

基于数字图像的砾波纹表面沉积物形貌特征研究

吴源源¹, 安 容¹, 杨转玲^{1,2,3}, 董慧林^{1,2,3*}

¹贵州师范学院地理与资源学院, 贵州 贵阳

²贵州师范学院贵州省流域地理国情监测重点实验室, 贵州 贵阳

³贵州师范学院贵州山地研究院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年4月23日; 录用日期: 2025年6月5日; 发布日期: 2025年6月18日

摘 要

库姆塔格沙漠北部的三垄沙地区发育有典型的砾波纹, 属于微风沙地貌形态。本研究以三垄沙地区典型砾波纹表面的粗颗粒为研究对象, 借助数字图像处理技术, 通过现场拍摄与室内图像处理相结合的方式, 提取了砾波纹表面不同部位粗颗粒砾石的覆盖度、粒径、磨圆度、形状比率等参数, 对其形貌特征进行了定量分析。结果表明, 该区域砾波纹表面不同部位的粗颗粒砾石覆盖度介于27%~88%, 以中等覆盖度为主; 平均粒径介于1.40~2.19 mm, 属于极粗沙到极细砾的范围, 且分选性差异较大, 不同部位粗颗粒的粒度频率曲线多呈窄至宽峰态分布。砾波纹表面不同部位粗颗粒的圆度均值介于0.68~0.75, 形状比率变化范围为1.06~3.25, 均值介于1.30~1.41, 表明砾波纹表面的粗颗粒大多呈近椭圆或略呈长条状, 以上研究结果可以为追溯戈壁物源区以及反演沉积物的搬运堆积过程提供有力参考。

关键词

数字图像, 库姆塔格沙漠, 砾波纹, 沉积物形貌

Based on Digital Imaging Morphological Characteristics of Granule Ripple Surface Sediments

Yuanyuan Wu¹, Rong An¹, Zhuanling Yang^{1,2,3}, Huilin Dong^{1,2,3*}

¹College of Geography and Resources, Guizhou Education University, Guiyang Guizhou

²Guizhou Provincial Key Laboratory of Geographic State Monitoring of Watershed, Guizhou Education University, Guiyang Guizhou

³Institute of Guizhou Mountain, Guizhou Education University, Guiyang Guizhou

*通讯作者。

文章引用: 吴源源, 安容, 杨转玲, 董慧林. 基于数字图像的砾波纹表面沉积物形貌特征研究[J]. 地理科学研究, 2025, 14(3): 531-540. DOI: 10.12677/gser.2025.143053

Abstract

The Sanlongsha area in the northern part of the Kumtagh Desert features typical granule ripples, which are a type of small aeolian bedform. This study focuses on the coarse grains on the surface of the typical gravel ripples in the Sanlongsha area. By combining field photography with indoor image processing using digital image processing techniques, we extracted parameters such as the coverage, grain size, roundness, and shape ratio of coarse gravel on different parts of the granule ripple surface, and conducted a quantitative analysis of their morphological characteristics. The results show that the coverage of coarse gravel on different parts of the granule ripple surface in this area ranges from 27% to 88%, with a predominance of moderate coverage. The average grain size ranges from 1.40 to 2.19 mm, falling within the range of very coarse sand to very fine gravel, and there is a significant difference in sorting. The grain size frequency curves of coarse grains in different parts mostly exhibit a distribution ranging from narrow to wide peaks. The average roundness of coarse grains on different parts of the gravel ripple surface ranges from 0.68 to 0.75, and the shape ratio varies from 1.06 to 3.25, with an average ranging from 1.30 to 1.41, indicating that the coarse grains on the gravel ripple surface are mostly nearly elliptical or slightly elongated. The research results can provide a solid reference for tracing the provenance of the Gobi and reconstructing the transportation and accumulation processes of sediments.

Keywords

Digital Image, Kumtagh Desert, Granule Ripple, Sediment Morphology

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

风成波纹是风沙地貌的一种，在风沙地貌中十分常见，而根据波纹的颗粒大小，又可分为沙波纹与砾波纹[1]。砾波纹是一种表面被粗沙细砾覆盖、呈不对称波状起伏、尺度显著大于沙波纹的微地貌形态[2]。砾波纹的分布十分广泛，在我国，砾波纹主要分布在干旱和半干旱地区的沙漠和盆地中，特别是在风力作用强烈、粗颗粒物补给丰富的区域，比如柴达木盆地、库姆塔格沙漠。

沉积物是风沙地貌形成与发育的物质基础[3]，对于风沙地貌研究的重要性不言而喻，沉积物粒度特征在沙丘形态发育和区域风沙地貌演化过程中起决定性作用。从区域尺度来看，沉积物粒度参数的空间差异直接反映了沉积物所经历的搬运、堆积过程，甚至对沙丘物质来源具有一定指示意义[4]。

前者对沙漠地表沉积物沙子粒度的研究方法，常采用的是传统的沉降法或者筛析法。由于砾波纹表面颗粒粒径和形态差异较大，采用传统的筛分法难以进行精确的粒级分离。以往关于砾石形态参数和砾石覆盖度的确定，通常采用目视方法或网格化测量进行，因而存在经验和统计误差[5]。为了克服以上问题，本研究选取库姆塔格沙漠北部三垄沙地区的砾波纹，采用数字照相技术，并通过数字图像处理，定量获取了砾波纹表面不同部位的砾石形貌参数，以期深入理解砾波纹表面物质组成，对于认识不同类型砾波纹的形成发育过程及其表面风动力过程有重要指示意义。

2. 研究区域与方法

2.1. 研究区概况

库姆塔格沙漠位于塔里木盆地东部，南临阿尔金山北麓，北至阿奇克堑谷，西抵罗布泊洼地，东部可延伸至甘肃西部的敦煌地区，地理范围 39°07'50"~41°00'03" N、89°57'49"~94°54'08" E，东西跨度 280 km，南北宽约 120 km，总面积约 $2.29 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是中国第六大沙漠[6]-[8]。三垄沙沙丘区(40°30'~41°02' N, 92°50'~93°16' E)位于库姆塔格沙漠北部，穿越阿奇克堑谷东端与沙漠主体相连[4]，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 2728 km² [9] (图 1)，研究区地表覆盖大量棱角状至次棱角状砾石，发育典型风成砾波纹地貌。

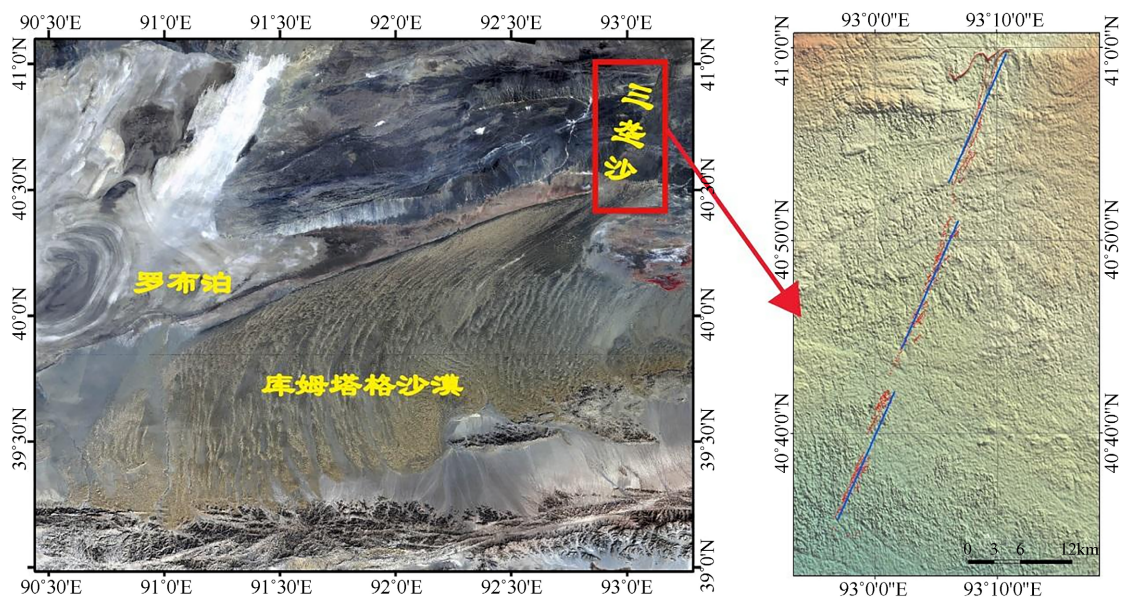


Figure 1. Geographical location of the study area
图 1. 研究区域地理位置

2.2. 研究方法

本研究中的图像数据来源于野外考察过程中，选取库姆塔格沙漠三垄沙地区无人扰动且砾波纹形态完整的典型区域，沿主导风向对不同地理位置表面采用标准镜头和小光圈的数码相机进行拍照取样。拍摄过程中，选定无干扰的砾波纹表面，放置具有毫米级精度的刻度标尺，标尺轴向与主风向保持平行。距地表 0.5~1 m 高度垂直拍摄，以保证拍摄的数字图像涵盖足够的区域大小和颗粒。对野外拍摄的砾波纹地表图像，在室内采用 Image J 软件进行预处理。数字图像首先经过亮度、对比度和锐化处理，以获得良好清晰度和易于识别的砾石颗粒边缘[5]，采用徒手选择工具对颗粒边缘进行跟踪，形成完全闭合的颗粒边缘轮廓，然后使用软件的自动测量功能对砾石颗粒进行测量统计，本研究选取的数字图像测量参数和计算方法见表 1。

Table 1. Statistical method for coarse particle shape parameters
表 1. 粗颗粒形状参数统计方法

参数	计算方法	说明
颗粒面积(A)	软件自动统计所选颗粒包含的像素面积并转换为实际面积	以 mm ² 表示

续表

颗粒周长(P)	软件自动统计所选颗粒边缘像素长度并转换为实际长度	以 mm 表示
几何平均粒径(D_{geo})	$D_{geo} = \sqrt{D_{max} \cdot D_{min}}$	单个颗粒的长轴 D_{max} (最大直径)与短轴 D_{min} (最小直径)
粒径颗粒圆度(C)	$C = \frac{4\pi \times A}{P^2}$	正圆为 1.0, 该值越小表明颗粒越扁
形状比率(AR)	$AR = \frac{l_{max}}{l_{min}}$	颗粒长轴 l_{max} 与短轴 l_{min} 之比
磨圆度(Rd)	$Rd = \frac{4 \times A}{\pi \times l_{max}}$	颗粒的磨圆程度, 圆球形颗粒为 1.0
砾石覆盖度(CG)	$CG = \frac{AP}{AT} \times 100\%$	粗颗粒所占面积(AP)与量算区域总面积(AT)之比

3. 结果与分析

3.1. 砾波纹表面粗颗粒覆盖度

砾石覆盖度是沙漠表面最为直观的特征之一，也是沙漠发育程度的表征，研究区砾波纹表面不同部位粗颗粒覆盖度呈显著空间分异(如图 2)，砾石覆盖度介于 27%~88%，均值为 66%。其中顶部因风蚀最强，持续风扬作用优先带走细颗粒，粗颗粒因起动风速较高滞留，覆盖度达 88%；迎风坡受剪切力主导，细颗粒侵蚀使粗颗粒富集；背风坡因风力遮蔽，细颗粒沉积通量增加，粗颗粒覆盖度锐减至 27%；槽部地形凹陷形成局部流场减速区，搬运能力下降促使粗颗粒相对富集。这种分异主要由风动力分选控制。

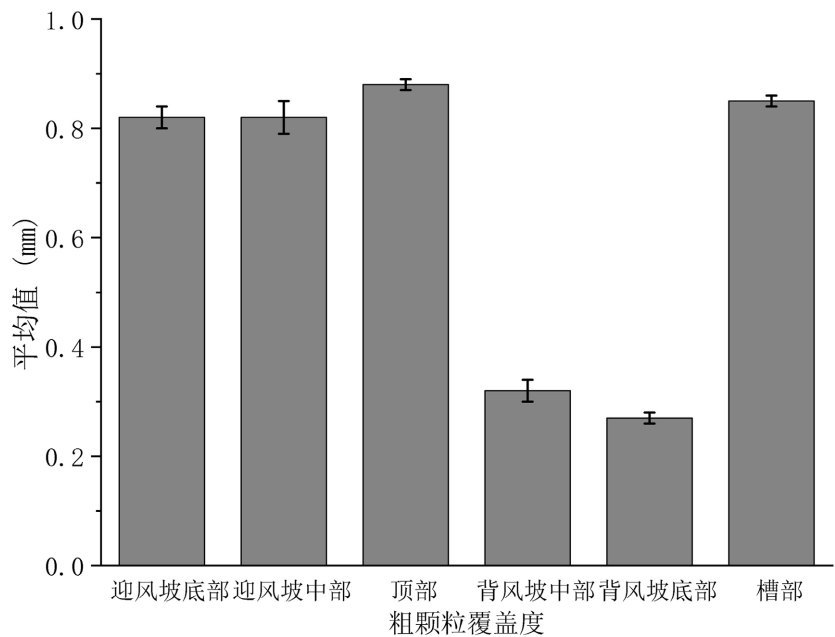


Figure 2. Coverage of coarse gravel in different parts
图 2. 不同部位粗颗粒砾石覆盖度

为清晰显示砾波纹表面粗颗粒不同面积的砾石数量,将颗粒面积以 0.5 间距进行分级,统计每级砾石数量占图像中砾石总量的百分比(图 3 和图 4)。结果显示,迎风坡底部至顶部粗颗粒面积集中于 2~5 mm²,占比分别为 66.62%、68.19%、74.10%,呈明显粗化趋势;背风坡呈双峰分布,2~5 mm² 占主导(>60%),但 1~2 mm² 细颗粒占比亦超 20%,反映弱风环境下细颗粒局部富集特征;槽部粗颗粒面积分布曲线平缓,集中于 2~8 mm² 宽幅范围,因槽部地形凹陷导致风速降低,搬运能力下降,粗/细颗粒在此发生复合堆积。

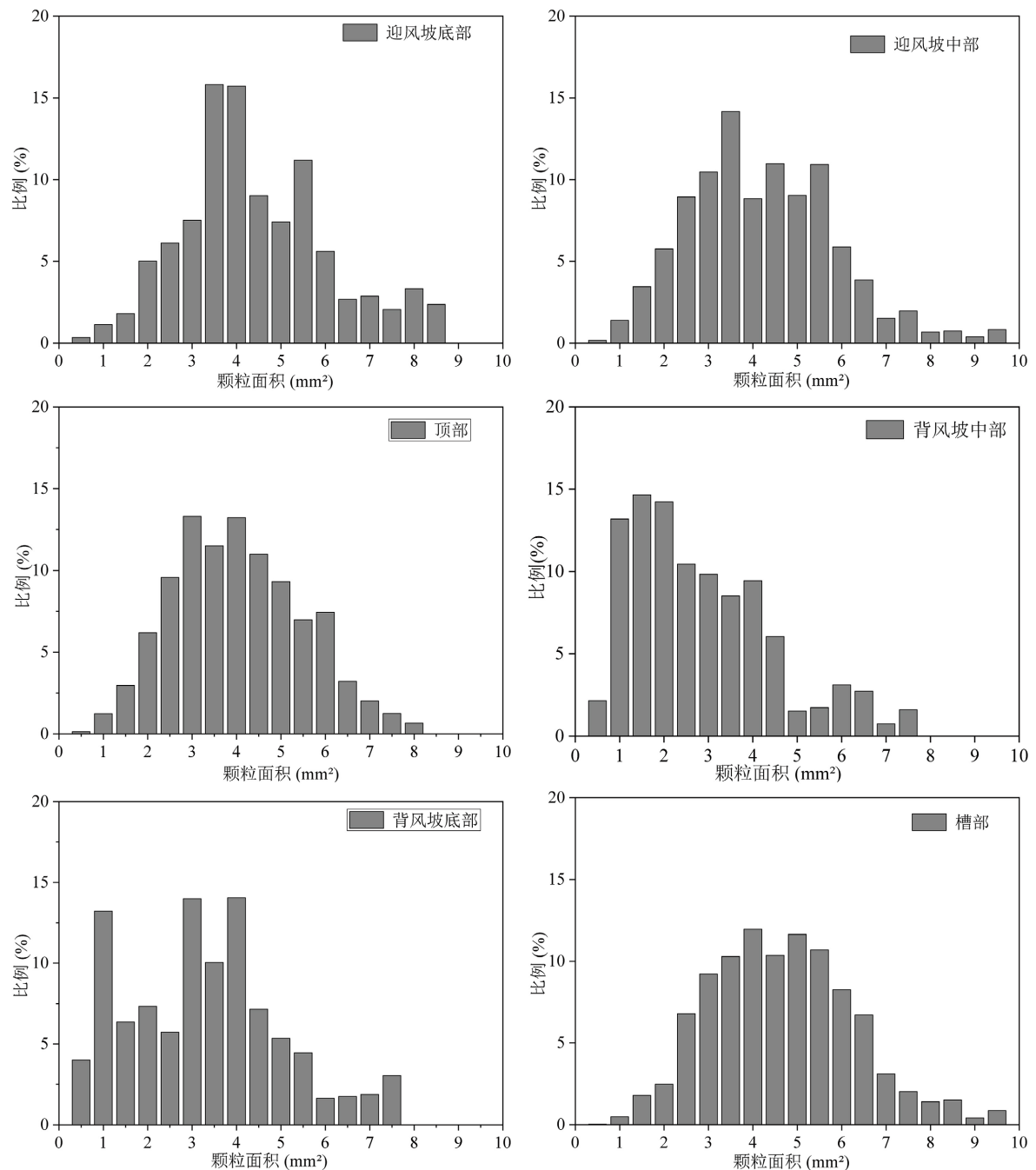


Figure 3. Proportion of coarse particle area in different parts
图 3. 不同部位粗颗粒颗粒面积比例

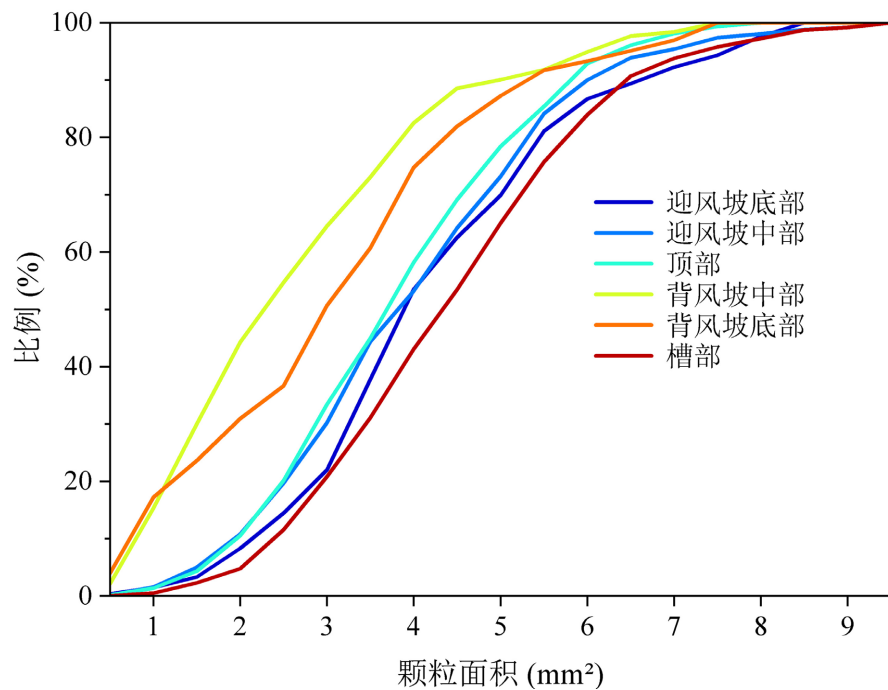


Figure 4. Ratio curve of coarse particle area in different parts
图 4. 不同部位粗颗粒面积比例曲线

3.2. 砾波纹表面粗颗粒粒度特征

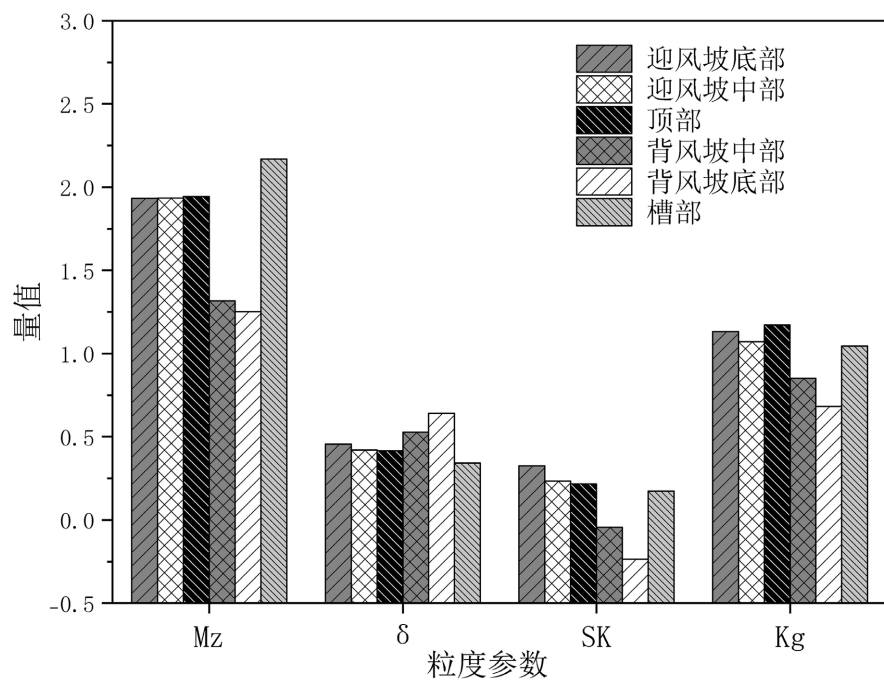


Figure 5. Particle size parameters of coarse particles in different parts
图 5. 不同部位粗颗粒的粒度参数

研究区砾波纹表面粗颗粒粒度参数空间分异显著(图 5), 平均粒径介于 1.40~2.19 mm (极粗沙 - 极细

砾), 槽部达到极细砾极(2.19 mm), 迎风坡底部至顶部稳定于 1.98~1.99 mm (极粗沙), 背风坡显著细化(1.40 mm)。分选性差异较大, 槽部分选极好(均值 0.34), 顶部和迎风坡中部分选较好(均值 0.42), 迎风坡底部(0.46)优于背风坡(0.53~0.64)。背风坡中部分选较底部提升明显, 反映坡面动力梯度变化特征。偏度特征显示: 无负偏分布, 迎风坡中部、顶部及槽部正偏, 底部极正偏, 背风坡近对称。峰度均值为 0.68~1.17, 频率曲线以窄至宽峰态为主。这一空间分异说明, 砾波纹的表面沉积物的粒度特征与风况密切相关。郭等[3]的研究表明, 研究区各季节风向变率属低变率风况, 且主风向(北北东)与砾波纹脊线垂直, 表明砾波纹具有横向风成地貌的特征, 这对于揭示砾波纹的形态动力过程具有重要的参考价值。

沙粒级配可以直观地反映风成沙的主要粒径组以及不同粒径组沙粒的相对含量[10]。据 Udden-Wentworth 粒级划分方法, 统计了砾波纹表面不同部位粗颗粒沙粒级配(表 2)。三垄沙砾波纹粗颗粒粒级分布集中, 未呈现连续分布。迎风坡底部至顶部由极细砾(2~4 mm)与极粗沙(1~2 mm)主导, 合计占比 94.26%~95.94%, 仅含少量粗沙(0.5~1 mm, 4.06%~5.59%), 顶部细砾与中沙完全缺失。背风坡呈三组分特征: 中部极细砾(14.47%)、极粗沙(60.07%)、粗沙(25.46%), 底部含微量中沙(0.24%)。槽部极细砾与极粗沙占 98.97%, 粗沙仅 1.03%, 无细砾及中沙。区域粒级分布差异反映风动力分选空间异质性: 迎风坡强风筛选颗粒稳定富集, 背风坡弱风混合沉积, 槽部地形减速致粗颗粒滞留。

Table 2. Grain size distribution characteristics of coarse particles in different parts
表 2. 不同部位粗颗粒的沙粒级配特征

粒级	沙粒级配/%					
	迎风坡底部	迎风坡中部	顶部	背风坡中部	背风坡底部	槽部
细砾	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
极细砾	52.87	49.44	48.96	14.47	20.24	62.78
极粗沙	41.39	46.50	46.57	60.07	41.46	36.19
粗沙	5.59	4.06	4.47	25.46	38.05	1.03
中沙	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00

三垄沙地区砾波纹表面粗颗粒粒度参数呈现显著的空间分异: 粗颗粒平均粒径介于 1.40~2.19 mm (极粗沙 - 极细砾)。空间分布上, 迎风坡底部平均粒径至背风坡底部呈规律性递减趋势, 槽部平均粒径最大(2.19 mm), 背风坡最小(1.40 mm); 分选性差异明显: 槽部分选极好(0.34), 迎风坡分选较好(0.42~0.46), 背风坡分选较弱(0.53~0.64)。偏度以正偏为主, 迎风坡底部呈极正偏, 背风坡近对称。峰度均值为 0.68~1.17, 槽部峰态尖锐(1.17), 背风坡底部宽缓(0.68), 反映不同部位沉积物频率曲线形态差异: 槽部窄峰态指示粒度高度集中, 背风坡宽峰态显示混合沉积特征。

3.3. 砾波纹表面粗颗粒形貌特征

砾石磨圆度在一定程度上反映砾石的搬运与沉积过程。应用表 1 中的公式计算砾石颗粒的圆度, 求同一位砾石圆度平均值, 代表该位置砾石圆度均值[11]; 研究区砾波纹六个部位粗颗粒平均圆度范围 0.25~0.92 (表 3)。背风坡底部圆度最小, 其他部位差异较小。圆度分级统计显示(图 6): 迎风坡底部至顶部 0.7~0.75 区间砾石占比持续增加(21.30%~23.14%); 背风坡中部圆度分异明显, 0.75~0.8 (24.36%)与 0.8~0.85 (24.63%)区间占比突出; 槽部以 0.7~0.75 砾石为主(22.64%)。全区域圆度分布集中于中高值(0.7~0.85 占比普遍超 20%)。磨圆度的差异在空间上的变化, 主要体现了其成因类型的差异, 因而砾石形貌特征可为反演沙丘原始沉积物的搬运、堆积过程和判别其物源区提供参考。

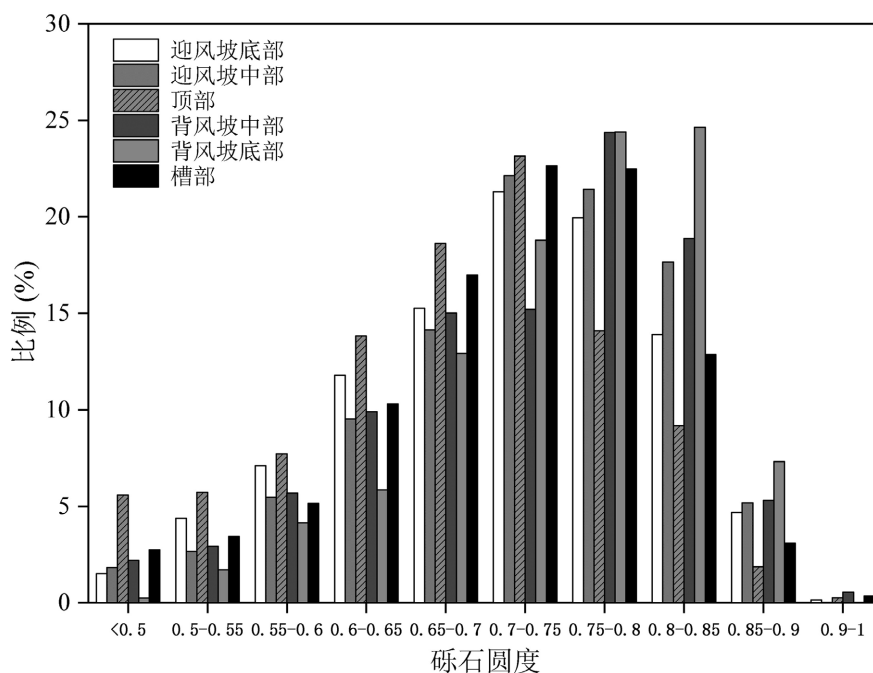


Figure 6. Proportion of roundness of coarse gravel in different parts
图 6. 不同部位粗颗粒砾石圆度比例

Table 3. Roundness of coarse gravel at different parts of gravel ripple surface
表 3. 砾波纹表面不同部位粗颗粒砾石圆度

	砾石圆度					
	迎风坡底部	迎风坡中部	顶部	背风坡中部	背风坡底部	槽部
平均值	0.71	0.73	0.68	0.72	0.75	0.71
最小值	0.39	0.43	0.35	0.36	0.25	0.35
最大值	0.90	0.90	0.90	0.91	0.90	0.92

三垄沙砾波纹粗颗粒形状比率呈显著空间分异(表 4), 均值为 1.30~1.41。迎风坡自底部向顶部形状比率先降后升(底部 1.35~顶部 1.41), 背风坡自顶部至槽部亦呈先减后增趋势。不同部位粗颗粒形状比率的空间分异反映了不同地貌部位搬运能量、沉积动力过程的差异。

Table 4. Ratio of coarse gravel shape at different parts of gravel ripple surface
表 4. 砾波纹表面不同部位粗颗粒砾石形状比率

	砾石形状比率					
	迎风坡底部	迎风坡中部	顶部	背风坡中部	背风坡底部	槽部
平均值	1.35	1.33	1.41	1.34	1.30	1.35
最小值	1.07	1.08	1.08	1.07	1.08	1.06
最大值	2.20	2.14	2.83	2.54	3.25	2.64

砾波纹表面砾石形貌特征(圆度、形状比率)能有效反演其侵蚀 - 搬运过程及沉积环境[12]。研究显示, 粗颗粒圆度介于 0.25~0.92 (均值 0.68~0.75), 形状比率 1.06~3.25 (均值 1.30~1.41), 整体呈近椭圆或略长

条状。背风坡圆度与形状比率差异显著高于其他部位, 暗示其受复杂动力作用。

3.4. 砾波纹表面粗颗粒各参数之间的关系

砾波纹表面粗颗粒形貌参数间关系分析表明(图 7), 面积与周长、长度等参数间呈现显著正相关($R = 0.87 \sim 0.99$), 表明其存在显著线性关联。粒径与面积等参数均呈显著相关性($R^2 > 0.90$), 但与磨圆度、形状比率相关性显著偏弱 ($R^2 < 0.1$)表明粒径可作为综合表征颗粒尺寸特征的有效指标。圆度与形状比率(平均 $R^2 = 0.54$)、磨圆度(平均 $R^2 = 0.73$)存在中等相关, 而磨圆度与形状比率呈现强协同变化趋势($R^2 > 0.80$)。

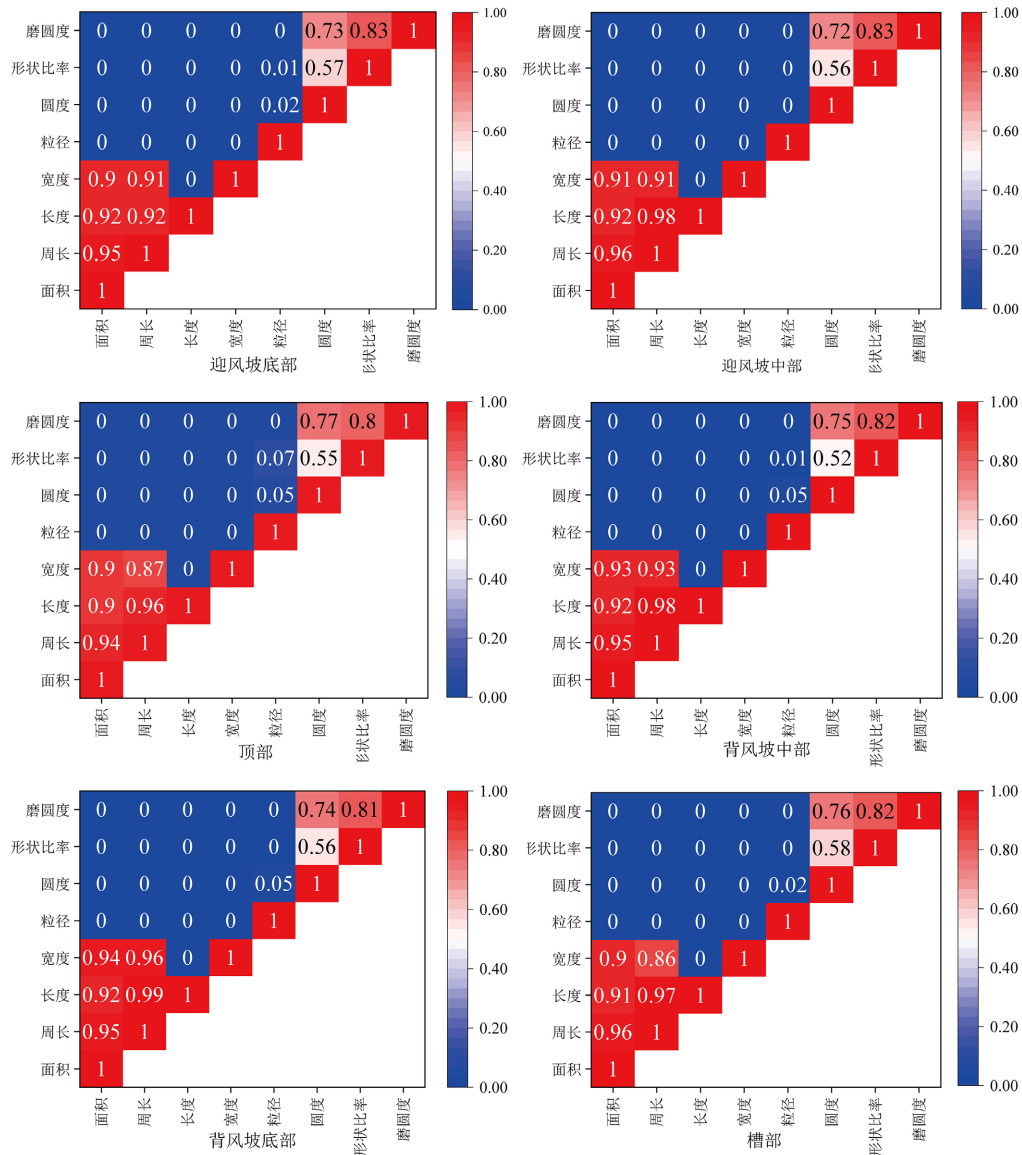


Figure 7. Relationship between coarse particle parameters in different parts

图 7. 不同部位粗颗粒参数之间的关系

4. 结论

本文采用数字图像量算方法, 分析了库姆塔格沙漠三垄沙地区砾波纹表面粗颗粒的形貌特征。不同

部位粗颗粒覆盖度值介于 27%~88%，砾石平均粒径为 1.40~2.19 mm，属于极粗沙到极细砾；沙粒分选性差异较大，偏度变化范围为-0.04~0.33，峰度平均值介于 0.68~1.17，窄至宽峰态分布。砾石粒度组成以极细砾和极粗沙为主，未呈现连续分布。砾石圆度均值介于 0.68~0.75，形状比率变化范围为 1.06~3.25，多为近椭圆或略呈长条状。砾波纹表面不同部位粗颗粒参数之间相关性差异显著。本文对库姆塔格沙漠三垄沙地区砾波纹表面粗颗粒的形貌特征进行了研究，系统性探讨了砾波纹不同地貌部位粗颗粒形态参数的空间分异规律，初步揭示了形态参数间的相关性，为砾波纹地貌发育过程研究提供理论支撑。

基金项目

贵州师范学院大学生创新创业训练计划项目(省级)(S202314223109)；贵州师范学院科研项目(2021BS015, 2021BS014, 2020BS013)。

参考文献

- [1] Sharp, R.P. (1963) Wind Ripples. *Journal of Geology*, **71**, 617-636. <https://doi.org/10.1086/626936>
- [2] Magnolia, R.A. (1941) The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. Methane, 265.
- [3] 郭西元, 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.
- [4] 杨转玲, 钱广强, 董治宝, 等. 库姆塔格沙漠北部三垄沙地区风成沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 589-596.
- [5] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 基于数字图像的中国西北地区戈壁表面砾石形貌特征研究[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 625-633.
- [6] 董治宝, 屈建军, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌区划[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 805-814.
- [7] 俄有浩, 苏志珠, 王继和, 等. 库姆塔格沙漠综合科学考察成果初报[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 693-697.
- [8] 王继和, 丁峰, 廖空太, 等. 库姆塔格沙漠综合考察的主要进展[J]. 干旱区研究, 2009, 26(2): 243-248.
- [9] 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.
- [10] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 巴丹吉林沙漠地表沉积物粒度特征及区域差异[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1357-1364.
- [11] 高君亮. 干旱区洪积扇戈壁表层沉积物特征研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019.
- [12] 任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 231.