

常菊,肖锋军,董治宝,等.基于激光垂直照射沙床面的风成沙波纹二维形态特征分析[J].中国沙漠,2021,41(5):33-42.

基于激光垂直照射沙床面的风成沙波纹 二维形态特征分析

常菊,肖锋军,董治宝,陈颢,马慧榕

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院,陕西 西安 710119)

摘要: 风成沙波纹因其规则的波浪形几何图案吸引着研究者的兴趣,但是对其发育过程的认识还比较薄弱。原因之一就是缺少高精度和高分辨率的沙波纹形态动态测量方法。传统的风成沙波纹形态动态测量方法采用的倾斜光源照射方式忽略了沙波纹脊线高度和走向的变化,会导致沙波纹高度测量错误和形态变形。本研究建立的激光片光源垂直照射沙波纹表面的方式纠正了这一问题,并分析了沙波纹形态及其参数随时间的变化规律。结果表明:(1)沙波纹发育形成过程的初始形成阶段、增长阶段和稳定阶段的时长都随风程长度的增加呈减小趋势,且风程长度越短沙波纹的发育进程越滞后,形成“倒游现象”。(2)沙波纹的波高和波长都随时间先快速增大然后趋于稳定,而且波高增长速度随风程长度增加而增大。稳定阶段沙波纹平均高度和波长呈现随风程长度的增加而增大的趋势。(3)沙波纹指数、迎风坡指数和背风坡指数都随时间先快速减小然后基本保持不变,服从指数函数分布。稳定阶段平均沙波纹指数随风程长度增加而减小。(4)沙波纹移动速度总体上随高度增大而减小,平均移动速度随时间按幂函数减小,而且在风沙流未饱和时平均移动速度总体上呈随风程长度增加而减小的趋势。可见,风程长度是沙波纹定量中不可忽略的一个因素。

关键词: 沙波纹形态;波长;风程效应;风洞

文章编号: 1000-694X(2021)05-033-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00040

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

风成沙波纹是松散沙质地表在风力作用下形成的一种呈波浪状起伏的风沙地貌类型,广泛分布在地球、火星、金星等天体的松散地表上。沙波纹形成的时间一般为数分钟或数十分钟,通常对应于一次风沙活动事件,而且沙波纹走向和风向垂直,对风向有很好的指示作用,其沉积结构对研究古气候变化也有重要意义^[1-4]。虽然已经开展了一百多年的研究,但是对沙波纹发育过程的认识还比较薄弱。由于沙粒粒径和实验条件的不同,不同实验研究的沙波纹波长、波高、沙波纹指数等形态参数结果在定量上存在较大差异^[5-6]。数值模型方法如元胞自动机方法^[7-8]、耦合映射格子法^[9-10]和离散元法^[11-12]可以在不同程度上重现沙波纹从平沙面到沙

波纹的形成过程,但是由于模型中的各种假设和简化使得模拟结果与实际沙波纹还有一些差距。因此,还需要更准确且详细的沙波纹整个发育过程中形态变化和参数数据来验证和改进沙波纹模型。但是,现有的沙波纹形态测量方法还难以满足要求。

风成沙波纹的波长一般在几厘米到数十厘米,高度通常只有几毫米,形成较快,导致对其形态的观测比较困难。传统的插钎法和相纸法需要直接接触沙波纹表面,因此只能在风沙运动停止时即对静态沙波纹进行测量,风洞实验时还需要多次停机才能测量^[6,13]。摄像法则由于不直接接触沙波纹表面可以满足动态测量和批量图像处理的需求^[14-20]。在摄像法中,沙波纹的波长借助图像中明暗变化与沙波纹脊线或波谷的对应关系可以较容易测量。

收稿日期:2021-01-26; 改回日期:2021-04-13

资助项目:国家自然科学基金项目(42071009,41601002);中国博士后科学基金项目(2017M623115);中央高校基本科研业务费专项资金项目(GK202103141);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JQ4028)

作者简介:常菊(1997—),女,山西晋城人,硕士研究生,主要从事风沙地貌研究。E-mail: changjv121@163.com

通信作者:肖锋军(E-mail: xiaofengjun@snnu.edu.cn)

但是,沙波纹的高度很难获得。Werner等^[16]建立了一种可以测量沙波纹高度的摄像测量法,该方法在沙波纹表面上方一定高度处放置一个挡板,通过分析倾斜光源照射条件下挡板在沙波纹上的影子长度和沙波纹高度的三角函数关系计算波高,但是该方法只适用于静态沙波纹的测量。Andreotti等^[20]使用激光片光源倾斜照射沙波纹表面,借助沙波纹的起伏和激光在沙波纹表面的形态对应关系计算波高,而且因为激光器的布置位置可以远离沙波纹表面,所以可用于沙波纹形态动态测量。上述两种方法的原理都是用沙波纹表面影子位置或激光照射位置的形态代替真实测量位置的形态,因此需要假设沙波纹在脊线方向上形态不变。但是,这和Cheng等^[6]、Andreotti等^[20]和本研究发现的沙波纹脊线的高度和走向存在剧烈变化的事实不符。倾斜照射方式会错误计算沙波纹高度和形态对称性进而导致沙波纹形态变形。因此,还需要开发新的沙波纹形态动态测量方法或改进方法。

本研究建立了激光片光源垂直照射沙波纹表面和侧向拍照的沙波纹形态动态测量方法,克服了倾斜照射方式中沙波纹脊线变化的影响。在风洞中拍摄记录了4个风程长度位置的沙波纹图像,使用Matlab软件对沙波纹图像进行批量处理^[18-19],提取了沙波纹二维截面形态,分析了沙波纹波长、波高等参数并探究了风程长度对沙波纹形态演化的影响。

1 实验方法

1.1 实验设置

实验在陕西师范大学风沙环境直流吹气式低速风洞内完成(图1)。风洞全长20 m,实验段长度为6.0 m,宽0.5 m,高0.6 m,实验段上风向设置粗糙

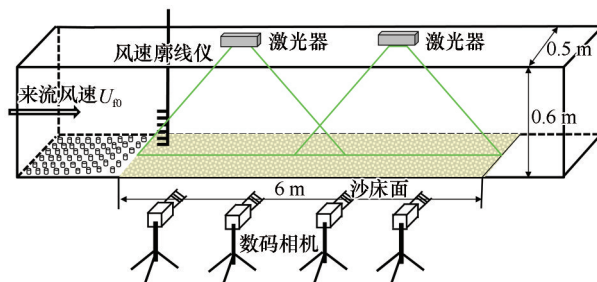


图1 沙波纹形态动态测量风洞实验示意图

Fig.1 Dynamic measurement of the cross-sectional profile of sand ripple in wind tunnel

元段用于快速形成具有一定厚度的边界层,风洞实验段设计风速在 $3\text{--}35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 连续调整,本实验选用 $11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速。风洞实验段顶部和两个侧边都由透明玻璃组成便于实验时激光照射和相机摄像。实验用沙取自于中国腾格里沙漠,平均粒径为 0.19 mm ,标准偏差为 0.41 。实验时实验用沙均匀平铺在长 6.0 m 和深 0.029 m 的沙槽中。

激光器为用于工业剪裁的两组一字型绿色激光器,功率为 80 mW 。激光器布置在风洞顶部,垂直照射在实验段的中轴线上。在风洞实验段侧面设置4个相机同步摄像,距离沙床上边缘分别为 2.0 、 3.0 、 3.7 、 4.7 m ,后续文中称为位置一、位置二、位置三和位置四。整个实验时间为 10 min ,前 5 min 和后 5 min 拍摄时的时间间隔分别为 5 s 和 10 s 。

1.2 沙波纹形态动态测量方法

图2A是沙波纹原始图像,从图中激光形态的起伏可以非常容易地识别出沙波纹的波峰、波谷的位置,还可以发现图像存在明显近大远小问题。借助增加的垂直来流风向的辅助线可以准确计算沙波纹的长度、迎风坡、背风坡的尺寸参数,但是沙波纹的高度计算比波长计算困难很多。

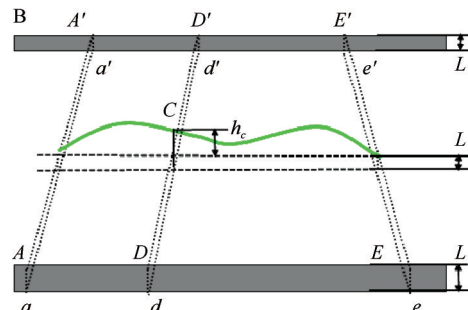
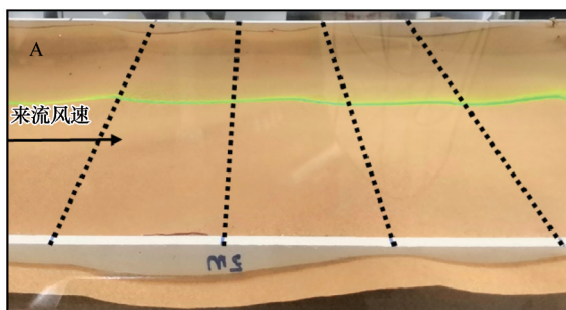


图2 沙波纹原始图像(A)和沙波纹高度计算方法(B)

Fig.2 Raw image of sand ripples(A) and schematic diagram of sand ripple height calculation method (B)

沙波纹高度计算主要以风洞实验段沙槽的两个边框为比例尺,计算方法如图2B所示。图中 AA' 、 EE' 和 DD' 是紧贴沙槽边框上边缘且和风洞来流方向垂直的辅助线, aa' 、 ee' 和 dd' 是相应的沙槽边框下边缘位置的辅助线,上边缘和下边缘距离就是沙槽深度 L ,等于0.029 m。这里定义沙波纹的高度为沙波纹表面到初始沙床面的距离。 DD' 断面上沙波纹点 C 位置的图像缩放系数为该位置初始沙床面深度 L 和图像中深度 L' 的比值,从而点 C 的实际高度 h_c 可表示为

$$h_c = \frac{L}{L'} h'_c \quad (1)$$

式中: L 为沙槽深度, L' 和 h'_c 为拍摄图像中的深度和高度。按照公式(1),依次计算图像中沙波纹上各位置的高度即可获得沙波纹二维形态。图像处理都使用Matlab软件进行,并提取图像中沙波纹二维

形体以及波长、波高、迎风坡长度、背风坡长度和移动速度等参数。

1.3 测量方法验证

对三维形态已知的沙丘模型^[21]采用倾斜和垂直两种激光照射方式测量其中轴截面的二维形态(图3)。同时从顶部垂直和侧向拍摄图像。激光倾斜照射时,测量截面上点 C 的实际高度将被倾斜激光与模型的交点 C' 的高度代替,高度计算公式为

$$h = H \tan \theta \quad (2)$$

式中: θ 是激光片光的照射角度,这里为 32° ; H 为点 C' 到被测截面的距离,可以从底板上铺设的坐标纸直接测量获得(图3B)。激光垂直照射时点 C 高度按照公式(1)计算,图中竖直放置的钢尺作为比例尺(图3A)。

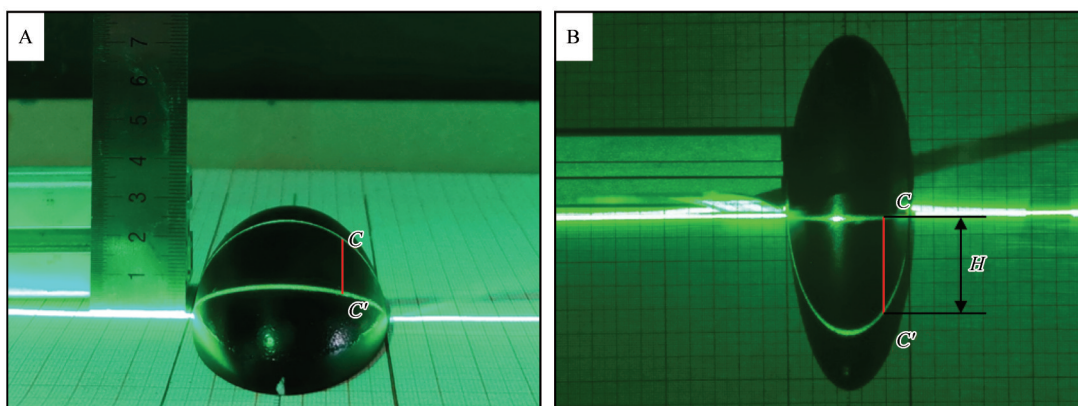


图3 激光垂直(A)和倾斜(B)照射方式下模型图像

Fig.3 Model images under vertical and inclined laser sheets

两种激光照射方式下沙丘模型截面形态的计算结果和相对误差如图4所示。倾斜照射的结果和模型实际尺寸有较大偏差,相对误差0.13—0.26。倾斜照射方式的误差主要受模型脊线高度和走向变化的影响,激光照射角度随之产生影响。脊线高度变化越大,测量高度的误差越大,脊线走向越弯曲,测量截面的对称性误差越大。垂直照射的结果与模型实际尺寸非常吻合,相对误差集中在 ± 0.02 ,只在模型边缘为0.09,但都显著小于倾斜照射时的误差。模型边缘相对误差较大主要是因为边缘位置形态变化剧烈且实际尺寸较小,而沙波纹形态相对变化很小,因此不会出现这种误差较大的情况。

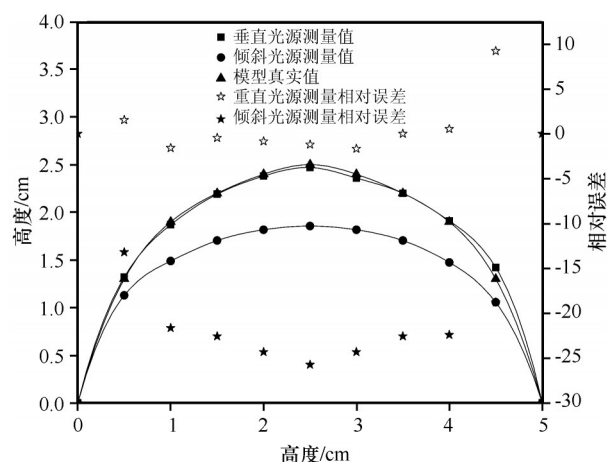


图4 倾斜和垂直光源下剖面形态和相对误差

Fig.4 Model profiles and relative differences under vertical and inclined laser sheets

2 结果与分析

2.1 沙波纹发育过程和形态参数

2.1.1 沙波纹发育过程

从图5可以发现,实验开始时沙床面都是平坦

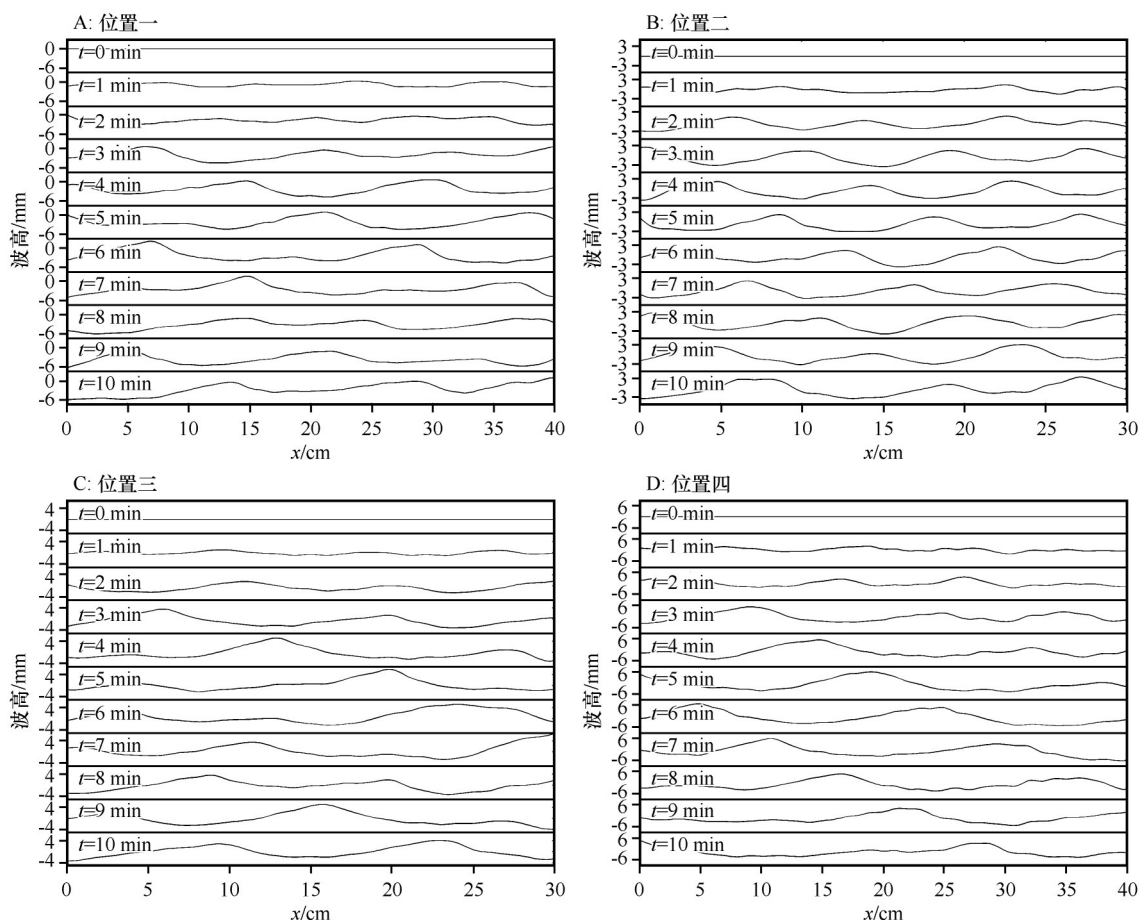


图5 4个风程长度位置沙波纹发育形成过程

Fig.5 Formation processes of sand ripples at four fetch length points

沙波纹的发育形成过程通常分为沙波纹初始形成阶段、增长阶段和稳定阶段^[6,22],并定义从实验开始到刚形成可辨识的沙波纹时为初始形成阶段,沙波纹波长、波高和形态等参数都达到稳定后为稳定阶段,两者之间是沙波纹尺寸增大的增长阶段。依据该方法,从位置一到位置四初始形成阶段的时间长度(t_0)依次为2.5、2.0、1.7、1.5 min,达到稳定的时间长度(t_{sat})依次为8.5、8.4、6.6、4.9 min,增长阶段的时间长度为6.0、6.4、4.9、3.4 min,都随风程长度的增加而减小。4个位置的 t_0 和 t_{sat} 也和其他风洞实验结果相近并且和实验风速的影响效果相似,风速越大沙波纹发育所需 t_0 和 t_{sat} 越短^[9,13,18-19,23-24]。例如,

随着实验时间增长,位置一到位置四的沙床面上都逐渐出现凹坑和凸起变得不规则,之后沙床面起伏越来越剧烈,沙波纹波长和波高快速增大并形成较规则的沙波纹,最后形成稳定的沙波纹。但是4个位置出现沙波纹的时间以及沙波纹尺寸参数并不同步,这可能和风沙运动的风程效应有关。

Cheng等^[6]发现在 $0.23\text{--}0.47\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 摩擦风速下 t_0 和 t_{sat} 的范围分别为3.0—1.5 min和19.0—4.5 min;朱伟^[13]发现在 $0.28\text{--}1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 摩擦风速下 t_0 和 t_{sat} 的范围分别为1.5—0.2 min和16—2 min;Andreotti等^[20]发现在 $0.29\text{--}0.51\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 摩擦风速下 t_0 和 t_{sat} 的范围分别为4.3—1.3 min和10 min。但朱伟^[13]的野外实验中 t_{sat} 更长(3—21 min),这是由于野外风场的不连续性使得在沙波纹发育过程中沙源不饱和。

4个风程长度位置沙波纹截面形态放大图如图6所示。位置一在1.5 min时截面形态尺寸较小且起伏不规则,还无法观测到可辨识的沙波纹;在2.0 min时可以观测到沙波纹但伴随小的起伏。位置二和位

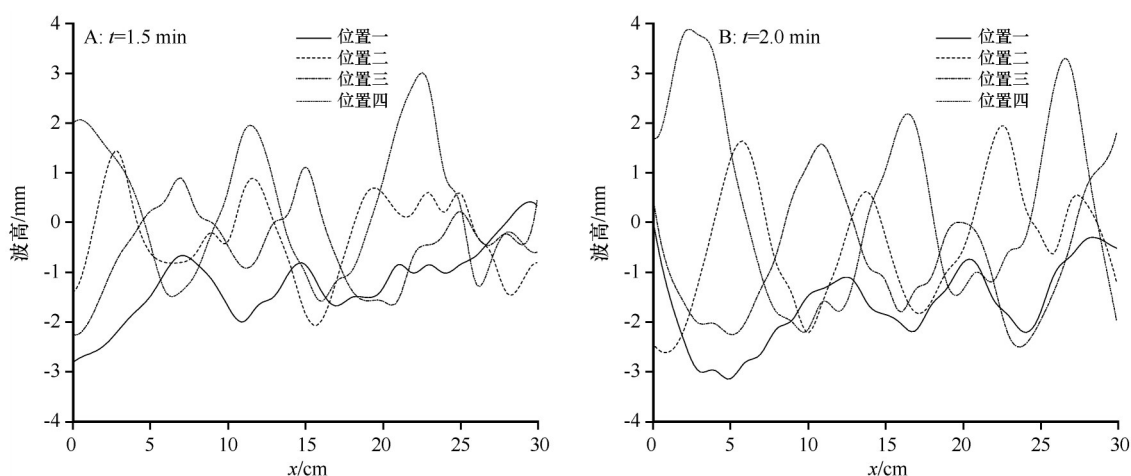


图6 1.5 min和2.0 min时4个风程长度位置沙波纹截面形态

Fig.6 Sand ripple profiles at four fetch length points at 1.5 min and 2.0 min

置三可以观测到比较规则的沙波纹,但是大沙波纹上叠置了大量小沙波纹。位置四已经形成非常规则的沙波纹,但仍叠置少量小沙波纹,沙波纹形态基本趋于稳定。沙波纹的形态不仅随实验时间变化而且还随风程长度变化。风程长度较大位置处先形成可辨识的规则沙波纹,随后沿沙床面向上风向逐步延伸形成规则沙波纹,呈现“倒游现象”。实验过程中还发现在沙床面上边缘约1.0 m范围始终不能观测到沙波纹,这和Cheng等^[6]和凌裕泉等^[15]的风洞实验一致。

2.1.2 不同阶段沙波纹形态参数变化

沙波纹波长5—23 cm(图7),这与Cheng等^[6]的(3—22 cm)以及朱伟^[13]的(5—30 cm,大部分为5—25 cm)实验结果非常吻合。4个位置的沙波纹波高和波长在初始阶段和增长阶段都随时间线性增大,

发育至稳定阶段后基本保持稳定,变化趋势与先前的研究结果一致^[6,13,20,22]。但在增长阶段波高和波长的线性增长速率存在差异,这可能是由不同实验风洞尺寸以及风速和粒径差异引起的。

风程长度对沙波纹波高和波长也有很大影响。线性增大段的沙波纹波高的增加速率随风程长度的增加而增大,稳定时沙波纹平均高度也相应逐渐增大,从位置一到位置四依次为4.1、4.5、5.1、8.3 mm。沙波纹波长的增加速率随风程长度的变化并不显著,稳定时平均波长依次为13.5、9.4、11.7、18.0 cm,基本上随风程长度增加而增大。位置一平均波长较大是因为大量小尺度沙波纹和大尺度沙波纹的共存且尺度都较小,导致一些小尺度沙波纹可能被统计到大尺度沙波纹波长中。但是,沙波纹波高和波长的量级与其他研究结果一致^[5-6]。

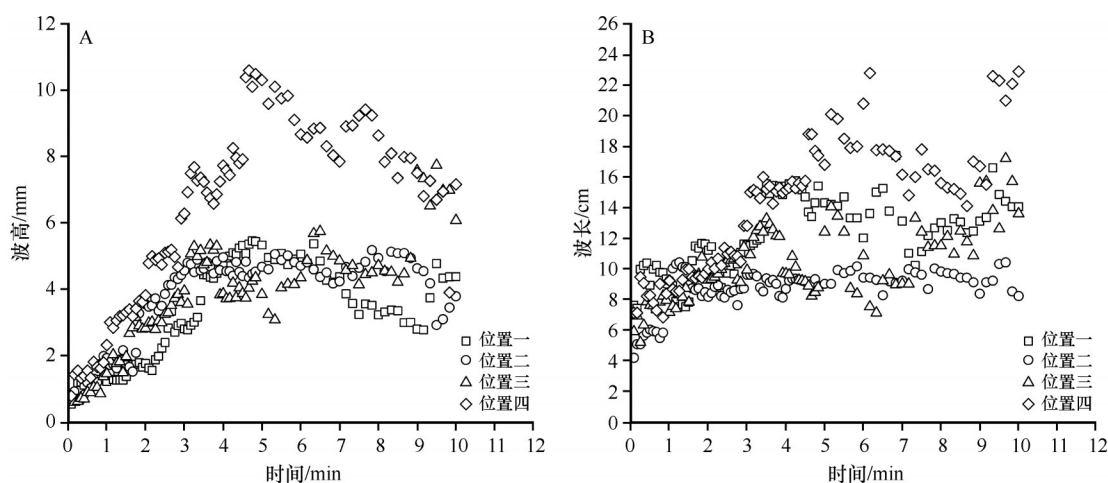


图7 沙波纹波高和波长随时间变化

Fig.7 Evolution of ripple height and wavelength with time

图7中沙波纹波高和波长随时间变化波动幅度较大而且有跳跃间断,这主要由3个原因导致:第一,实验观测区长度太短,当跟踪的沙波纹移动出且上风向新沙波纹进入观测区时,前后两个沙波纹的尺寸不一致导致波高和波长快速变化。第二,小沙波纹和大沙波纹并存以及沙波纹的合并,图7B中位置二在1 min时出现波长跳跃增长就是由于沙波纹合并使得波长增长约1.5倍。第三,风沙运动中跃移沙粒和蠕移沙粒的横向不均匀运动造成,三维

结构的沙床面和流场的相互作用必然导致沙粒横向运动不均匀。

沙波纹指数 RI 即波长和波高的比值,是描述沙波纹形态的一个重要指标,本文借鉴沙波纹指数定义将沙波纹迎/背风坡指数 (windward/leeward index) 定义为迎/背风坡波长和波高的比值,分别用 WI 和 LI 表示。3种指数都随时间先快速减小,然后减速变缓最后基本保持稳定,并且都可以用指数函数描述(图8)。

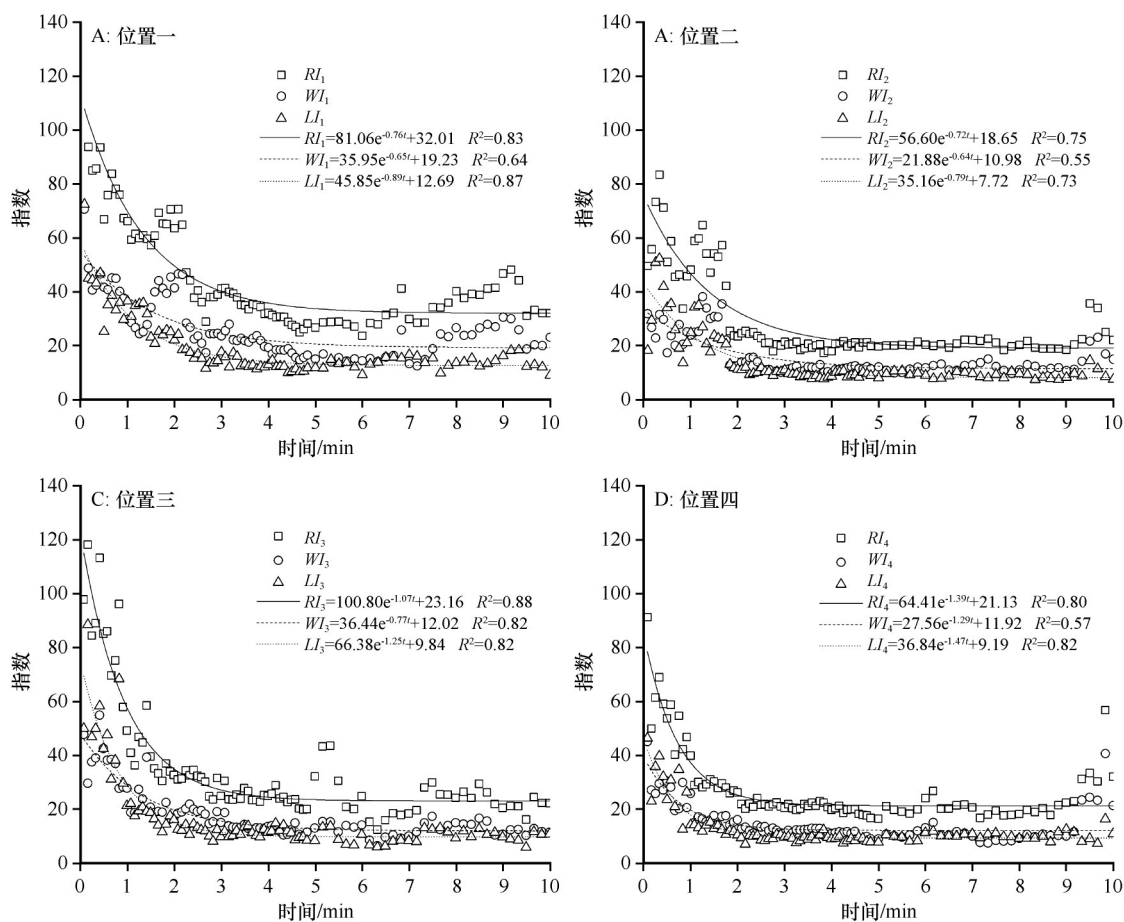


图8 沙波纹指数、沙波纹迎风坡指数和沙波纹背风坡指数随时间变化

Fig.8 Evolution of sand ripple index, windward index and leeward index with time

沙波纹指数的减小反映了波长和波高随时间的相对变化,从图7也可以发现沙波纹发育形成过程中波高的增加比波长更显著。但是波高和波长随着时间的增加都逐渐趋于稳定,也使沙波纹指数趋于稳定值。稳定阶段4个风程长度位置的平均沙波纹指数依次为33、19、24、21,与其他实验结果比较吻合^[1,5,25-26],而且随风程长度的增加呈减小趋势。迎风坡指数和背风坡指数反映了迎风坡长度和背风坡长度的相对变化。整个实验过程经历了迎风

坡长度小于和大于背风坡长度两个阶段,也反映了沙床面从开始时的不规则起伏、不规则沙波纹向规则沙波纹的转化。

2.1.3 沙波纹移动速度

沙波纹移动速度与波高的关系如图9所示。沙波纹移动速度是相邻两帧图像中同一沙波纹的波峰移动量除以时间间隔,量级为 10^{-1} — 10^1 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。4个位置移动速度的变化幅度比较接近,且波高越小,变化幅度越大。例如,1 mm高度沙波纹的移动

速度为 $5\text{--}25\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, 而 10 mm 沙波纹移动速度为 $2\text{--}10\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。4个位置的移动速度总体上都随沙波纹高度的增加呈减小趋势, 与实验研究和数值模拟研究中移动速度与高度呈反比的结果一致^[11,22,26]。这首先是由于风沙流运动本身具有的不均匀性和瞬时性使得沙波纹的移动速度本身就变化剧烈, 同时本实验选择的拍照时间间隔远小于其他实验研究的时间间隔, 更接近沙波纹瞬时移动速度, 因此也没有时间间隔增长带来的平均化的影响。其次是由于图9中包含了从初始形成阶段到稳定阶段所有测量到的沙波纹移动速度数据, 相同高度沙波纹在不同发育阶段的移动速度必然有很大差异。

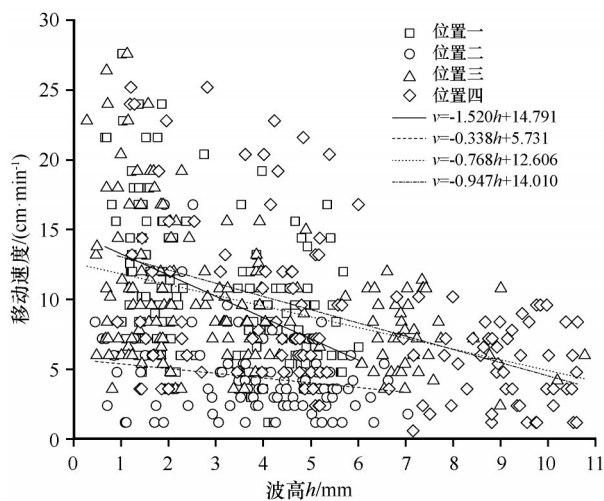


图9 沙波纹移动速度与波高的关系

Fig.9 Relationship between propagation velocity and sand ripple height

沙波纹平均移动速度是一分钟内沙波纹的波峰移动量的平均值。4个位置处沙波纹平均移动速度都随时间先迅速减小, 随后下降趋势减缓(图10), 符合幂函数分布:

$$v = at^{-b} \quad (3)$$

式中: v 为沙波纹平均移动速度; a 、 b 为拟合参数。4个位置相关系数 R^2 都在0.80左右。

沙波纹平均移动速度总体上呈随风程长度增加而减小的趋势。其中位置二处平均移动速度整体偏小是由沙波纹脊线蜿蜒且分布不均匀造成的, 可见沙波纹三维结构影响其移动速度。但是, 和Cheng等^[6]实验中实验段中部和尾部沙波纹平均移动速度基本不变的结果相矛盾。这很可能是两个实验中风程长度不同导致。Cheng等^[6]实验中实验段

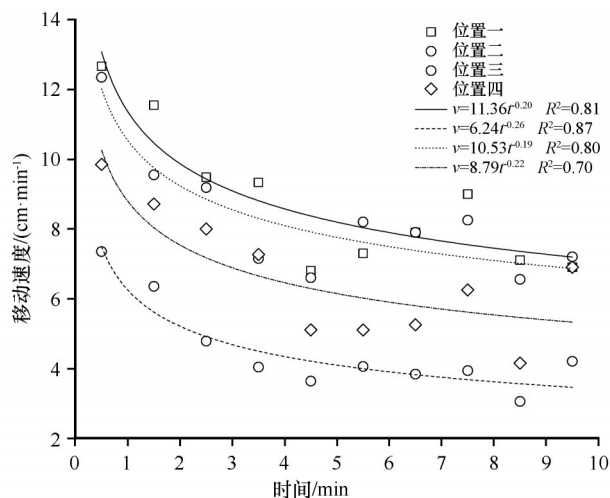


图10 沙波纹平均移动速度随时间变化

Fig.10 Mean propagation velocities of sand ripples changes with time

中部与尾部的风程长度分别为 $4.5\text{--}5\text{ m}$ 和 $9\text{--}10\text{ m}$, 超过了本研究实验段风程长度 ($2\text{--}4.7\text{ m}$), 因此Cheng等^[6]实验中输沙量和沙波纹都可能已经达到了饱和阶段从而移动速度不变。

2.2 沙波纹稳定过程形态

在沙波纹增长阶段和稳定阶段, 沙波纹存在显著差异(图11)。本文采用Zimbelman等^[27]的方法使用沙波纹波长作为特征长度对沙波纹波长和波高进行无量纲化。在增长阶段, 图11A的沙波纹随实验时间增加越来越尖锐, 即波高增加速度更快。小沙波纹叠置在大沙波纹上, 说明沙波纹尺寸可以通过合并快速增长。沙波纹波峰位于整个波长 $0.6\text{--}0.7$ 位置处, 而且有向下风向移动的趋势, 即迎风坡的长度相对增长而背风坡的长度相对缩短。在稳定阶段, 图11B中沙波纹形态和波高都基本不变, 叠置其上的小沙波纹的尺寸非常小, 对沙波纹形态和运动的影响很小。波峰位于整个波长 $0.5\text{--}0.6$ 位置处。图11A和图11B中并不是同一个沙波纹从增长阶段发展到稳定阶段, 代表的是两个完全不同的沙波纹。这些结果都与图8中沙波纹指数、沙波纹迎风坡指数和沙波纹背风坡指数的变化规律一致。

3 讨论

沙波纹的形成是地表风沙运动的结果, 运动沙粒越多沙波纹越容易形成, 因此风程效应对沙波纹有很大影响。风程效应指风沙运动中输沙率从可

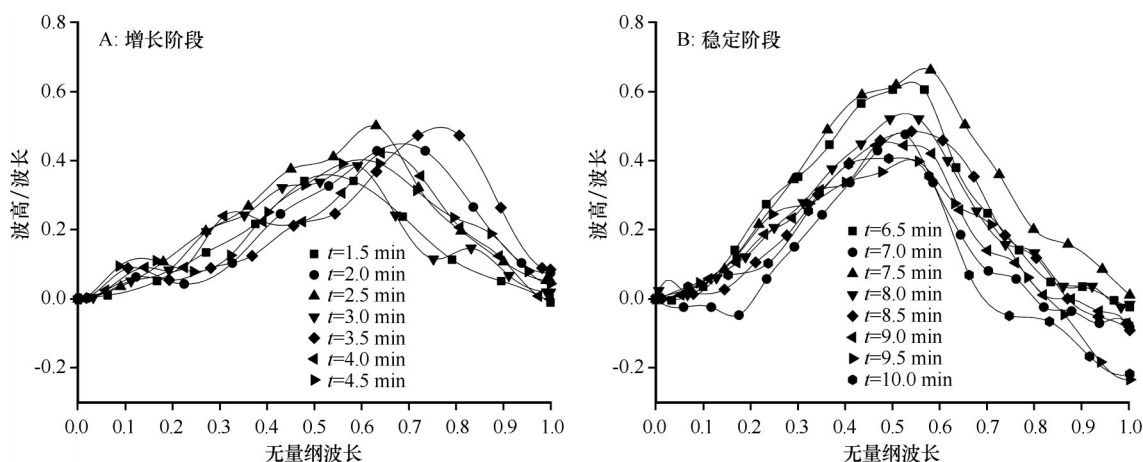


图11 沙波纹增长阶段和稳定阶段位置四截面形态随时间变化

Fig.11 Evolution of scaled sand ripple profiles at developing and full development stages

蚀边缘开始向下风向运动过程中随着距离增加而发生变化的过程^[28-31]。Chen等^[23]在相同风洞相近风速条件下的实验中发现输沙率随距离先快速增大,但是在大约2.5 m后增大速率随距离增加而减缓。这和本文沙波纹的发育趋势相同。不同沙粒粒径和风速实验条件下风程效应有很大差异,临界风程长度随粒径和风速的增大而增长^[23,30]。风洞实验段长度和截面尺寸的不同对风沙运动影响是导致研究结果差异的一个常被忽略的原因。因此,不同文献数据对比时还需要考虑风程长度的影响。

沙波纹发育形成过程的各阶段都始终伴随着不同尺寸沙波纹的共存(图6、11)。在沙波纹初始阶段和增长阶段,沙波纹可以通过合并快速增大^[24,26,32]。稳定阶段的小沙波纹的尺寸比大沙波纹的尺寸小很多,两个尺寸级别的沙波纹共存时的相互作用还需要研究。同时,实验测量时可能会忽略这些小沙波纹,进而造成沙波纹波长和沙波纹指数增大^[6]。

地表沙粒的起动自身就是一个随机过程,起沙风基本都是湍流,风速在时间和空间上显示出不规则性,因此也必然使风沙运动在时间和空间上表现为不均匀性^[33-34],进而导致沙波纹脊线蜿蜒和移动速度的不均匀,形态上呈现三维结构^[6,35-36]。对本文的测量方法进行扩展,在沙波纹脊线方向布置激光片光源阵列,按照本文方法计算各激光片光源下的截面形态就可以获得沙波纹三维形态,这也是我们下一步的研究工作。同时,用高分辨率的监控设备代替本文的普通相机还可以达到长期无人监测的目的,将给野外实验监测巨型沙波纹、砾浪等移动缓慢的风沙地貌的演化提供很大便利^[35-37]。

4 结论

采用激光片光源垂直照射沙床面的方式消除了沙波纹脊线方向变化对沙波纹截面形态测量的影响,对沙丘模型截面形态的测量证明了该方法可以显著提高测量准确性。①沙波纹发育形成过程的初始形成阶段、增长阶段和稳定阶段的时长都随风程长度的增加呈减小趋势。不同位置沙波纹的发育过程不同步,越靠近沙床面上边缘沙波纹的发育越滞后,呈现“倒游现象”。②4个风程长度位置沙波纹的波高和波长都随时间先快速增大,然后趋于稳定,而且波高增长速度随风程长度增加而增大。稳定阶段沙波纹平均高度和波长都随风程长度的增加而增大。③沙波纹指数、迎风坡指数和背风坡指数都随时间按照指数函数先快速减小,然后基本保持不变。稳定阶段平均沙波纹指数呈现随风程长度的增加而减小的趋势。④沙波纹移动速度总体上随高度增大而减小,平均移动速度随时间按 $v=at^{-b}$ 减小,而且在风沙流未饱和阶段平均移动速度总体上呈随风程长度增加而减小的趋势。沙波纹研究中必须考虑风程长度的影响。未来研究中需要关注沙波纹三维结构和横向运动的影响。

参考文献:

- [1] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes [M]. London, UK: Springer, 1941.
- [2] Hand E. Sandy ripples point to Mars's past [J]. Science, 2016, 352(6281): 16-17.
- [3] Lapotre M G A, Ewing R C, Lamb M P, et al. Large wind ripples on Mars: a record of atmospheric evolution [J]. Science, 2016, 353(6294): 55-58.

- [4] 董治宝, 苏志珠, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 178–184.
- [5] Sherman D J, Zhang P, Martin R L, et al. Aeolian ripple migration and associated creep transport rates[J]. *Geosciences*, 2019, 9(9): 389.
- [6] Cheng H, Liu C C, Li J F, et al. Experimental study of aeolian sand ripples in a wind tunnel[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(1): 312–321.
- [7] Anderson R S, Bunas K L. Grain size segregation and stratigraphy in aeolian ripples modelled with a cellular automaton[J]. *Nature*, 1993, 365: 740–743.
- [8] 苗天德, 武生智, 慕青松. 风成沙波发育过程的计算机模拟[J]. *自然科学进展*, 2001(2): 89–92.
- [9] Kang L Q, Guo L J. Numerical simulation of aeolian sand ripples[J]. *Physics Letters A*, 2004, 330(3/4): 198–202.
- [10] Nishimori H, Ouchi N. Formation of ripple patterns and dunes by wind-blown sand[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(1): 197–200.
- [11] 郑晓静, 薄天利, 谢莉. 风成沙波纹的离散粒子追踪法模拟[J]. *中国科学(G辑: 物理学 力学 天文学)*, 2007(4): 527–534.
- [12] Duran O, Claudin P, Andreotti B. Direct numerical simulations of aeolian sand ripples[J]. *PNAS*, 2014, 111(44): 15665–15668.
- [13] 朱伟. 风成沙波纹形成和发展过程研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [14] 凌裕泉, 刘绍中, 吴正, 等. 风成沙纹形成的风洞模拟研究[J]. *地理学报*, 1998, 53(6): 42–49.
- [15] 凌裕泉, 屈建军, 李长治. 应用近景摄影法研究沙纹的移动[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(2): 118–120.
- [16] Werner B T, Haff P K, Livi R P, et al. Measurement of eolian sand ripple cross-sectional shapes [J]. *Geology*, 1986, 14(9): 743–745.
- [17] Lorenz R D. Observations of wind ripple migration on an Egyptian seif dune using an inexpensive digital timelapse camera[J]. *Aeolian Research*, 2011, 3(2): 229–234.
- [18] 李猛, 董治宝, 张正偲. 风成沙波纹脊线提取与应用计算[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(2): 312–317.
- [19] 胡田立, 李兴财. 基于图像处理的沙波纹几何特征研究[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(6): 143–147.
- [20] Andreotti B, Claudin P, Pouliquen O. Aeolian sand ripples: experimental study of fully developed states[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(2): 28001.
- [21] Li C, Dong Z B, Chen G X, et al. Qaidam Basin as an analog for linear dune formation in Chasma Boreale, Mars: a comparative analysis[J]. *Geomorphology*, 2018, 322: 29–40.
- [22] 李振山, 倪晋仁. 风成沙纹发育过程中形态变化的风洞实验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2003(3): 247–254.
- [23] Chen Z Y, Xiao F J, Dong Z B. Fetch effect on the developmental process of aeolian sand transport in a wind tunnel[J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(3): 436–446.
- [24] Werner B T, Gillespie D T. Fundamentally discrete stochastic model for wind ripple dynamics [J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(19): 3230–3233.
- [25] Sharp R P. Wind ripples[J]. *The Journal of Geology*, 1963, 71(5): 617–636.
- [26] Seppälä M, Lindé K. Wind tunnel studies of ripple formation [J]. *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*, 1978, 60(1/2): 29–42.
- [27] Zimbelman J R, Williams S H, Johnston A K. Cross-sectional profiles of sand ripples, megaripples, and dunes: a method for discriminating between formational mechanisms[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(10): 1120–1125.
- [28] 张正偲, 董治宝, 赵爱国. 人工模拟戈壁风沙流与风程效应观测[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(10): 1505–1510.
- [29] Gillette D A, Herbert G, Stockton P H, et al. Causes of the fetch effect in wind erosion [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21(7): 641–659.
- [30] Dong Z B, Wang H T, Liu X P, et al. The blown sand flux over a sandy surface: a wind tunnel investigation on the fetch effect [J]. *Geomorphology*, 2004, 57(1/2): 117–127.
- [31] Lynch K, Jackson D W T, Cooper J A G. The fetch effect on aeolian sediment transport on a sandy beach: a case study from Magilligan Strand, Northern Ireland[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(8): 1129–1135.
- [32] Forrest S B, Haff P K. Mechanics of wind ripple stratigraphy[J]. *Science*, 1992, 255(5049): 1240–1243.
- [33] Baas A C W. Evaluation of saltation flux impact responders (Safires) for measuring instantaneous aeolian sand transport intensity[J]. *Geomorphology*, 2004, 59(1/4): 99–118.
- [34] Baas A C W, Sherman D J. Spatiotemporal variability of aeolian sand transport in a coastal dune environment [J]. *Journal of Coastal Research*, 2006, 22(5): 1198–1205.
- [35] Yizhaq H, Kutra I, Isenberg O, et al. Evolution of megaripples from a flat bed[J]. *Aeolian Research*, 2012, 6: 1–12.
- [36] Qian G Q, Dong Z B, Zhang Z C, et al. Granule ripples in the Kumtagh Desert, China: morphology, grain size and influencing factors[J]. *Sedimentology*, 2012, 59(6): 1888–1901.
- [37] Milana J P. Largest wind ripples on Earth? [J]. *Geology*, 2009, 37(4): 343–346.

Research of two-dimensional morphological characteristics of aeolian sand ripples by laser vertically irradiating the sand bed

Chang Ju, Xiao Fengjun, Dong Zhibao, Chen Hao, Ma Huirong

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Aeolian sand ripple attracts people's attention because of its regular wavy geometric pattern, but its formation process is still lack of in-depth understanding. The lack of high-precision and high-resolution measurement method of sand ripple profile is one reason. The laser sheet is inclined at some angle to the sand bed in the traditional measurement method. It will cause the inaccurate measurement of height and the deformation of sand ripple profile. In this study, we correct the problem by irradiating the sand bed vertically and analyze the influence of fetch length on the evolution of geometric parameters with time. The results show that: (1) The durations of the initial formation stage, the growth stage and the stable stage of the sand ripple decrease with the increase of the fetch length, and the shorter the fetch length, the slower the development process of the sand ripple, forming the "backward phenomenon". (2) The height and wavelength of sand ripple increase rapidly with time at first and then are gradually become stable in the end. The growth rate of ripple height increases with the increase of fetch length. The mean ripple height and wavelength increase with fetch length. (3) The ripple indexes, windward indexes and leeward indexes decrease with time following an exponential law. At the stable stage of the sand ripples, the mean ripple index decreases with fetch length. (4) The propagation velocity of sand ripple shows a decreasing trend with ripple height. The mean propagation velocity decreases according to a power law with respect to time, and it decreases with fetch length when saturated sand flux is not reached. Therefore, the fetch length is a key factor in the study of sand ripple.

Key words: sand ripple profile; wavelength; fetch effect; wind tunnel