

新月形沙丘研究进展

杨岩岩, 刘连友, 屈志强, 张国明

(环境演变与自然灾害教育部重点实验室 北京市防沙治沙工程研究中心
北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘要: 新月形沙丘是最简单且研究较深入的风积地貌, 对其研究已有较长的历史。总结和扼要评述国内外对新月形沙丘形态与移动特征、形成条件与过程、流场与蚀积特征、粒度与构造特征及分布与相互作用的研究成果; 分析了对其未来的研究趋势。

关键词: 新月形沙丘; 形态与移动; 形成条件与过程; 流场与蚀积特征; 粒度与构造特征

中图分类号: P931.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2014)01-0076-08

沙丘有多种分类方法, 按其形成风向和供沙量的多少, 可分为横向沙丘、纵向沙丘和星状沙丘。新月形沙丘是最简单且研究较为深入横向沙丘, 因其形似新月而得名, 分布在世界各大沙漠的边缘、河谷、干涸盐湖、海岸及其他星球, 是最典型最简单的风积地貌^[1-3]。新月形沙丘的沉积构造可以反映气候的变化过程; 移动方向可以指示地表物质的输移方向, 移动速度可以估算沙物质的输移量^[3], 是防风固沙工程的参考指标。沙漠及沙地面积占陆地总面积的1/3, 其中沙丘占80%以上, 新月形沙丘是主要的沙丘类型^[4]。沙区资源开发、生态环境保护、防风固沙工程的建设等方面均需掌握其形成、运动规律。以往研究已有了大量研究成果, 但仍然有许多问题有待解决。本文总结和论述了新月形沙丘的形态与移动特征、形成条件与过程、流场与蚀积特征、粒度与构造特征、分布与相互作用的研究成果, 探讨了研究中存在的问题与将来的研究方向。

1 形态与移动特征

新月形沙丘的形态参数(图1), 包括长、宽、高、兽角(翼)、迎风坡、背风坡和沙脊线。新月形沙丘横截面呈抛物线状^[5], 迎风坡角度介于8~20°之间, 背风坡角度介于28~34°, 高度差异较大^[6,7]。新月

形沙丘的宽高比固定, 介于8~18^[7-9], 存在区域差异。Belrhiti和Douady^[10]认为新月形沙丘的两翼和最高点形成一个稳定的多边形, 才使得其移动时保持形状不变。当然如果其运动时形态发生变化, 宽高比固定的这一结论将无从解释。Long和Sharp^[11]按照新月形沙丘迎风坡长度和宽度的比值, 将其分为“肥的”、“矮胖的”、“正常的”、“苗条的”(图2)。Bourke^[12]按照兽角的形态, 把新月形沙丘的兽角(翼)分为线性的、串珠状的、打结的。新月形沙丘存在沙脊线与丘顶重合与分离两种情况, 可能是由于风向的变化所致, 当风向较为单一时, 沙脊线与丘顶重合; 当风向较多变时, 沙脊线与丘顶分离。在野外其重合的情况较少。Howard等的研究表明新月形沙丘的大小与边界层的厚度、沙丘的年龄及下风向的粗糙度有关^[2]。最小新月形沙丘的宽度是沙粒获得跃移速度距离的20倍^[13]。影响新月形沙丘形态的因素主要有风况、沙物质的供应和植被覆盖^[14]。前两者是其形成的条件, 而植被对其形态的影响体现在随着植被盖度的增加, 新月形沙丘会逐渐过渡到抛物线形沙丘, 形态发生了逆转^[15,16]。

新月形沙丘是移动的, 朱震达等^[17]给出了不同主风向作用下的运动图式。对新月形沙丘移动时的形态说法不一, 有些人认为新月形沙丘运动时形态不变, 保持一种平衡态^[18]; 而有些人认为其处

收稿日期: 2013-02-24; 修订日期: 2013-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(41201261、40771021)、国家自然科学基金(41071331)、中国人民财产保险股份有限公司支持的学生项目资助。

作者简介: 杨岩岩(1988-), 女, 甘肃礼县人, 博士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治。E-mail: yanyang@mail.bnu.edu.cn

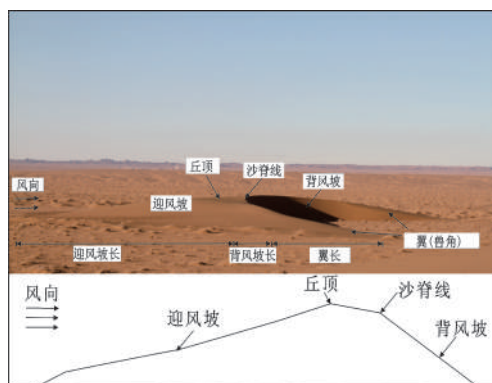
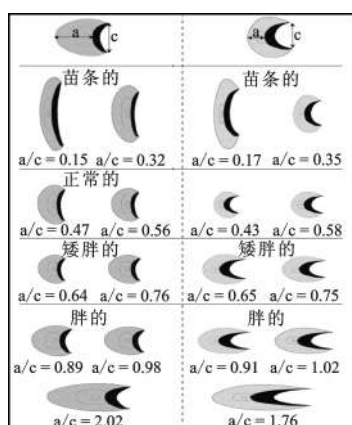


图1 新月形沙丘的形态参数

Fig.1 The morphological parameters of barchan dune

图2 不同研究区新月形沙丘移动状况^[13]Fig. 2 Schematic figure of barchan shapes^[13]

于非平衡态^[19],Hersen^[18]认为可能存在其他未被发

现的过程来解释平衡态和非平衡态之间的不一致。笔者在对巴丹吉林沙漠边缘新月形沙丘的研究中发现,随风况的变化其形态一直在变化。新月形沙丘是多种因素的地貌表现,任一影响因素的变化,均可能导致其形态的变化。移动速度与高度、宽度均成反比^[19,20]。以往研究建立了很多新月形沙丘移动速度,公式如:

$$D=Q/\gamma H \quad (1)$$

$$D=b+aH \quad (2)$$

式中, Q 为单位时间内通过单位宽度的沙量; H 为沙丘的高度; γ 为沙粒比重; D 为新月形沙丘的运动速度^[1]; a, b 为回归系数^[17,21,22]。Wilson^[21]把(1)式中的 Q 定义为:

$$Q=Q_c-Q_l \quad (3)$$

Q_c, Q_l 分别为沙丘顶部和底部的输沙量。以上公式分别从形态和过程出发,衡量沙丘输沙量。同理,也可以用沙丘移动速度估算沙丘的输沙量。沙丘的移动速度只能通过实地的观测和遥感影像解译获得。已有研究结果中,不同研究区的新月形沙丘年平均移动速度介于0.5~60 m/a之间,差异较大,移动方向各异,大致与起沙风的年合成方向一致,研究方法较多样(表1)。可根据新月形沙丘的移动速度的大小划分其移动强度^[17]。其为防风固沙工程的参考指标。新月形沙丘移动速度的大小除风力状况外,还受水分条件、植被覆盖状况的影响。移动方向随起沙风风向的变异而变化。

表1 不同研究区新月形沙丘移动状况

Table 1 The migration of barchan dune in different regions

研究区	平均移动速度(m/a)	方向	时间分辨率	方法	参考文献
塔克拉玛干南缘	5~18	ESE	1 a	插钎法	[17,23]
塔克拉玛干	6.4	SW	2 a	插钎法	[24]
大沙丘国家公园和自然保护区(美国)	1.9~7.5	WSW	63 a	遥感影像	[25]
纳米布沙漠	3.75	NE	24 a	遥感影像	[26]
秘鲁南部	15	NE	3 a	遥感影像	[27]
秘鲁南部	11~60	SE	11 a	遥感影像	[19]
腾格里沙漠	3.42	SE	-	¹⁴ C	[28]
英皮里尔谷	15~25	E	22 a	遥感影像	[11]
西奈半岛西北部	11.9	SE, E	1 a	遥感影像和COSI-Corr技术	[29]
阿拉善高原北部	5.3	ESE-SE	27 a	遥感影像	[30]
维谷(南极洲)	1.5	SW	40 a	遥感影像和LiDAR	[13]
直布罗陀海峡	1.75	W	1 d	插钎法	[31]
科伯克河谷国家公园(阿拉斯加)	0.5~1.5	SW	5 a	遥感影像和COSI-Corr技术	[32]

注:表中“-”表示时间分辨率没有意义。

2 形成条件与过程

早期,对新月形沙丘的形成条件是以概念模型描述性的提出的,认为新月形沙丘形成于供沙量不足和几乎为单向输沙风信的无植被区域^[33]。直至1983年Wasson和Hyde^[34]用RDP/DP定量表示了风向变率,新月形沙丘的RDP/DP平均值为0.68,对应的风况为单一风向风或窄风向组合风;用单位面积内沙层平均厚度EST(Equivalent Sand Thickness)定量表针了供沙量的多少,新月形沙丘形成的EST接近于0。但1984年在相同期刊中Rubin^[35]指出供沙量不能用EST表示。相对定性描述而言,EST是目前较合理的对供沙量定量描述的参数。植被在新月形沙丘形成过程的作用,至今无一定论,有学者认为植被是新月形沙丘形成的初始阶段,遇阻堆积的条件。而笔者认为植被是新月形沙丘形成的非充分非必要条件。

新月形沙丘是风沙流经过障碍物(如草丛、灌丛、砾石等)堆积后,在单一风向的作用下,经历了从沙斑、饼状沙堆、盾形沙堆、雏形新月形沙丘、新月形沙丘的过程形成的^[1,17]。但并不是所有的沙斑均向沙丘发育。此概念模型已在风洞、水槽和计算机数值中得到了验证^[17,36,37]。

3 流场与蚀积特征

3.1 流场特征

气流是新月形沙丘形成的动力因子,是新月形沙丘研究的重点和难点。由于沙丘形态对气流的影响,把新月形沙丘的流场分为3个区:迎风坡区、背风坡区和丘间地,但对迎风坡的流场关注更多。

从沙丘迎风坡坡脚至沙丘顶部,风速值逐渐被放大,气流加速约为1.3~2倍,风速的增加量与迎风坡的坡度、沙丘高度成正相关,随坡度、高度的增加,风速的加速率减小,风速趋于稳定,到一定高度,气流速度几乎不再增加,风速从丘顶到沙脊线减小^[38,39];迎风坡各点的风速廓线除坡脚外,均符合对数律;坡脚风速廓线异常,是湍流的剪切压力增大所致,而且从坡脚到沙脊线湍流强度在减小。迎风坡存在一个近地面内边界层,有些学者认为在野外无法观测^[40,41],而Wu等^[42]通过野外观测和风洞实验的研究认为内边界层的厚度约为0.66 m。

沙丘背风坡气流主要包括分离气流、偏向气

流,以及与主风向一致的表面附流,它们均属于二次流的范畴^[43],可分为回流区、恢复区、上部尾流区、下部尾流区。从背风坡坡脚至沙丘下风向一定距离,气流方向从与沙丘走向近似于垂直渐渐转向,形成一个回流区,直至一定距离以后,气流方向才会与沙丘上风向气流方向基本一致,把气流开始转向与上风向一致的位置叫附着点,其与迎风坡的形态密切相关,综合学者们的研究附着点位于4~15 H的位置^[8,9,40,44~56]。Walker和Nickling^[44]通过风洞实验测得回流区的气流有扩张和减弱的趋势,剪切压力波动的增大,在附着点达到了最大,整个区域湍流一直存在。随着迎风坡坡度的增大,回流区气流水平速度也在增大,且其最大值出现的高度约在沙丘高度的1/2处,气流速度约为外流区速度的30%~70%或沙丘顶部气流速度的30%~80%^[47]。尾流区的湍流会间歇性的冲击上边界层,从而影响该区域的沙粒运动^[48~50]。

对丘间地气流的研究集中在距背风坡较近的区域,即附着点以内的区域,对其以外的区域研究较少。直至2007年,Baddock^[51]在野外对丘间地的流场进行了研究,认为按照沙丘间的距离可把沙丘分为距离较小(Closed)和距离较大的沙丘(Extended)。当沙丘间的距离较小时,前面沙丘的流场不会影响下风向沙丘的流场,附着点出现在4 H的距离;当丘间距较大时,气流在下风向沙丘迎风坡坡脚的加积效应较小,使得在迎风坡坡脚的侵蚀力加强。

随着理论的日益成熟,对新月形沙丘的流场的模拟方面研究也逐渐增多,最早Wippermann和Gross^[52]、Weng等^[53]通过分析已有的模型,把输沙过程和计算模型相结合,模拟了新月形沙丘的流场,但其不能够完全模拟沙丘表面蚀积过程,模拟的结果精度不高,而且不能模拟出新月形沙丘表面的湍流、较小沙丘的背风坡的流场及沙丘形态的动态过程^[39,54]。后来的研究运用CFD(Computational Fluid Dynamics)成功的模拟了新月形沙丘坡脚的滞流、迎风坡从坡脚到丘顶连续的加积效应、背风坡的回流、沙丘形态对水平、垂直流场、二次流结构的影响^[44]及新月形沙丘3D的流场分布^[55,56]。

3.2 蚀积特征

新月形沙丘的流场、输沙率、形态之间相互影响,相互制约^[57]。不同位置输沙率的大小,控制着沙丘的形态。输沙率由迎风坡坡脚至丘顶总体呈递增

趋势^[43,58],但是迎风坡坡脚的输沙率不是最小的,而且坡度变缓、剪切风速降低的部位输沙率也相应减小。且在低风速的情况下,呈对数律增加;在高风速的情况下,呈线性增加^[41,59]。输沙率从兽角一个到另一个兽角,先增大后减小,在沙丘顶部达到了最大值^[60]。值得一提的是当把输沙率与风速联系起来时,在迎风坡坡脚出现了低风速高输沙率的矛盾,后来认为是由于湍流造成的,湍流对输沙率的影响可用流线的曲率来表示,且有一定的滞后效应,迎风坡流线的曲率从坡脚到坡中是凹的,从坡中到坡顶是凸的^[61-64]。但湍流与输沙过程之间的研究仍处于探索阶段,还需大量的研究工作。

挟沙气流输沙量(率)垂线分布及其变化规律为风沙流结构。由于新月形沙丘迎风坡和背风坡坡度的影响,使得新月形沙丘不同部位的风沙流结构较平坦沙地出现了变异,而且不同部位的风沙流结构不一致,不同学者的研究结果也存在差异。韩致文等^[65]对新月沙丘不同部位1 m高度风沙流结构的研究表明,不同部位风沙流结构均成分段函数,且表达式差异较大。这一结论与哈斯^[66]的研究结果不一致。这种差异可能是集沙仪规格或者不同研究区风况和沙粒性质差异所致,还需进一步研究。新月形沙丘不同部位风沙流中,沙粒的粒径分布也存在差异^[67]。

输沙率的变化导致蚀积强度的差异。沙丘迎风坡坡度变缓的部位沉积大于侵蚀,其它部位侵蚀大于沉积,其中丘顶侵蚀强度最大^[43]。迎风坡上部以及丘顶部为强烈风蚀区,落沙坡和兽角表现为堆积区^[68]。蚀积强度受风向的季节变化在交替变化^[69]。新月形沙丘的净蚀积量体现在其总沙量的变化,是由上风向的来沙量和下风向的损失量决定。Hersen等^[18]通过模拟认为新月形沙丘从上风向获得的沙量与其宽度成正比,其损失量与沙丘兽角的宽度呈正比,也就是说新月形沙丘的兽角宽度(H_w)与沙丘宽度(W)的比率决定了沙丘总沙量的变化,当 H_w/W 减小,沙丘的损失量在减小,沙丘的总沙量在增大,但仍没有相关的实测证据。

4 粒度与构造特征

侵蚀强度决定着沙丘表层沉积物的分布,就粒度分布而言,研究结论并不一致。有些研究认为从迎风坡坡脚至丘顶总体略呈变细趋势,但丘顶反而变粗,沙丘表面侵蚀强度是粒度特征的决

定因素^[47,49]。而另外一些研究认为新月形沙丘从坡脚至丘顶,粒度有变粗的趋势,背风坡的粒径较迎风坡细,分选程度以沙丘脊部最好向两坡逐渐较差^[45,70-73]。Folk等^[74]指出这种差异是由沙源沉积物的粒度组成造成的。由此可知,表层沙粒粒径的分布同时受沙源和动力过程的共同影响,主要取决于哪个因素的影响较大。

新月形沙丘的沉积构造既取决于滑落面顶脊线与丘顶是否分离,也取决于滑落面是否伸展到背风坡的底部,同时,季节性和更长周期的风向变化程度、沙丘大小和形状的变化也影响到沉积构造特征^[75]。沙丘的沉积构造反映沙丘的形成过程和沙丘的形成环境,以往对新月形沙丘的沉积构造方面的研究主要是通过刨挖、测量剖面的方法,由于工作量大,加之,沙物质的塌陷性,对构造方面的研究较少。已有报道中,较系统的为McKee^[76]在新墨西哥州对新月形沙丘平行和垂直于盛行风向的沉积构造的研究,结果表明新月形沙丘结构较为复杂。其结果是否具有代表性,与其他研究区是否相同,还需深入研究。随着科技的发展,利用电磁波传播原理探测地物的探地雷达(GPR)被应用到了对沙丘的研究^[77]。Ortiz等^[78]利用GPR研究了海岸的新月形沙丘的内部构造,指出沙丘内部存在多个不同的重叠单元,沙丘迎风坡的层理的倾斜角度可以反映风沙活动的强烈程度,层理的倾斜角越大,风沙活动越强烈。

5 分布与相互作用

以往对新月形沙丘的研究大多是针对单个沙丘而言的,近年来有些学者把研究对象转向了整个沙地新月形沙丘的分布、排列、相互作用(合并和分离)及其形成过程。Hersen等^[18]认为每一个沙地中的新月形沙丘的大小及之间的距离是一致的,而且通过碰撞过程,沙丘越大其繁殖速度越大。Bishop^[79]和Durán等^[80]通过对摩洛哥沙漠的研究认为在一个沙地中新月形沙丘之间的距离是服从正态分布的,而且沙丘的大小也是服从独立的函数分布,说明新月形沙丘的分布是经历一个自我调整和组织的过程。而且随着沙丘的移动和合并,沙丘的大小和丘间距将趋向于一致^[81],也有人认为沙丘间的距离是由气流的附着点的平均长度决定的^[53,82]。Elbelrhiti^[83]认为大的新月形沙丘通过两翼沙物质的损失形成了下一级的的小的新月形沙丘,阻

止了沙地向一级化发展,而且维持了新月形沙丘沙地的发展模式和沙丘大小的分布。已开展的大量关于新月形沙丘分布及相互作用的模拟实验,认为沙丘间相互作用是由其质量比、面积比及相对位置决定的,而且在相互作用的工程中,新月形沙丘高度的分布不会改变^[84,85]。但没有实测数据来证明这些结论^[86]。

6 展 望

综上所述,对新月形沙丘的研究已有较多成果,但仍有许多问题需要深入研究。

1) 形态与移动方面:在同一研究区,新月形沙丘的形态也存在较大差异(具有统计意义),其影响因素仍然未知;以往对新月形沙丘移动研究,时间间隔较大,对于较小时间间隔(季节、沙尘暴事件)的研究几乎没有涉及,而小时间间隔的移动规律对固沙工程更有意义,且有利于对移动过程和移动机制研究。

2) 形成条件与过程方面:EST 是否能表针供沙量,如果不能,那么哪些参数能够代替其,较好的表示供沙量,还需要深入的研究;有关新月形沙丘形成过程的模拟实验报道较少,大量的模拟实验还需开展,较多的实验结果才能为概念模型提供佐证。

3) 流场与蚀积方面:新月形沙丘的迎风坡存在一个内边界层,内边界层的气流才是真正产生剪切力的因素,但由于迎风坡坡度的影响,内边界层的测定较为困难。现利用其他高度的风速计算出的剪切力是否与实际一致,仍需要大量的研究工作。湍流和气流的结构对新月形沙丘形态、蚀积状况的影响还不清楚。在湍流条件下,沙粒是如何搬运、沉积的均是必须解决的问题。

4) 粒度与构造特征方面:较平坦地表新月形沙丘的表层粒度的分布的研究较多,那么爬坡和下坡新月形沙丘的粒度分布是否与平坦地表沙丘的一致,还需要进行研究。可将 GPR 引入到新月形沙丘构造特征的研究中,不但可以减少工作量及人为干扰,而且可以对比分析不同地表(平坦、爬坡、下坡)及区域(沙漠的边缘、河谷、干涸盐湖、海岸)新月形沙丘的构造的异同。

5) 分布与相互作用方面:沙丘的分布排列模式及沙丘间的相互作用(合并、分离),均处于定性的描述及各种假设条件下的数值模拟,对分布模

式的形成、发展机制及相互作用的控制条件、物质交换、相互作用的过程,亟需深入研究。

参考文献:

- [1] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. London: Chapman and Hall, 1941: 265.
- [2] Howard A D, Morton J B, Gad-el-Hak M, et al. Sand transport model of barchan dune equilibrium[J]. *Sedimentology*, 1978, **25**: 307-338.
- [3] Hunter R E, Richmond B M, Alpha T R. Storm-controlled oblique dunes of the Oregon coast[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1983, **94**: 1450-1465.
- [4] Meigs P. World distribution of arid and semi-arid homoclimates [J]. *Review of Research on Arid Zone Hydrology*, UNESCO Arid Zone Res, Series, 1953, **1**: 203-209.
- [5] Sauermann G, Rognon P, Poliakov A, et al. The shape of the barchan dunes of Southern Morocco[J]. *Geomorphology*, 2000, **36**: 47-62.
- [6] Frank A, Kocurek G. Airflow up the stoss slope of sand dunes: limitations of current understanding[J]. *Geomorphology*, 1996a, **17**: 47-54.
- [7] Sweet M L, Kocurek G. An empirical model of Aeolian dune lee-face airflow[J]. *Sedimentology*, 1990, **37**: 1023-1038.
- [8] Hesp P A, Hastings K. Width, height and slope relationships and aerodynamic maintenance of barchans[J]. *Geomorphology*, 1998, **22**: 193-204.
- [9] Hastenrath S. The barchans of the Arequipa Region, Southern Peru[J]. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1967, **11**: 300-331.
- [10] Belrhiti H E, Douady S. Equilibrium versus disequilibrium of barchan dunes[J]. *Geomorphology*, 2011, **125**: 558-568.
- [11] Long J T, Sharp R P. Barchan-dune movement in Imperial Valley, CA[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1964, **75**: 149-156.
- [12] Bourke M C. Barchan dune asymmetry: Observations from Mars and Earth[J]. *Icarus*, 2010, **205**: 183-197.
- [13] Hersen P, Douady S, Andreotti B. Relevant length scale of barchan dunes[J]. *Physical Review Letters*, 2002, **89**: 4.
- [14] Buckley R C. The effect of sparse vegetation on the transport of dune sand by wind[J]. *Nature*, 1987, **325**: 426-428.
- [15] Bourke M C, Goudie A S. Varieties of barchans form in the Namib Desert and on Mars[J]. *Aeolian Research*, 2009, **1**: 45-54.
- [16] Hack J T. Dunes of the Western Navajo Country[J]. *Geographical Review*, 1941, **31**: 240-263.
- [17] 朱震达, 陈治平, 吴正, 等. 塔克拉玛干风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 56-80.
- [18] Hersen P. On the crescentic shape of barchan dunes[J]. *European Physical Journal B*, 2004, **37**: 507-514.
- [19] Gay S P. Observation regarding the movement of barchan sand dunes in the Nazca to Tanaca area of southern Peru[J]. *Geomorphology*, 1999, **27**: 279-293.
- [20] Andreotti B, Claudin P, Douady S. Selection of dune shapes and

- velocities (2Parts) [J].European Physical Journal B,2002,**28**: 341-352.
- [21] Wilson I G.Aeolian bedforms their development and origins[J]. Sedimentology,1972,**19**:173-210.
- [22] Greeley R,Iversen J D.Wind as a Geological Process on Earth, Mars,Venus and Titan[M].Cambridge:Cambridge University Press,1985:333.
- [23] 周兴佳,李崇舜,雷加强,等.塔克拉玛干沙漠南缘策勒县沙丘移动规律的初步研究[J].干旱区研究,1990,**1**:39-44.
- [24] Dong Z B,Wang X M,Chen G T.Monitoring sand dune advance in the Taklimakan Desert[J].Geomorphology,2000,**35**:219-231.
- [25] Mari n L,Forman S L,Valdez A,et al.Twentieth century dune migration at the Great Sand Dunes National Park and Preserve, Colorado,relation to drought variability[J].Geomorphology, 2005,**70**:163-183.
- [26] Bristowa C S,Lancaster N.Movement of a small slip face less dome dune in the Namib Sand Sea,Namibia[J].Geomorphology, 2005,**114**:361-372.
- [27] Finkel H J.The barchans of Southern Peru[J].The Journal of Geology,1959,**67**:614-647.
- [28] Wang Z T,Zhao H,Zhang K C.Barchans of Minqin: quantifying migration rate of a barchans[J].Sciences in Cold and Arid Regions,2009,**1**(2):151-156.
- [29] Hermas E,Leprince S,El-Magd I A.Retrieving sand dune movements using sub-pixel correlation of multi-temporal optical remote sensing imagery,northwest Sinai Peninsula,Egypt[J].Remote Sensing of Environment,2012,**121**:51-60.
- [30] Yao Z Y,Wang T,Han Z W,et al.Migration of sand dunes on the northern Alxa Plateau, Inner Mongolia, China[J].Journal of Arid Environments,2007,**70**:80-93.
- [31] Navarro M,Juan J,Muñoz-Pérez,et al.Assessment of highly active dune mobility in the medium, short and very short term[J]. Geomorphology,2011,**129**:14-28.
- [32] Necsoiu M,Leprince S,Hooper D M,et al.Monitoring migration rates of an active subarctic dune field using optical imagery[J]. Remote Sensing of Environment,2009,**113**: 2441-2447.
- [33] 费道洛维奇 B A.现代沙漠地貌的起源[M].陈治平,朱震达,吴正,等译.北京:科学出版社,1962:1-15.
- [34] Wasson R J,Hyde R.Factors determining desert dune type[J].Nature,1983,**304**:337-339.
- [35] Rubin D M.Factors determining desert dune type[J].Nature, 1984,**309**:91-92.
- [36] Andreotti B,Claudin P,Douady S. Selection of barchan shapes and velocities.Part1: Dynamics of sand,wind and dunes[J].Eur. Phys. J. B,2002a,**28**: 321-339.
- [37] Taniguchi K,Endo N.The effect of periodic changes in wind direction on the deformation and morphology of isolated sand dunes based on flume experiments and field data from the Western Sahara[J].Geomorphology,2012,**90**:91-100.
- [38] 李恒鹏,陈广庭,李 波.新月形沙丘迎风坡气流加速模拟[J].中国沙漠,**21**(1):24-27.
- [39] Faria R, Ferreiral D,Sismeiro J L,et al.Wind tunnel and computational study of the stoss slope effect on the Aeolian erosion of transverse sand dunes[J].Aeolian Research,2011,**3**:303-314.
- [40] Frank A,Kocurek G.Toward a model for airflow on the lee side of aeolian dunes[J].Sedimentology,1996,**43**(3):451-458.
- [41] Lancaster N,Nickling W G,McKenna N C,et al.Sediment flux and airflow on the stoss slope of a barchans dune[J].Geomorphology,1996,**17**:55-62.
- [42] Wu X,Zou X,Zheng Z C,et al.Field measurement and scaled-down wind-tunnel model measurement of airflow field over a barchan dune[J].Journal of Arid Environments,2011,**75**:438-445.
- [43] 哈 斯,贵 勇,董光荣.沙丘背风侧气流及其沉积类型与意义[J].沉积学报,2001,**19**(1):96-100,124.
- [44] Walker I J,Nickling W G.Simulation and measurement of surface shear stress over isolated and closely spaced transverse dunes in a wind tunnel[J].Earth Surface Processes and Landforms 2003,**28**:1111-1124.
- [45] 王训明,董治宝,赵爱国.简单横向沙丘表面物质组成、气流分布及其在动力学过程中的意义[J].干旱区资源与环境,2004,**18** (4):29-33.
- [46] 钱广强,董治宝,罗万银,等.横向沙丘背风侧气流重附风洞模拟[J].中国沙漠,2008,**28**(1):16-20.
- [47] 李志忠,关有志.纵向沙丘和横向沙丘模拟流场的实验研究[J].中国沙漠,1996,**16**(4):360-363.
- [48] Nelson J M,McLean S R,Wolfe S R.Mean flow and turbulence fields over two-dimensional bed forms[J].Water Resources Research,1993,**29**:3935-3953.
- [49] McLean S R,Nelson J M,Wolfe S R.Turbulence structure over two-dimensional bed forms: implications for sediment transport [J].Journal of Geophysical Research,1994,**99**:12729-12747.
- [50] Venditti J C,Bauer B O.Turbulent flow over a dune: Green River,Colorado[J].Earth Surface Processes and Landforms, 2005, **30**:289-304.
- [51] Baddock M C,Livingstone I,Wiggs G F S.The geomorphological significance of airflow patterns in transverse dune interdunes [J].Geomorphology,2007,**87**:322-336.
- [52] Wippermann F K,Gross G.The wind-induced shaping and migration of an isolated dune: a numerical experiment[J].Boundary-Layer Meteorology, 1986,**36**:319-334.
- [53] Weng W S,Hunt J C R,Carruthers D J,et al.Air flow and sand transport over sand-dunes[J].Acta Mechanica Supplementum, 1991,**2**:1-22.
- [54] Stam J M T.On the modelling of two-dimensional aeolian dunes [J].Sedimentology,1997,**44**:127-141.
- [55] Liu B L,Qu J J,Zhang W M,et al.Numerical simulation of wind flow over transverse and pyramid dunes[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2011,**99**:879-888.
- [56] 江丽娟.新月形沙丘风场的数值模拟[D].兰州:兰州大学,2009.
- [57] Leeder M R.On the interactions between turbulent flow,sediment transport and bedform mechanics in channelised flows [M]//Collinson J D, Lewin J.Modern and ancient fluvial Sys-

- tems. Special Publication of the International Association of Sedimentologists. Blackwell: Oxford, 1983: 5-18.
- [58] Wiggs G F S. Desert dune processes and dynamics[J]. *Progress in Physical Geography*, 2001, **25**: 53-59.
- [59] Sauermann G, Andrade J S, Maia L P, et al. Wind velocity and sand transport on a barchan dune[J]. *Geomorphology*, 2003, **54**: 245-255.
- [60] Wang Z T, Zhang J W, Zhang Q H, et al. Barchans of Minqin: Sediment transport[J]. *Geomorphology*, 2008, **96**: 233-238.
- [61] Wiggs G F S, Livingstone I, Warren A. The role of streamline curvature in sand dune dynamics: evidence from field and wind tunnel measurements[J]. *Geomorphology*, 1996, **17**: 29-46.
- [62] 张春来, 郝青振, 邹学勇, 等. 新月形沙丘迎风坡形态及沉积物对表面气流的响应[J]. *中国沙漠*, 19(4): 359~363.
- [63] Weaver C M, Wiggs G F S. Field measurements of mean and turbulent airflow over a barchan sand dune[J]. *Geomorphology*, 2011, **128**: 32-41.
- [64] Wiggs G F S, Weaver C M. Turbulent flow structures and aeolian sediment transport over a barchan sand dune[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**: 1-7.
- [65] 韩致文, 缙倩倩, 杜鹤强, 等. 新月形沙丘表面 100 cm 高度内风沙流输沙量垂直分布函数分段拟合[J]. *地理科学*, 2012, **32**(7): 892~897.
- [66] 哈 斯. 腾格里沙漠东南缘沙丘表面风沙流结构变异的初步研究[J]. *科学通报*, 2004, **49**(11): 1099~1104.
- [67] 董玉祥, 黄德全, 马 骏. 海岸沙丘表面不同部位风沙流中不同粒径沙粒垂向分布的变化[J]. *地理科学*, 2010, **30**(3): 391~397.
- [68] 赵景峰, 李崇舜, 周兴佳, 等. 新月形沙丘丘表流场与沙丘蚀积特征[J]. *中国沙漠*, 1993, **13**(3): 18~24.
- [69] Livingstone I. Monitoring surface change on a Namib linear dune[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1989, **18**: 661-664.
- [70] Barndorff-Nielsen O, Dalsgaard K, Halgreen C, et al. Variation in particle size over a small dune[J]. *Sedimentology*, 1982, **29**: 53-65.
- [71] 哈 斯, 庄燕美, 王 蕾, 等. 毛乌素沙地南缘横向沙丘粒度分布及其对风向变化的响应[J]. *地理科学进展*, 2006, **25**(6): 42~51.
- [72] 周 娜, 张春来, 刘永刚. 雅鲁藏布江米林宽谷段新月形沙丘粒度分异研究[J]. *地理科学*, 2011, **31**(8): 558~596.
- [73] 陈渭南, 雷加强. 塔克拉玛干沙漠新月形沙丘不同部位的粒度特征[J]. *干旱区资源与环境*, 1992, **6**(2): 101~110.
- [74] Folk R L. Longitudinal dunes of the Northwestern edge of the Simpson Desert, Northern Territory, Australia: geomorphology and grain size relationships[J]. *Sedimentology*, 1971, **16**: 4~54.
- [75] 李志忠. 新月形沙丘研究进展综述[J]. *干旱区地理*, 1994, **17**(4): 81~87.
- [76] Mckee E D. Structures of dunes at White Sands National Monument, New Mexico[J]. *Sedimentology*, 1966, **7**(1): 1-69.
- [77] Harari Z. Ground-penetrating radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1996, **36**: 43-52.
- [78] Gómez-Ortiz D, Martín-Crespo T, Rodríguez I, et al. The internal structure of modern barchan dunes of the Ebro River Delta (Spain) from ground penetrating radar[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, **68**: 159-170.
- [79] Bishop M A. Point pattern analysis of north polar crescentic dunes, Mars: a geography of dune self-organization[J]. *Icarus*, 2007, **191**: 151-157.
- [80] Durán O, Claudin P, Andreotti B. On aeolian transport: Grain-scale interactions, dynamical mechanisms and scaling laws[J]. *Aeolian Research*, 2011, **3**: 243-270.
- [81] Kocurek G, Ewing R C. Aeolian dune field self-organization-implications for the formation of simple versus complex dune-field patterns[J]. *Geomorphology*, 2005, **72**: 94-105.
- [82] Engel P. Length of flow separation over dunes[J]. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 1981, **107**: 1133-1143.
- [83] Elbelrhiti H, Claudin P, Andreotti B. Field evidence for surface-wave-induced instability of sand dunes[J]. *Nature*, 2005, **437**: 720-723.
- [84] Endo N, Taniguchi K, Katsuki A. Observation of the whole process of interaction between barchans by flume experiments[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**: L125033: 1-3.
- [85] Katsuki A, Nishimori H, Endo N, et al. Collision dynamics of two barchan dunes simulated by a simple model[J]. *J. Phys. Soc. JPN*, 2005, **74**: 538-541.
- [86] Livingstone I, Wiggs G F S, Baddock M C. Barchan dunes: why they cannot be treated as 'solitons' or 'solitary waves' [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, **30**: 25.

A Review of Barchan Dunes

YANG Yan-yan, LIU Lian-you, QU Zhi-qiang, ZHANG Guo-ming

(*Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education Engineering Center of Desertification and Blown-sand Control, Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: Barchan dunes are the most common and more in-depth researched aeolian landform, which have been learnt for a long time. This study briefly reviews the shapes and migration, formation conditions and process, flow field and erosion, grain size and structure, distribution and interaction of barchan dunes, and analyzes its study trends. Although a lot of important progress has been made in the study of barchan dune, there are still many problems needs to be solved. Firstly, shapes and migration are the most obvious characters of the barchan dune and have been researched since 1940. However, in the same region where the shapes of barchan dune are varied, the reasons are worth studying. Meanwhile, the researches in barchan dunes migration were concentrated on long period of time interval, while the short time interval studies, such as season and sand storm event, are critical in the projects of windbreak and sand-fixation, but have been concerned little. Secondly, in the formation condition and process, whether EST can stand for sand availability or not and which parameters can instead of it are still needed to answer. Meantime, experiments of the formation process are few, which are very important to prove the conceptual model. Thirdly, in the flow field of barchans dunes, how to measure shear force and the turbulent are very important aspects to study since how sand movement and deposition in the turbulent condition are the microscopic factors to explain the evolution. Moreover, studies of barchans dune structures are limited, so we can use new technologies, such as GPR(Ground Penetrating Radar) in the future. At last, distribution and interaction of barchan dunes are hot fields, where many studies have been done. However, they are still to be advanced and qualitative, and lots of problems are needed to solve. For instance, process, mass change and control condition of interaction, formation and development mechanism of barchans dune distribution.

Key words: barchan dunes; shapes and migration; formation conditions and process; flow field and erosion; grain size and structure