

风沙流起动阶段沙粒输运特征

亢力强, 张军杰, 邹学勇, 张春来, 程宏

(北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室/防沙治沙教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要:为了探究风沙流起动过程中沙粒输运特征,利用PTV测量技术在风洞中对风沙流起动过程进行了测量,分析了沙粒空间分布、沙粒平均水平速度、输沙率、沙粒数密度和输沙通量随时间的变化规律。结果表明:风沙流起动时间大约为1.5 s。起动过程中,输沙率随时间迅速增加,气流中沙粒总数目随时间的变化可表示为指数函数,沙粒数密度和输沙通量随高度的变化均可近似表示为负指数衰减函数。在 $t=1.0$ s时刻的沙粒平均水平速度大于相同高度处以后时刻的沙粒平均水平速度,同一高度处 $t=1.5$ s以后的沙粒数密度大于 $t=0.5$ s、1.0 s时刻的沙粒数密度,同一高度处 $t=1.5$ s以后的输沙通量大于 $t=1.0$ s时刻的输沙通量。沙粒数密度随高度的衰减率一般随时间的增加而减小,并在 $t=1.5$ s后逐渐接近稳定值。

关键词:风沙流; 起动; 风洞实验

文章编号:1000-694X(2017)06-1051-08

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00106

中图分类号:X169

文献标志码:A

0 引言

风沙流即风沙运动是流动的空气及其搬运的沙粒形成的一种气固两相流动^[1]。每一次风沙运动过程都要经历起动、发展、消亡等3个阶段,然而现有研究大都集中于风沙运动起动后的发展阶段,研究内容包括输沙率、输沙通量、沙粒速度、沙粒浓度等参数的输运特征^[2-8]。风洞试验和理论模型通常均假定发生在平坦地表、二维稳定风场等一些较理想的条件,这类研究的风沙流可称为稳态风沙流,众所周知,发生风沙运动的气流始终处于湍流运动状态,即风速一直是脉动的,因此,这里所谓稳态是表示风场无明显的低频风速波动。另一方面,由于自然界野外风速的阵性和地表条件的复杂性,风和沙粒的相互作用很难达到动态稳定状态,这种状态下的风沙流可称为非稳态风沙流,即风场有明显的低频风速波动,野外观测实验通常发生在这种条件下^[9-11]。总之,已有研究对稳态和非稳态风沙流的沙粒输运规律尤其是稳态情况进行了比较充分的研究。

然而对处于起动阶段的风沙输运特征的研究还不充分,这里的起动阶段是指沙粒从开始起动到发展到动态稳定时的这个过程。在数值研究方面,Anderson等^[12-13]认为风沙流发展到稳定阶段需要

大约2 s,在此过程中,床面起跳的沙粒数、单宽输沙率随时间的增加迅速增加到最大值,然后逐渐减小到稳定值。Spies等^[14]的计算表明风沙运动发展到稳定状态的时间约为2~4.5 s,这与模拟风洞高度有关。Kang等^[15]采用离散颗粒模型模拟了风沙运动,风沙流发展到稳定阶段需要大约3.5 s。Tong等^[16]的计算表明输沙率随时间发展到动态稳定阶段所需时间约为1.5~2.5 s,取决于来流风速大小。Zheng等^[17]在考虑电场力作用时计算得到风沙流发展到稳定阶段约为2 s。在实验研究方面,Alawadhi等^[18]在风洞中采用集沙仪测量了风洞起动阶段输沙率随时间的变化,发现输沙率在1 min内迅速增加,然后慢慢调整到稳定状态,而且达到这个稳定状态的时间在无补给沙情况下为2~4 min,在有补给沙情况下为8~9 min。上述这些研究关注了风沙运动的起动时间以及起动阶段输沙率随时间的变化,然而,对起动阶段沙粒空间分布、沙粒平均水平速度、沙粒数密度和输沙通量的研究还十分匮乏。

随着测量技术的发展,先进的图像测量技术PIV(Particle image velocimetry)和PTV(Particle tracking velocimetry)开始应用到风沙运动研究中^[5,19-21],这些测量方法不干扰风场和沙粒的运动,目前利用这些方法主要研究了稳态风沙流状况下沙

粒速度和沙粒浓度的变化规律。针对起动阶段的风沙运动,本文利用先进的 PTV 测量技术,在风洞中研究风速增加到设定值的过程中床面沙粒逐渐起动进入气流并发展到动态稳定状态的过程,探究该起动过程中沙粒空间分布、沙粒平均水平速度、输沙率、沙粒数密度和输沙通量等参数随时间的变化规律,为揭示风沙流起动规律提供参考数据。

1 实验方法

实验在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室的中型风沙环境与工程风洞内进行。该风洞为直流吹气式风洞,实验段长 16 m,横截面为 1 m×1 m,实验风速可以达到 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。风洞内铺设 6.2 m 长、0.8 m 宽、2 cm 厚的沙床,其前缘距风洞实验段入口约 6 m,实验沙粒平均粒径为 0.23 mm。风速采用皮托管式风速廓线仪测量,风沙流发展到稳定阶段的风洞来流风速分别设置为 7.5、8.8、 $10.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

沙粒信息采用粒子图像测速系统(PIV)进行测量,激光片光源从风洞顶部引入。首先启动 PIV 测量系统,然后迅速启动风洞风机运转,这样可以捕获风沙运动起动阶段的运动沙粒瞬时图像。PIV 图像的采集频率为 2 Hz,图像大小为 4008×2672 像素,分辨率为每像素 $80.39 \mu\text{m}$ 。沙粒速度采用 TSI INSIGHT 3G 软件中的 PTV 算法计算获得。

2 结果与分析

2.1 起动阶段运动沙粒的空间分布

从图 1 可以看出,在风沙流起动阶段,沙粒迅速起动进入气流,沙粒进入气流的数目也迅速增加,风沙流起动时间很短,在大约 1.5 s 内完成。

为了定量描述气流中运动沙粒数目的变化情况,图 2 给出风沙流起动阶段 PIV 图像中捕捉的沙粒总数目随时间的变化情况。图中 N 表示一张 PIV 图像中捕获的沙粒总数目, u_{f0} 为风沙流发展到稳定阶段的风洞来流风速。横坐标 t_{PIV} 起始时间为 PIV 系统拍照记录的时刻,而不是风沙流起动的前一时刻(即图 1 标记的时刻)。从图 2 可以看出,风沙流起动时间约为 1.5 s,其后 PIV 图像中捕捉的沙粒总数目进入动态波动阶段。在风沙流起动过程中,气流中运动沙粒总数目随时间的变化可表示为指数函数,如图 3 所示,该指数函数为 $N=a\exp(bt)$,式中 a 和 b 为拟合系数。

2.2 起动阶段沙粒平均水平速度变化

随着沙粒不断进入气流,导致 $t=1.5 \text{ s}$ 及其以后时刻在 8 mm 以下高度内沙粒浓度较高,此时软件的 PTV 算法得到的每个沙粒速度不正确,故此高度内沙粒速度数据没有给出。

图 4 为不同时刻沙粒平均水平速度随高度的变化,图中 u_p 表示沙粒平均水平速度。由于 $t=0.5 \text{ s}$ 时无法得到统计的沙粒平均速度,故图中未给出此时刻的数据。从图 4 可以看出,在每一时刻,沙粒平均水平速度随高度增加有增大的趋势,在 $t=1.5 \text{ s}$ 以后沙粒平均水平速度的变化比较接近。在 $t=1.0 \text{ s}$ 时刻的沙粒平均水平速度大于相同高度处 $t=1.5, 2.0, 2.5 \text{ s}$ 时刻的沙粒平均水平速度,这是由于在 $t=1.0 \text{ s}$ 时风沙流正处于发展过程中,此时气流中沙粒数目比稳定时的数目少,它们对气流的总阻力比稳定时的也要小,因此, $t=1.0 \text{ s}$ 时刻的沙粒平均速度大于其后时刻同一高度处的沙粒平均水平速度。

2.3 起动阶段输沙率随时间的变化

由于 8 mm 以下高度的沙粒速度数据不正确,故只统计了 8 mm 以上高度的输沙率。图 5 为风沙流起动过程中大于 8 mm 高度的输沙率随时间的变化,图中 $Q_{y>8\text{mm}}$ 表示 8 mm 以上高度的单宽输沙率,表示为

$$Q_{y>8\text{mm}} = \int_{0.008}^{+\infty} mn(y)u_p(y)dy \quad (1)$$

式中: m 为单个沙粒的平均质量; $n(y)$ 表示高度 y 处沙粒数密度; $u_p(y)$ 表示高度 y 处沙粒平均水平速度。

从图 5 可以看出,在沙粒起动的开始阶段,输沙率随时间迅速增加,当达到一定时间后,输沙率在某一数值附近波动变化,说明风沙流达到动态平衡状态。为了和已有文献结果定性比较,图 5 还给出了文献[12]中输沙率 Q 随时间的计算结果(图中 u_* 表示摩阻风速),可以看出,本实验所得风沙流起动阶段的输沙率随时间的变化趋势和文献计算结果趋势一致。还可看出不同风洞来流风速下,所达到的饱和输沙率也不同,而且随着风洞来流风速的增加,饱和输沙率增加。这主要因为随着风洞来流风速增加,床面沙粒进入气流的数目增加,而且沙粒在气流中受到的拖曳力也增加,从而动态稳定状态下的输沙率增加。

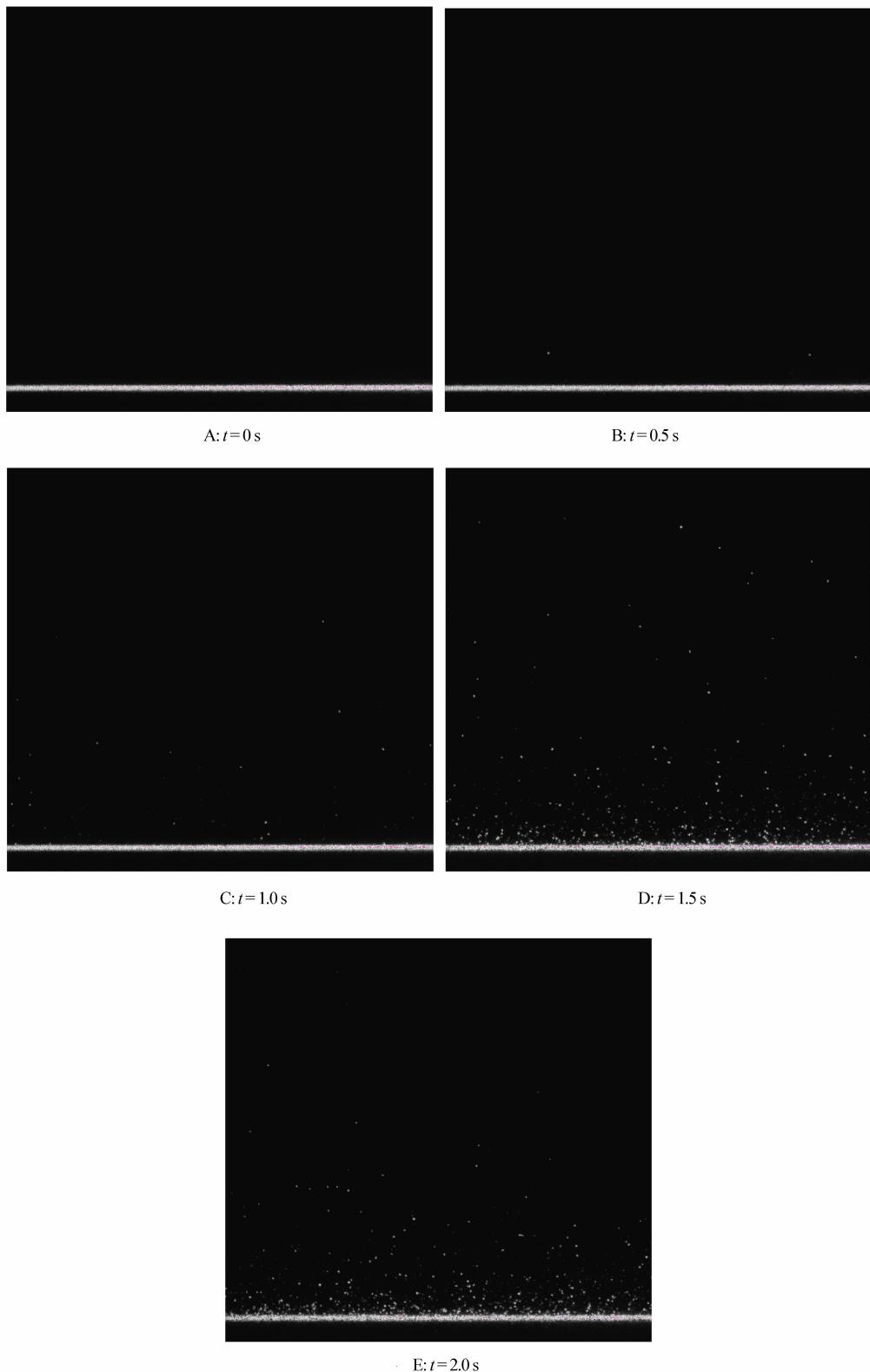


图 1 风洞来流风速为 $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时风沙流起动阶段的 PIV 图像序列

Fig. 1 Time series of PIV images during initiation process of aeolian sand transport

2.4 起动阶段沙粒数密度变化

由图 6 可见, 在风沙流起动过程中的每一时刻,

沙粒数密度一般随高度的增加而减少, 在贴近床面位置处沙粒数密度最大, 然而在风洞来流风速为 $10.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $t=1.5\text{s}$ 以后靠近床面一点的沙粒

数密度减小,可能由于沙粒浓度高导致 PIV 图像中床面处沙粒不能很好识别。当风洞来流风速相同

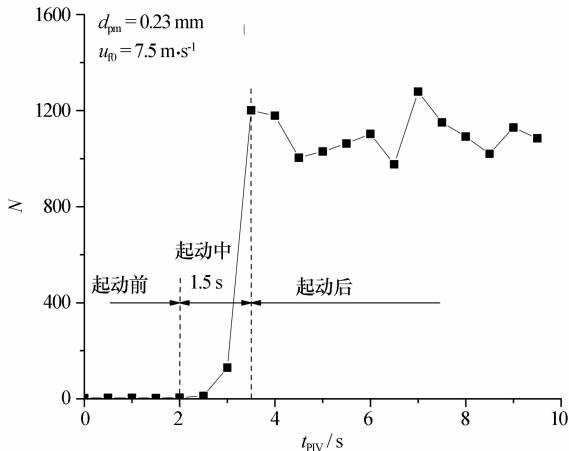


图 2 PIV 图像中沙粒总数目随时间的变化

Fig. 2 Variation of total sand particle number in PIV image with time

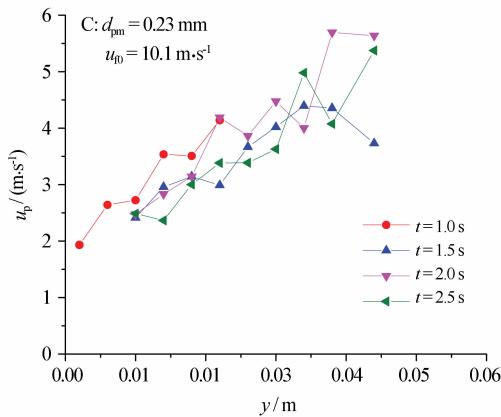
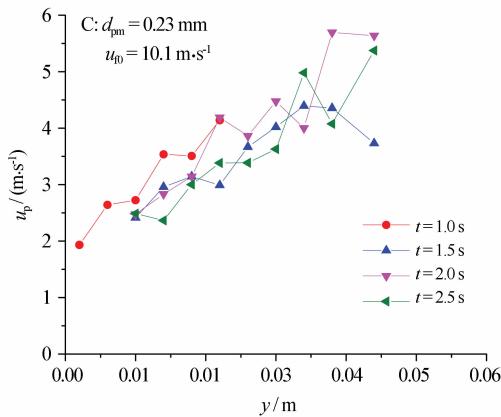
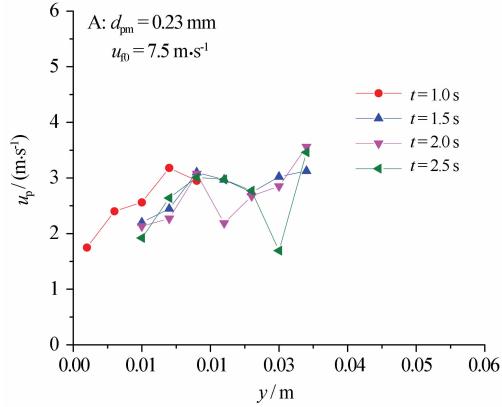


图 4 风沙流起动过程中沙粒平均水平速度随高度的变化

Fig. 4 Variation of mean horizontal particle velocity with time during initiation process of aeolian sand transport

时,同一高度处 $t = 1.5$ s 以后的沙粒数密度大于 $t = 0.5$ s、 1.0 s 时刻的沙粒数密度,并且沙粒出现的高度也增加。 $t = 1.5$ s 以后所得到的沙粒数密度曲线比较接近,说明风沙流达到动态稳定状态。

风沙流起动过程中沙粒数密度随高度的变化曲

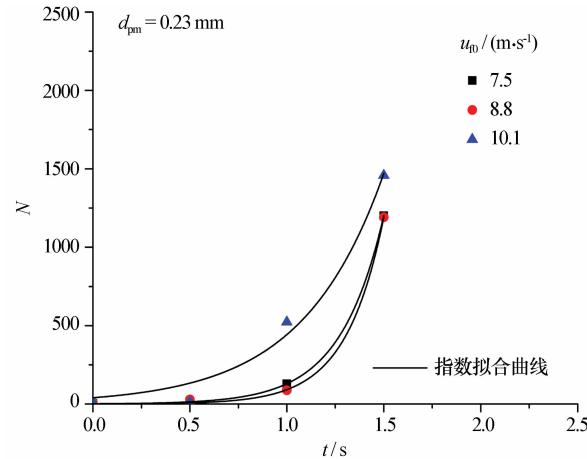
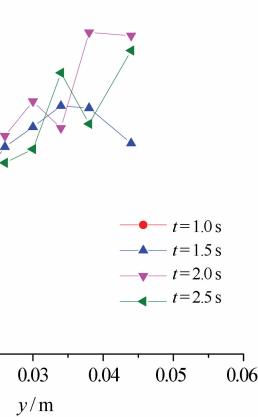
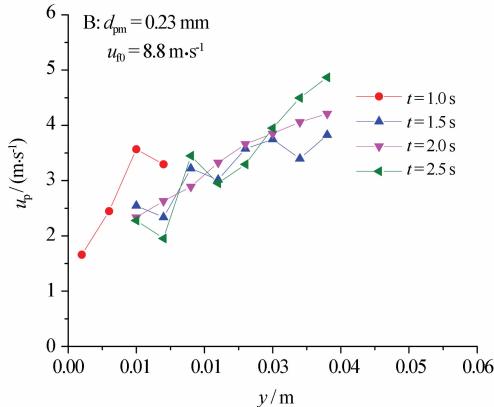


图 3 风沙流起动过程中 PIV 图像中沙粒总数目变化的拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of total sand particle number in PIV image during initiation process of aeolian sand transport



线可近似表示为负指数函数:

$$n(y) = n_0 \exp(-b_n y) \quad (2)$$

式中: n_0 表示床面处沙粒数密度, b_n 表示沙粒数密度随高度的衰减率。从图 7 可以看出,在风洞来流风速为 7.5 、 8.8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,床面处沙粒数密度 n_0 一

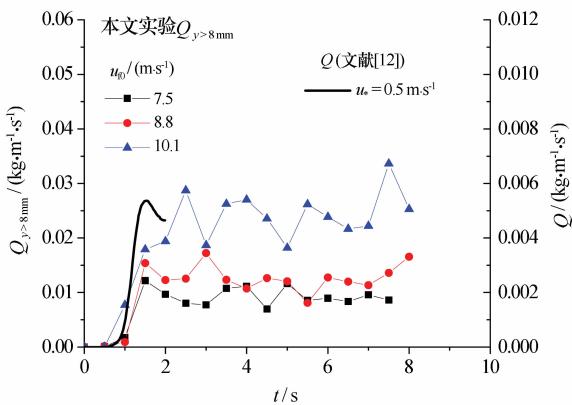


图 5 风沙流起动过程中大于 8 mm 高度的输沙率随时间的变化

Fig. 5 Variation of sand transport rate above 8 mm height during initiation process of aeolian sand transport

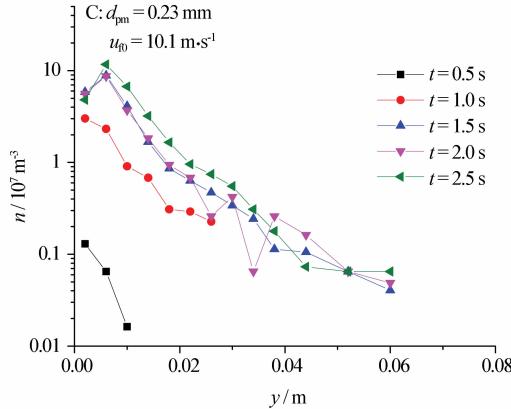
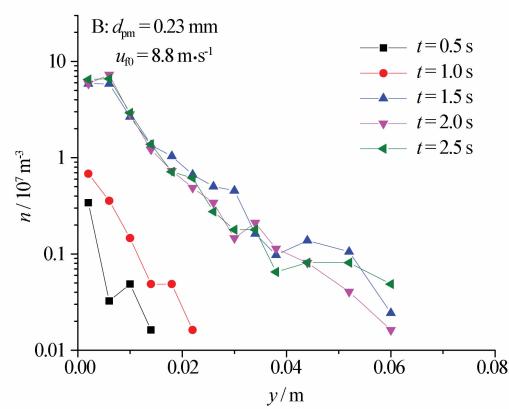
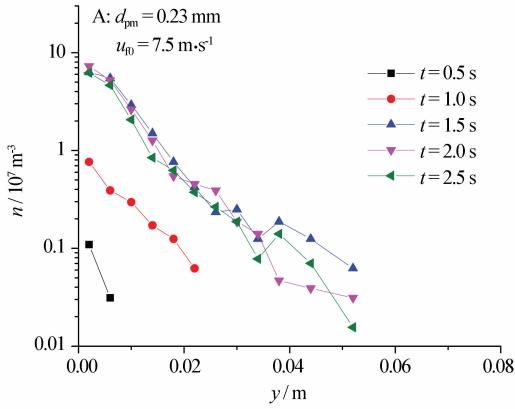


图 6 风沙流起动过程中沙粒数密度随高度的变化

Fig. 6 Variation of particle number density with height during initiation process of aeolian sand transport

于 $t=1.0$ s 时刻的输沙通量, 并且 $t=1.5$ s 以后所得到的输沙通量随高度的分布曲线比较接近, 说明风沙流达到动态稳定状态。

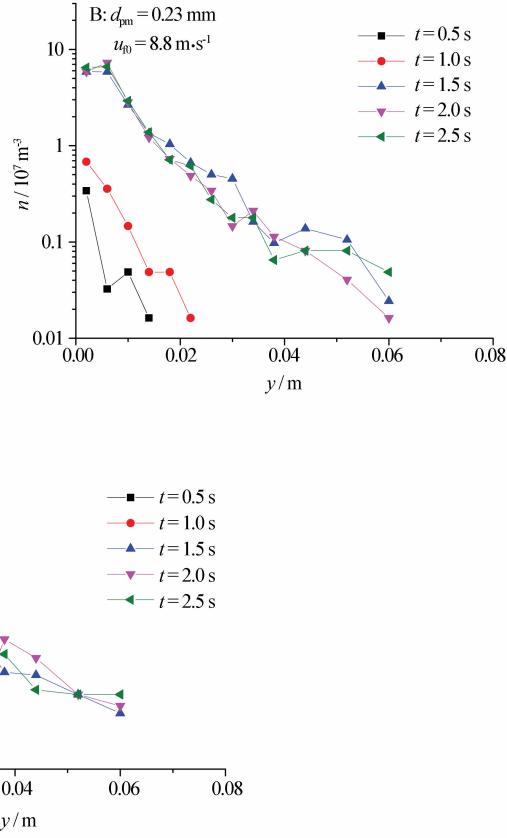
由图 8 还可看出, 风沙流起动过程中输沙通量随高度的变化可近似表示为负指数函数:

$$q = q_0 \exp(-b_q y) \quad (3)$$

般随时间的增加而增加, 并在 $t=1.5$ s 后逐渐接近稳定值, 而风洞来流风速为 $10.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, n_0 一直随时间的增加而增加, 是由于 $t=1.5$ s 到 2.5 s 之间的输沙率还在增加导致, 如图 5 所示。沙粒数密度随高度的衰减率 b_n 一般随时间的增加而减小, 并在 $t=1.5$ s 后逐渐接近稳定值, 这表明一开始沙粒数密度随高度的衰减速度很快, 随着时间的增加, 随高度的衰减速度减小并趋于稳定值。

2.5 起动阶段输沙通量变化

图 8 给出了不同来流风速下风沙流起动过程中输沙通量随高度的分布曲线。图中 q 表示输沙通量。由图 8 可知, 在风沙流起动过程中每一时刻的输沙通量一般随高度的增加而减少。当风洞来流风速不变时, 同一高度处 $t=1.5$ s 以后的输沙通量大



式中: q_0 表示床面处输沙通量; b_q 表示输沙通量随高度的衰减率。

图 9 给出了风沙流起动过程中输沙通量负指数拟合曲线的参数值随时间的变化。在不同的风洞来流风速下, $t=1.5$ s 后床面处的输沙通量 q_0 大于 $t=1.0$ s 时刻的值。输沙通量随高度的衰减率 b_q 在

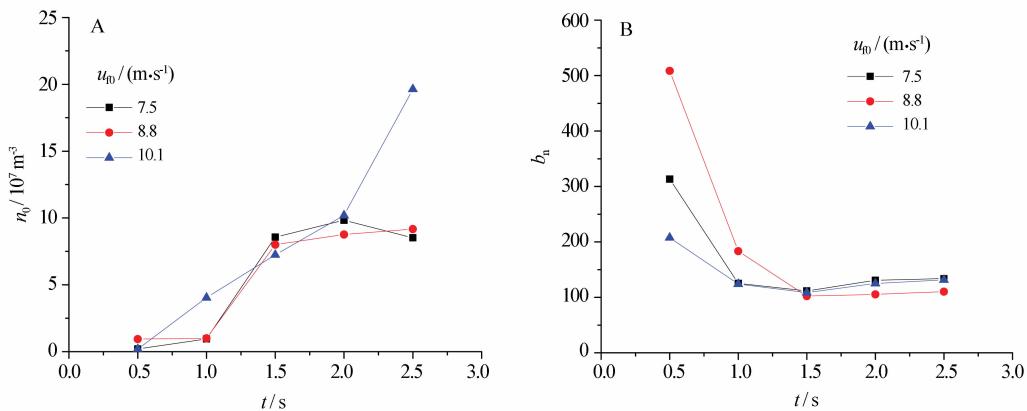


图 7 风沙流起动过程中沙粒数密度拟合曲线系数随时间的变化

Fig. 7 Variation with time of curve-fitting parameters of particle number density during initiation process of aeolian sand transport

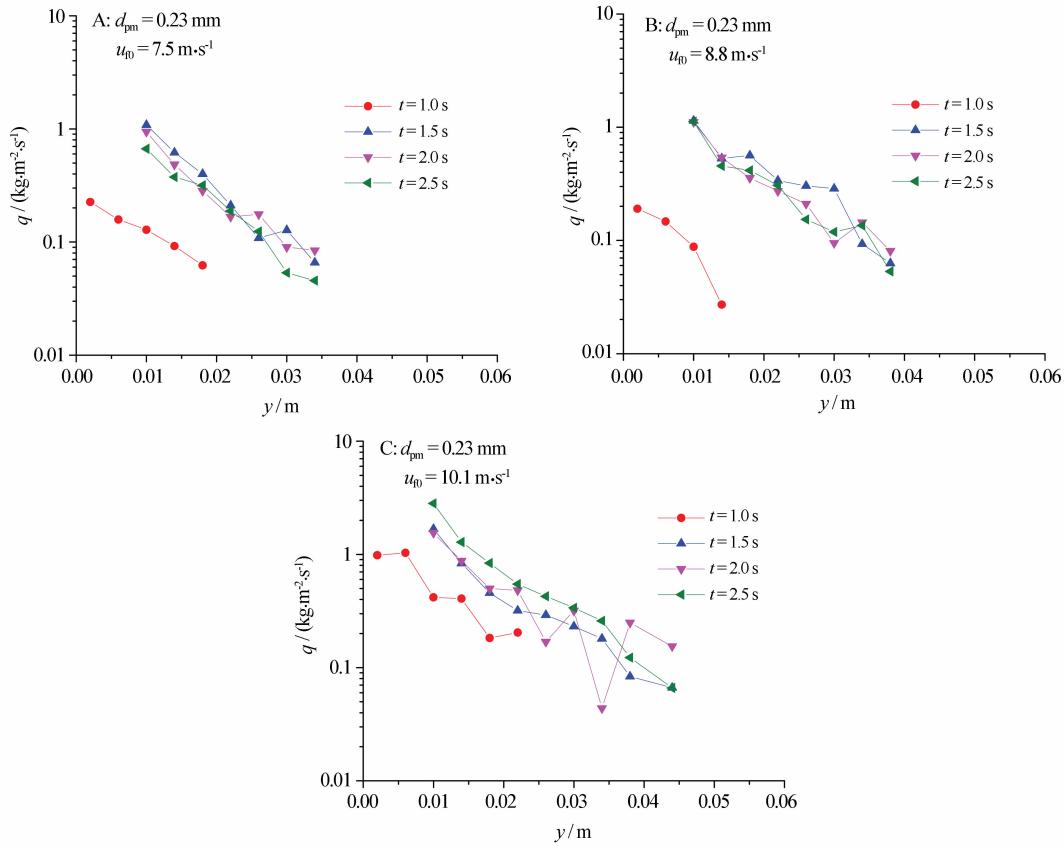


图 8 风沙流起动过程中输沙通量随高度的变化

Fig. 8 Variation of sand flux with height during initiation process of aeolian sand transport

$t = 1.0 \text{ s}$ 后没有统一的变化规律。

2.6 起动阶段风速变化

图 10 为风沙流起动阶段中不同高度处水平风速随时间变化的时间序列。图中风速采样频率为 100 Hz。从图中可以看出,在风沙流起动阶段,不同高度处水平风速随时间变化均为脉动变化,这说明风的流动处于湍流运动状态,尤其是风沙流起动之后,边界

层内风速脉动幅度增大,即风速波动增强。

经实验观察,沙粒起动风速在 0.3 m 高度处约为 $4.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。如果从水平风速达到起动风速时开始计时,那么大约经历 5 s 时间,0.3 m 高度处的水平风速会达到动态稳定状态,而边界层内 0.06 m 和 0.1 m 高度处的水平风速达到动态稳定状态所经历的时间却小于 5 s,为 3.0~3.5 s。由于风速和 PIV 测量没有实现同步测量,因此,无法给出瞬

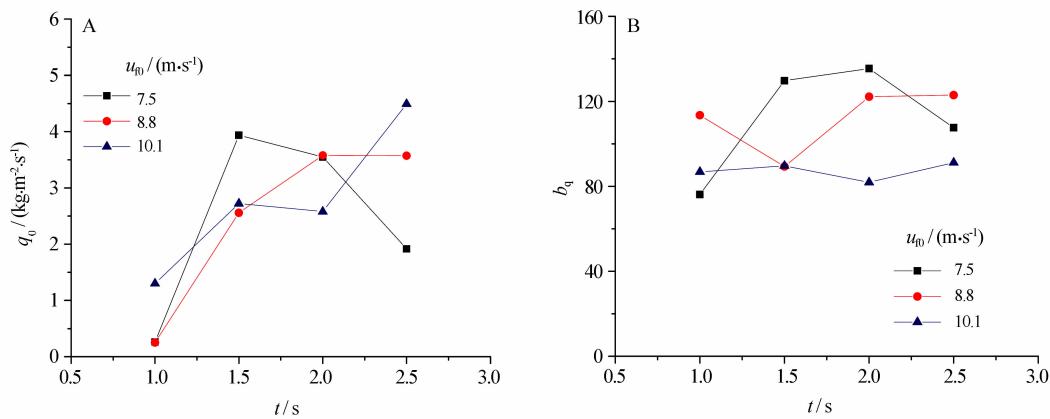


图9 风沙流起动过程中输沙通量拟合曲线参数随时间的变化

Fig. 9 Variation with time of curve-fitting parameters of sand flux during initiation process of aeolian sand transport

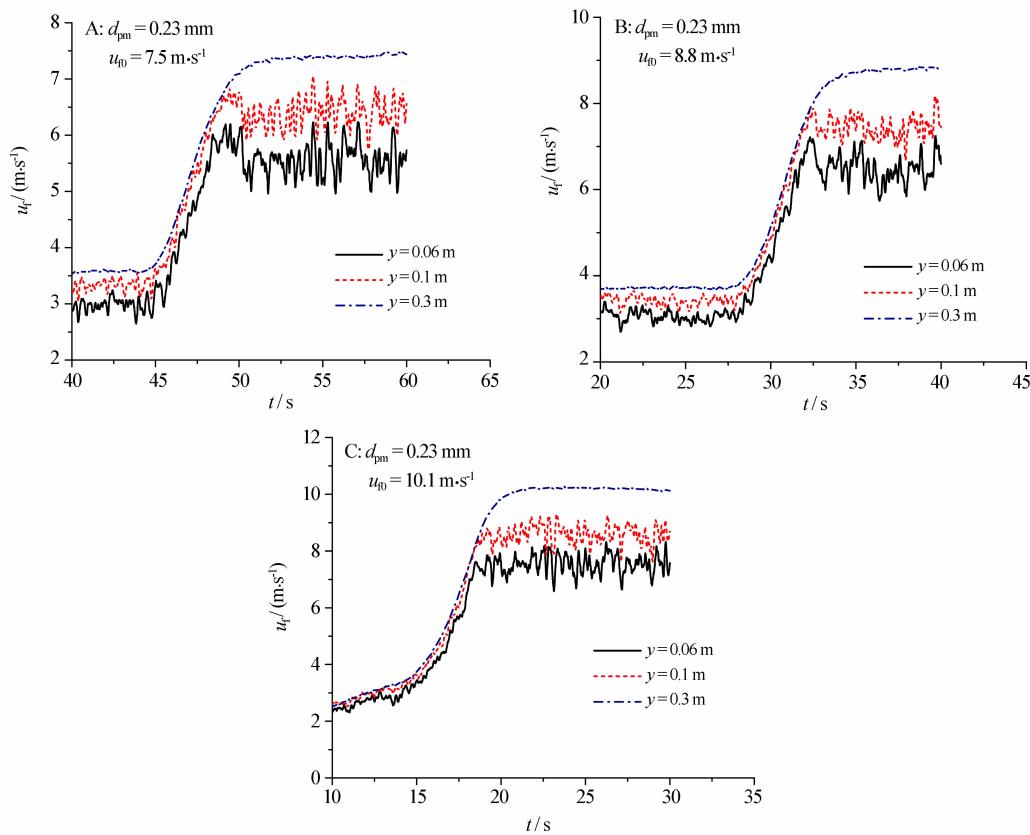


图10 风沙流起动过程中水平风速的时间序列

Fig. 10 Time series of horizontal wind velocity during initiation process of aeolian sand transport

时风速和PIV图像之间的准确对应关系。

3 结论

风沙流起动时间约1.5 s。

风沙流起动过程中,气流中沙粒总数目和输沙率随时间的增加而迅速增加,沙粒数密度和输沙通量随高度的变化均可近似表示为负指数函数。沙粒数密度随高度的衰减率一般随时间的增加而减小,并在 $t=1.5$ s后逐渐接近稳定值。

在 $t=1.0$ s时刻的沙粒平均水平速度大于相同高度处 $t=1.5$ 、 2.0 、 2.5 s时刻的沙粒平均水平速度,同一高度处 $t=1.5$ s以后的沙粒数密度大于 $t=0.5$ s、 1.0 s时刻的沙粒数密度,同一高度处 $t=1.5$ s以后的输沙通量大于 $t=1.0$ s时刻的输沙通量。

参考文献:

- [1] 吴正等. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] Zou X Y, Wang Z L, Hao Q Z, et al. The distribution of veloci-

- ty and energy of saltating sand grains in a wind tunnel[J]. Geomorphology, 2001, 36: 155–165.
- [3] Dong Z B, Liu X P, Wang H T, et al. Aeolian sand transport: a wind tunnel model[J]. Sedimentary Geology, 2003, 161: 71–83.
- [4] Liu X P, Dong Z B. Experimental investigation of the concentration profile of a blowing sand cloud[J]. Geomorphology, 2004, 60: 371–381.
- [5] Kang L Q, Zhao G D, Zou X Y, et al. An improved particle counting method for particle volume concentration in aeolian sand transport[J]. Powder Technology, 2015, 280: 191–200.
- [6] Kang L Q, Guo L J, Liu D Y. Reconstructing the vertical distribution of the aeolian saltation mass flux based on the probability distribution of lift-off velocity [J]. Geomorphology, 2008, 96: 1–15.
- [7] Butterfield G R. Transitional behaviour of saltation: wind tunnel observations of unsteady winds[J]. Journal of Arid Environments, 1998, 39: 377–394.
- [8] 赵国丹,亢力强,邹学勇,等. 稳态风沙流中沙粒体积浓度的模型分析[J]. 中国沙漠,2015,35(5):1113–1119.
- [9] Davidson-Arnott R G D, MacQuarrie K, Aagaard T. The effect of wind gusts, moisture content and fetch length on sand transport on a beach[J]. Geomorphology, 2005, 68: 115–129.
- [10] Ellis J T, Sherman D J, Farrell E J, et al. Temporal and spatial variability of aeolian sand transport: implications for field measurements[J]. Aeolian Research, 2012, 3: 379–387.
- [11] Davidson-Arnott R G D, Bauer B O, Walker I J, et al. High-frequency sediment transport responses on a vegetated fore-dune[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37: 1227–1241.
- [12] Anderson R S, Haff P K. Simulation of eolian saltation[J]. Science, 1988, 241: 820–823.
- [13] Anderson R S, Haff P K. Wind modification and bed response during saltation of sand in air[M]//Barndorff-Nielsen O E, Willetts B B. Aeolian Grain Transport 1. Acta Mechanica Supplementum, Vienna, Austria: Springer, 1991: 21–51.
- [14] Spies P-J, McEwan I K, Butterfield G R. One-dimensional transitional behaviour in saltation[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25: 505–518.
- [15] Kang L Q, Guo L J. Eulerian-Lagrangian simulation of aeolian sand transport[J]. Powder Technology, 2006, 162 (2): 111–120.
- [16] Tong D, Huang N. Numerical simulation of saltating particles in atmospheric boundary layer over flat bed and sand ripples [J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: D16205.
- [17] Zheng X J, Huang N, Zhou Y. The effect of electrostatic force on the evolution of sandsaltation cloud[J]. European Physical Journal E, 2006, 19: 129–138.
- [18] Al-awadhi J M, Willetts B B. Transient sand transport rates after wind tunnel start-up [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 22: 21–30.
- [19] Dong Z B, Qian G Q, Luo W Y, et al. Analysis of the mass flux profiles of an aeolian saltating cloud[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2006, 111: D16111.
- [20] Creyssels M, Dupont P, Ould El Moctar A, et al. Saltating particles in a turbulent boundary layer: experiment and theory [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 625: 47–74.
- [21] 佟鼎,黄宁. 天然混合沙运动速度特征的风洞 PIV 实验[J]. 工程力学,2011,28(7):229–237.

Characteristics of Sand Transport during Initiation Process of Aeolian Sand Transport

Kang Liqiang, Zhang Junjie, Zou Xueyong, Zhang Chunlai, Cheng Hong

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology/MOE Engineering Center of Desertification and Blown-sand Control, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In order to further explore the characteristics of sand transport during the initiation process of aeolian sand transport, the developing process of initiation of aeolian sand transport was measured by PTV (particle tracking velocimetry) technology in a wind tunnel. The variation of particle space distribution, the horizontal particle velocity, sand transport rate, particle number density and sand flux with time is analyzed. The result shows that the time consumption is about 1.5 s for the initiation process of aeolian sand transport. During the initiation process, the sand transport rate increases rapidly with time, the total particle number in air increases exponentially with time, and the variation of both particle number density and sand flux with height can be approximately expressed by a negative exponential function. At the same height, the mean horizontal particle velocity at $t=1.0$ s is larger than that after this time, the particle number density after $t=1.5$ s is larger than that at $t=0.5$ s and 1.0 s, and the sand flux after $t=1.5$ s is more than that at $t=1.0$ s. The decay rate of particle number density with height generally decreases with time, and approximates to a constant after $t=1.5$ s.

Key words: aeolian sand transport; initiation; wind tunnel experiment