

DOI: 10.7652/xjtuxb201305012

缩尺沙丘演化特性的风洞实验研究

贾攀, 王元, 张洋

(西安交通大学流体机械及工程系, 710049, 西安)

摘要: 以风洞实验为手段,从俯视和侧视 2 个角度采用光学测量同步记录、分析了缩尺沙丘的演化特性。结果表明:在风蚀沙床提供沙补给的情况下,缩尺沙丘的形态逐渐向新月形沙丘演化;沙丘的侵蚀主要发生在背风面,侵蚀程度随沙丘宽高比的减小而增大,迎风面仅在演化的初始阶段略有侵蚀,随后廓线基本保持不变;在同一时刻背风面和迎风面的侵蚀率均随沙丘宽高比的减小而增加,且随时间的推移逐渐降低,侵蚀率在背风面趋于定值,在迎风面逐渐逼近 0。对沙丘宽高比进行关联性分析表明,沙丘的侵蚀程度和宽高比呈现单调变化关系,宽高比可作为参数独立描述沙丘的演化特性。

关键词: 缩尺沙丘;风洞实验;侵蚀率;演化过程

中图分类号: O359;X169 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)05-0067-05

Experiment on Evolution of Downsized Dunes in Wind Tunnel

JIA Pan, WANG Yuan, ZHANG Yang

(Department of Fluid Machinery and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An experiment in a wind tunnel was conducted to record the evolution of downsized dunes from both top and side view by using an optical test system. The results show that downsized dunes gradually developed into barchans with sand supply given by the wind erosion on a sand bed. A further analysis on the profile variation indicates that the dunes erosion occurred mainly on the leeward side, and the erosion increased with the decrease in the ratio of the dune width and height. However, on the windward side, the erosion only occurred at the initial stage of the evolution and subsequently remained nearly unchanged. The erosion rate approached a nonzero constant on the leeward side while zero on the windward side as time went on. In addition, the relevance analysis on the dune width and height shows a clear monotonic relationship between dune erosion and the ratio of the dune width and height, so the ratio can be used as an independent parameter to describe the evolution of dunes.

Keywords: downsized dunes; wind tunnel experiment; erosion rate; evolution

沙丘是荒漠拓展的主要方式,也是风沙物理学和地貌学研究的热点^[1-2]。沙丘的形成和迁移是表面气流运动、宏观表面变化以及微观沙粒输移三者相互作用的复杂结果^[3]。20 世纪 50 年代,Bagnold 最早对沙丘进行了研究^[1],随后研究者通过野外及

实验观测、数值模拟等手段进行了深入的研究,取得了丰富的研究成果,实现了从微观单颗粒运动到宏观沙丘成形和迁移研究的跨越^[2]。新月形沙丘是一种迁移型沙丘,相关研究包括沙丘的表面气流特征、沉积模式以及风沙流结构等^[4-14],其中大部分内容

收稿日期: 2012-10-11。 作者简介: 贾攀(1987—),男,博士生;王元(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11272252)。

网络出版时间: 2013-03-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130307.0830.014.html>

仅从几何相似出发来探索实验室模拟和野外观测结果的一致性。例如:通过风洞扩散段气流持续时间和强度改变风沙流的饱和长度,来模拟新月形沙丘的形成和发育过程^[15];通过在风洞顶部加入定量的沙样实现沙供给,来模拟锥形沙堆的演化过程。然而,上述实验中沙供给方式与自然界的状况不符。另外,文献^[16-17]利用实验室水环境,通过改变两相的密度比来改变饱和长度,以模拟缩尺沙丘的演化特征,但是相比于风蚀环境,沙丘的演化过程中不存在跃移运动,颗粒的微观运动也不同。鉴于以上工作,本文采用与自然界更为接近的风蚀沙床实现了沙供给,借助光学测量从俯视和侧视 2 个角度记录了缩尺沙丘的演化过程,并以侵蚀率为参考研究了流向和垂向二维度的关联性。

1 缩尺沙丘演化实验设置

实验在直流开式大气边界层风洞中进行,简图如图 1 所示。风洞测试段的尺寸为长 $L=14.4\text{ m}$,宽 $W=0.7\text{ m}$,高 $H=1.2\text{ m}$ 。在测试段铺设粗糙元,以形成中性层结的大气边界层,并通过粒子图像测速 PIV 系统测量风速廓线及湍流量,结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,所测风速廓线满足对数风速分布律 $u(z)/u_* = \ln(z/z_0)/\kappa$,其中 $u(z)$ 为高度 z 处的平均风速, u_* 为摩阻风速, κ 为 Karman 常数, z_0 为空气动力学粗糙度。从图 2 还可以看出,湍流量 T 的最大值约为 15%,出现在沙床面附近。采用 PCO-1200hs 和 PCO-1600 相机分别以侧视和俯视角度同步记录缩尺沙丘的演化过程,同时综合考虑了沙丘的演化特性和测试系统的限制,设定采样频率为 1 Hz,采样时长为 1 424 s。

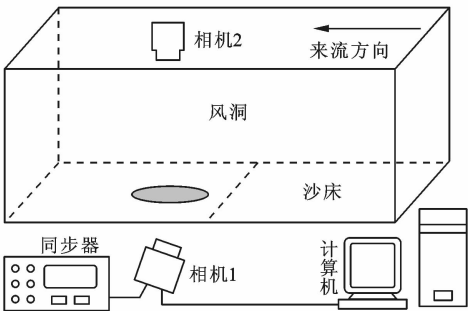


图 1 实验系统

将一定质量的沙样堆积成锥状沙堆,以此作为缩尺沙丘的初始形态,并以同种沙样从距离沙丘位置 0.5 m 处向上游铺设尺寸为长 8 m、宽 0.7 m、高 0.001 m 的沙床,用以模拟沙丘演化过程中的沙供

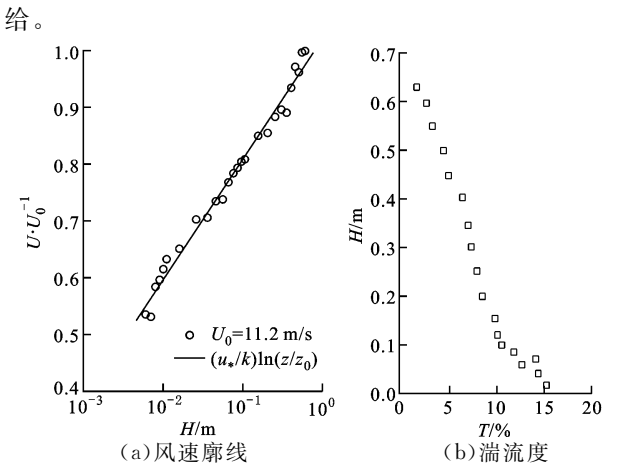


图 2 风速廓线及湍流量

实验中采用粒径 $d=250\text{ }\mu\text{m}$ 以下的细沙作为标本,沙样是来源于塔克拉玛干沙漠南缘的自然沙丘沙, d 主要在 $100\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ 之间^[18]。根据物性参数,临界摩阻风速^[1]

$$u_{*t} = A \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d \right)^{1/2} \tag{1}$$

式中: ρ_s 为沙粒密度; ρ 为空气密度; g 为重力加速度; A 为经验常数,一般取值为 0.1。经过计算, $u_{*t}=0.24\text{ m/s}$,如果主流风速 $U_0=11.2\text{ m/s}$, $u_*/u_{*t}=1.8$,以此供沙,沙床面出现了明显的跃移运动,且可保证沙丘具有明显的风蚀现象。

实验考虑了 3 个相似准则数^[19-20]:若斯比数 Ro 、弗罗德数 Fr 及雷诺数 Re 。实验模拟是在大气边界层下部(跃移层)10%~15%以内进行,故 Ro 效应可以忽略。文献^[21]中建议: $Fr=U_0^2/(gH)$ 小于 20 可避免跃移颗粒和风洞顶板碰撞,所以实验中取 $Fr=10.7$ 。此外,本文中 Re 值大于 10^4 ,已经达到了“自模化”状态。

2 实验数据分析

2.1 沙丘形态特征变化

实验中采用以沙压初始形态为标识的 4 种工况,几何参数如表 1 所示,表中 $\gamma=D/h$, h 为沙丘高度, D 为沙丘底面直径。

表 1 缩尺沙丘初始几何参数

工况	h/cm	D/cm	γ
1	26.3	6.7	3.95
2	25.2	7.8	3.61
3	23.4	7.5	3.12
4	29.1	10.3	2.83

$\gamma=3.95$ 时俯视记录缩尺沙丘形态的演化过

程,结果如图 3 所示。侧视角度(如图 1 中相机 1)下记录了沙丘流向纵剖面的演化过程,定义归一化高度 H_0 为任一时刻 h 与初始时刻沙丘高度之比,同理归一化 D_0 为任一时刻 D 与初始时刻沙丘底面直径之比。沙丘几何参数变化趋势如图 4 所示。从图 4 可以看出: H_0 仅在演化的初始阶段略微下降,随后由于来自上游的沙补给使得 H_0 保持基本不变;4 种工况下 D_0 随着时间的增加单调减小, D_0 减小的程度随着 γ 的减小而加剧。 D_0 的变化曲线在 $\gamma=3.12$ 和 $\gamma=2.83$ 时出现了“突跳”,这是由于实验过程中沙丘被侵蚀面侵蚀而造成局部坍塌引起的。结合文献[3]的实验结果可知:通过沙堆上游提供沙补给来调谐风沙流的饱和长度,是得到新月形沙丘的必要条件;即使提供沙补给,流向长度也会逐渐减小(若实验记录的时间足够长可观察到沙丘逐渐变小直至完全消失),表明稳定迁移的新月形沙丘存在一个最小尺寸^[1,3]。

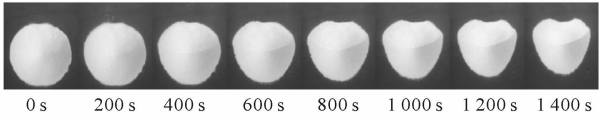


图 3 俯视时沙丘形态变化过程($\gamma=3.95$)

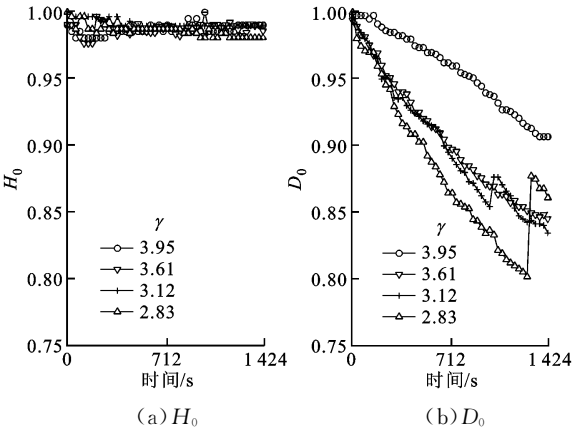


图 4 沙丘几何参数变化趋势

2.2 沙丘演化的动力学特性

通过廓线的相关系数 C_i 和侵蚀率 R 2 个指标分别从迎风面、背风面及整体沙丘 3 个角度分析了沙丘演化的动力学特性。设 P_i 为流向纵剖面在 $t=i(0 \leq i \leq 1424 \text{ s})$ 时刻的廓线, C_i 为 P_i 和 P_0 (未受侵蚀时的廓线)的相关系数, $R=(P_0-P_i)/i$, 则有

$$C_i = (E(P_i P_0) - E(P_i)E(P_0)) / (B(P_i)B(P_0))^{1/2} \quad (2)$$

式中: E 和 B 分别为期望和方差算子。显然, 相关

系数越大, i 时刻的廓线 P_i 越接近初始时刻的廓线 P_0 。沙丘迎风面、背风面演化过程如图 5 所示。

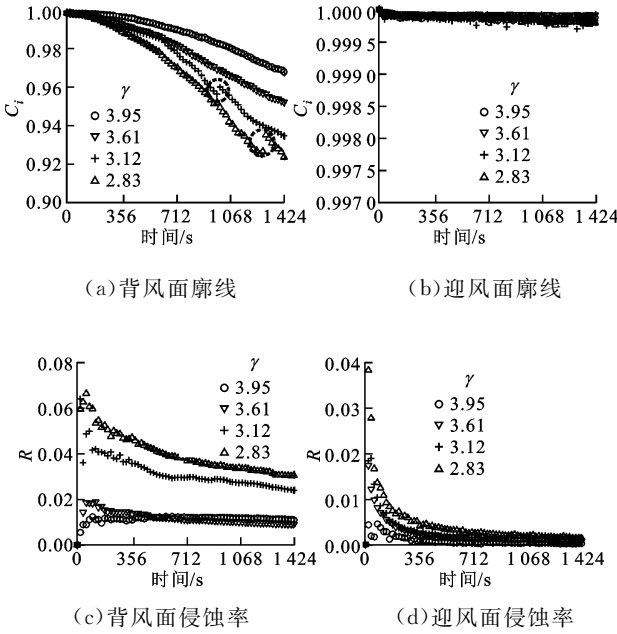


图 5 沙丘迎风面、背风面演化过程

由图 5 可以看出:随着时间的推移,4 种工况下背风面廓线与初始时刻廓线的相关程度都在下降,说明随着时间的推移,背风面廓线的变化越来越大,沙丘被侵蚀的程度加大;经历同样的风蚀时间, γ 越小,背风面廓线的变化越大(即与初始时刻的相关性越小),沙丘被侵蚀的程度越大;背风面被侵蚀的程度远大于迎风面,这与文献[3]的实验结果一致,与文献[22]关于横向沙丘的演化实验中观测到的结果相似,是沙丘体扰动来流使得下游形成较强的回流涡导致的;迎风面廓线和初始时刻的相关系数仅在演化的开始阶段微有下降,但随着时间的推移基本保持不变;在 $\gamma=3.12$ 和 $\gamma=2.83$ 的 2 种工况下,背风面廓线的相关性系数变化曲线出现突跳,这是由于实验中沙丘被侵蚀而导致局部出现坍塌引起的,值得指出的是,突跳前后相关性系数曲线的变化趋势保持基本不变。曲线拟合计算表明, $\gamma=3.12$ 和 $\gamma=2.83$ 时,突跳前后相关性系数变化率分别保持为 $8.78 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $1.41 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 左右。从图 5 亦可发现:当 γ 较小时($\gamma=3.12$ 和 $\gamma=2.83$),背风面侵蚀率随着时间的推移逐渐减小,且变化率越来越小,有趋于定值的趋势;当 γ 较大时($\gamma=3.61$ 和 $\gamma=3.95$),从初始时刻经过较少的时间(约 150 s)后侵蚀率趋于定值;迎风面侵蚀率随着时间的推移逐渐下降,最后趋近于 0,这与迎风面廓线相关性分析结果一致。所以,在迎风面和背风面,同一时刻的侵蚀

率总体随着 γ 的减小而增加。

沙丘整体演化过程如图6所示。从图6可以看出,整体相关特性系数的变化曲线与图5a结果基本相似,相同时刻也观察到曲线的突跳现象,沙丘流向纵剖面侵蚀率的变化与图5c相似,表明本文实验条件下沙丘背风面的侵蚀在沙丘整体的演化过程中起主导的作用。

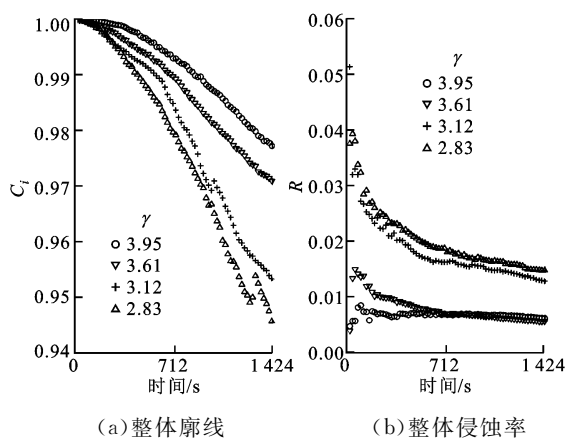


图6 沙丘整体演化过程

2.3 沙丘二维度关联性

野外观测显示,沙丘的流向长度与高度呈线性关系^[3]。本文以侵蚀率为参考,对沙丘流向与垂向二维度的关联性进行了研究。定义 $\Delta = 1 - C_{1424}$ 为沙丘流向纵剖面历时 1 424 s 后的侵蚀程度,显然 Δ 越大,侵蚀程度也越大,工况 1~工况 4 对应的 Δ 分别为 0.023、0.032、0.047、0.054。沙丘侵蚀程度和沙丘初始几何参数的变化关系如图7所示。由图7可以看出,沙丘的 h 和直径 D 与 Δ 之间并无明显的相关性, γ 与 Δ 之间呈现出明显的单调变化关系,即随着 γ 的减小,沙丘受侵蚀的程度逐渐增大,因此 h 和 D 并不能作为独立的参数来描述沙丘的侵蚀特性。

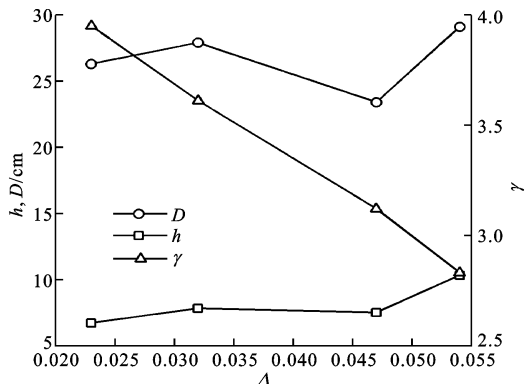


图7 沙丘几何特征与受侵蚀程度的关系

3 结论

本文通过风洞实验,采用与自然界更为接近的风蚀沙床实现了沙供给,借助光学测量方法记录了缩尺沙丘的演化过程,在本文实验条件下得到以下结论。

(1)在风蚀沙床提供沙补给的情况下,缩尺沙丘在演化过程中逐渐向新月形沙丘发育;沙丘的流向长度逐渐缩短,垂向长度受上游沙补给的影响,演化过程保持基本不变。

(2)在背风面和迎风面,同一时刻的侵蚀率随着 γ 的减小而增加,同一 γ 下侵蚀率随时间的推移逐渐降低并表现出收敛特性,背风面的侵蚀率趋于定值,迎风面的侵蚀率逐渐逼近 0。

(3)沙丘的受侵蚀程度与 γ 之间呈现出明显的单调变化关系,因此研究单一风面(迎风面或背风面),可尝试将 γ 可作为独立参数来描述沙丘的演化特性。下一步工作将在流向、展向及垂向 3 个维度上全面分析沙丘演化过程与维度的关联性。

参考文献:

- [1] BAGNOLD R A. The physics of blown sand and desert dunes [M]. New York, USA: Dover Publications Inc., 1954.
- [2] LIVINGSTONE I, WIGGS G F S, WEAVER C M. Geomorphology of desert sand dunes: a review of recent progress [J]. Earth-Science Reviews, 2007, 80 (3/4): 239-257.
- [3] ANDREOTTI B, CLAUDIN P, DOUADY S. Selection of dune shapes and velocities: part 1 Dynamics of sand, wind and barchans [J]. European Physical Journal: B, 2002, 28(3): 321-339.
- [4] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] 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 [2012-02-20]. DOI: 10.1029/2012GL050847.
- [6] DU H. Variation of wind profile and sand flow structure above barchan dune [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(1): 9-16.
- [7] WU X. Field measurement and scaled-down wind-tunnel model measurement of airflow field over a barchan dune [J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75 (5): 438-445.
- [8] WEAVER C M, WIGGS G F S. Field measurements

- of mean and turbulent airflow over a barchan sand dune [J]. *Geomorphology*, 2011, 128(1/2): 32-41.
- [9] BADDOCK M C, WIGGS G F S, LIVINGSTONE I. A field study of mean and turbulent flow characteristics upwind, over and downwind of barchan dunes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36 (11): 1435-1448.
- [10] KATSUKI A, KIKUCHI M. Simulation of barchan dynamics with inter-dune sand streams [J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13 [2012-05-11]. DOI: 10.1088/1367-2630/13/6/063049.
- [11] ZHANG D, NARTEAU C, ROZIER O. Morphodynamics of barchan and transverse dunes using a cellular automaton model [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2010, 1159 [2012-08-09]. DOI: 10.1029/2009JF001620.
- [12] MA Gaosheng, ZHENG Xiaojing. The research on the shedding vortex of barchan dune by LES [C]//2nd International Symposium on Computational Mechanics. New York, USA: American Institute of Physics, 2010: 1219-1224.
- [13] DURAN O, PARTELI E J R, HERRMANN H J. A continuous model for sand dunes; review, new developments and application to barchan dunes and barchan dune fields [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(13): 1591-1600.
- [14] KROY K, SAUERMAN G, HERRMANN H J. Minimal model for aeolian sand dunes [J]. *Physical Review: E*, 2002, 66(3): 031302.
- [15] 凌裕泉, 吴正, 刘绍中, 等. 新月形沙丘形态的模拟实验研究 [J]. *地理科学*, 1998, 18(1): 88-93.
- LING Yuquan, WU Zheng, LIU Shaozhong, et al. Simulated study on barchan dune forms [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18(1): 88-93.
- [16] FRANKLIN E M, CHARRU F. Subaqueous barchan dunes in turbulent shear flow: part 1 Dune motion [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2011, 675: 199-222.
- [17] HERSEN P, DOUADY S, ANDREOTTI B. Relevant length scale of barchan dunes [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(26): 264-301.
- [18] 王元. 沙漠-绿洲过渡带流沙起动规律及防护模式模拟实验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1998.
- [19] WHITE B R. Laboratory simulation of aeolian sand transport and physical modeling of flow around dunes [J]. *Annals of Arid Zone*, 1996, 35(3): 187-213.
- [20] ZHANG W, KANG J H, LEE S J. Tracking of saltating sand trajectories over a flat surface embedded in an atmospheric boundary layer [J]. *Geomorphology*, 2007, 86(3/4): 320-331.
- [21] OWEN P R, GILLETTE D. Wind tunnel constraint on saltation [C]//Proceedings of International Workshop on the Physics of Blown Sand. Aarhus, Denmark: University of Aarhus, 1985: 253-269.
- [22] FERREIRA A D, FINO M R M. A wind tunnel study of wind erosion and profile reshaping of transverse sand piles in tandem [J]. *Geomorphology*, 2012, 139: 230-241.

(编辑 苗凌)

(上接第 66 页)

- [10] 张道刚, 王茂廷, 王杰, 等. 往复式压缩机管道振动的 ANSYS 分析 [J]. *化工设备与管道*, 2009, 46(1): 56-59.
- ZHANG Daogang, WANG Maoting, WANG Jie, et al. Vibration analysis for piping connected with reciprocating compressor by using ANSYS [J]. *Process Equipment & Piping*, 2009, 46(1): 56-59.
- [11] 苏永生, 王恒杰. 应用 CFD 消除气流脉动 [J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2006, 32(4): 480-483.
- SU Yongsheng, WANG Hengjie. Using CFD in reducing airflow ripple [J]. *Journal of East China University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2006, 32(4): 480-483.
- [12] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

(编辑 苗凌)