

新月形沙丘形态的模拟实验研究^{*}

凌裕泉 吴 正^① 刘绍中^② 李长治

(中国科学院兰州沙漠研究所 兰州 730000)

①(华南师范大学 广州 510631) ②(中国科学院成都计算机应用研究所 成都 610041)

提 要 新月形沙丘是风沙地貌基本形态之一,一般为高浓度非饱和风沙流所塑造。其形成过程始于风沙运动的“波粒二重性”,并经历沙物质积累(高浓度饱和风沙流)和形体塑造(高浓度不饱和风沙流)两个发育阶段,即耗散性增大和色散性减小过程;非沙质床面零星分布的单个新月形沙丘具有明显的移动性和形态的不稳定性(高大新月形沙山除外)。风洞实验条件下形成的新月形沙丘形态(其尺度比床面沙纹大一个数量级),有助于新月形沙丘形成机制的了解。

关键词 新月形沙丘 模拟实验 耗散性和色散性

分类号 中图法 P931

关于沙漠地区沙丘形成与演变问题,曾引起国内外众多学者的关注^[1~6,10,11]。从其研究内容和研究方法来看,具有如下特点:一是早期由地质和地理学家把各种沙丘形态分别视为一种地质地理过程,宏观地解释其成因与分类,随后又利用航片与卫片研究其移动与变化规律;二是物理学家与气象学家把风沙问题作为一个物理过程和气-固二相流体力学,进行理论分析与实验研究以及计算机模拟。继而把风沙现象作为“波粒二重性”系统来考虑,将使风沙问题的研究进入一个崭新的风沙湍流理论阶段^[1~8]。

1 新月形沙丘的形成

1.1 新月形沙丘的形态学特征

新月形沙丘是最基本的沙丘形态之一,其典型形态呈新月形状。沙丘两侧有顺风向延伸的两个兽角(翼)(照片 1),其间交角与相应的主导风强度成反比关系,剖面是两个不对称的斜坡,迎风坡面凸出而平缓,介于 $5^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 之间,其变化取决于风力、输沙量、粒配与比重;背风坡凹而陡,介于 $28^{\circ} \sim 32^{\circ}$ 之间,相当于沙粒最大休止角。新月形沙丘高度一般在 1~5 m 左右,很少超过 15 m。多半成单一零星散布于沙漠边缘非沙质地表,或粗质平沙地。

在沙物质供应比较充裕的情况下,高浓度饱和或过饱和风沙流很可能导致密集新月形沙丘相互连成新月形沙丘链(照片 2),呈平行波型式,高度一般在 10~30 m 左右。在风向单一地区,沙丘链在形态上仍保持原有单个新月形沙丘形体痕迹;在多向风地区,新月形沙丘或沙丘链又可能演变为横向沙丘、格状沙丘或金字塔沙丘。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(49371009)的系列研究成果之一。

第一作者简介:凌裕泉,男,1935 年生,研究员,从事风沙物理和风沙工程研究。

收稿日期:1996-10-23;改回日期:1997-03-23

1.2 新月形沙丘形态的发育过程

1.2.1 新月形沙丘的发育条件

新月形沙丘是一种风积地貌,其形成发育过程是一个特殊的风沙运动过程。单一风向的高浓度风沙流——高输沙量的沙粒跃移流是其形态发育的充分而必要的条件。所谓高浓度风沙流是指沙质床面随风速增大输沙量随之迅速增大,床面沙粒运动方式——蠕移和跃移强度配比发生很大的变化,且沙粒跃移占了绝对优势,这时气流对沙物质的搬运能力达到极限饱和状态,同时风沙运动的“波粒二重性”亦达到最佳状态,即床面与风沙流之间的动量交换与物质交换和输移都接近均衡状态。此种沙粒跃移流在运行中,气流条件和床面性质的细微变化均可导致输沙量或风沙流结构的相应变化,从而呈现床面新的蚀积过程的交替,并形成对应尺度的新月形沙丘形态。沙丘形态向下风处有一定的排列顺序,即由横向沙丘向新月形沙丘链,再向单个新月形沙丘演变的模式,这是由于供沙量逐渐减少的结果。一般来说,特定地段所呈现的沙丘类型取决于输沙量的水平梯度,是可供沙量的函数^[5]。在绝大多数情况下,新月形沙丘、新月形沙丘链和横向沙丘平面分布呈平行波状,也称为平行波沙丘^[11]。其中,以新月形沙丘和新月形沙丘链两种沙丘形态最为常见。

1.2.2 新月形沙丘形态的发育过程

自然界大尺度沙丘形态的发育过程是一个复杂而缓慢的风沙运动过程,人们难于在野外条件下观测到其变化的动态过程。在塔克拉玛干沙漠同一地区摄取的一组不同发育阶段的沙丘形态照片(照片3、4、5、6),为新月形沙丘形成机制的研究提供了极为宝贵的形态变化依据。在单一主风向作用下,裸露平坦无障碍地表的沙丘形态是从原始的饼状沙丘(照片3),经盾状沙丘(照片4)和雏形新月形沙丘(照片5)诸阶段发育为新月形沙丘(照片6)。其中以盾状沙丘转变为雏形新月形沙丘这一阶段最为重要。因为在此阶段不仅形态发生显著变化,出现陡峭的落沙坡,而且气流运行也发生很大变化,出现明显的涡旋——形成于脊线后的涡流线具有螺旋线形状。沙丘形态变化往往落后于气流条件的变化,两者之间存在时差,时差大小除取决于沙丘形态原来的规模和风速大小之外,还取决于组成物质和粒径,较细的粒径要比较粗的粒径时差小。这是由于风沙运动的湍流间隙性和分形特征造成的。

在沙丘形态由饼状向新月形演变过程中,沙丘长度与高度之比是逐渐减小的,一般变化于30~16之间^[4]。

1.2.3 新月形沙丘形态的风洞模拟实验

野外沙丘形态的变化只能反映沙丘不同发育阶段的形态特征,尚不能解释其形成的动态过程,还有待于风洞模拟实验的补充和验证。

在风洞实验条件下,沙质床面只能形成小尺度的沙纹,难以形成大尺度的沙丘形态。因此,试图在风洞实验条件下形成沙丘形态,首先必须解决实验条件的模拟,即高浓度饱和或不饱和风沙流的形成与运行条件。高浓度风沙流既是塑造小尺度沙纹的动力和物质基础,也是沙丘形态形成的充分而必要的条件。一般来说,在沙质床面形成高浓度饱和风沙流是比较容易的,而在风洞中模拟高浓度饱和风沙流途经一种下垫面时,使之转变为高浓度不饱和风沙流,最后再转变为高浓度饱和或过饱和风沙流,并形成局部积沙的条件是困难的。因为改变风沙流的饱和程度一般有两种措施:其一是增大实验段床面粗糙度,这样将会影响风沙流的运行条件,而且难于形成局部积沙;其二是降低局部地段风速,或设置障碍阻挡气流,实践证明这一方法也是不可行的。经过反复实验,发现风洞扩散段(扩散角为 8°)基本上可

以满足以上要求,关键在于风速强度和持续时间要严格控制。这样,高浓度不饱和风沙流由实验段进入扩散段时,由于扩散降速作用可以使高浓度不饱和风沙流转变为高浓度饱和或过饱和风沙流,并形成明显积沙。这一阶段可以视为沙物质积累阶段,风洞实验指示的风速 $V_{\infty} = 7.0 \sim 8.0 \text{ m/s}$,吹沙 $20 \sim 30 \text{ min}$;当升速至 $V_{\infty} = 10.0 \sim 11.0 \text{ m/s}$ 时,扩散段风沙流已处于高浓度不饱和状态,对前期积沙体产生较强的风蚀作用,由于输沙量水平分布的非均匀性^[9],使积沙体分解为三个部分,中间部分最大并形成新月形沙丘的雏形(照片 7),吹沙时间为 $4 \sim 5 \text{ min}$;当风速升至 $V_{\infty} = 12.0 \text{ m/s}$ 时,吹沙 $1 \sim 2 \text{ min}$,这一阶段可视为新月形沙丘形态的形体塑造阶段;再把风速降至 $V_{\infty} = 7.5 \text{ m/s}$,吹沙 $3 \sim 5 \text{ min}$,将形成正态新月形沙丘形态(照片 8),这一阶段,高浓度饱和风沙流对新月形沙丘雏形既有沙物质补充积累作用,又有形体塑造作用。实验表明,新月形沙丘形态一旦形成,就保持相对稳定而不容易变态。可是,如果继续以高浓度饱和或过饱和风沙流吹过新月形沙丘时,原有新月形沙丘形体不再继续增大,而且很有可能在原来的新月形沙丘上风向处或沙丘迎风坡脚形成新的新月形沙丘。上述沙丘形态能够在风洞中重演,野外亦有类似现象出现。这表明,特定的环境条件只能形成确定尺度的新月形沙丘形态,或者说只有类似形态的重演,而不会出现形态的质变。

通过风洞模拟实验,将沙丘形态的形成过程与风沙运动性质和强度的变化紧密地联系在一起,并形成新月形沙丘形态,这是风洞实验取得的新进展。尽管沙丘形态的几何尺度远小于实际沙丘,而且沙丘形态的发育阶段与野外也不完全对应,但就某一发育阶段而言,在其机制方面风洞与野外却是一致的。我们确信,既然能够模拟出比床面沙纹尺度大一个数量级的新月形沙丘形态,就有可能通过进一步改变风洞实验条件,形成尺度比目前新月形沙丘更大一些的沙丘形态。

1.3 新月形沙丘形成模式

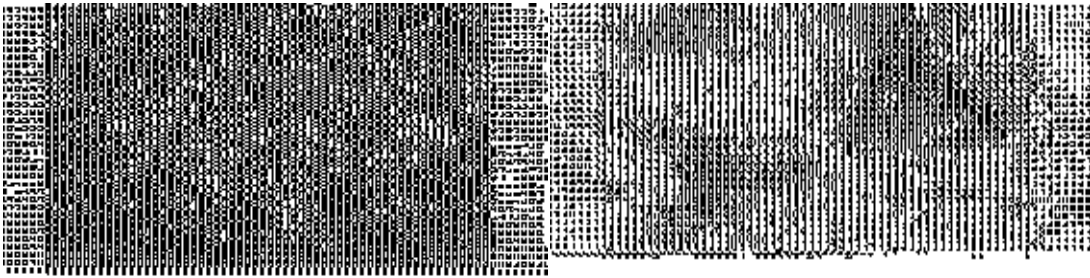
在自然界,风力、沙物质和下垫面性质是构成风沙运动的三大要素,也是各种风成地貌形态形成和演变的动力、物质基础和转换条件。

作为风沙运动主要形式的沙粒蠕移和跃移(特别是沙粒跃移)以及两种运动形式的强度配比,在各种风成地貌形态的形成和演变过程中,均扮演了极其重要的角色。

风沙流是以沙粒跃移为主体的分散介质颗粒流,具有明显的紊动性、间隙性和“波粒二重性”,是一种特殊的可变密度的气-固二相流。它是风力、沙物质和下垫面性质三大要素的综合体和可变函数。而风沙流结构——输沙量随高度变化,又是高度函数。因此,采用风沙流饱和程度来讨论沙丘形态的形成过程,就更为直观、合理。

诚如前述,野外观察和风洞实验均表明,高浓度饱和或不饱和风沙流是新月形沙丘形成和演变的充分而必要的条件。为便于讨论,以自然界新月形沙丘形态的发育阶段为模式,结合风洞模拟实验过程,对新月形沙丘形态各个发育阶段的成因进行解释。

第一阶段:饼状沙丘的形成 当来自上风处沙质床面的高浓度饱和风沙流进入非沙质床面时(砾质床面或粗质平沙地),由于下垫面性质的改变而导致沙粒跃移流性质的改变——其结构改变使底层处于相对不饱和状态。这种高浓度不饱和风沙流继续向下风处运行时,往往由于风的紊动作用造成风速的阵性变化(其中也可能有大尺度的气流波动性的影响),或局部地形起伏作用使气流速度出现瞬时迅速减弱,造成积沙现象。这时,风沙流已变为高浓度饱和或过饱和状态。这种风沙流造成沙物质积累成堆,加之输沙量水平分布的非

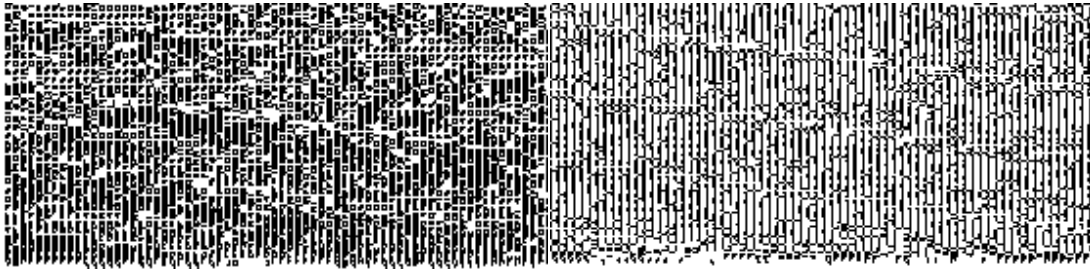


照片 1. 新月形沙丘

Photo 1 Barchan dunes

照片 2. 新月形沙丘链

Photo 2 Barchan chains

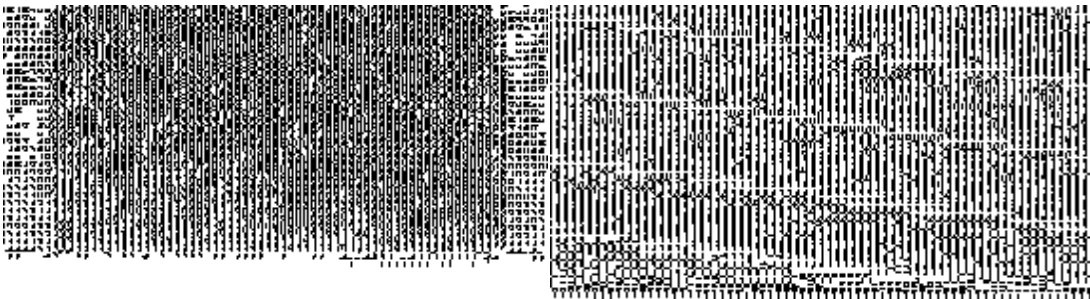


照片 3. 饼状沙丘

Photo 3 Discus dune

照片 4. 盾状沙丘

Photo 4 Shield dune

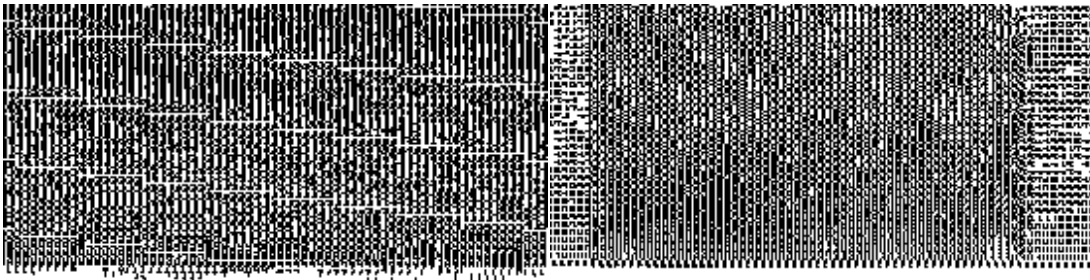


照片 5. 锥形新月形沙丘

Photo 5 Embryonic barchan dune

照片 6. 新月形沙丘

Photo 6 Barchan dune



照片 7. 锥形新月形沙丘(风洞)

Photo 7 Embryonic Barchan dune
(wind tunnel)

照片 8. 新月形沙丘(风洞)

Photo 8 Normal barchan dune
(wind tunnel)

均一性的作用,致使沙堆呈椭圆形的饼状。我们把这一阶段称之为新月形沙丘形成过程的沙物质积累(为主)阶段,也是饼状沙丘形成阶段。

第二阶段:盾状沙丘的形成 这一阶段风沙流运行条件同上,其不同之处在于床面已经形成饼状沙丘,而且饼状沙丘继续增大。随着饼状沙丘的体积增大,对风沙流运行条件产生显著的影响。鉴于风沙流是一种表面运动过程,而且高浓度风沙流与饼状沙丘表面之间,始终都存在着动量和物质交换,沙物质蚀积过程交替进行,风沙流的饱和程度亦在不断地变化。同时,在下风侧产生附面层分离,并在垂直和水平两个方向形成相应尺度的涡旋,继而形成小的落沙坡。此时,沙丘形态类似盾状,一般称为盾状沙丘。从风沙运动条件来看,其运动过程仍以沙物质积累为主,不过形体塑造过程已经开始。

第三阶段:锥形新月形沙丘 在风沙流运行条件相同的情况下,此种沙丘形态只不过是盾状沙丘形态的进一步发展。其不同点在于这一阶段高浓度饱和风沙流的沙物质积累过程与沙丘形体塑造作用两者之间接近均衡状态,即沙丘形体增大与形态的塑造同步进行。我们把这一发育阶段视为新月形沙丘的形体塑造阶段。

第四阶段:新月形沙丘形态的形成 从风洞模拟实验过程来看,由锥形新月形沙丘发育为新月形沙丘形态的过程是短暂的,关键在于风沙流的强度变化。相对前三个阶段而言,该阶段的沙物质积累作用已下降到次要地位,而沙丘的形体塑造作用更为突出,风沙流强度也相对减弱。其形体增大过程将在脊线下风处进行。

从风沙湍流理论的“波粒学说”来看,新月形沙丘形态的形成机制可概括为:新月形沙丘形态的形成起始于平坦裸露床面单一风向的高浓度不饱和风沙流,经历沙物质积累和形体塑造的两个发育阶段,即耗散性增大和色散性减小的过程。在沙质床面,耗散性表征气流对沙物质搬运过程中的能量损失。在一般情况下,跃移沙粒是在迅速旋转并具有螺旋形特征,需要较多的能量维持^[7],风沙流速度愈大,耗散性也随之增大;色散性主要与气流性质、沙粒运动形式和运动速度有关,色散是一种扩散现象,在低风速的沙质床面由于沙粒蠕移和跃移并存,其色散性就较大。而高浓度不饱和风沙流主要是快速运动的沙粒跃移流,其色散性就变小或保持不变^[6]。

上述新月形沙丘形成模式的四个发育阶段,也是相对而言,并无严格的界限。特别是在风洞实验条件下,由于风速稳定而持续,其阶段性的分界很可能是瞬间的变化。另外,各个发育阶段之间都有密切的联系,互为条件,更难于区分。不过,作为一个完整发育过程来说,却又存在这样几个阶段。

2 结 语

(1)新月形沙丘是风积地貌的最基本形态之一。在单一风向、沙源充裕条件下,可形成横向沙丘和新月形沙丘链;在多向风条件下,可形成格状沙丘和金字塔形沙丘;零散的单个新月形沙丘多半分布于沙漠边缘地区。

(2)在平坦裸露无障碍地表,单一风向所形成的新月形沙丘形态的发育模式为:饼状沙丘→盾状沙丘→锥形新月形沙丘→新月形沙丘。

(3)新月形沙丘形态形成的动态过程:新月形沙丘形态的形成起始于高浓度非饱和风沙流,并经历沙物质积累(高浓度饱和风沙流)和形体塑造(高浓度不饱和风沙流)两个发育阶段,即耗散性增大和色散性减小的过程。

参 考 文 献

1 Bagnold R A. 风沙和荒漠沙丘物理学. (中译本). 北京: 科学出版社, 1959. 172~ 218
2 刘振兴. 关于风沙问题的研究(II) 在风力作用下沙丘移动规律性的初步研究. 气象学报, 1960. 31(1): 84~ 91
3 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论(修订本). 北京: 科学出版社, 1980. 36~ 55
4 朱震达. 风力作用下沙丘演变动态过程中若干问题的初步研究. 地理集刊, 第 5 号, 北京: 科学出版社, 1963. 58~ 78
5 凌裕泉. 塔克拉玛干沙漠的流场特征与风沙活动强度的关系. 中国沙漠, 1988, 8(2): 25~ 37
6 李后强, 艾南山. 风积地貌形成的湍流理论. 中国沙漠, 1992, 12(3): 1~ 9
7 凌裕泉, 吴正. 风沙运动的动态摄影实验. 地理学报, 1980, 35(2): 174~ 181
8 刘绍中, 杨绍华, 凌裕泉. 沙粒跃移模型及其数值分析. 计算物理, 1985, 2(4): 443~ 452
9 凌裕泉. 输沙量(率) 水平分布的非均一性. 实验力学, 1994, 9(4): 352~ 356
10 Vaughan Cornish. On the formation of Sand dunes. The Geographical Journal, 1897. IX(3): 278~ 309.
11 McKee E D. A Study of Global Sand Sea. Washington: U. S. Goverment Printing Office, 1979. 8~ 19.

SIMULATED STUDY ON BARCHAN DUNE FORMS

Ling Yuquan Wu Zheng^① Liu Shaozhong^② Li Changzhi

(*Institute of Desert Research, Chinese Academy Sciences, Lanzhou, 730000*)

^① (*South China Nonmal University, Guangzhou, 510631*)

^② (*Institute of Computer Application, Chinese Academy Sciences, Chengdu 610041*)

ABSTRACT

Barchan dunes is a fundamental pattern of aeolian landform. Generally speaking, it is moulded by non-saturated wind-sand flow which is the high concentration. Its fomating process is caused by the wave-grain duality of sand grain movement, and develop with two stages: sand material accumulation (high concentration saturated wind-sand flow) and form moulding (high concentration non-saturated wind-sand flow), which shows the increase of dissipation and the decrease of dispersion. The scattered single barchan dunes on the non-sand bed possess movability and form unstability except the high-large crescent sand mountain. In wind tunnel, the formation of crescent dune form(its size is bigger one order of magnitudes than the ripples on the sand bed) will be helpful to understand the formation mechanism of the barchan dunes.

Key Words: Barchan dunes; Simulated experiment; dissipation and dispersion