

杨转玲,钱广强,邢学刚,等.库姆塔格沙漠北部三垄沙地区砾波纹形态和表面流场[J].中国沙漠,2025,45(2):225-235.

库姆塔格沙漠北部三垄沙地区砾波纹 形态和表面流场

杨转玲¹,钱广强²,邢学刚¹,董治宝³,郭酉元²

(1.贵州师范学院 地理与资源学院,贵州 贵阳 550018; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院 干旱区生态安全
与可持续发展重点实验室,甘肃 兰州 730000; 3.陕西师范大学 行星风沙科学研究院,陕西 西安 710119)

摘要:砾波纹是独特的微风沙地貌形态,气流是沙粒起动及输移的直接动力来源,对砾波纹形态塑造至关重要。探讨砾波纹形态如何影响气流结构及气流反过来如何重新塑造波纹形态,有助于揭示砾波纹形态动力学的内在机理和理解横向沙脊的形成发育过程。由于地貌尺度问题和技术手段的限制,目前缺乏砾波纹表面流场结构的精确测量。对三垄沙地区典型砾波纹的形态和表面气流进行了实地测量,分析了砾波纹的形态特征和表面气流结构,初步探讨了气流与地形之间的互馈机制。结果表明:(1)三垄沙地区砾波纹大致平行排列,两侧坡面明显不对称,波长和波高分别为3.37 m和0.18 m,RI值(波长/波高)为18.76。(2)迎风坡面气流速度逐渐增大,湍流强度依次减小,气流方向向西偏转,至波峰处与脊线接近垂直;背风坡风速较低、风向变化大且湍流强度高,气流分离,出现涡流。(3)与较高层(0.22 m)相比,贴近地表处(0.05 m)迎风坡面气流加速更剧烈,向西偏转角度更大。(4)砾波纹波长越大,波峰处风速越大,有助于粗颗粒被搬运至波峰,促进砾波纹发育,形成更大更高的波纹。

关键词:砾波纹;形态;气流结构;三垄沙

文章编号: 1000-694X(2025)02-225-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00005

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

砾波纹由双峰或多峰型粗沙和细砾沉积物组成,属于风成波纹的一类^[1-4],也被称为沙脊(ridges)^[5]、巨型波纹(mega-ripples)^[6]、砾石波纹(gravel ripples)^[7]、砾浪(gravel waves)^[8]或粗颗粒波纹^[9]。砾波纹广泛分布于地球各大沙漠边缘、沙丘间区域和沙丘迎风坡等区域,如利比亚沙漠^[5]、纳米布沙漠^[3]、以色列那哈尔卡苏伊^[10]、库姆塔格沙漠^[2]、柴达木盆地^[11]等,在火星表面存在更大尺度的巨型砾波纹^[12]。

砾波纹以其独特的形态和沉积特征引起了广泛关注,研究者们相继对砾波纹形态特征、物质组成、形成演化过程等内容开展了一系列研究^[4,13-16]。就形态特征而言,砾波纹脊线通常近似平行排列,长度几米到几百米,大致与当地的主风向垂直^[2,10,17-18]。

砾波纹两侧坡面不对称,背风坡较迎风坡陡峭,两侧坡面靠近波峰处的坡度均大于下部^[3-4,14]。全球不同区域砾波纹波峰之间的距离(间距或波长)最小约0.31 m,最大甚至超过43.11 m;波峰与波谷之间的高度差(波高)最小约0.01 m,最大可超过1 m^[3-4,16-17]。波长和波高受区域沉积物特性和风况影响,且波长与波高呈正相关,研究者多用波形指数(波长/波高,Ripple index,RI)反映风成波纹的几何特征,其值在不同地区变化大^[15,19]。

沙丘形态动力过程受控于地形、气流及沙粒输移间复杂的相互作用,沙丘动力系统内部的动量交换取决于气流状况和地表形态之间的反馈关系^[20-24]。目前,研究者采用二维、三维超声或风杯风速仪相继对新月形沙丘、穹状沙丘及反向沙丘等类型的沙丘表面流场进行了野外监测^[22,25-28]。研究表明,从

收稿日期:2024-12-16; 改回日期:2025-01-08

资助项目:国家自然科学基金项目(42071016,42241110);贵州省科技计划项目(黔科合基础-zk[2025]面上076);贵州省教育厅高等学校科学研究项目(青年项目,黔教技[2022]249,黔教技[2022]250号);贵州师范学院科研项目(2021BS015,2021BS014)

作者简介:杨转玲(1990—),女,甘肃通渭人,副教授,主要从事风沙物理与风沙地貌研究。E-mail: yangzhuangling@lzb.ac.cn

通信作者:邢学刚(E-mail: xingxuegang@lzb.ac.cn)

沙丘迎风坡底部开始,迎风坡面气流被压缩,压力梯度增大,流速显著增加,湍流强度因气流加速和流线曲率的变化而降低,顶部至脊线狭窄区域流速达到最大,湍流最小^[28];沙丘背风坡气流分离,出现涡流,流速减小,湍流强度增大,形成了高湍流应力区域;离沙丘边缘高度10~17倍距离处,大致为气流的恢复区,流速和流向恢复至初始状态,湍流减弱^[29-31]。气流是砾波纹表面颗粒起动及输移的直接动力来源,对其形态塑造至关重要。由于地貌尺度问题和技术手段的限制,目前缺乏砾波纹表面气流的精确测量。砾波纹形态发育过程中,不同部位的气流结构如何变化?背风坡是否发生气流分离?是否存在气流恢复区域?目前尚不清楚。

砾波纹是由风力驱动下双峰颗粒输移形成的微地貌沙丘形态^[4,14,20]。早期研究者提出了多种模式解释砾波纹的形成^[32-34],关键的假设是细颗粒在风力超过起动风速后发生跳跃,粗颗粒仅在跃移颗粒碰撞后通过蠕移方式向前运动,从而双峰粒度分布是砾波纹形成的前提条件。最近的研究表明,砾波纹发育过程是风力搬运、颗粒输移和床面形态结构相互作用的结果,即使初始床面为单峰粒度分布,随着时间推移,风力作用下的颗粒输移和沉积过程也有可能形成双峰粒度分布。Tholen等^[20]根据风力强度和颗粒粒径,构建了一个4种输移模式的理论框架:无输移(粗细颗粒均不动)、选择性输移(细颗粒跳跃而粗颗粒保持静止)、双模态输移(细颗粒跳跃和粗颗粒蠕移)、单模态输移(粗细颗粒均跳跃)。基于该理论框架,Qian等^[14]确定了三垄沙地区4种输移模式下砾波纹的形态演变过程:演化停滞、保护层形成、缓慢迁移、快速迁移乃至砾波纹形态逐渐被破坏。粗细颗粒在气流结构变化时,如何通过自身运动和颗粒相互作用适应新的流场环境,并在此过程中如何影响砾波纹的形态演变,是砾波纹形态动力过程研究中的内在机制问题。

库姆塔格沙漠北部三垄沙地区风力强劲,风沙地貌演化过程快,砾波纹发育典型,是开展砾波纹形态动力过程研究的理想区域。因此,本研究选取该区域典型砾波纹分布区,采用无人机倾斜摄影测量获取砾波纹三维形态参数,采用二维超声波风速仪进行砾波纹表面流场监测,分析砾波纹形态特征及表面气流结构,以期初步探讨气流与地形之间的互馈关系。

1 研究区概况

研究区位于库姆塔格沙漠北部的三垄沙沙丘区(40°30'—41°02'N,92°50'—93°16'E),该沙丘区是呈东北—西南方向延伸的狭长沙丘带,长约55 km,面积约2 728 km²(图1)。该区域深居亚洲内陆腹地,属于极端干旱温带大陆性气候,夏季最高气温达32.3℃,冬季最低气温可降至-26℃,年降水量小于30 mm,植被覆盖度极低。该区域盛行北东北风,平均风速为4.2 m·s⁻¹,最大风速超过21 m·s⁻¹。沙丘区主要发育于东北至西南之间冲洪积层和山前的剥蚀残丘上,典型的流动沙丘类型有新月形沙丘及沙丘链、线形沙丘、爬坡沙丘和砾波纹^[35]。其中,砾波纹主要发育于丘间平地或沙带边缘,总面积约20 km²,高度小于0.4 m,砾波纹表面沉积物为双峰或三峰分布,波谷沉积物平均粒径为0.49 mm,波峰为1.89 mm,最粗可超过3 mm^[13-14,36]。

2 数据与方法

2.1 形态测量

无人机倾斜摄影测量能够高效、精确获取高分辨率的数字正射影像(DOM, Digital Orthophoto Map)和数字表面模型(DSM, Digital Surface Model),近年成为测量沙丘地貌的关键技术^[37-38]。本研究于2022年7月6日借助PIX4D软件的双网格航线模式,采用大疆多旋翼无人机(DJI Phantom 4 Pro)在30 m高度飞行,航拍覆盖面积为100 m×100 m的区域;辅以RTK GPS(GR-3, Topcon, Paramus, NJ, USA)测量了9个地面控制点。通过三维模拟,获得观测区DOM和DSM,精度为0.029 m,并提取了砾波纹脊线长度、走向、波长、波高、*RI*值(波长/波高)、坡度和弯曲度(脊线长度/两端点间直线距离)一系列形态参数^[14]。

2.2 流场监测

2022年7月6日09:00—09:30(T1)和14:00—14:30(T2)两个时段,选取了观测区内两条相邻砾波纹进行流场监测,风速仪布设剖面线的角度为245°(正北,图1C和图2A)。采用DS-2微型二维超声波风速仪(Decagon's DS-2 Sonic Anemometer, Decagon Devices, Inc.)开展砾波纹表面不同部位风速和风向监测,该仪器采样频率为0.1 Hz,最低采样高度

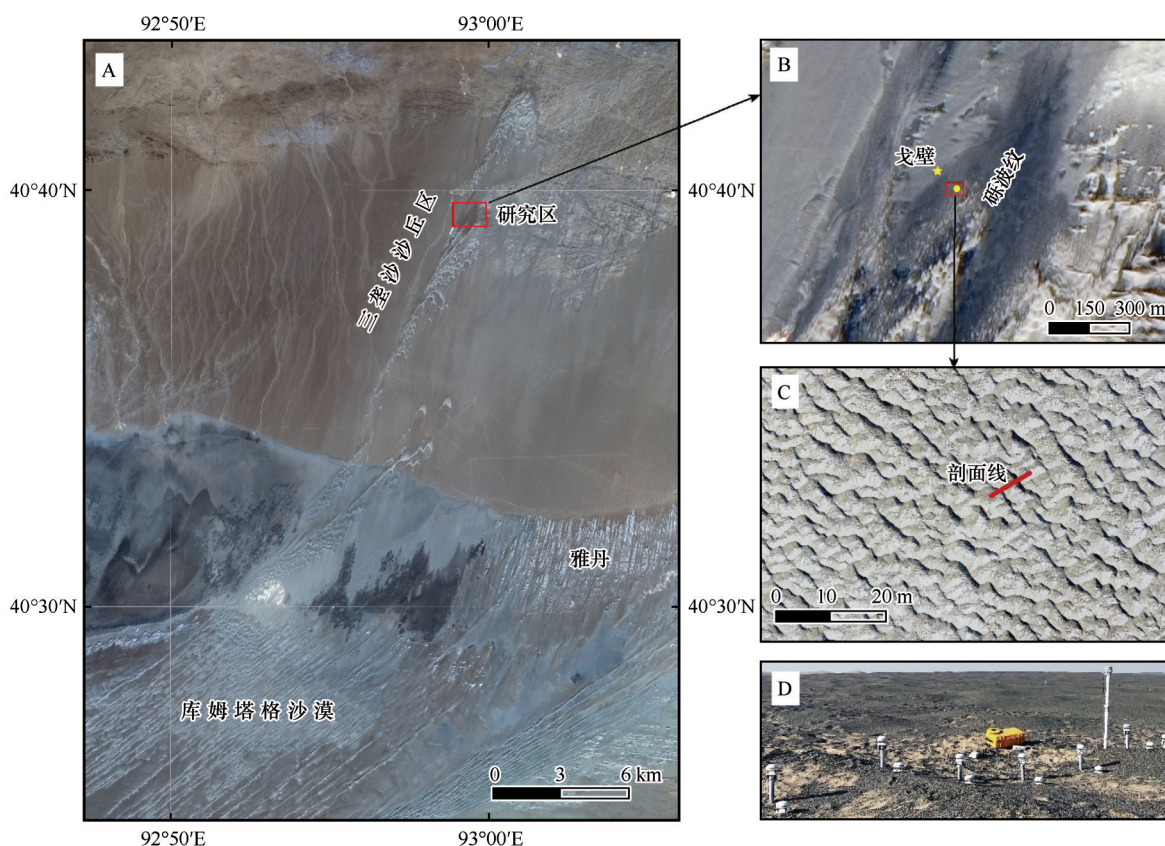


图1 研究区概况(A.哨兵2号卫星影像;B.高分1号卫星影像,五角星和圆分别为戈壁参考点和砾波纹表面风速仪布设位置;C.无人机航拍正射影像,线条为砾波纹表面风速仪布设的剖面线;D.风速仪布设照片)

Fig.1 Location of the study area. A. The Sentinel-2 Satellite image. B. The Gaofen-1 (GF-1) satellite image. Star and circle indicate experiment location of gobi and granule ripples. C. The aerial photograph of granule ripples by unmanned aerial vehicle (UAV). The line indicates the profile line of experiment area. D. Photos of Anemometer placement

0.03 m,本研究数据采集时间间隔为10 s。风速仪布设在砾波纹表面7个位置:G1迎风坡(P1)、G1波峰(P2)、G1背风坡(P3)、波谷(P4)、G2迎风坡(P5)、G2波峰(P6)和G2背风坡(P7),每个位置布设0.05 m和0.22 m两个高度(图2A、B和图1D)。同时,在砾波纹观测区西北边缘平坦戈壁表面布设一组风速仪作为参考点(图1B)。本研究采用变异系数 $CV^{[26,30]}$ 估算湍流强度:

$$CV = SD/\bar{u} \quad (1)$$

式中: SD 为标准差,用来量化风速的波动; \bar{u} 为平均风速。

3 结果与分析

3.1 砾波纹形态特征

观测区砾波纹脊线长度0.89~38.67 m,平均值为7.93 m;弯曲度1.00~1.36,平均值为1.11;脊线走向为56.24°~155.75°,平均值为119.56°,与研究区盛

行风向近似垂直($RDD=203.8^\circ$)。迎风坡下部和上部平均坡度分别为6.71°和8.71°,背风坡下部和上部分别为12.12°和16.19°,表明砾波纹两侧坡面明显不对称,两侧上部坡度均大于下部,与前人的研究结果一致^[3-4,14,23],背风坡坡度略小于Sharp^[4]和Qian等^[14]的结果。波长1.14~5.28 m,平均值为3.37 m;波高0.04~0.32 m,平均值为0.18 m(表1),与其他地区相比,本区域的砾波纹规模处于中等水平^[15]。风沙地貌研究者多用 RI 值评估波纹形态、估算通量或推断波纹的形成环境和动力条件^[15,39-41]。本研究区 RI 值为18.76,与柴达木盆地的测量值(18.5)^[11]和Tyler提出的线性预测值(17.6)^[19]基本一致,小于Yizhaq等^[15]通过多项研究数据提出的最佳拟合值(21.97)和Qian等^[14]在库姆塔格沙漠现场测量值(20.4),大于Sharp^[4]在凯尔索沙丘区的测量值(15.3,表1和图3)。此外,对于布设风速仪的两条砾波纹而言,G2波纹的波长和波高与砾波纹观测区平均值基本一致,G1波纹远大于观测区平均值,G1

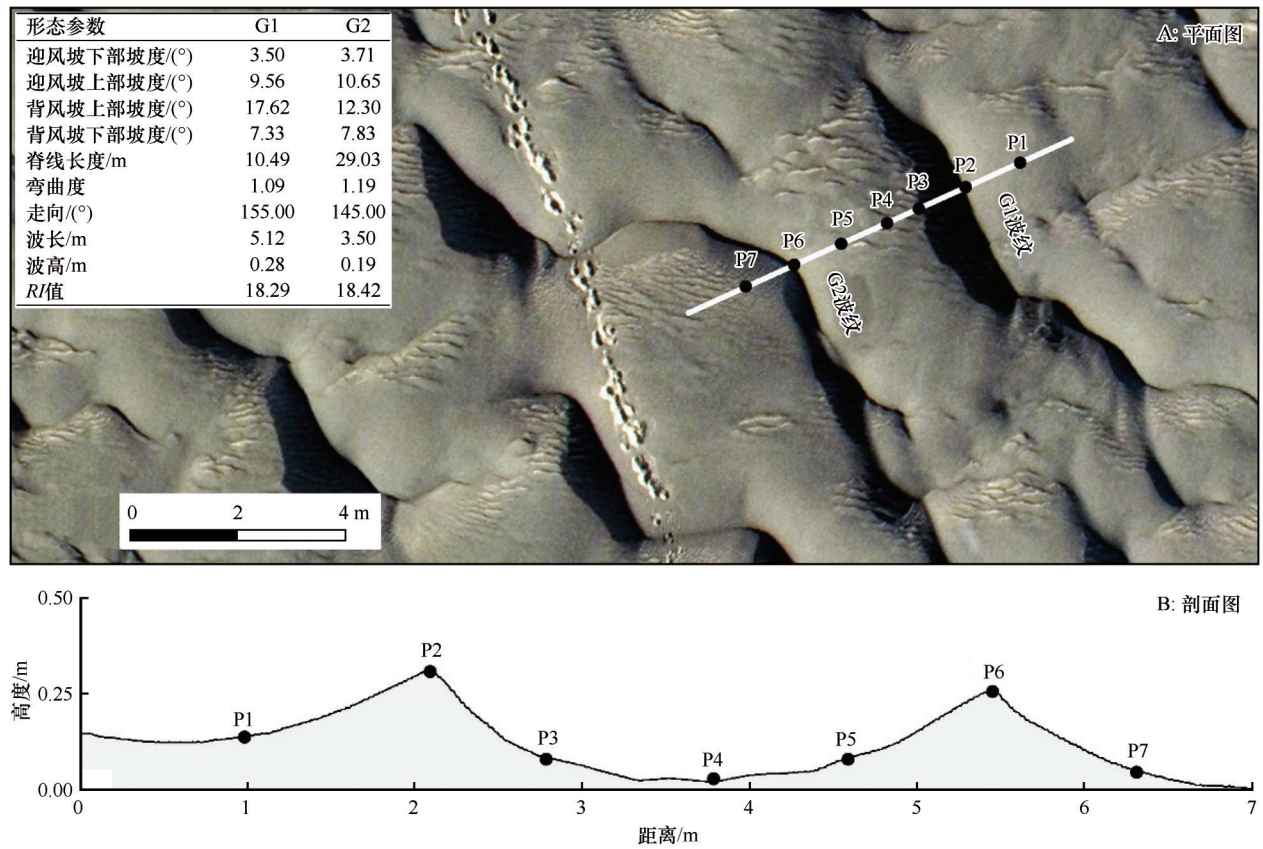


图2 砾波纹表面风速仪布设位置
Fig.2 Granule ripples anemometer positions

表1 砾波纹形态参数统计
Table 1 Statistical results of granule ripple morphological parameters

形态参数	样本量	平均值	标准差	最小值	中位数	最大值
迎风坡下部坡度/(°)	120	6.71	1.77	3.47	6.58	11.56
迎风坡上部坡度/(°)	120	8.71	1.95	5.45	8.63	14.04
背风坡上部坡度/(°)	120	16.19	3.11	10.26	16.09	24.62
背风坡下部坡度/(°)	120	12.22	3.65	7.25	11.31	21.80
脊线长度/m	340	7.93	7.16	0.89	5.55	38.67
弯曲度	340	1.11	0.07	1.00	1.10	1.36
走向/(°)	340	119.56	17.09	56.24	121.01	155.75
波长/m	120	3.37	0.97	1.14	3.40	5.28
波高/m	120	0.18	0.06	0.04	0.18	0.32
RI值	120	18.76	3.19	13.35	18.81	25.93

和 G2 波纹的 RI 值与观测区 RI 基本一致(图 2、3 和表 1)。

3.2 戈壁参考点风速风向

参考点 T1 和 T2 时段 0.05 m 和 0.22 m 高度的平均风速分别为 3.15 m·s⁻¹ 和 5.71 m·s⁻¹、3.67 m·s⁻¹ 和

6.63 m·s⁻¹，T2 风速大于 T1(图 4)。两个时段 0.22 m 高度的平均风速约为 0.05 m 的 1.8 倍，受地表粗糙度影响，戈壁近地表风速随高度变化剧烈，扭曲了对数线性风速廓线^[28,42]。两个时段两个高度的平均风向分别为 205.44°和 193.38°、195.63°和 182.7°(正北)，与三垄沙沙丘区合成输沙方向基本一致。此

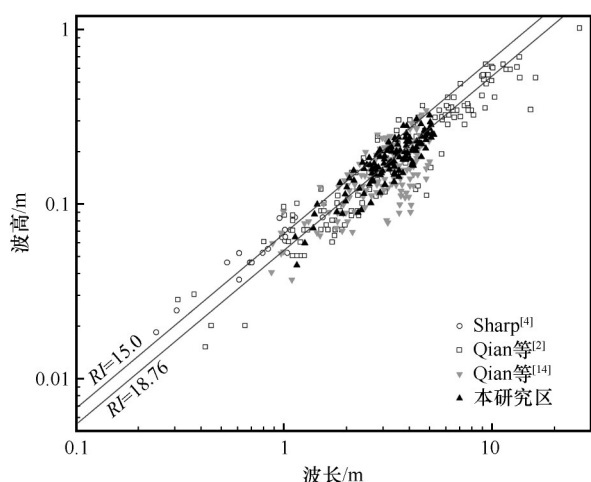


图3 砾波纹波长与波高之间的关系对比

Fig.3 The relationship between wavelength and height of granule ripples

外,两个时段两个高度的湍流强度分别为0.17和0.15、0.21和0.18,表明贴近地表(0.05 m)气流波动较大,气流方向的变化幅度也较大(图4)。

3.3 砾波纹表面风速和风向

3.3.1 风速

T1和T2两个时段0.05 m和0.22 m高度不同部位风速变化规律基本一致,P1至P3风速先增大再减小,P3至P5风速依次增大,表明气流沿迎风坡呈

加速过程,背风坡呈减速过程(图5),与其他沙丘表面的风速变化规律相似^[23,26,28]。特别指出,两个时段P6至P7,0.22 m高度风速略有增大,而0.05 m高度风速急剧减小,主要原因是G2波纹的波高较小(0.19 m),以及背风坡的坡度较为平缓(上部坡度10.65°,图2A),导致贴近地表气流发生分离,较高层则没有出现明显的气流分离现象。观察砾波纹表面两个高度的风速变化,发现P1、P4和P5在0.22 m高度的风速是0.05 m的1.48至2.00倍,P2和P6是1.10至1.14倍,P3和P7是1.22至4.45倍。由此可见,砾波纹背风坡两个高度的风速差异最大,波谷和迎风坡处次之,波峰最小,表明气流在迎风坡加速的过程中,受到地形的影响,起到了加速效应,贴近地表气流加速幅度大于较高层,使得波峰两个高度的气流速度更为接近。

与参考点相比,两个时段两个高度迎风坡(P1和P5)风速与参考点最为接近,相对差值-18%~7%,其次为波谷(P4),为-22%~-9%,波峰(P2和P6)最大,在-22%~72%,(图5),可以推断出从波谷至迎风坡气流速度逐渐恢复至接近参考点水平。此外,两个高度G1波峰处(P2)风速均远大于G2波峰(P6),说明随着砾波纹波长和波高增加,迎风坡的气流加速效果越显著,则波峰的风速越大。

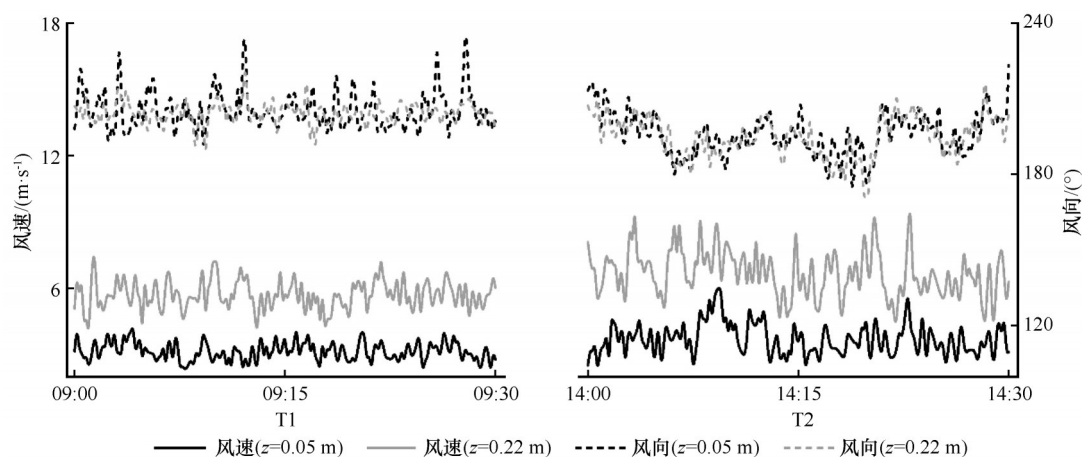


图4 戈壁参考点T1和T2时段平均风速和风向

Fig.4 T1 and T2 periods average wind speed and direction at the gobi reference points

3.3.2 风向

两个高度气流平均方向的差值在波谷、迎风坡、波峰、背风坡分别为8°~11°、7°~14°、2°~15°、23°~51°,气流方向在高度上存在明显差异(图6),已被前人通过实地观测和数值模拟所证实^[15]。其中,随高度的气流方向偏转在背风坡最为明显,波谷和迎

风坡次之,波峰最小。波峰气流方向偏转最小,由于该处是气流分离的起始点,气流开始从砾波纹表面分离,形成初始涡旋,但规模不足以引起显著方向变化。背风坡气流方向偏转最大,是由于回流区内气流分离所致^[43-45]。尽管波谷和迎风坡的气流受到砾波纹形态的影响,但它们并不像背风坡那样直

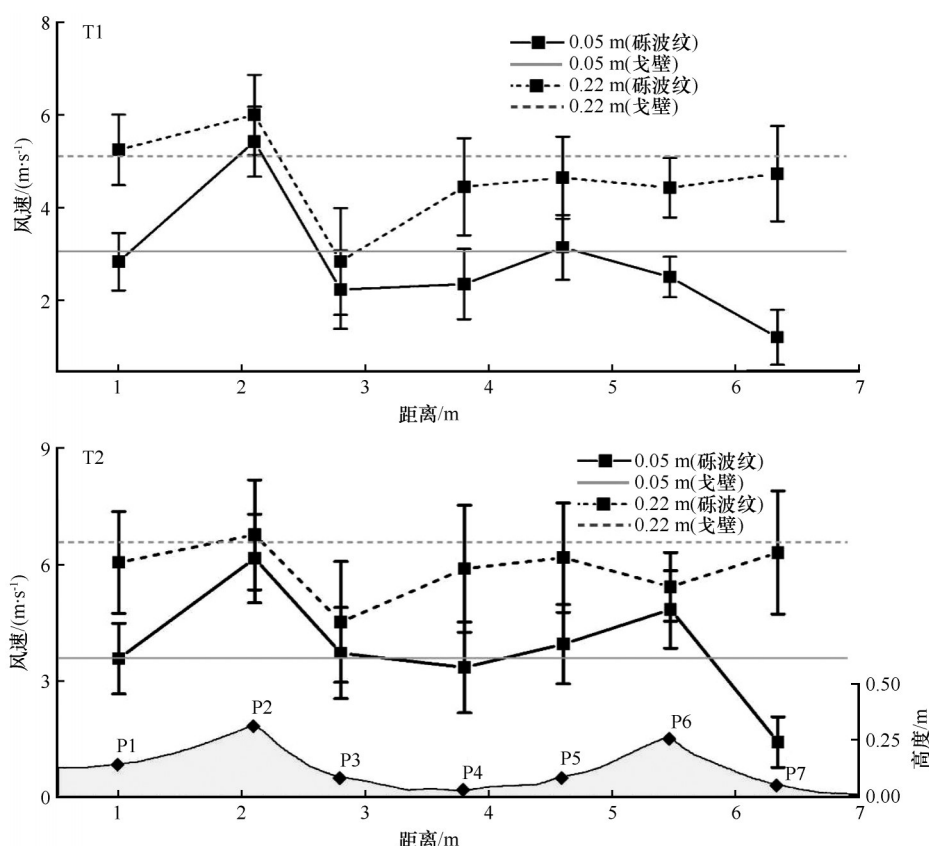


图5 砾波纹表面不同部位和戈壁参考点T1和T2时段平均风速

Fig.5 T1 and T2 periods average wind speed at different positions of the granule ripple surface and gobi reference point

接导致气流分离和涡流的形成^[22]。

与参考点相比,贴近地表(0.05 m)的气流方向沿波谷-迎风坡-波峰向西偏转,角度依次增大,为 $23^{\circ}\sim 35^{\circ}$,至波峰达到最大(气流方向 $218^{\circ}\sim 244^{\circ}$)。较高层(0.22 m)气流方向偏转的规律与贴近地表处相似,偏转角度仅 $6^{\circ}\sim 14^{\circ}$,波峰气流方向 $213^{\circ}\sim 232^{\circ}$ 。说明气流方向从波谷至波峰逐渐与脊线走向(155°)接近垂直。此外,背风坡气流受涡流影响,在两个高度与参考点差异均较大,尤其贴近地表处P7向西偏转 29° ,而P3向东偏转 38° 。此外,两个时段波谷气流方向与参考点最接近,迎风坡次之,波峰偏离角度最大(图6),说明气流方向从波谷至迎风坡逐渐趋近于参考点的水平。

3.4 砾波纹表面湍流强度

两个高度湍流强度在不同部位的变化趋势基本一致,沿波谷-迎风坡-波峰湍流强度依次降低,波峰至背风坡迅速增大,波峰湍流强度最小,背风坡处最大(图7),与前人对其他沙丘的研究结果相似^[28]。波谷和迎风坡贴近地表的湍流强度均大于较高层,差值分别为 $0.07\sim 0.08$ 和 $0.04\sim 0.07$,波峰处

差异最小(<0.04),表明砾波纹波谷-迎风坡-波峰湍流强度在高度上的差异逐渐减小。背风坡两个高度的湍流强度差异大,P3处相差很小($0.01\sim 0.03$);P7处贴近地表处远大于较高层($0.20\sim 0.27$),主要原因是G1砾波纹的高度和坡度远大于G2。此外,与参考点相比,两个时段两个高度砾波纹波峰处湍流强度与参考点最为接近,迎风坡和波谷次之,可以推断湍流强度从波谷至波峰逐渐趋近于参考点水平。

4 讨论

沙丘迎风坡受地形对气流的压缩,压力梯度增大,导致风速依次增大,地表剪切应力增强,同时随着气流加速,流线汇聚导致湍流强度逐渐减小^[23,26,28]。本研究中,从砾波纹波谷-迎风坡-波峰,气流流速呈增加趋势(图5),湍流强度依次减小(图7),与前人对其他沙丘的研究结果相符。受地形引导的效应,气流方向从砾波纹的波谷至坡峰逐渐偏转,趋于与脊线接近垂直(图6)。由于本研究区砾波纹背风坡上部坡度大($10.26^{\circ}\sim 24.62^{\circ}$),出现了与其他沙丘类似的气流分离现象,表现为风速低、风

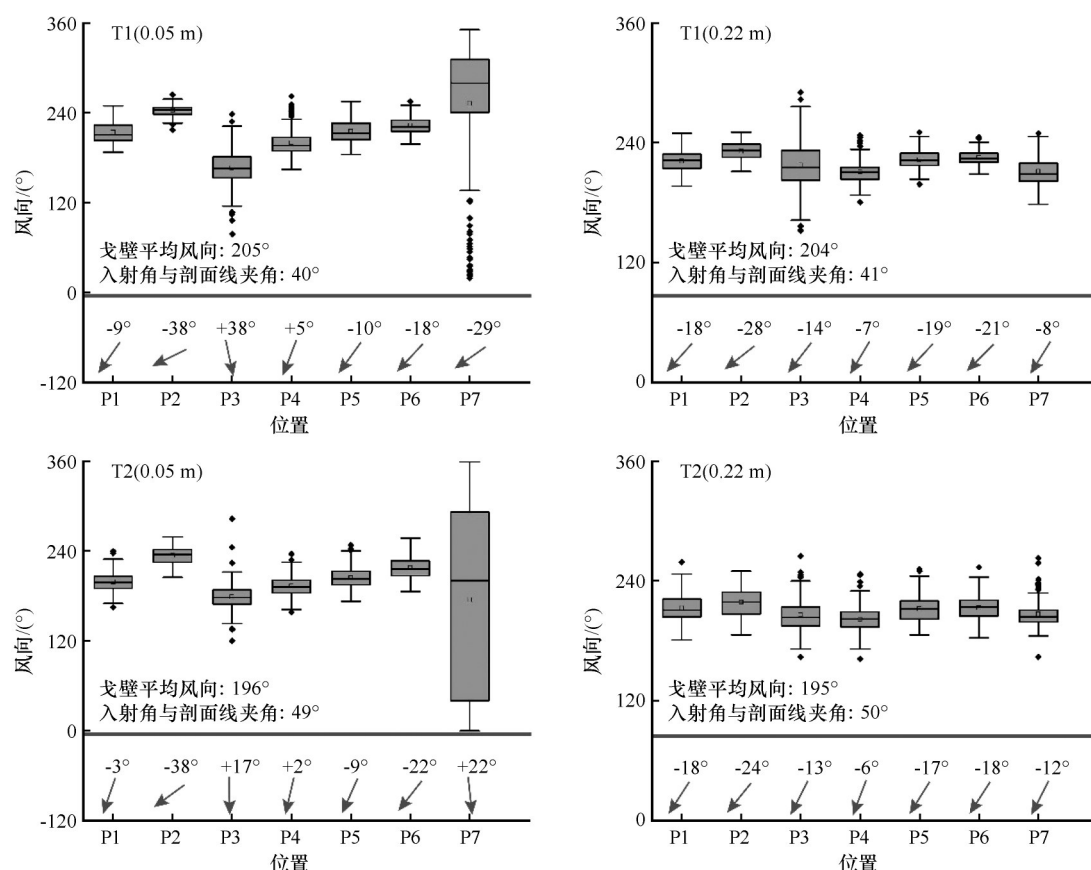


图6 砾波纹表面不同部位T1和T2时段风向统计(备注:西偏为负值,东偏为正值)

Fig.6 T1 and T2 periods wind direction statistics at different positions of the granule ripple surface.

Notes: A deflection to the west is considered negative, while a deflection to the east is positive

向变化率大以及湍流强度高(图8)。当气流经过背风坡并从波谷向波峰流动时,波谷至迎风坡的气流速度和方向逐渐接近参考点水平,表明在该段气流加速的过程中也伴随气流的恢复。值得注意的是,波谷至迎风坡的湍流强度相对较高,直到气流到达波峰,湍流强度才开始趋近于参考点水平,说明湍流的恢复相对滞后。

三垄沙地区颗粒的选择性输移模式(19.35%)主导了砾波纹双峰粒径的分布,而双模态(1.61%)和单模态(0.45%)输移模式对砾波纹的形态演化有显著影响^[14]。在选择性输移模式下,由于迎风坡气流加速,砾波纹波峰的强烈剪切作用导致大部分细颗粒被吹蚀,从而形成了以蠕移粗颗粒富集的保护层^[14,20]。在双模态输移模式下,粗颗粒从波谷或迎风坡开始蠕动,在强烈的地表剪切力作用下,部分粗颗粒被搬运至波峰处。其中一些到达波峰的粗颗粒会滑落至背风坡,另一部分则停留在波峰,使得砾波纹缓慢前移且高度逐渐增加,促进砾波纹发育。在单模态输移模式下,气流加速作用使得砾波

纹波峰处地表剪切应力极大,粗颗粒发生跳跃运动,一旦侵蚀大于沉积速率,保护层开始退化,砾波纹高度降低,严重时甚至会导致砾波纹的破坏。特别地,本研究发现迎风坡气流加速过程中,贴近地表(0.05 m)的气流加速比较高层(0.22 m)更强烈,这为地表粗细颗粒的运动提供了更多能量,增强了颗粒在3种输移模式下的动态,进而促进了气流对砾波纹形态的重塑过程。

当气流沿沙丘表面流动且方向偏转至与沙丘脊线垂直时,沙丘倾向于形成横向沙丘^[26]。本研究观察到砾波纹波谷至波峰的气流方向逐渐向西偏转,且贴近地表处的偏转角度大于较高层,使得波峰贴近地表的气流方向(218°~244°)更接近垂直于脊线(155°)。以上气流偏转影响脊线走向,促进砾波纹脊线呈近似平行排列。此外,气流经过砾波纹的背风坡并从波谷向波峰流动时,气流在加速的过程中也会逐渐恢复,砾波纹波长越大,则迎风坡的坡长也越长,这使得气流在迎风坡的加速程度更加显著,同时气流的恢复程度也更大(图5、8),这种加

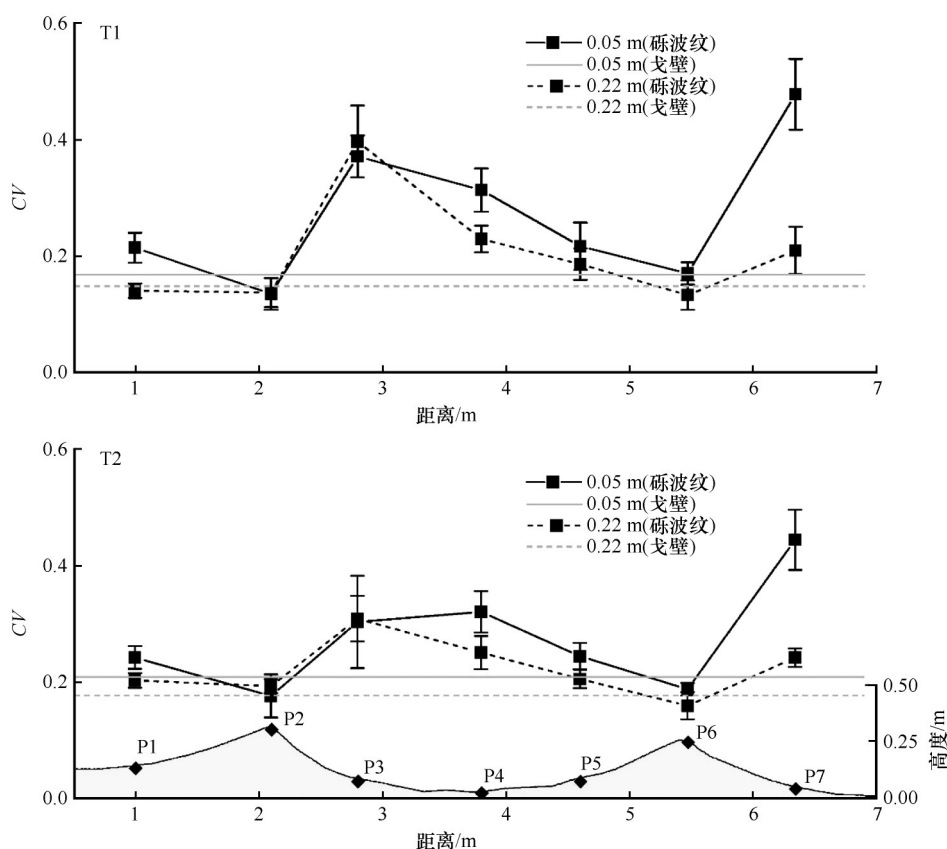


图7 砾波纹表面不同部位与戈壁参考点T1和T2时段湍流强度

Fig.7 T1 and T2 periods turbulence intensity changes at different positions of the granule ripple and gobi reference point

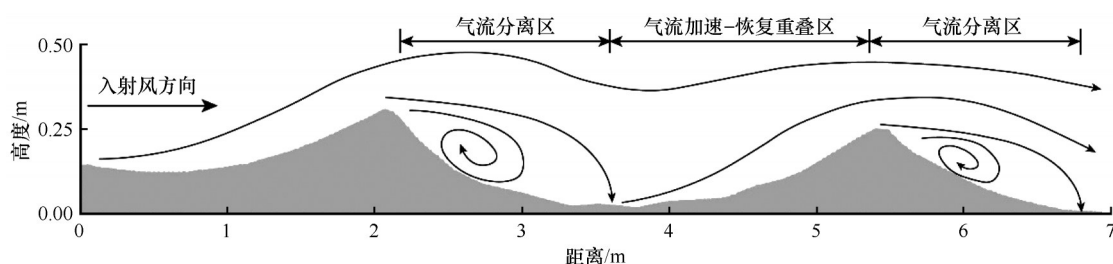


图8 砾波纹表面气流结构简图

Fig.8 Schematic diagram of airflow structure over the surface of the granule ripple

速和恢复的过程增加了颗粒从迎风坡向波峰搬运的能量,从而促进了粗颗粒在波峰的堆积,形成了更高的波峰。这与人研究相符,即砾波纹的波长和波高呈正相关关系,波长越大,波高越高^[15]。

5 结论

沙丘形态动力过程受控于地形、气流以及沙粒输移三者之间复杂的相互作用。气流是沙粒起动及输移的直接动力来源,对砾波纹形态塑造起至关重要的作用,目前缺乏砾波纹表面气流结构的精确测量。本研究采用无人机倾斜摄影测量手段和二维超声风速仪,对三垄沙地区典型砾波纹形态和表

面气流速度和方向开展了实地测量。结果表明:①研究区砾波纹脊线平均长度为7.93 m,走向为119.56°,大致平行排列,两侧坡面明显不对称,两坡面上部坡度均大于下部;砾波纹平均波长和高度分别为3.37 m和0.18 m,RI值为18.76。②波谷至波峰,气流速度逐渐增大,湍流强度依次减小,气流方向逐渐向西偏转,至波峰处趋于与脊线(走向155°)垂直;背风坡风速较低、风向变化大且湍流强度高,发生气流分离现象,出现涡流。③与较高层(0.22 m)相比,贴近地表处(0.05 m)波谷至波峰气流加速更为剧烈,向西偏转角度更大(约29°),贴近地表处气流的剧烈加速为颗粒运动提供了更多能量,促进了气

流对砾波纹形态的重塑过程,气流方向的偏转影响脊线走向,促进砾波纹脊线呈近似平行排列。④气流经过背风坡,从波谷向迎风坡流动时逐渐加速并恢复至参考点水平,而湍流强度仍较大,直到波峰处才趋近于参考点水平,表明湍流恢复相对滞后。⑤砾波纹波长越大,波峰处风速越大,有助于粗颗粒被搬运至波峰并堆积,促进砾波纹发育,从而形成更大更高的波纹。

本文仅就野外测量获得的砾波纹形态和表面气流结构进行了初步分析,并尝试探讨了地形和气流在砾波纹形态动力过程中的互馈机制。现实中,砾波纹形成演化受控于地形、气流和颗粒运动之间复杂的互馈关系,本研究还不足以全面阐释其内在机理。在本研究基础上,利用高精度测量设备收集的粗细颗粒运动数据,并结合砾波纹表面气流的数值模拟结果,对于深入理解砾波纹形态动力过程至关重要。

参考文献:

- [1] Yizhaq H, Kutra I, Isenberg O, et al. Evolution of megaripples from a flat bed[J]. *Aeolian Research*, 2012, 6: 1–12.
- [2] Qian G, Dong Z, Zhang Z, et al. Granule ripples in the Kumtagh Desert, China: morphology, grain size and influencing factors[J]. *Sedimentology*, 2012, 59(6): 1888–1901.
- [3] Fryberger S G, Hesp P, Hastings K. Aeolian granule ripple deposits, Namibia[J]. *Sedimentology*, 1992, 39(2): 319–331.
- [4] Sharp R P. Wind ripples[J]. *Journal of Geology*, 1963, 71: 617–636.
- [5] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. London, UK: Methuen, 1941: 265.
- [6] Ellwood J M, Evans P D, Wilson I G. Small scale aeolian bed-forms[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1975, 45(2): 554–561.
- [7] Sakamoto-Arnold C M. Eolian features produced by the December 1977 windstorm, southern San Joaquin Valley, California[J]. *The Journal of Geology*, 1981, 89(1): 129–137.
- [8] 杨根生, 丛自立. 鉴别风力的一种地貌标志: 砾浪[J]. *新疆环境保护*, 1984(4): 33–37.
- [9] Jerolmack D J, Mohrig D, Grotzinger J P, et al. Spatial grain size sorting in eolian ripples and estimation of wind conditions on planetary surfaces: application to Meridiani Planum, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2006, 111: E12S.
- [10] Isenberg O, Yizhaq H, Tsoar H, et al. Megaripple flattening due to strong winds[J]. *Geomorphology*, 2011, 131: 69–84.
- [11] Wang L, Xiao F, Dong Z, et al. Megaripple stripes in the Qaidam Basin, China: morphology, grain size and sedimentary characteristics[J]. *Geomorphology*, 2024, 461: 109301.
- [12] 董治宝, 吕萍, 李超, 等. 火星大沙波纹特征及其形成机制[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(10): 1006–1015.
- [13] 钱广强, 杨转玲, 邢学刚, 等. 砾波纹地表风沙颗粒蠕移特征及其地貌学意义[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(6): 1–12.
- [14] Qian G, Yang Z, Xing X, et al. Seasonal morphological evolution and migration of granule ripples in the Sanlongsha Dune Field, northern Kumtagh Sand Sea, China[J]. *Geomorphology*, 2024, 444: 108951.
- [15] Yizhaq H, Kutra I. Longevity of aeolian megaripples[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 422: 28–32.
- [16] Milana J P. Largest wind ripples on Earth? [J]. *Geology*, 2009, 37(4): 343–346.
- [17] Foroutan M, Steinmetz G, Zimbelman J R, et al. Megaripples at Wau-an-Namus, Libya: a new analog for similar features on Mars[J]. *Icarus*, 2019, 319: 840–851.
- [18] Yizhaq H, Isenberg O, Wenkart R, et al. Morphology and dynamics of aeolian mega-ripples in Nahal Kasuy, southern Israel[J]. *Israel Journal of Earth Sciences*, 2009, 57(3): 149–165.
- [19] Gough T R, Hugenholtz C H. Statistical perspectives on the ripple index from a case study of aeolian megaripples[J]. *Geomorphology*, 2024, 447: 109025.
- [20] Tholen K, Phtz T, Yizhaq H, et al. Megaripple mechanics: bimodal transport ingrained in bimodal sands[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1–11.
- [21] Qian G, Yang Z, Tian M, et al. From dome dune to barchan dune: airflow structure changes measured with particle image velocimetry in a wind tunnel[J]. *Geomorphology*, 2021, 382: 107681.
- [22] Hesp P A, Smyth T A, Nielsen P, et al. Flow deflection over a foredune[J]. *Geomorphology*, 2015, 230: 64–74.
- [23] Qian G, Dong Z, Luo W, et al. Airflow patterns upwind of obstacles and their significance for echo dune formation: a field measurement of the effects of the windward slope angle[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(4): 545–553.
- [24] Dong Z, Qinan G, Lu P, et al. Turbulence fields in the lee of two-dimensional transverse dunes simulated in a wind tunnel[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(2): 204–216.
- [25] Davidson S G, Hesp P A, Dasilva M, et al. Flow dynamics over a high, steep, erosional coastal dune slope[J]. *Geomorphology*, 2022, 402: 108111.
- [26] Zhang Z, Dong Z. Field measurements of crestal flow direction and turbulent flow over two transverse dune ridges[J]. *Geomorphology*, 2021, 383: 107699.
- [27] 潘凯佳, 张正德, 梁爱民. 反向沙丘近地层气流变化及其对沙丘形态的影响[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(2): 1–8.
- [28] Weaver C M, Wiggs G F S. Field measurements of mean and turbulent airflow over a barchan sand dune[J]. *Geomorphology*, 2011, 128: 32–41.
- [29] 罗霖炎, 高鑫, 赵永成. 新月形沙丘表面流场特征[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(4): 41–54.

- [30] Baddock M C, Wiggs G F, Livingstone I A. 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.
- [31] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 横向沙丘背风侧气流重附风洞模拟[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(1): 16–20.
- [32] Wang P, Zhang J, Huang N. A theoretical model for aeolian poly-disperse-sand ripples [J]. *Geomorphology*, 2019, 335: 28–36.
- [33] Manukyan E, Prigozhin L. Formation of aeolian ripples and sand sorting [J]. *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2009, 79(3): 31303.
- [34] Yizhaq H. A simple model of aeolian megaripples [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2004, 338(1/2): 211–217.
- [35] Yang Z, Qian G, Dong Z, et al. Migration of barchan dunes and factors that influence migration in the Sanlongsha dune field of the northern Kumtagh Sand Sea, China [J]. *Geomorphology*, 2021, 378: 107615.
- [36] 郭酉元, 钱广强, 杨转玲, 等. 库姆塔格沙漠三垄沙地区砾波纹形态、粒度及环境风况[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(4): 37–45.
- [37] 钱广强, 杨转玲, 董治宝, 等. 基于多旋翼无人机倾斜摄影测量的沙丘三维形态研究[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(1): 18–25.
- [38] Solazzo D, Sankey J B, Sankey T T, et al. Mapping and measuring aeolian sand dunes with photogrammetry and LiDAR from unmanned aerial vehicles (UAV) and multispectral satellite imagery on the Paria Plateau, AZ, USA [J]. *Geomorphology*, 2018, 319: 174–185.
- [39] Sullivan R, Baker M, Newman C, et al. The aeolian environment in Glen Torridon, Gale crater, Mars [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, 127(8): e2021JE007174.
- [40] 邹桐, 杨转玲, 韦锦芝, 等. 柴达木盆地西南缘新月形沙丘移动特征及其影响因素[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(1): 212–221.
- [41] Landry W, Werner B T. Computer simulations of self-organized wind ripple patterns [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1994, 77(1/3): 238–260.
- [42] Frank A J, Kocurek G. Airflow up the stoss slope of sand dunes: limitations of current understanding [J]. *Geomorphology*, 1996, 17: 47–54.
- [43] Smyth T A G, Jackson D, Cooper A. Airflow and aeolian sediment transport patterns within a coastal trough blowout during lateral wind conditions [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(14): 1847–1854.
- [44] Bauer B O, Davidson Arnott R G, Walker I J, et al. Wind direction and complex sediment transport response across a beach-dune system [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(15): 1661–1677.
- [45] Walker I J, Hesp P A, Davidson-Arnott R G, et al. Responses of three-dimensional flow to variations in the angle of incident wind and profile form of dunes: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada [J]. *Geomorphology*, 2009, 105: 127–138.

Morphology and surface flow patterns of granule ripples in the Sanlongsha dune field of the northern Kumtagh Sand Sea

Yang Zhuanling¹, Qian Guangqiang², Xing Xuegang¹, Dong Zhibao³, Guo Youyuan²

(1.School of Geography and Resource Science, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China; 2.Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3.Planetary Aeolian Research Institute, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Granule ripples are a type of small aeolian bedform, and airflow serves as the direct source of power for the initiation and transportation of sand particles, playing a crucial role in the morphological development. Owing to the challenges of landform scale and the constraints of available technology, there is currently a lack of accurate measurements regarding the airflow structure on the surface of these dunes. This study conducted field measurements of the morphology and surface airflow of typical granule ripples in the Sanlongsha area, analyzed the morphological characteristics and surface airflow structure, and preliminarily explored the feedback mechanism between airflow and terrain. The results indicate: (1) The granule ripples are generally aligned in parallel, featuring markedly asymmetrical slopes on both sides, with a wavelength and height measuring 3.37 m and 0.18 m, respectively, and a ripple Index (RI , wavelength/height) of 18.76. (2) On the windward slope, the airflow velocity gradually increases, the turbulence intensity decreases sequentially, the airflow direction deflects to the west, and at the crest, it is nearly perpendicular to the crest line; on the leeward slope, the wind speed is lower, the wind direction changes significantly, and the turbulence intensity is high, with airflow separation and the appearance of vortices. (3) Compared to the upper level (0.22 m), the airflow on the windward slope accelerates more violently and deflects to a greater angle to the west at a closer distance near the ground (0.05 m). (4) The larger the wavelength, the greater the wind speed at the crest, which helps to transport coarser particles to the crest, promoting the development of granule ripples and the formation of larger and higher ripples. This exploration of how morphology affects airflow structure and how airflow, in turn, reshapes the granule ripple morphology, helps to reveal the intrinsic mechanisms of granule ripple morphological dynamics and understand the formation and development process of transverse ridges on Mars.

Key words: granule ripple; morphology; airflow structure; Sanlongsha