

高频测量输沙浓度对湍流脉动的频率响应

刘江¹, 王元¹, 杨斌²

(1. 西安交通大学流体机械与工程系, 710049, 西安; 2. 西北大学化工学院, 710127, 西安)

摘要: 为揭示风沙流中输沙浓度对湍流脉动的响应频率, 在边界层风洞中对不同粒径沙样进行了两相同步测量. 采用高速数字相机以 2 000 帧/s 拍摄跃移粒子连续图像以计算瞬时输沙浓度, 配合热线风速仪同步记录跃移层内的湍流脉动. 结果表明, 沙粒瞬时浓度变化呈典型的随机过程, 其频谱规律表明输沙浓度只能响应含能较高的低频湍流脉动. 引入小波包变换分析两相数据的能量结构, 结果显示沙粒浓度的能量波动约有 90% 集中在 500 Hz 内的低频段. 输沙浓度对湍流脉动的响应频率受粒子尺寸的影响, 对于 100~125 μm 的小粒径沙样, 阈值响应频率约为 40 Hz, 对于 300~500 μm 的大粒径沙样, 响应频率约为 30 Hz.

关键词: 输沙浓度; 湍流脉动; 小波包分析; 响应频率

中图分类号: O353.5; X169 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)11-0113-06

High-Frequency Measurements of Particle Response to Turbulence

LIU Jiang¹, WANG Yuan¹, YANG Bin²

(1. Fluid Machinery and Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Chemical Engineering, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: In order to analyze the response frequency of saltating particles to turbulence, the fluid-particle synchronous measurements were carried out in a boundary layer wind-tunnel with different particle sizes. A high-speed digital camera was employed to record consecutive instantaneous images of the saltating particles at 2 000 frames per second to calculate the particle concentration, and the turbulent velocity fluctuation in the saltation layer was obtained simultaneously by a hot-wire anemometer. The results show that the saltation transport of sand particles is a typical stochastic process. The variations of the particle concentration are closely dependent only on the turbulent flow at low-frequency band. Moreover, the wavelet packet analysis shows that the low frequency section lower than 500 Hz of the particle concentration dominates the energy structure of sand-phase. In addition, the effects of a fluctuating wind on particle concentration are different for various particle sizes. For the smaller sand (100-125 μm), the threshold response frequency of particle concentration to turbulence is about 40 Hz while the frequency value is roughly 30 Hz for the larger sand (300-500 μm).

Keywords: particle concentration; turbulent fluctuation; wavelet packet analysis; response frequency

引起风沙运动的自然风总是以湍流形式出现, 具有强烈的速度脉动. 瞬时风速峰值足以引起沙粒跃移, 因此强调湍流特性非常必要^[1]. 作为瞬态过

程, 沙粒起动与瞬时风速的联系更为紧密, 而并非平均风速^[2]. Leenders 等人的风洞实验表明, 与雷诺应力相比, 水平风速脉动与跃移相关性更好^[3]. 该结

果与 Sterk 等人^[4]和 Schönfeldt 与 von Löwis^[5]进行的野外实测结论相吻合. 因此, 风沙动力学研究已逐渐从稳态近似法转向瞬态湍流场内输沙过程的测量建模. 新的研究方向使得对风速和输沙进行高频同步测量成为亟待解决的问题. 为了确定高频测量频率的要求, 需要了解气固两相脉动规律并分析湍流对沙粒运动的有效影响频率, 即输沙过程对湍流脉动的响应频率.

截止目前, 输沙过程的采样频率并未引起足够关注, 而该参数对于测量风沙运动至关重要. 尽管 Leenders 等人在野外实测中分析了不同采样频率下输沙量和风速脉动的对应关系, 但未指出沙粒运动的能量分布及影响输沙的湍流频率^[3]. 实际上, 沙粒运动对应风速脉动响应频率的结论目前均来自 Butterfield^[6]和 Spie 等人^[7]早期的研究结果. 已发论文均采用时域分析来评估输沙对湍流的响应, 但未给出时域参数判定阈值, 使得时域分析过于主观. 此外, 跃移存在着间歇性, 且风速脉动与输沙响应存在不确定的滞后问题, 这又是时域分析不能准确判定输沙对湍流响应的理由. 近年来, 傅里叶变换和小波变换等频域分析方法已广泛用于时序分析, 针对风沙测量, Bass^[8]采用小波变换分析了输沙强度和风速的变化, 是风沙动力学领域分析方法的重要革新. 与此类似, 本文从频域视角出发, 借助傅里叶变换和小波包变换工具, 分析了输沙过程与湍流阵风能谱分布, 并确定了粒子浓度对湍流脉动的响应.

1 实验方法和实验方案

1.1 风洞内边界层模拟

图 1 为实验装置示意图. 风洞实验段为 $7.4^L \text{ m} \times 0.7^W \text{ m} \times 0.6^H \text{ m}$, 入口放置尖劈和粗糙元形成所需边界层. 限制 $Fr \leq 20$ 以满足边界层和跃移层充分发展的风洞高度 H 的要求^[9], 实验段长度 L 满足最小发展段要求^[10]. 采用 Dantec 热线风速仪配合 55P11 探针测量风速廓线. 满足边界层对数律的方程为

$$U(z)/u_* = 1/\kappa(\ln(z/z_0)) \quad (1)$$

式中: $U(z)$ 为平均流向风速; u_* 为摩阻风速; κ 为卡曼常数; z_0 为有效粗糙度. 实验的主流风速 U_0 廓线及主流湍流强度见图 2、图 3. 风洞内沙床为 $6.4^L \text{ m} \times 0.5^W \text{ m} \times 0.04^H \text{ m}$, 距实验段入口 1 m 处铺设的沙粒分别由粒径 r 为 $100 \sim 125 \mu\text{m}$ 和 $300 \sim 500 \mu\text{m}$ 的天然沙样组成. 小粒径沙样的实验参考风速为 6.8、7.2、7.5 m/s, 大粒径沙样的来流风速为 9.2、

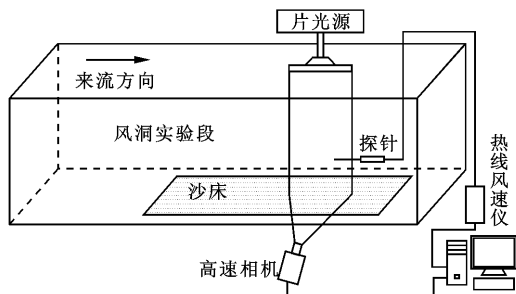


图 1 风沙实验平台示意图

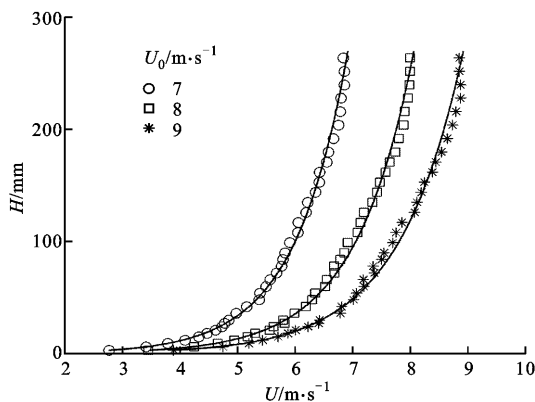


图 2 实验主流风速廓线

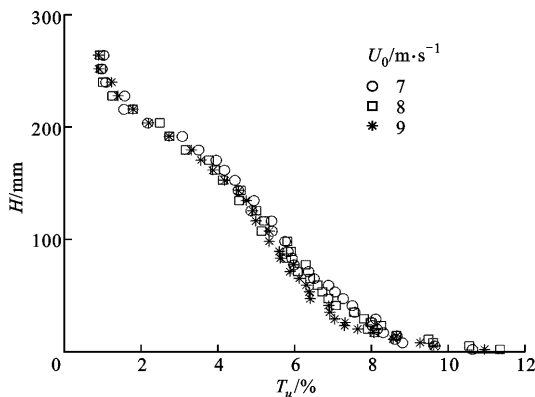


图 3 实验主流湍流强度

9.5、9.8 m/s.

1.2 风沙两相同步测量系统

采用高速数字相机 (FASTCAM-APX, $1\,024 \times 512$ 像素) 拍摄跃移粒子连续图像. 冷光源发出片光 (厚 5 mm) 照亮测点处垂直中心面, 并设定镜头景深略大于片光厚度以保证获取被照亮的所有沙粒. 相机拍摄帧率为 2 000 帧/s, 曝光时间为 $1/3\,000 \text{ s}$, 每次拍摄记录 4 096 帧图像. 为获得与沙粒同步的风速, 由相机外触发热线风速仪来测量流向湍流速度. 配合高速相机, 热线的采样频率设为 2 kHz. 为

为了避免探针影响拍摄,将探针位置与风洞中心面错开 20 mm,探针高于沙床面约 30 mm,探头投影位置为相机观测域的中心点.在每一种沙床和来流条件下,重复测量 30 次,测量过程在充分发展的风沙流环境中进行.

2 数据处理方法

2.1 跃移沙粒的瞬时浓度计算

通过粒子图像可计算瞬时输沙浓度.首先引入背景减法去除图像噪声和沙床面图像,其次进行图像粒子识别,该难点在于颗粒重叠黏连现象的处理.典型的单阈值二值化算法受制于大量粒子重叠的情况.本文采用动态阈值二值化算法^[11],其针对单颗粒子图像计算阈值,能够将每个粒子图像区别于背景.该算法在分离临近或重叠粒子方面明显优于传统单阈值算法.最后,由四连通域标记算法求得粒子计数.由于本文计算了整场粒子浓度,所以在不考虑第 3 维方向的前提下,求得的粒子计数实际等同于视场平面内的粒子浓度.

2.2 基于小波包变换的频域分析方法

随机信号可从时域变换到频域,标准方法为傅里叶变换法.小波变换是一种更高级的时-频域分析方法.普通小波分析是将信号分解成低频近似部分与高频细节部分,然后只对低频部分做第 2 层分解,从中产生新的低频与高频部分,依次类推.小波重构是小波分解的逆运算,是指通过全部或部分频段的小波系数重新生成原始信号或原始信号特定频段的信号.借助小波重构,可对信号进行分频段特征提取,这有助于分析信号在不同频段的能量分布.相对应的小波包分析,能够为信号提供一种更精细的分析方法,它将频带进行多层次划分,可对高频部分进行分解,并能够根据信号特征自适应选择相应频段,使之与信号频谱相匹配(见图 4).

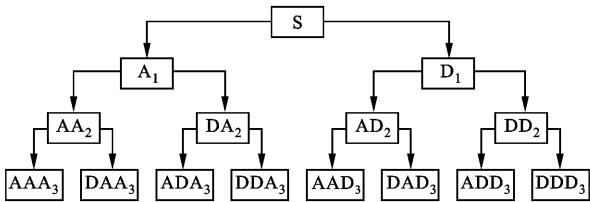


图 4 小波包分解示意图

2.3 不确定度分析

热线测量速度的不确定度主要源于标定仪器、流场温度变化和标定曲线.若包含标定仪器自身的不确定度,在 95%置信区间内速度样本的总不确定

度为 3%.沙粒浓度不确定度源于图像采集和图像处理,其中图像采集不确定度主要来自背景噪声和沙床反射光,但用图像背景减法可有效去除噪声和沙床面的影响,这样只需考虑粒子识别的不确定度.人工生成 512×512 像素的灰度图像,向其中随机撒布粒子,生成 I 和 II 两种类型各 1 000 帧图像来模拟主流风速 U_0 .分别为 9.5、7.2 m/s 且沙样粒径 r 分别为 300~500 μm 、100~125 μm 的实验工况.采用动态阈值二值化算法进行粒子识别,并将结果与单阈值二值化算法进行对比,结果见表 1.

表 1 两种类型的粒子识别算法效率比较

算法	测试图像	模拟粒径图像/像素	真实粒子数	可识别粒子数	识别率/%
单阈值	I	5~10	500	397~439	79.4~87.8
二值化	II	2~6	1 000	867~904	86.7~90.4
动态阈值	I	5~10	500	474~481	94.8~96.2
二值化	II	2~6	1 000	965~984	96.5~98.4

3 结果分析和讨论

3.1 两相流场的时域和频域特征

图 5 为典型跃移图像.基于动态阈值二值化方法进行粒子识别,使用标记算法求得瞬态沙粒数.图 6 为一组风沙两相数据,风速脉动表现出随机序列特征,符合近地面湍流的普遍事实,同时输沙浓度(沙粒数 N)也呈现非平稳随机序列形状.跃移云是由大量沙粒个体随机运动组成的复杂群体运动,因此输沙浓度必然表现出高度的变化性.1987 年 Anderson 提出将风沙输移作为随机过程的处理思路^[12],随后的实验和数值研究均延续了这一思路.为了从能量分布角度分析随机过程,对两相时序信号进行了频谱分析,得到输沙浓度和风速脉动的功率谱(见图 7).为了便于将计算所得风谱同常用风谱进行比较,本文引入 Karman 谱标于图 7 中.图中结果表明,跃移层内脉动风谱符合 Karman 风谱,且观察到惯性子区-5/3 定律,而输沙浓度谱与风速谱并非完全一致.在较低频段(约小于 30 Hz),即湍流较大含能区,输沙浓度谱与风速谱的趋势基本一致,这是跃移层内大尺度湍流结构作用于输沙运动低频变化的直接反映;在较高频段(约大于 30 Hz),输沙浓度谱的能量分布明显有别于风速谱,并在 30 Hz 处出现拐点,其后的高频段特征与低频段明显不同.

图 7 分析结果表明,并非所有尺度的湍流脉动

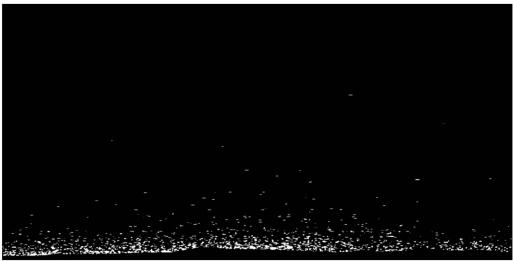


图5 典型跃移粒子图像

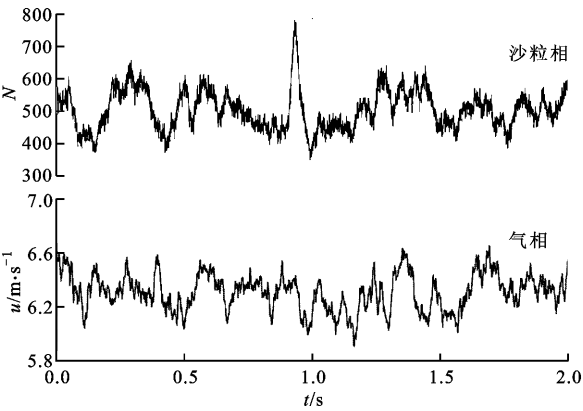


图6 输沙浓度和湍流脉动的同步时间序列

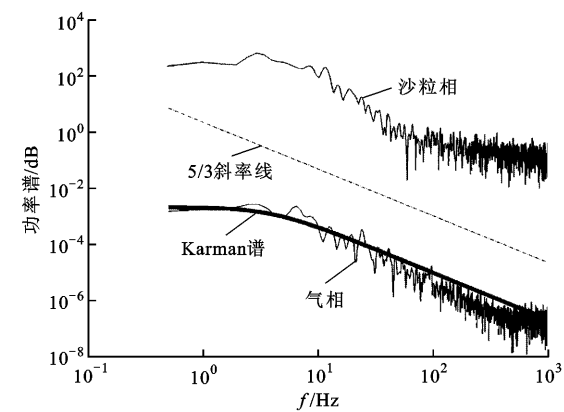


图7 输沙浓度和湍流脉动的功率谱(粒径为100~125 μm,来流风速为7.2 m/s)

都会影响沙粒运动. 正如我们所知,输沙运动是一种需要能量支持的物理过程,因此跃移过程只能响应含能较大的低频湍流脉动.

3.2 小波包分析输沙浓度对湍流的响应

频谱计算表明,不同频率的湍流结构对输沙过程的影响有所不同. 为了定量分析输沙能量分布及不同粒径下湍流对沙粒输移的作用,本文选择了Meyer小波作为基函数,并引入小波包来分析处理两相数据. 根据信号频谱特征定义频域分解结构(见表2). 小波包分析包括分解和重构,即在各子频段

将信号按分解结构分解为不同的近似系数和细节系数,再基于子频段小波包系数分别在各单频段独立重构信号,即生成一组新的单频段时序信号. 经过小波包分解重构,原始数据将转化为一组单支重构信号.

分析跃移对湍流脉动的频率响应,必须准确获得不同子频段内的两相信号能量,为此定义有限能量时序信号 $x(k)$ 的能量为

$$E(f_i) = \sum_k |x(k)|^2 \Delta t$$

(2)

式中: k 为时间离散点计数; $x(k)$ 为子频段 f_i 上单支重构产生的时序信号; Δt 为数字信号时间步长. 基于时频域能量守恒的帕塞瓦尔定理,时间序列 $x(k)$ 的总能量等于相应子频段 f_i 上的频域信号能量 $E(f_i)$. 由于风速和输沙浓度具有不同的单位和量级,因此需要将式(2)所得数值按频段求其百分比组分,以便于能谱对比. 实验计算表明,频段 f_4 上风速和输沙浓度的能量最大. 因此,两相数据各自以频段 f_4 能量为标准值1进行标准化,结果见表3. 对小粒径沙样,在6.2、6.8、7.5 m/s来流风速下,输沙浓度在0.5~500 Hz($f_1 \sim f_{12}$)低频段上的含能百分比分别为89.45%、89.58%和90.13%;对大粒径沙样,在9.2、9.5、9.8 m/s来流风速下,输沙浓度在0.5~500 Hz低频段上的含能百分比为87.52%、87.96%、88.31%. 尽管输沙浓度时序结构表现出杂乱的随机波动特征(见图6),然而频域结构分析表明浓度变化主要集中在较低频率范围(<500 Hz). 总的来说,输沙浓度的低频结构决定了其整体变化趋势.

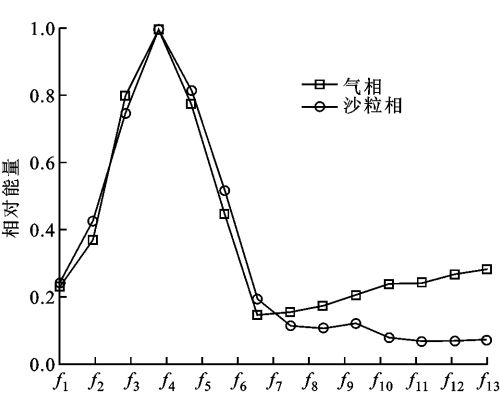
表2 小波包分解结构表

频段	频率范围/Hz	频段	频率范围/Hz
f_1	0.500 0~0.976 6	f_8	39.062 5~46.875 0
f_2	0.976 6~1.953 1	f_9	46.875 0~62.500 0
f_3	1.953 1~3.906 3	f_{10}	62.500 0~125.000 0
f_4	3.906 3~7.812 5	f_{11}	125.000 0~250.000 0
f_5	7.812 5~15.625 0	f_{12}	250.000 0~500.000 0
f_6	15.625 0~31.250 0	f_{13}	500.000 0~1 000.000 0
f_7	31.250 0~39.062 5	f_{14}	1 000.000 0~2 000.000 0

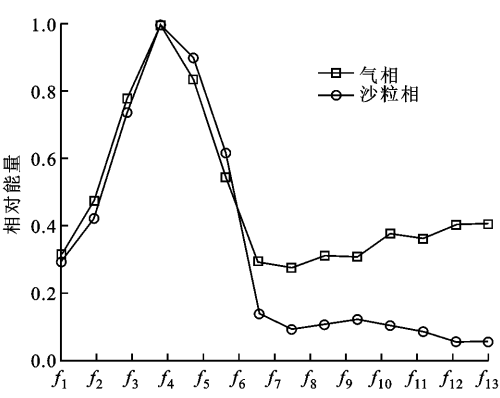
表3表明,来流风速对输沙浓度能量结构无显著影响. 为直观对比两相组分间的不同能量结构,将3种风速条件的数据进行平均,从中获得两种粒径的能量结构平均值(见图8). 由图8可知,不同粒径

表 3 不同粒径沙样下输沙浓度的频域能量结构表

频段	相对能量											
	$r=100\sim125\ \mu\text{m}$						$r=300\sim500\ \mu\text{m}$					
	$U_0=6.8\ \text{m/s}$		$U_0=7.2\ \text{m/s}$		$U_0=7.8\ \text{m/s}$		$U_0=0.2\ \text{m/s}$		$U_0=9.5\ \text{m/s}$		$U_0=9.8\ \text{m/s}$	
	风	沙	风	沙	风	沙	风	沙	风	沙	风	沙
f_1	0.22	0.21	0.25	0.24	0.25	0.24	0.31	0.31	0.29	0.32	0.27	0.33
f_2	0.41	0.35	0.41	0.36	0.47	0.40	0.44	0.47	0.40	0.51	0.42	0.46
f_3	0.78	0.78	0.77	0.82	0.70	0.80	0.78	0.77	0.73	0.81	0.71	0.76
f_4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
f_5	0.84	0.79	0.79	0.79	0.83	0.76	0.91	0.81	0.91	0.85	0.88	0.86
f_6	0.50	0.46	0.51	0.42	0.55	0.47	0.64	0.52	0.60	0.56	0.62	0.54
f_7	0.21	0.14	0.18	0.17	0.18	0.14	0.15	0.29	0.13	0.28	0.14	0.33
f_8	0.13	0.15	0.10	0.18	0.10	0.15	0.08	0.27	0.11	0.29	0.08	0.28
f_9	0.12	0.16	0.09	0.20	0.12	0.15	0.10	0.32	0.12	0.31	0.11	0.30
f_{10}	0.12	0.23	0.11	0.22	0.13	0.18	0.11	0.33	0.13	0.30	0.12	0.30
f_{11}	0.09	0.24	0.08	0.24	0.07	0.24	0.10	0.37	0.12	0.39	0.11	0.38
f_{12}	0.08	0.24	0.07	0.26	0.06	0.22	0.08	0.36	0.10	0.37	0.09	0.35
f_{13}	0.07	0.26	0.06	0.28	0.08	0.27	0.06	0.41	0.07	0.41	0.05	0.38
f_{14}	0.07	0.30	0.06	0.29	0.08	0.25	0.06	0.42	0.07	0.41	0.05	0.40



(a) $r=100\sim125\ \mu\text{m}$



(b) $r=300\sim500\ \mu\text{m}$

图 8 频域能量结构平均值

条件下的输沙浓度对湍流脉动的频率响应有所不同. 小粒径条件下, $f_1\sim f_7$ 低频段内(约为 0.5~40 Hz), 输沙浓度的脉动规律受湍流变化的控制; 对大粒径沙样, 影响频段为 $f_1\sim f_6$, 阈值频率约为 30 Hz. Anderson 指出, 沙粒对湍流响应依赖于粒径, 较小粒子能够迅速响应高频湍流脉动, 而较大粒子只能随低频速度变化^[12]. 事实上, 湍流低频结构是由含能较大的大涡运动造成, 小涡表现为含能较小的高频脉动. 相对于小粒径粒子, 较大粒子必然需要更多的能量来克服各种阻力而产生运动. 因此, 湍流作为驱动沙粒运动的动力, 大小沙粒受到湍流影响的频率范围必然不同.

4 结 论

输沙浓度变化仅与湍流脉动低频结构相关, 表明不同频率湍流结构对沙粒运动的影响有所不同. 尽管沙粒瞬时浓度呈现随机变化, 但其能量分布约有 90% 集中在低于 500 Hz 的低频波段上. 在不同的粒径条件下, 输沙浓度对湍流结构的响应并非一致. 沙样粒径为 100~125 μm 时, 输沙浓度可以响应低于 40 Hz 的湍流脉动; 沙样粒径为 300~500 μm 时, 阈值响应频率为 30 Hz. 根据粒径的不同, 不同频段内的湍流脉动控制着输沙过程的能量分布

结构.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] XUAN J. Turbulence factors for threshold velocity and emission rate of atmospheric mineral dust [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(12):1777-1783.
- [3] LEENDERS J K, VAN BOXEL J H, STERK G. Wind forces and related saltation transport [J]. *Geomorphology*, 2005, 71(3/4):357-372.
- [4] STERK G, JACOBS A F G, VAN BOXEL J H. Effect of turbulent flow structures on saltation sand transport in the atmospheric boundary layer [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23(10):877-887.
- [5] SCHONFELDT H J, VON LOWIS S. Turbulence-driven saltation in the atmospheric surface layer [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2003, 12(5):257-268.
- [6] BUTTERFIELD G R. Transitional behaviour of saltation: wind tunnel observations of unsteady winds [J]. *Journal of Arid Environments*, 1998, 39(3):377-394.
- [7] SPIES P J, MCEWAN I K, BUTTERFIELD G R. One-dimensional transitional behaviour in saltation [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(5):505-518.
- [8] BAAS A C W. Wavelet power spectra of aeolian sand transport by boundary layer turbulence [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(5):4.
- [9] 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.
- [10] WHITE B R, MOUNLA H. An experimental study of Froude number effect on wind-tunnel saltation [J]. *Acta Mechanica*, 1991, 1(S1):145-157.
- [11] OHMI K, LI H Y. Particle-tracking velocimetry with new algorithm [J]. *Measurement Science & Technology*, 2000, 11(6):603-616.
- [12] ANDERSON R S. Eolian sediment transport as a stochastic process: the effects of a fluctuating wind on particle trajectories [J]. *The Journal of Geology*, 1987, 94(4):497-512.

(编辑 苗凌)