2),其主要原理是利用胶带纸粘附跃移沙粒。胶带纸装在自己记筒上随时间转动,而其开口的狭缝则由风向标带动使其正对风向。显然,这种仪器的缺点是:

(1)仪器庞大复杂,其本身就是对风的障碍物。因此,不能保证沙粒都能被捕捉到而不从仪器两侧绕过。

(2)捕获的跃移沙粒只能放在显微镜下观察其直径、形状,而不能称量其重量,各次观测之间不好对比。

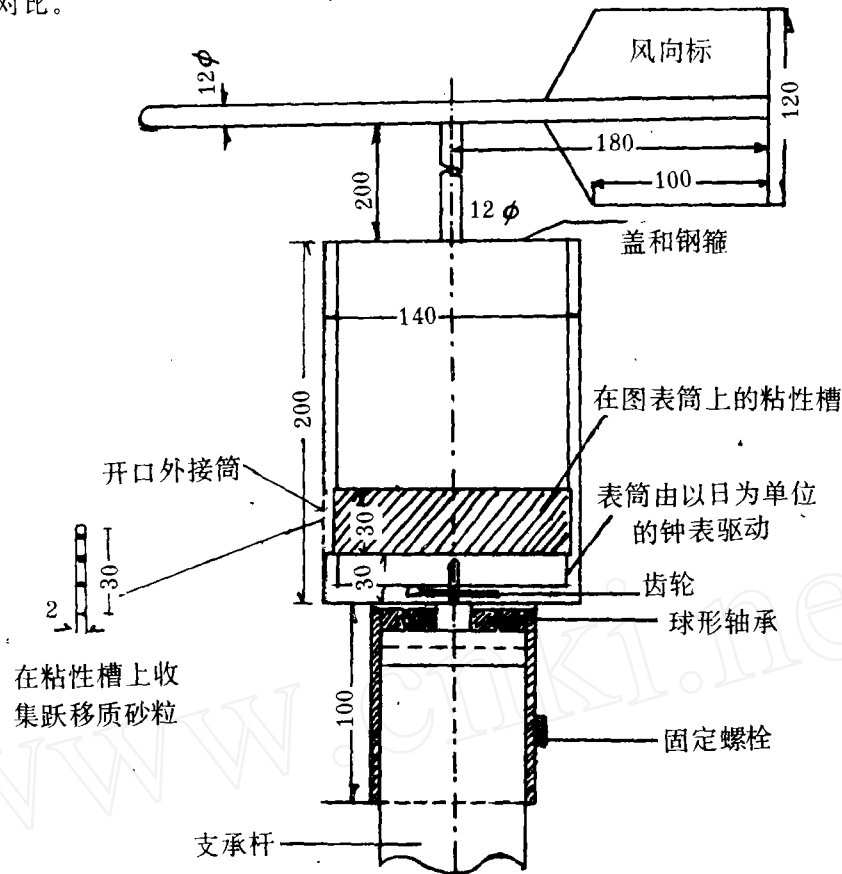


图 2 粘沙法取沙装置

Fig. 2 Sand-collecting equipment by binding method

(3)操作繁杂,在野外工作尤其不便。

正因为以上几点,此类仪器在我国很少见到,即使有,也多是仪器展室中的展品。

2、碟形集沙仪:是一组上面敞开的碟形圆盘(图 3)。置于风沙流中,经过一段时间后收集盘中沉积的沙量。此仪器也有一些难以克服的缺点,如:

(1)与粘沙装置一样,本仪器也是对风的障碍物,风沙流可能由两侧绕过而不进入碟中。

(2)仪器向上开口,因此主要是降落的颗粒才能进入碟中,起跳阶段和平飞阶段的跃移沙粒可能会沉降在碟前或超过碟后,而不能进入碟中。我所沙风洞实验室曾试用过此仪器,结果正如所料,收集量远不如惯性集沙仪。

3、惯性集沙仪:是一排迎风放置的方形管道,利用沙粒前进的惯性进入仪器后,沙粒沉降在仪器内,空气则由后部分分离出来。此类仪器由拜格诺和 A. N 兹那明斯基^[7] 最早使用。因仪器坚固耐用,操作简便,最适于野外工作。引入我国后,作了多次改进,改进的方面大致有:

(1)自动对正风向装置:仪器与风向标固定能随风转动,保证集沙仪入口永远正对风向。

(2)加大了集沙仪的集沙高度;戈壁地区风沙流飞扬较高,为此加大了集沙仪的高度,由原来的入口截面 $1 \times 1 \text{cm}^2$ 、10 孔,改为 $2 \times 2 \text{cm}^2$ 、10 孔,有的甚至做到 40cm 高、多个组合,一次即

可测得几米高之沙量^①。

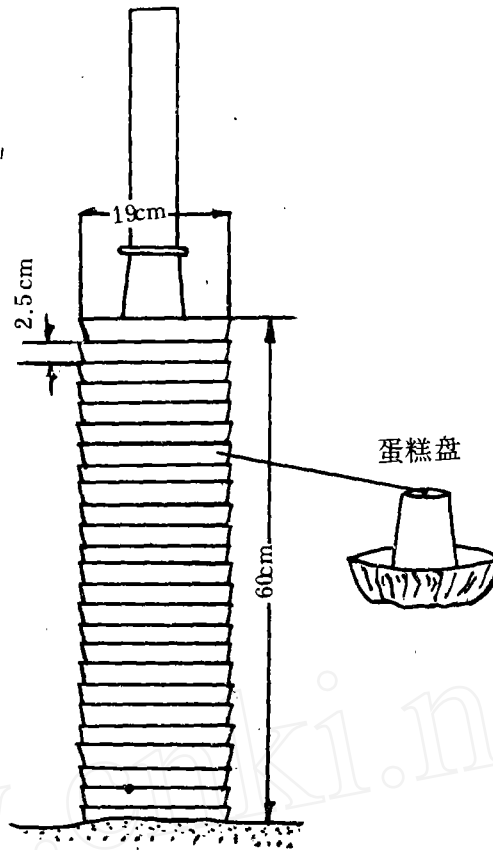


图3 碟形集沙仪(引自文献〔6〕P118)

Fig. 3 Butterfly-shaped sand-taped instrument

(3)为减少每次逐格称重的麻烦,仪器内装带有刻度之玻璃管,每次测时一看集沙之体积就可换算得出沙重。

从上几种改革既未涉及仪器的原理,也未脱离其基本形式,因而仪器固有的一些缺点仍未得到克服,主要是:

(1)惯性集沙仪捕集的原理是依靠运动沙粒的惯性,让沙粒自己进入集沙仪中。实验表明对于惯性较小的细沙及尘土,效果就不理想了;细沙粒随风绕流而不能进入集沙仪中,收集效率大大降低。

(2)惯性集沙仪虽然结构简单,体积小巧,但毕竟也是风的障碍物,气流在仪器周围要形成涡旋,尤其在沙面附近掏蚀更甚。近地面是沙流密度最大的地方,沙面掏空了,蠕移和部分跃移沙粒就会由仪器下面溜过而无法收集。

尽管如此,惯性集沙仪仍然比其他两种仪器好的多。目前国内使用的多是惯性集沙仪,只有在颗粒较细的我国东部地区,集沙效率才较差,应该考虑采用其他原理和形式的新型集沙仪。

^① 李长治等,平口式集沙仪的研制,中国沙漠7卷3期,1987。

五、惯性集沙仪的集沙效率和影响因素

1、集沙仪集沙效率的鉴定:

为了判别惯性集沙仪的优劣,我们在室内沙风洞中采取称重法对集沙仪进行了鉴定,其步骤是:

(1)在风洞后部安装一或二台惯性集沙仪,在集沙仪附近安装庇托管,以便在集沙的同时测风速。

(2)集沙仪前铺沙,厚度要均匀,铺满整个洞体,铺沙时逐秤称量沙重,其和即为铺沙总重 W_0 。

(3)风洞开机后迅速调升到所需之风速附近,测风速。

(4)在吹刮一定时间后迅速减速停机。吹刮时间的长短主要视集沙仪收集量多少而定,收集量太少则观测相对误差大,太多则需时过长,铺沙沙面有变化,供沙不均匀。

(5)将风洞之余沙逐秤称重,得到余沙沙重 W_1 ,则吹蚀沙量 = $W_0 - W_1$

(6)逐格称量集沙仪收集之沙量,并换算为整个风洞截面的捕集量,其大小为

$$\frac{l}{e}W$$

其中 l ——风洞宽〔厘米〕, e ——集沙仪收集宽度〔厘米〕, W ——集沙仪收集总量。

一般来讲,集沙仪捕集量应小于吹蚀量,两者之差称为吹失量。

$$\text{吹失量} = (W_0 - W_1) - \frac{l}{e}W \geq 0$$

(7)惯性集沙仪的效率即为:

$$\frac{lW}{e(W_0 - W_1)}$$

不言而喻,称量法的前提是:一是在吹刮时间内风沙流的密度是均匀的;二是风洞侧壁影响可以忽略,但在实际上这些假设很难做到。随着吹刮时间的推移,铺沙量逐渐减少、粗化,单位时间的吹蚀量和收集量也会相应减少。实际上所求出的集沙效率只是在吹刮时段内的平均集沙效率,因此在集沙效率鉴定过程中应该注意的是:

(1)在集沙仪收集量准确称重的条件下,吹刮时间要尽可能的短。

(2)在电机安全运转所允许的条件下,风洞起动升速和降速停机要尽可能的快。

(3)铺沙量 W_0 和余沙量 W_1 都是大量,其差值 $W_0 - W_1$ 是小量,因此称量必须十分仔细,否则相对误差将会很大,甚至得出捕集量大于吹蚀量的不合理结果来。

2、影响集沙效率的因素:

为了探求影响集沙仪收集效率的因素,我们在不同风速下对龙羊峡和沙坡头两种沙样做了收集效率的实验。其结果列于表 2a 和表 2b 中。

表 2a 惯性集沙仪的集沙效率(沙坡头砂)

Tab. 2a Trap efficiency of inertial sand-traped instrument(Shapotou area)

风速(米/秒)	8.3	9.5	11.4	13.2	13.7	15.8	17.7
集沙效率(%)	79	86	86	83	83	81	70

表 2b 惯性集沙仪的集沙效率(龙羊峡砂)

Tab. 2b Trap efficiency of inertial sand-traped instrument(Longyang Gorge area)

风速(米/秒)	8.1	12.3	17.0
集沙效率(%)	96	82	79

由表 2a 和表 2b 可见:

1、粒径大小显然对集沙仪收集效率有很大影响:实验中所用龙羊峡沙平均粒径为 0.234mm 沙坡头沙平均粒径为 0.184mm。龙羊峡沙在 8.1 米/秒风速下相近风速之下收集效率只有 80%多。同样,龙羊峡沙在 17.0 米/秒风速下收集效率为 79%,而沙坡头沙在相近风速下之收集效率只有 70%。这显然是受沙粒惯性大小的影响。惯性大小与沙粒质量成正比,即,与粒径的三次方成正比。平均粒径大的龙羊峡沙的质量是平均粒径小的沙坡头沙的一倍多,当然更易于为集沙仪所收集。相反的,我们在土壤风蚀风洞实验中,沙粒平均粒径只有 0.15—0.03mm,集沙仪收集效率仅为 30—50%。

2、风速大小对集沙效率的影响:

由表中明显可见,风速大时集沙仪收集效率低,这可能是因为大风速时沙粒飞扬高度较大,部分沙粒由集沙仪的上部飞过而未能被捕集到致使捕集效率较低。

六、结 论

1、风沙运动虽有三种方式,但其测量仪器却很不完善,其中蠕移运动方式只能在实验室中测得,野外测蠕移量目前尚无仪器可用,仅靠测跃移量的同时测量蠕移与跃移量的总和。

2、目前环境保护部门通用的测量飘尘的仪器不适用于测量悬移沙量,风沙运动中悬移量的测量仪器必须重新研制。首先要着重研制捕集悬移量的绝大部分。

3、目前国内所采用的测量跃移运动的惯性集沙仪能适用于野外和室内测量之用,但应注意所测沙样之粒径不能太小。此外,在观测时要将地面捣固平整,防止沙面掏蚀。

4、用称量法测量了惯性集沙仪在不同风速下对不同粒径沙粒的捕集效率,得出:小风速下和沙粒粒径较大时捕集效率高,反之亦然。

参考文献

- [1] R. A. Bagnold 风沙与荒漠沙丘物理学 科学出版社 1959。
[2] A. 维希曼 实用水力学 上海科学技术出版社 1959。
[3] 贺大良等 风沙现象研究的重要设备——沙风洞 中国沙漠 1 卷 1 期 1981。
[4] 贺大良等 降水对起沙风速的影响 中国沙漠 8 卷 4 期 1988。
[5] 贺大良等 沙粒跃移运动的高度摄制研究 中国沙漠 8 卷 1 期 1988。
[6] M. J. 柯克比等 土壤侵蚀 水利电力出版社 1987。
[7] A. N. 兹那明斯基 沙地风蚀过程的实验研究和沙堆防止问题 科学出版社 1960。
[8] 贺大良等 地表风蚀物理过程的风洞实验 中国沙漠 6 卷 1 期 1986。

Three Forms of Movement of Blowing Sand and Their Measurement

He Daliang Shen Jianyou

(Institute of Desert Research, Academia Sinica, Lanzhou)

Liu Dayou

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

Thus far there is no ideal instrument for measurement of three forms of movement of blowing sand. First of all, the measurement of creep load can only be done in the laboratory, its field measurement is simultaneously conducted with saltation load. In the observation processes of saltation movement attention should be paid to the surface stability to avoid vortex caused by sand-taped instrument, which will exert influence on the sand collection. Secondly, there is no suitable instrument to measure suspension load, while the dust-taped instrument adopted by environmental protection departments can only be used to trap particles less than 20μ , especially less than 10μ , which is not suitable for measurement of suspension load discharge. Therefore, there is an urgent need to develop a new instrument for trap of larger suspension particles ($20-100 \mu$). The existing inertial sand-taped instrument could be successfully used to measure saltation load, which usually makes up a majority of the total sand discharge, but its trap efficiency is poor for finer particles. The factors affecting the trap efficiency of existing inertial sand-taped instrument were analysed.