

梁依茹, 吕萍, 曹敏, 等. 沙粒级配对沙波纹形态影响的风洞实验研究[J]. 中国沙漠, 2025, 45(1): 20-31.

沙粒级配对沙波纹形态影响的风洞实验研究

梁依茹, 吕萍, 曹敏, 马芳, 夏子书, 余军林, 吴婧妍

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119)

摘要: 风成沙波纹是风在沙质地表塑造的呈波状起伏的微地貌, 其形态特征主要受风速和粒径的影响, 然而很少有研究关注沙粒级配的作用, 因此对于影响沙波纹形态因素的认知并不全面, 数值模拟等研究方法的发展大大受限。基于风洞实验, 设置了9组粒度配比下的沙波纹形态观测, 并利用Matlab软件提取特征参数, 再对沙波纹的发育过程、饱和形态进行了分析, 期待对以往研究予以补充, 并提供实验数据与对比参考。结果表明: (1) 沙床颗粒中存在30%以上的相对细沙, 可以有效促进沙波纹的形成; 相对粗沙的存在, 使得沙波纹波长和沙波纹指数的上限增大。(2) 沙粒级配因素的介入, 影响了沙波纹发育过程的复杂程度, 使得到达稳定饱和阶段的时间并不随着风速的增加而线性减小。(3) 当风速增加时, 双粒径和三粒径混合沙形成的沙波纹形态的复杂性和不均匀性更加显著; 细沙: 粗沙=1:1的粒度配比可以更快地到达稳定, 并更好地保持平衡; 在等比双粒径的组别中, 细沙: 中沙=1:1的粒度配比有利于沙波纹的发育与发展; 非等比双粒径条件下的沙波纹, 表现出迎风坡波长小于背风坡波长的特点; 非等比双粒径和等比三粒径的组别可以更好地在高速条件下发展。

关键词: 风成沙波纹; 沙粒级配; 形态; 风洞实验

文章编号: 1000-694X(2025)01-020-12

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00088

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

风成沙波纹是风吹过松散沙质地表时, 在短时间内形成的呈波状起伏、随风快速变化的微风沙地貌^[1]。作为风力作用下地表形成的最基本的地貌类型, 风成沙波纹的研究既是理解其他类型风沙地貌的基础, 也是推动行星风沙研究的迫切需要^[2-4]。

针对沙波纹的研究大致起始于19世纪80年代^[5], 经过100多年的发展与探索, 学者们在风成沙波纹的影响因素、形成机理、类型划分等方面进行了讨论。关于波纹的形成存在众多理论^[2,6-7], 也正是意识到沙波纹发展过程的复杂性, 人们基于其形成机理, 划分出了空气动力学沙波纹和冲击沙波纹^[8-9], 考虑到尺度因素, 冲击沙波纹又可细分为一般沙波纹和巨型沙波纹^[2,6]。本研究仅涉及一般沙波纹。除上述内容外, 前人最主要的探讨还是针对风成沙波纹的基本形态特征。

沙波纹的截面形态呈现两坡的明显不对称性,

迎风坡缓而稍凸起, 背风坡陡而微凹。它们的形态参数除了波长(L)即波峰到波峰, 或波谷到波谷的距离, 和波高(h)即波谷到波峰之间的差值以外, 还使用沙波纹指数 $RI=L/h$ 、沙波纹对称指数 $RSI=i/s$ (i 为迎风面波长投影-冲击区长度, s 为背风面波长投影-阴影区长度)来表征其形态特征^[10]。Bagnold^[2]认为主要有5个要素影响风成沙波纹的形态, 其中风速和粒径是两个最重要的因素, 只有当风速和粒径处于特定条件时, 才会形成沙波纹^[11]。前人实验表明, 沙波纹的波长随摩擦风速的增加而增加^[12-14], 但波高存在两种不同的变化趋势, 有的随风速的增加线性增加^[2,6,12,14-16], 有的却随风速先增大后减小^[11,17]。另外, 学者们普遍认为沙粒粒径的增大会导致沙波纹波高的增加^[6,17-18], 但对于粒径与波长的关系, 则存在一定争议^[6,11,15,19]。与此同时, 研究者们意识到, 沙粒级配因素也会对沙波纹形态产生显著影响^[20], 但针对其开展的深入研究依然较少, 从而导致各种研究结果之间存在一定的差异, 人们对

收稿日期: 2024-04-23; 改回日期: 2024-07-07

资助项目: 国家自然科学基金项目(42271006); 中央高校基本科研业务费专项项目(GK202202004)

作者简介: 梁依茹(2000—), 女, 安徽合肥人, 硕士研究生, 研究方向为风沙地貌学。E-mail: hereissimba@163.com

通信作者: 吕萍(E-mail: lvping@snnu.edu.cn)

波纹形态影响因素的理解也并不充分。因此,有必要进一步深入探讨沙粒级配的作用,以获得更全面、准确的研究结论。

另外,由于实地测量的误差和局限性,以及计算机技术的持续发展,数值模拟方法逐渐成为研究风成沙波纹的重要手段,模拟结果大大提高了我们对于沙波纹形成和演化的认识。但是模型往往聚焦于单一粒径的初始形成阶段,使得假设条件脱离现实,最终结果与风洞实验、野外测量存在差异。因此重视模拟两种或多种粒径颗粒的沙波纹形成过程、形成机理,是数值模拟的未来发展趋势^[21-24],这便需要相关实验数据提供参与对比。沙波纹作为一种短期的微地貌,可以比较好地在风洞模拟实验中再现,因此补充风洞实验中沙粒级配因素的空缺,可以更好地推动数值模拟方法的持续发展,完善对于风成沙波纹的认知。

本文设置了多组粒度配比的风洞实验,并对其发育过程、饱和形态进行了分析,期待补充沙粒级配对沙波纹形态及其发展的影响,使得风成沙波纹的研究更加深入、全面,同时给予丰富的实验数据,为数值模拟的发展提供风洞实验方面的对比。

1 实验方法

1.1 风洞实验

风洞实验在陕西师范大学风沙动力学实验室中完成(图1)。直流闭口吹气式风洞全长16.5 m,工作段长7.0 m,宽0.5 m,高0.6 m,风速可在 $3\sim 35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 连续变化。实验段前端布设粗糙元,用于模拟自然条件下沙波纹形成所需的风场条件^[25]。将激光发射器安装在风洞顶部,保证激光片发射的光源垂直照射于沙床的中轴线,从而观测沙波纹的形成过程。实验所用沙样采集于沙波纹充分发育的柴达

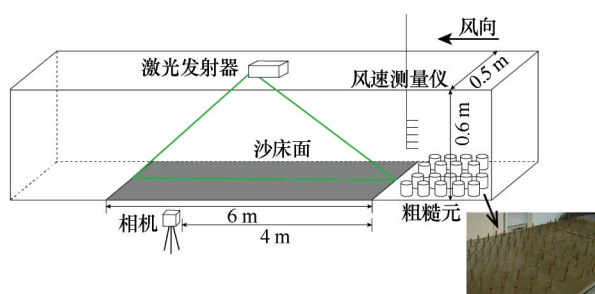


图1 风洞实验示意图

Fig.1 Layout of the instrumentation for the wind tunnel experiment

木盆地沙漠乌图美仁地区(图2),该地区沉积物粒度组成以细沙和中沙为主,平均粒径偏大,分选较差,可以满足实验所需^[26]。首先计算、筛选、分类不同粒径的沙粒及砾石,再按照所需比例进行充分混合,最后将实验用沙均匀平铺在长6.0 m、宽0.5 m、深0.029 m的沙槽中。

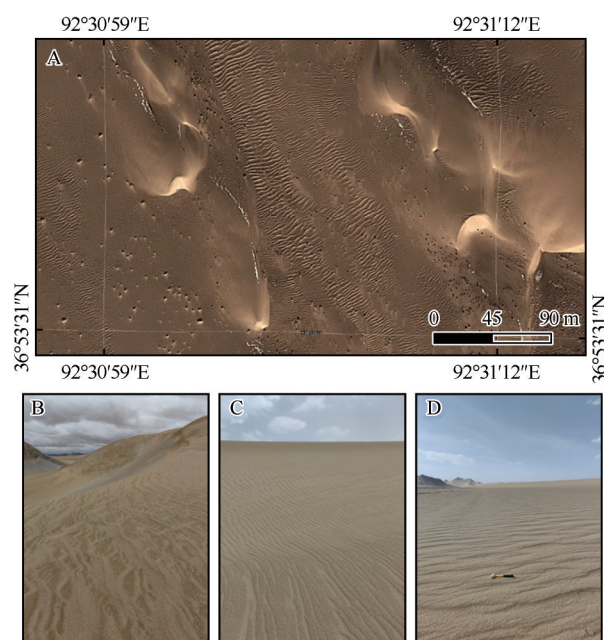


图2 柴达木盆地沙漠沙波纹卫星影像(A,资料来源于Google Earth)和实地照片(B~D)

Fig.2 Satellite aerial image (A, Image from Google Earth) and field photos (B~D) of sand ripples in the Qaidam Basin, China

选取4组特定风速(9.0、10.5、12.0、 $15.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),开展粒度配比(共9组,表1)的风洞实验。在前期的试验中,我们发现风速过小沙粒无法移动,而风速过大沙粒则无法堆积形成沙波纹,因此,本文选取了能够尽可能发育沙波纹的风速范围。通过调整风机转速获得目标风速,使用TSI生产的风速测量仪测定风速,当风速达到实验所需且基本稳定后,开始拍摄沙床内沙波纹的发育状况。每一小组完成后,改变风速或粒度配比,抹平沙床,进行下一组实验,直到完成所有的风速、粒度配比下沙波纹形态参数的记录。在风洞实验段侧面,距离沙床上边缘4 m处,设置相机同步摄像(拍摄时间间隔为10 s)。风机转动至目标风速时开始计时,同时开始拍摄,吹见风洞底板即停止拍摄。

采用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测量方法(图3A)。针对实验所

表1 沙粒级配(%)设置

Table 1 Particle size distribution(%) of experiment

| 组别 | 细沙 (<0.25 mm) | 中沙 ($0.25\sim0.5$ mm) | 粗沙 ($0.5\sim1.0$ mm) |
|------|---------------------|---------------------------|--------------------------|
| No.1 | 100 | | |
| No.2 | | 100 | |
| No.3 | | | 100 |
| No.4 | 50 | | 50 |
| No.5 | 50 | 50 | |
| No.6 | | 50 | 50 |
| No.7 | 70 | | 30 |
| No.8 | 30 | | 70 |
| No.9 | 33.3 | 33.3 | 33.3 |

注:该比例为质量比,No.1、No.2、No.3组为单粒径,No.4、5、6组为等比双粒径,No.7、No.8组为非等比双粒径,No.9组为等比三粒径;其中No.7组粒度配比参考了野外真实情况,为了实验设计的系统性又加入了No.8组的粒度配比;这里的粒径划分采用Udden-Wentworth方法^[27]。

得图像,使用Matlab软件,提取沙波纹的波峰、波谷坐标,以及截面形态。通过增加垂直于来流风向的辅助线可以克服原始图像的近大远小问题,进而获得准确的沙波纹波长(L)、迎风坡长度(i)、背风坡长度(s)数据。已知风洞实验段沙槽深度0.029 m,以沙槽的两个边框为比例尺,结合垂直于来流风向的

辅助线,可以计算沙波纹波高(h),如图3B所示。相机一次可拍摄记录0.6 m范围内的沙波纹形态,获知一张照片中的所有可观测沙波纹形态数据后,采用求平均值的方法得到最终的形态参数。再通过公式计算,获得沙波纹指数($RI=L/h$)和沙波纹对称指数($RSI=i/s$),从而进一步分析沙波纹的形态特征。上述测量和分析方法已经得到前人的实验验证,误差可以控制在合理的范围内^[28]。

1.2 粒度实验

将铺设沙床的沙粒,使用英国马尔文公司生产的Mastersize3000激光粒度仪(测量范围0.01~3 500 μm)进行测量。各组沙粒级配的粒度频率分布曲线如图4所示。

2 结果

在风洞实验过程中,No.2、No.3、No.8未提取到有效的沙波纹形态参数,9.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下仅有No.1、No.5、No.9形成可观测沙波纹(表2)。因此后续的分析与讨论,针对有效实验结果展开。表格中平均粒径 M_z 、分选系数 σ 等粒度参数在GRADISTAT软件中,按照Folk-Ward方法^[29]计算。

2.1 沙波纹发育过程

对于沙波纹的形成和发展过程,前人主要总结为3个阶段^[12-13,17,30]:①初始形成阶段(图5A);②增长阶段(图5B);③稳定饱和阶段(图5C)。稳定饱和阶段的沙波纹波长约为初始形成阶段的两倍^[13]。在大风速下,沙波纹会继续进入消亡阶段,波纹继续增大且形态开始演变,即变态、分解与重新组合,最终导致沙波纹的消失^[17]。

对于实验中的可识别沙波纹,通过直接观测得出各组到达稳定饱和阶段的时间(t_{sat} ,图6)。当沙波纹波长、波高和传播速度均趋于稳定,且合并与消亡现象明显减少时,我们认为到达稳定饱和阶段。 t_{sat} 的范围为1.8~9.0 min,大部分为1.8~6.2 min,与过往研究均处于一个相似的范围^[11-14,18]。各组的发育阶段不同步,并且除了No.1的单一细沙,本实验中的 t_{sat} 并不随着风速的增加线性减小,这与前人的研究存在差异^[2,6,14,19]。非等比双粒径和等比三粒径的混合沙,随风速的增加 t_{sat} 大致呈减小趋势;但在等比双粒径的组别中, t_{sat} 与风速的关联似乎并不紧密,且细沙和粗沙的等比组合常在更短的时间内

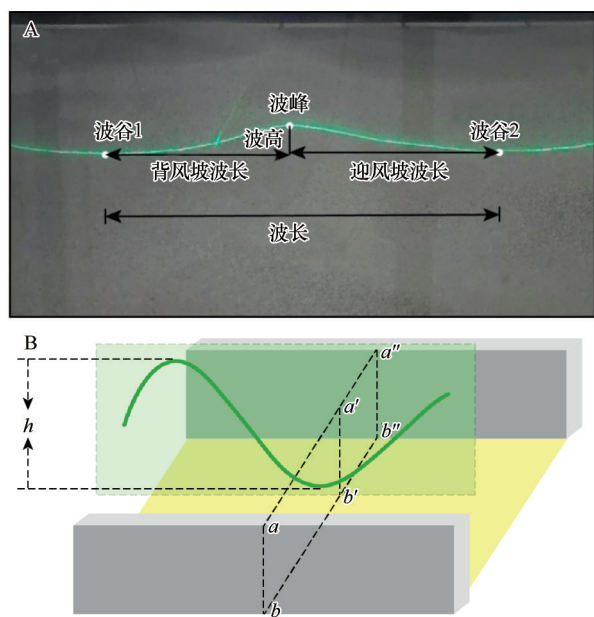


图3 激光照射沙床面的真实图像(A)和沙波纹波高计算示意图(B)

Fig.3 Real image of sand bed irradiated by laser (A) and calculation diagram of sand ripple height (B)

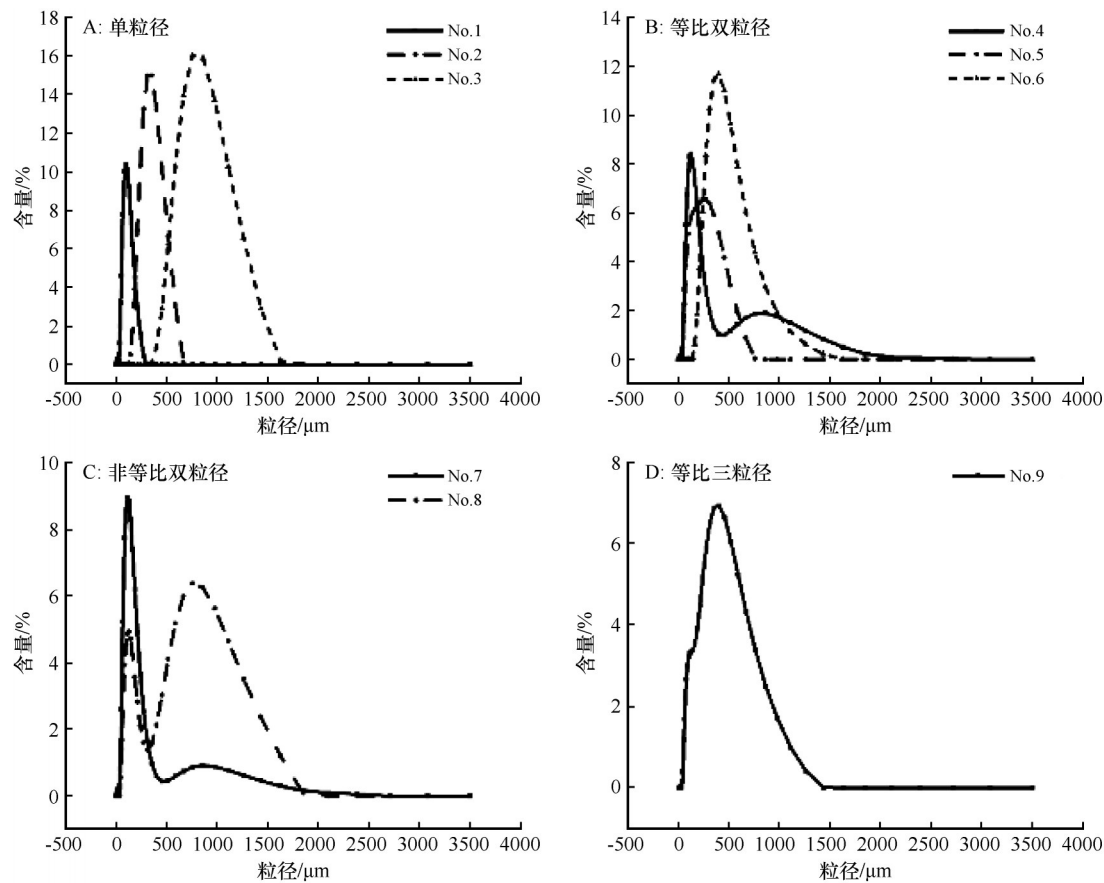


图 4 各组沙粒级配的粒度频率分布曲线

Fig.4 Grain size frequency curves of particle size distribution in each group

表 2 实验结果汇总

Table 2 Summary of experimental results

| 分类 | 组别 | 沙粒级配 | 平均粒径 $M_z/\mu\text{m}$ | 分选 系数 σ | 风速 V_1 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 风速 V_2 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 风速 V_3 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 风速 V_4 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|--------|------|----------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 单粒径 | No.1 | 细沙(<0.25 mm)100% | 101.0 | 1.619 | 9.0 | 10.5 | 12.0 | 15.0 |
| | No.2 | 中沙(0.25~0.5 mm)100% | 345.1 | 1.376 | \ | \ | \ | \ |
| | No.3 | 粗沙(0.5~1.0 mm)100% | 856.5 | 1.349 | \ | \ | \ | \ |
| 等比双粒径 | No.4 | 细沙 50%+粗沙 50% | 176.0 | 2.266 | \ | 10.5 | 12.0 | 15.0 |
| | No.5 | 细沙 50%+中沙 50% | 193.5 | 1.993 | 9.0 | 10.5 | 12.0 | 15.0 |
| | No.6 | 中沙 50%+粗沙 50% | 440.7 | 1.536 | \ | 10.5 | 12.0 | 15.0 |
| 非等比双粒径 | No.7 | 细沙 70%+粗沙 30% | 135.3 | 2.000 | \ | 10.5 | 12.0 | 15.0 |
| | No.8 | 细沙 30%+粗沙 70% | 353.9 | 2.739 | \ | \ | \ | \ |
| 等比三粒径 | No.9 | 细沙 33.3%+中沙 33.3%+粗沙 33.3% | 283.2 | 2.247 | 9.0 | 10.5 | 12.0 | 15.0 |

到达饱和。

2.2 沙波纹的波长与波高

本研究出现沙波纹的波长为 4~39 cm(图 7),此范围与先前研究较为吻合,但波长最大值大于前人的风洞实验结果^[12,14,18],说明沙粒级配会导致沙波

纹波长的变化。随着时间的增加,沙波纹波长整体呈现逐步增长趋势,最终在饱和阶段达到相对稳定,其中存在几次数值的突变,这可能是由于沙波纹出现了合并与消亡现象,从而影响了增长阶段的沙波纹波长。同时,波长均随着风速的增加而增大,这与前人的研究结果一致^[12~14]。

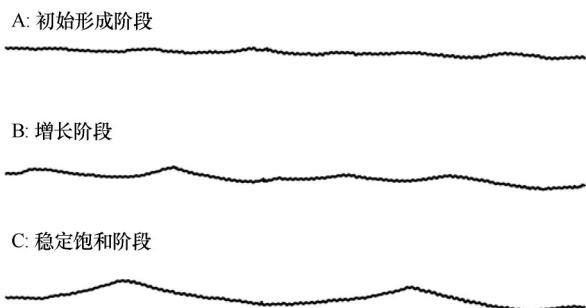


图5 沙波纹的形成和发展过程(以No.1在 $12.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速下为例)

Fig.5 Formation and development process of sand ripples (take No.1 and $12.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ as an example)

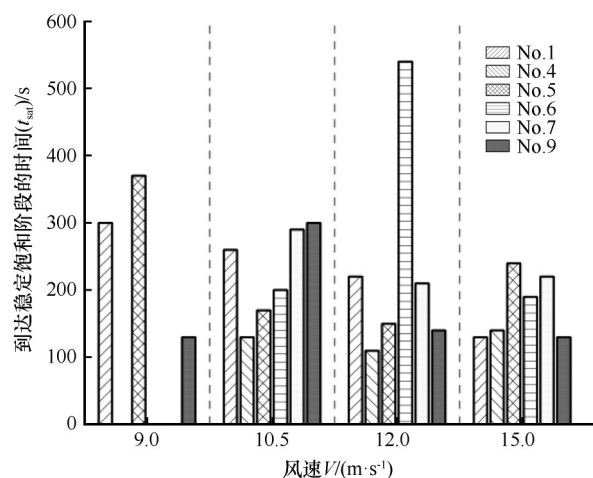


图6 各组沙波纹到达稳定饱和阶段的时间

Fig.6 Time to saturation in each group

当风速相同时,不同粒度配比会对沙波纹波长产生影响。在中低风速条件下,单一细沙形成的沙波纹波长明显大于其他沙粒级配条件下的波长。在等比双粒径的组别中,细沙与中沙的等比组合会产生更长的沙波纹波长,而细沙与粗沙的等比组合所形成的沙波纹波长通常最短。以细沙为优势的细粗混合沙所形成的波长,与等比三粒径的混合沙所形成的波长非常接近,且在高风速条件下,与其他粒度配比相比,二者会导致更长的沙波纹波长。

沙波纹波高为 $0\sim 1.42 \text{ cm}$ (图8),这与前人的实验结果非常吻合^[18,30]。与波长的变化相似,在增长阶段,沙波纹波高随时间增大,其中存在合并和消亡现象导致的数值突变,最终在饱和阶段,波高达到相对稳定。非等比双粒径和等比三粒径条件下的沙波纹波高,随着风速的增加而增加,但其他组别的波高,均随着风速的增加呈现先增后减的趋

势。在前人的研究结果中,也多次出现这两种不同的趋势^[2,6,12,14-17],针对先增后减的情况,Walker^[11]解释为在低风速条件下,蠕移的颗粒不容易被推至背风坡;当然也有可能是因为到达了临界风速,沙波纹进入了消亡阶段^[2]。

沙波纹波高的数值规律与波长极其相似。当风速相同时,沙粒级配的不同会对沙波纹波高产生影响。单一细沙形成的沙波纹波高明显大于其他沙粒级配条件下的波高。在等比双粒径的组别中,细沙与中沙的等比组合更有利于形成相对较高的沙波纹,与此同时细沙与粗沙的等比组合总形成相对较矮的沙波纹。在高风速条件下,细沙:粗沙=7:3的情况,有助于沙波纹的升高。

综上所述,单一细沙相较于其他组别,会形成尺度更大的沙波纹,然而这可能与平均粒径较小密切相关。细沙与中沙的等比组合会形成更大的沙波纹,进而说明该组粒度配比,更有利于沙波纹的发育;另外细沙与粗沙的等比组合,往往形成尺度最小的沙波纹。在高风速条件下,细沙:粗沙=7:3与等比三粒径的配比有助于沙波纹尺度的增大。

2.3 沙波纹指数与沙波纹对称指数

沙波纹指数 RI 和沙波纹对称指数 RSI 都是描述沙波纹波状特征的重要指标^[1,31]。另外,在沙波纹增长过程中,存在合并与消亡现象,小波纹的消失又往往发生在背风坡,因此背风坡长度常被高估,该阶段的沙波纹对称指数则不具有准确性,所以我们采用稳定饱和阶段的 RSI 和 RI 来进行讨论、分析。

沙波纹指数为 $12 < RI < 80$,平均值为32,如图9A所示,范围比先前研究略大^[2],说明本实验设置的沙粒级配,使得沙波纹剖面形态趋于平缓。在各组中,等比三粒径拥有相对较小的 RI ,即较为起伏;等比双粒径拥有相对较大的 RI ,即较为平坦。在风速较高时,非等比双粒径混合沙的 RI 明显小于其他组别。结合波长与波高的数值特征,No.4为小尺度平坦沙波纹,No.5为大尺度平坦沙波纹,No.7和No.9为高风速下的较大尺度起伏沙波纹。另外,沙波纹指数整体随风速的增大而增大,与前人实验结果保持一致^[6,11]。

沙波纹对称指数的平均值为1.4(图9B),波纹的剖面形态呈现两坡的明显不对称性,迎风坡缓背风坡陡^[10]。以细沙为优势的细粗混合沙,是唯一一组在稳定阶段还呈现迎风坡波长小于背风坡波长的

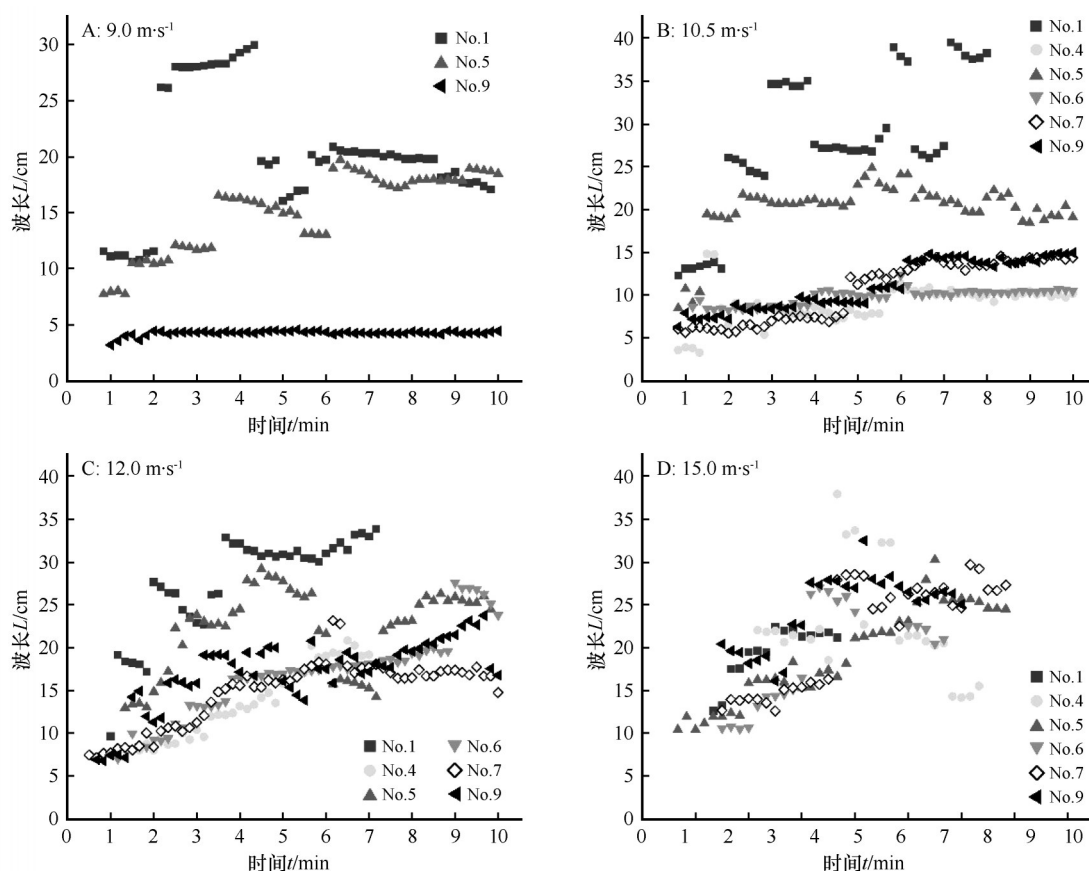


图7 沙波纹波长随时间变化

Fig.7 Temporal change of ripple wavelength

组别,但相比之下它们所形成的沙波纹拥有最接近于1的 RSI ,即对称性较强;与细、粗沙的等比组合相对比,可以验证前人的结论:在粗颗粒占比较高、粒度组成不均匀的情况下,形成的沙波纹更不对称^[2,11]。然而在所有等比双粒径的组别中,当细沙:粗沙=1:1时沙波纹拥有最强的对称性,结合前文的结论(细沙和粗沙的等比组合常在更短的时间内达到饱),我们认为,该组粒度配比可以更好地到达并保持平衡。有学者认为 RSI 与风速的关系并不显著^[17],也有学者认为风速的增加会产生更大的沙波纹对称性^[32],而本实验表明,等比双粒径的 RSI 随风速的增大呈增加趋势,同时等比三粒径在大风速条件下对称性增强。

最后,当风速较大时, RI 和 RSI 的数值范围越发分散,即在同一风速同一粒度配比条件下发育的沙波纹,沙波纹指数和沙波纹对称指数差别较大;由此可知,大风速条件下各组的沙波纹形态更加复杂、多样。

2.4 沙波纹移动速率

沙波纹移动速率(v)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^[28]。 v 随风速的增

加而增加,并且随时间呈幂函数递减(图10, $P < 0.05$)。各组发展阶段的平均沙波纹移动速率,均大于稳定饱和阶段的平均沙波纹移动速率,只有少数组别的 v 随时间变化不剧烈。上述现象正是由于沙波纹的合并而导致的,前人研究表明沙波纹的传播速率与波高成反比,因此小的波纹可以追赶并合并成较大的波纹^[2,6,32-33]。

总的来说,等比双粒径混合沙的移动速率较快,其次是等比三粒径混合沙,最后是以细沙为优势的非等比双粒径混合沙;在等比双粒径的组别中,细沙:中沙=1:1的组合拥有最快的移动速率,中沙:粗沙=1:1的组合拥有最慢的移动速率,该现象更多受到平均粒径因素的影响(图11)。具体来说,单一细沙和细、中等比混合沙的移动速率较大,且随着风速的增加,移动速率由单粒径 \geq 细、中沙的等比组合,逐渐转变为细、中沙的等比组合 $>$ 单粒径。非等比双粒径和等比三粒径在保持大致相似的移动速率基础上,等比三粒径 $>$ 非等比双粒径,与此同时No.9的平均粒径大于No.7的平均粒径,这与前人的结论不符^[7,34],由此可见沙粒级配对沙波纹发育过

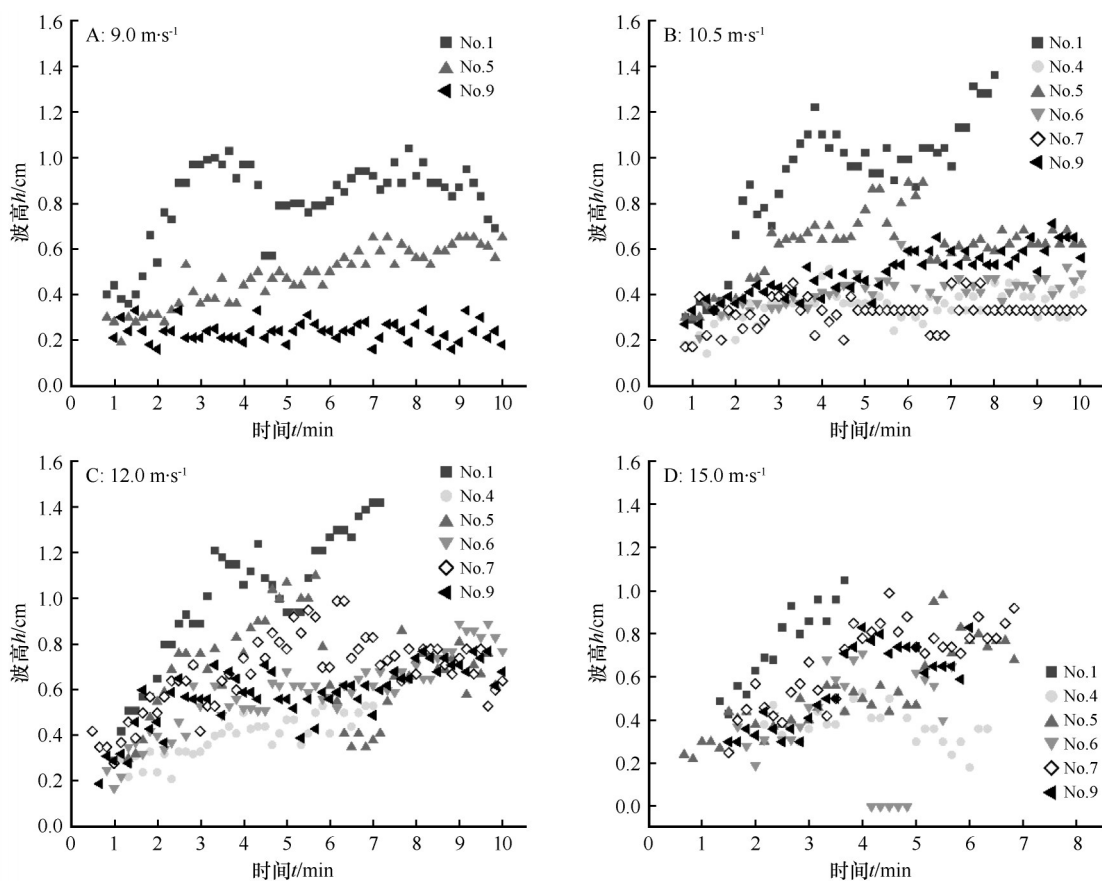


图8 沙波纹波高随时间变化

Fig.8 Temporal change of ripple height

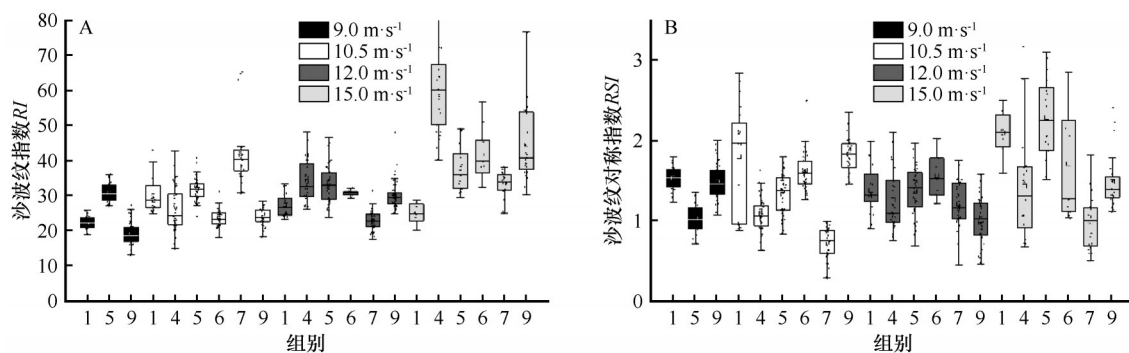


图9 稳定饱和阶段的沙波纹指数与沙波纹对称指数

Fig.9 Ripple index and ripple symmetry index of saturation stage

程的影响。另外本实验结果认为,以细沙为优势的细粗混合沙并不利于沙波纹的移动。

3 讨论

3.1 沙粒级配对沙波纹形成过程的影响

粒径在沙波纹的形成和演化过程中起到至关重要的作用,其中沙粒级配这一要素也有很大的影响。本文的实验现象与前人研究结果有相似之处,

凌裕泉等^[17]曾在风洞实验过程中发现,单一极细沙、单一中沙、单一粗沙均不能形成明显沙波纹。在本文的实验中,单一中沙和单一粗沙依旧没有形成明显沙波纹,但是中沙和粗沙的等比组合可以提取到有效沙波纹形态;另外,当粗沙占比过大时(No.8),也无法形成明显波纹。再结合各组别的平均粒径,不难看出No.6的 M_z 大于No.2和No.8的 M_z ,因此导致该现象的主导因素并不是平均粒径的差异。凌裕泉等考虑到沙量过少、沙床过短等因素

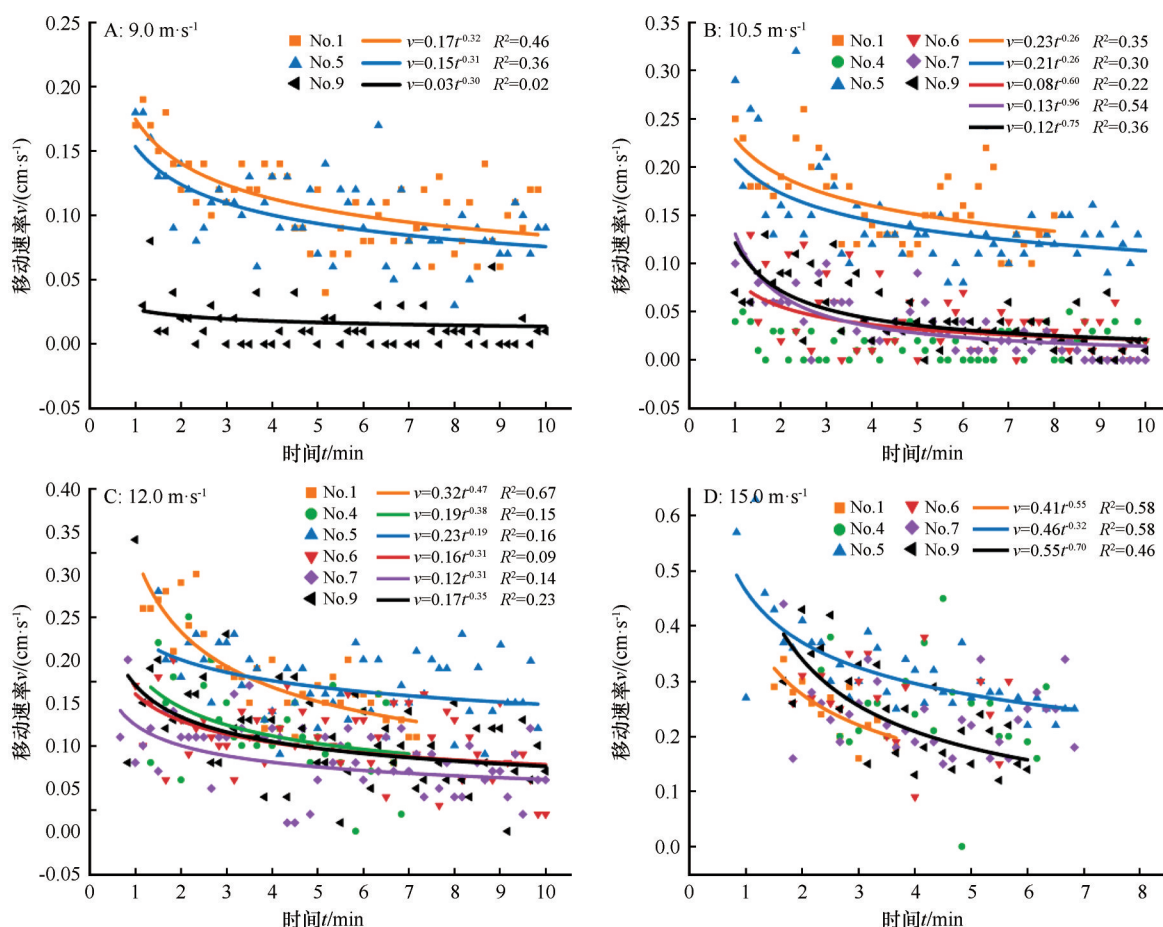


图 10 沙波纹移动速率随时间变化

Fig.10 Temporal change of propagation velocities

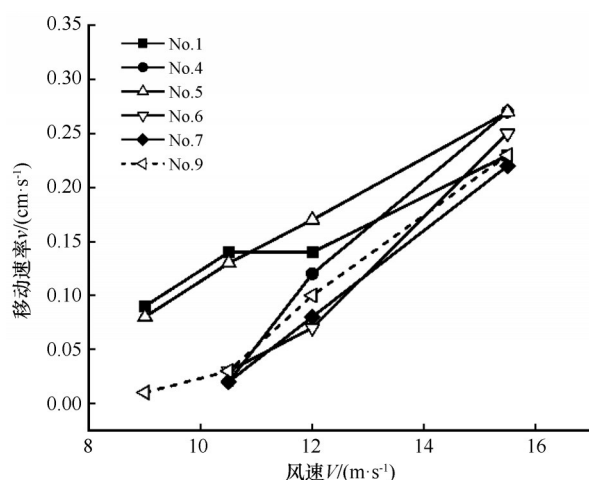


图 11 稳定阶段沙波纹平均移动速率随风速变化

Fig.11 Mean propagation velocities of sand ripples changes with wind speed

的影响,除此之外,更多学者认为只有当粒径处于特定条件时,才会形成沙波纹^[2,11]。从而我们推测,相对细沙的存在,是促进沙波纹形成的重要因素,同时相对细沙的占比要超过 30%。当风速大于相

对细沙的起动风速时,风沙流中会存在足够多的细颗粒物,就能对沙床产生有效碰撞,促进粗粒径沙粒在床面上方的跃移和在床面的蠕移,进而导致沙波纹的形成。在以往的针对跃移沙粒撞击沙平面的实验和数值模拟研究中,已经证实了沙粒的跃移、蠕移运动是影响沙波纹形态与发展的重要因素^[22,35-36],同时它们又依赖于沙粒间的碰撞^[37-41]。前人针对风成沙波纹形成的临界粒径也有相关讨论,刘贤万^[7]认为粒径超过 0.5 mm 后沙波纹则无法形成,也有研究将其扩大到 0.5~0.9 mm 的范围^[42]。

本实验引入沙粒级配因素,导致沙波纹到达稳定饱和阶段的时间并不随着风速的增加而线性减小,这与前人的研究结果相悖^[2,6,14,19]。从而我们推测,风速和粒径并不是影响 t_{sat} 长短的唯一因素,沙粒级配的不同会使得发育阶段的复杂程度产生鲜明差异,进而影响 t_{sat} 的长短。有些组别的发育过程仅经历小波纹的粗化便达到饱和;还有些组别会经历简单的小波纹消亡与生长;而其他组别则不断地经历波纹的抬高、降低,甚至是先形成大波纹,颗粒

再从波峰跳入波谷之间,形成小波纹,接着出现小波纹追赶大波纹的情况,这与前人在高风速下的风洞实验现象相类似^[14]。 t_{sat} 随着风速的增加先增后减的组别,往往是经历了下述过程:较低风速下仅存在小波纹的粗化,中等风速条件下沙波纹发育过程复杂且相对缓慢,大风速下沙波纹发育过程迅速,例如No.6、No.9。而 t_{sat} 随着风速的增加先减后增的组别,通常是因为在风速较高时存在发育过程复杂、反复的现象,例如No.5。

相较于前人的风洞实验结果,本文的沙波纹波长最大值较大,沙波纹指数的范围也略大,沙波纹剖面形态更为平缓。有研究表明,相较于均匀沙,沙床沉积物的非均质性有利于波长的延长^[24]。除此之外我们考虑相对粗沙的存在使得跃移运动更加困难,进而延长了沙波纹的波长,也使得沙波纹形态更为扁平。

3.2 沙粒级配对沙波纹截面形态的影响

结合沙波纹稳定饱和阶段的截面形态图(图12)不难发现,大部分组别的沙波纹形态并不简单、均匀,在一张照片中常常出现大小波纹共同存在的情况。随着风速的增加,这种复杂现象更加常见。

单一细沙所形成的沙波纹形态最为规律,可以清晰地提取到波峰与波谷,这与前人研究相似^[17],同时它还拥有最为尖锐的波峰。前人研究认为,沙波纹中,粒度较粗的沙粒通常集中于波峰处,而细沙粒则聚集于波谷^[2,6,14,24,43-46],这是因为较小的颗粒倾向于跃移至更远的距离,而大颗粒只能跃移较近的距离。因此正是粒度组成的不同,导致了沙波纹截面形态的差异,当沙粒级配中包含粗颗粒物质时,它们常堆积于波峰,从而使得波峰圆滑,也会使得形态偏扁平,沙波纹指数偏大。另外,相比于其他组别, No.1形成的沙波纹尺度最大。

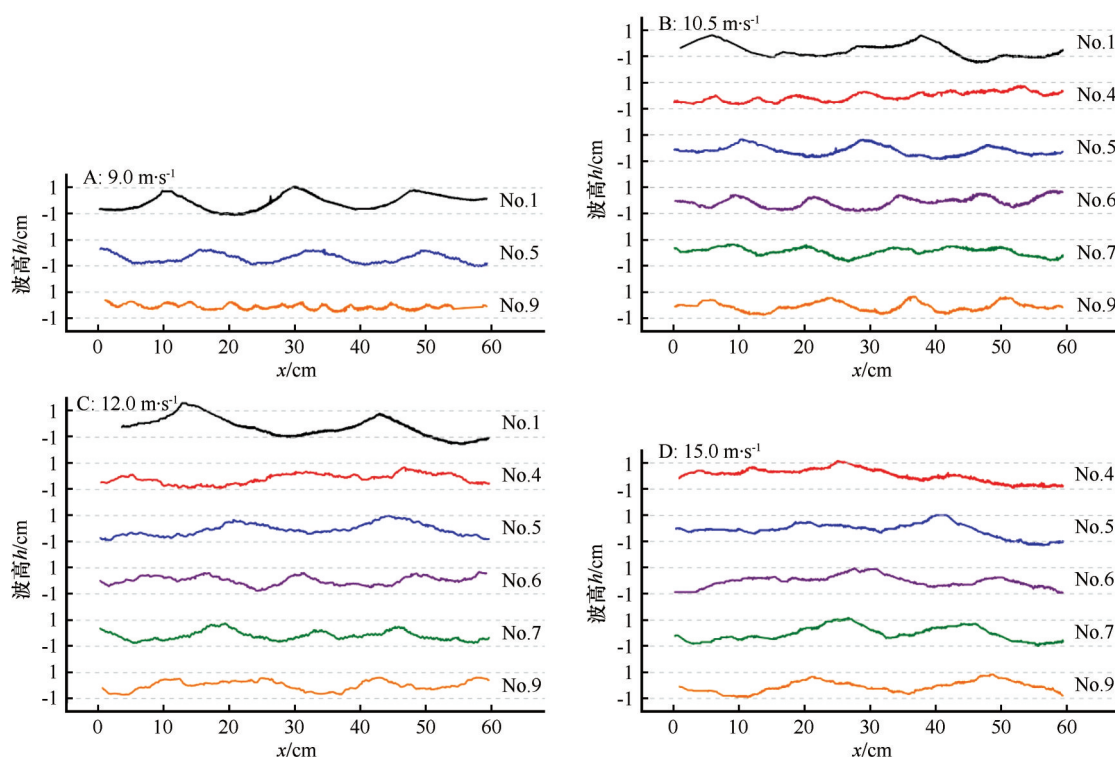


图12 饱和阶段沙波纹截面形态图

Fig.12 Sand ripple profiles at saturation stage

No.4的沙波纹形态最为模糊,根据前文分析可知该组别的沙波纹尺度较小、对称性较强、到达稳定阶段的时间较短。在实验过程中,我们观察到,当表面的细沙被快速吹走,粗沙会像保护层一样覆盖,从而阻碍了沙粒的移动,使得发展阶段仅经历

小波纹的简单粗化便达到饱和,因此 t_{sat} 较小;与此同时粗沙也阻碍了沙波纹的尺度增大,进而导致稳定阶段的沙波纹形态难以识别。因此我们认为该组粒度配比,可以更快地到达稳定,并更好地保持平衡,但不利于沙波纹的持续发展。在等比双粒径

的组别中,细沙与中沙的等比组合会形成更大尺度的沙波纹,结合前文结论可知,该组的沙波纹移动速率也较大,进而说明该组粒度配比有利于沙波纹的发育与发展。我们发现虽然 No.6 平均粒径($440.7\ \mu\text{m}$)大于 No.4 平均粒径($176.0\ \mu\text{m}$),但中沙与粗沙的等比组合依旧会形成尺度相对较大的沙波纹,除了考虑分选性的差异外,我们认为当细沙被快速吹走后,沙粒碰撞和粗沙的跃移、蠕移变得困难,因此沙波纹尺度难以增大;而中沙的起动风速较大,不易被快速吹走,进而可以促进沙波纹尺度的增大。

聚焦非等比双粒径的沙波纹截面形态,我们更加明确这是唯一一组出现迎风坡波长小于背风坡波长的情况,且在不只一组风速条件下发现该现象,这大概是因为占比较大的细沙越过波峰抵达背风坡,而占比较小的粗沙停留在迎风坡。但它们所形成的沙波纹拥有最接近于1的沙波纹对称指数,即对称性较强。

随着风速的增加,非等比双粒径和等比三粒径的组别可以观察到明显的波长变长、波高增高现象,且在高风速条件下,二者的沙波纹对称性增强,波纹形态比其他组别更为均匀,起伏更为明显,即 RI 值较大。我们认为,沙波纹的消亡要经历波长增加、波高降低的过程,即逐渐扁平化; Bagnold^[2]研究表明,风速超过某一临界后,沙波纹变平坦或消失不见。所以我们推断,非等比双粒径和等比三粒径的混合沙相比其他粒度配比,拥有更大的临界风速^[44],在本实验条件下,该风速超过 $15.0\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。通过前文的数据分析可知,两者的移动速率较慢,因此提升空间较大,可以更好地适应高风速条件。

4 结论

实验结果表明,沙粒级配因素会对沙波纹的发育过程及形态参数产生显著影响,甚至出现与以往结论相差较大的结果。

床面沙粒的粒度配比中,相对细沙的存在,是促进沙波纹形成的重要因素,同时相对细沙的占比要超过30%;沙床颗粒中,相对粗沙的存在,使得沙波纹波长和沙波纹指数的上限增大。

沙粒级配的不同会使得发育过程的复杂程度产生鲜明差异,进而影响到达稳定饱和阶段的时间长短,使其并不随着风速而发生线性变化。

双粒径和三粒径混合沙形成的沙波纹,形态复杂且不均匀,该现象随着风速的增加越发明显;粒度配比为细沙:粗沙=1:1时,形成的沙波纹尺度较小、对称性较强、到达稳定饱和阶段的时间较短,因此可以更快地到达稳定,并更好地保持平衡;在等比双粒径的组别中,细沙与中沙的等比组合所形成的沙波纹尺度较大、移动速率较大,因此该组粒度配比有利于沙波纹的发育与发展;非等比双粒径条件下的沙波纹存在迎风坡波长小于背风坡波长的情况,与此同时其对称性较强;非等比双粒径和等比三粒径组别的临界风速较大,可以更好地在高风速条件下发展。

不同的沙粒级配会对沙波纹发育与形态产生影响,本文所得到的结论具有定性特征,更为精确的结果需要更加细致的组别划分,以及深入的实验。另外,在未来的研究中,可以进一步关注沙粒密度比对沙波纹形态的影响,以及沙波纹间距的存在。

参考文献:

- [1] 董治宝,屈建军,钱广强,等.库姆塔格沙漠风沙地貌[M].北京:科学出版社,2011.
- [2] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes [M]. London, UK: Methuen, 1942.
- [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] Hand E. Sandy ripples point to Mars's past [J]. Science, 2016, 352(6281): 16–17.
- [5] Rae J. Wind sand ripples [J]. Nature, 1884, 29(746): 357.
- [6] Sharp R P. Wind Ripples [J]. The Journal of Geology, 1963, 71(5): 617–636.
- [7] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [8] Yizhaq H, Tholen K, Saban L, et al. Coevolving aerodynamic and impact ripples on Earth [J]. Nature Geoscience, 2024, 17(1): 66–72.
- [9] Wilson I G. Aeolian bedforms— their development and origins [J]. Sedimentology, 1972, 19(3/4): 173–210.
- [10] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [11] Walker J D. An experimental study of wind ripples [D]. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1981.
- [12] Andreotti B, Claudin P, Pouliquen O. Aeolian sand ripples: experimental study of fully developed states [J]. Physical Review Letters, 2006, 96(2): 28001.
- [13] 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.
- [14] Seppälä M, Lindé K. Wind tunnel studies of ripple formation [J]. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 1978, 60(1/2): 29–42.
- [15] Schmerler E, Katra I, Kok J F, et al. Experimental and numerical study of Sharp's shadow zone hypothesis on sand ripple wavelength[J]. *Aeolian Research*, 2016, 22: 37–46.
- [16] 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.
- [17] 凌裕泉, 刘绍中, 吴正. 风成沙纹形成的风洞模拟研究[J]. *地理学报*, 1998, 53(6): 520.
- [18] 朱伟. 风成沙波纹形成和发展过程研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [19] Summers H J, Stone R O. Study of Subaqueous and Subaerial Sand Ripples[R]. 1968.
- [20] Calantoni J, Landry B J, Penko A M. Laboratory observations of sand ripple evolution using bimodal grain size distributions under asymmetric oscillatory flows [J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 165: 1497–1502.
- [21] Anderson R S. A theoretical model for aeolian impact ripples [J]. *Sedimentology*, 1987, 34(5): 943–956.
- [22] 李猛, 董治宝, 张正偲. 风成沙波纹数学模型综述[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1285–1292.
- [23] 罗昊, 倪晋仁, 李振山. 风成沙纹数值模拟研究述评[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(6): 783–790.
- [24] Wang P, Zhang J, Huang N. A theoretical model for aeolian polydisperse-sand ripples [J]. *Geomorphology*, 2019, 335: 28–36.
- [25] 常菊. 风成沙波纹发育过程中形态特征分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2022.
- [26] 鲍锋, 董治宝. 察尔汗盐湖沙漠沙丘沉积物粒度特征分析[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(6): 355–359.
- [27] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30(5): 377–392.
- [28] 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.
- [29] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27(1): 3–26.
- [30] Zheng X J. *Mechanics of Wind-blown Sand Movement* [M]. Berlin, Germany: Springer, 2009.
- [31] Tanner W F. Ripple mark indices and their uses [J]. *Sedimentology*, 1967, 9(2): 89–104.
- [32] Hoyle R B, Woods A W. Analytical model of propagating sand ripples [J]. *Physical Review E, Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, 1997, 56(6): 6861–6868.
- [33] Forrest S B, Haff P K. Mechanics of wind ripple stratigraphy [J]. *Science*, 1992, 255(5049): 1240–1243.
- [34] 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. *中国沙漠概论* [M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [35] 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, 37(4): 527–534.
- [36] Rumpel D A. Successive aeolian saltation: studies of idealized collisions [J]. *Sedimentology*, 1985, 32(2): 267–280.
- [37] Mitha S, Tran M Q, Werner B T, et al. The grain-bed impact process in aeolian saltation [J]. *Acta Mechanica*, 1986, 63(1/4): 267–278.
- [38] Willetts B B, Rice M A. Collisions in aeolian saltation [J]. *Acta Mechanica*, 1986, 63(1/4): 255–265.
- [39] Ungar J E, Haff P K. Steady state saltation in air [J]. *Sedimentology*, 1987, 34(2): 289–299.
- [40] Werner B T, Haff P K. The impact process in aeolian saltation two-dimensional simulations [J]. *Sedimentology*, 1988, 35(2): 186–196.
- [41] Werner B T. A steady state model of wind-blown sand transport [J]. *The Journal of Geology*, 1990, 98(1): 1–17.
- [42] 钱宁. *泥沙运动力学* [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [43] Pye K, Tsoar H. *Aeolian Sand and Sand Dunes* [M]. London, UK: Unwin Hyman, 1990.
- [44] Ellwood J M, Evans P D, Wilson I G. Small scale aeolian bed-forms [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1975, 45: 554–561.
- [45] Neuman C M, Bédard O. A wind tunnel investigation of particle segregation, ripple formation and armouring within sand beds of systematically varied texture [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(5): 749–762.
- [46] Hong C, Huiru L, Yi F, et al. Particle size characteristics of aeolian ripple crests and troughs [J]. *Sedimentology*, 2018, 65(6): 1859–1874.

Wind tunnel research into the effect of particle size distribution on sand ripple morphology

Liang Yiru, Lv Ping, Cao Min, Ma Fang, Xia Zishu, Yu Junlin, Wu Jingyan

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

Abstract: Aeolian sand ripple is a wavy microtopography caused by wind on a sandy surface. Its morphological features are mostly governed by wind speed and particle size. However, few studies have investigated the influence of sand particle size distribution. As a result, the understanding of the elements influencing the morphology of sand ripples is incomplete, and the development of numerical simulation and other research methodologies is severely constrained. This research, which is based on wind tunnel experiments, sets up nine groups to observe the morphology of sand ripples at different particle size ratios. It utilizes Matlab software to extract the characteristic parameters of the sand ripples and examines their development process and saturation morphology. It is expected to provide experimental data and a comparative reference, supplementing the previous work. The following are the primary conclusions: (1) More than 30% of relatively fine sand can effectively promote the formation of sand ripples. The presence of relative coarse sand raises the upper limit of the sand ripple wavelength and sand ripple index. (2) The intervention of sand gradation parameters affects the complexity of the development process of sand ripples, so that the time to reach the stable saturation stage does not decrease linearly with the rise of wind speed. (3) The sand ripples created by the two- and three-size mixed sands become more intricate and inhomogeneous as the wind speed increases. The particle size ratio of fine sand to coarse sand is 1:1, which allows for faster stability and better balance. In the group of equal ratio and double particle size, the particle size ratio of fine sand to medium sand = 1:1 promotes the formation and growth of sand ripples. The sand ripple under non-equivalent double particle size conditions reveals that the windward slope has a shorter wavelength than the leeward slope. Under high wind speeds, the non-equal ratio double particle size and equal ratio three particle size groups can develop more effectively.

Key words: aeolian sand ripple; particle size distribution; morphology; wind tunnel experiment