

王兴,王永红,徐杨杨,等. 基于数字图像的山东长山岛砾石海滩表层砾石形貌特征研究[J]. 海洋学报, 2021, 43(1): 110–121, doi:10.12284/hyxb2021009

Wang Xing, Wang Yonghong, Xu Yangyang, et al. Morphological characteristics based on digital images of gravels from gravels beaches in the Changshan Island, Shandong Province[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(1): 110–121, doi:10.12284/hyxb2021009

基于数字图像的山东长山岛砾石海滩 表层砾石形貌特征研究

王兴^{1,2}, 王永红^{1,2*}, 徐杨杨^{1,2}, 向亚武^{1,2}

(1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 2. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要:天然砾石海滩作为一种高能环境下的海岸堆积体,因其粒径粗、孔隙度大等特征,是良好的海岸防护屏障。了解砾石海滩形成过程离不开砾石形貌这一重要参数,但要快速、准确获得大量砾石的定量参数比较困难。本文对山东北长山岛 3 个砾石海滩(九丈崖、月牙湾、长滩)、南长山岛的 4 个砾石海滩(仙境源、林海、长山尾和明珠广场)进行现场剖面测量并采集砾石样品及砾石图像,应用 ImageJ 软件对砾石进行原位无干扰数字图像测算,可以快速大量分析砾石粒径、磨圆度等形貌参数。结果显示:砾石的粒径范围为 4~79 mm,主要集中在中砾,各海滩分选较好;其中,北长山岛海滩的砾石平均粒径略小于南长山岛,北长山岛九丈崖海滩的砾石平均粒径最大,南长山岛的仙境源海滩砾石平均粒径最小。向海方向从滩肩到高潮线平均粒径逐渐减小,但在水边线处增大。砾石磨圆度介于 0.59~0.75 之间,等级均为圆状,砾石海滩均已达到较成熟阶段;其中北长山岛的月牙湾海滩砾石磨圆最好,长滩海滩砾石的磨圆最差,由陆向海磨圆度值呈增大的趋势。形状比率范围介于 1.36~1.77 之间,与磨圆度呈明显负相关($R^2=0.98$),砾石由陆向海从长条状渐变为椭圆状。南、北长山岛的砾石海滩的砾石形貌受到物源、动力条件和人为活动的影响。研究区砾石海滩坡度范围为 16%~35%,海滩坡度与沉积物粒径呈正相关。

关键词:砾石滩;数字图像;形貌特征;控制因素

中图分类号: P737.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)01-0110-12

1 引言

砾石海滩多发育在基岩海岸附近,其在全球海岸带地区分布虽不广泛,但却是一种稳定性非常高的海岸地貌,沉积物具有粒径粗(2~256 mm)、所处位置坡度大等特征^[1]。砾石海滩的规模、演化的时间尺度及其稳定性受物质来源、区域地质地貌类型等因素的制约^[2]。砾石海滩物质来源主要包括临近的河流输送、冰川搬运、海岸侵蚀等^[3]。目前对砾石海滩,包括

细砾滩($D_{50}=2\sim 10\text{ mm}$)、混合砂砾滩和纯砾石海滩的形貌特征、砾石磨蚀、输运以及稳定性方面研究较为丰富^[4-12]。Masselink 等^[5]对英国 Slapton 细砾滩($D_{50}=2\sim 10\text{ mm}$)现场调查发现,在特定波浪潮流条件下($H_s=0.5\sim 1\text{ m}$; $T_s=4\sim 8\text{ s}$; 潮差=3~4 m),冲流带上部形成高滩肩,冲流带和激浪带之间形成台阶;Harley 等^[6]研究发现意大利中部某砾石海滩坡度变化在 0.10~0.25 之间,粗砾和中砾集中在后滨,细砾分布在滩面。王爱军等^[7]对浙江朱家尖岛两处砾石海滩粒度及形

收稿日期: 2020-03-24; 修订日期: 2020-10-06。

基金项目: 国家海洋局公益性项目(201405037); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402602); 国家自然科学基金(41376054, 41176039, 41410304022, U1606401)。

作者简介: 王兴(1991—),男,山东省阳谷县人,博士研究生,主要从事海岸动力地貌研究。E-mail: geologywx@163.com

* 通信作者: 王永红,女,山东省青岛市人,教授,主要从事海洋地质和环境方面研究。E-mail: yonghongw@ouc.edu.cn

态参数特征分析,并讨论了磨蚀与搬运作用对砾石改造的相对重要性。在中等波浪条件下,混合砂砾滩的中砾运动方向主要为横向移动^[4],细砾与砂则以沿岸输移为主,而且高能环境下扁平状砾石被搬运得更远^[7]。厦门天泉湾人工砾石海滩在强潮强动力环境下,年平均输移率为 $1\ 015.6\sim 2\ 392.5\ \text{m}^3/\text{a}$ ^[8]。纯砾石滩沉积物和地貌受台风影响后,砾石发生大规模的整体运动,但后期能够自然恢复,因孔隙度大、波浪下渗率高而较砂质海滩稳定^[9-11],有显著的自然防波堤效果^[12]。

砾石海滩最基本的参数是砾石的形貌特征。砾石的形态在一定程度上可以反映砾石的动力条件、搬运与沉积过程、物源性质,其定量分析对沉积环境判断具有重要的指示意义^[13]。研究砾石海滩表层砾石形貌特征对认识砾石滩的形成发育及其水动力过程具有重要作用。以往针对砾石海滩砾石形貌的研究,研究人员多采用卡尺测量或目估法^[14-15]等传统方法获取砾石参数。卡尺测量虽然可以获得三维的数据,但由于费时费力,难以使用大量的样品数据对砾石形态进行评定。

目前,可以采用数字照相与图像处理技术定量获取砾石形态参数。虽然数字图像提取技术只可获取砾石颗粒的二维信息,但由于其可以快速大量采集砾石样品的形貌数据,仍可反映砾石分布和变化特征。例如前人在冰川堆积物^[16]、戈壁表层砾石^[17]和泥石流卵砾石^[18]等研究中利用此方法取得了良好的效果。本研究以山东长山岛砾石海滩为例,应用计算机图像处理软件对现场拍摄的沉积物图像进行处理,快速大量获取砾石海滩表面砾石粒径及形态参数。结合剖面形态数据,探讨砾石海滩形态分布特征及控制因素,为砾石海岸环境的可持续发展提供科学依据。

2 研究区域及方法

2.1 研究区域概况

南、北长山岛隶属山东省长岛县(图1),地理位置上处于渤海海峡的南部,长山水道与庙岛海峡之间,其中南长山岛岸线长21.60 km,面积为13.43 km²,为山东第一大岛。北长山岛北临长山水道,南接南长山岛,该岛呈NW向展布,岸线长15.68 km,面积为

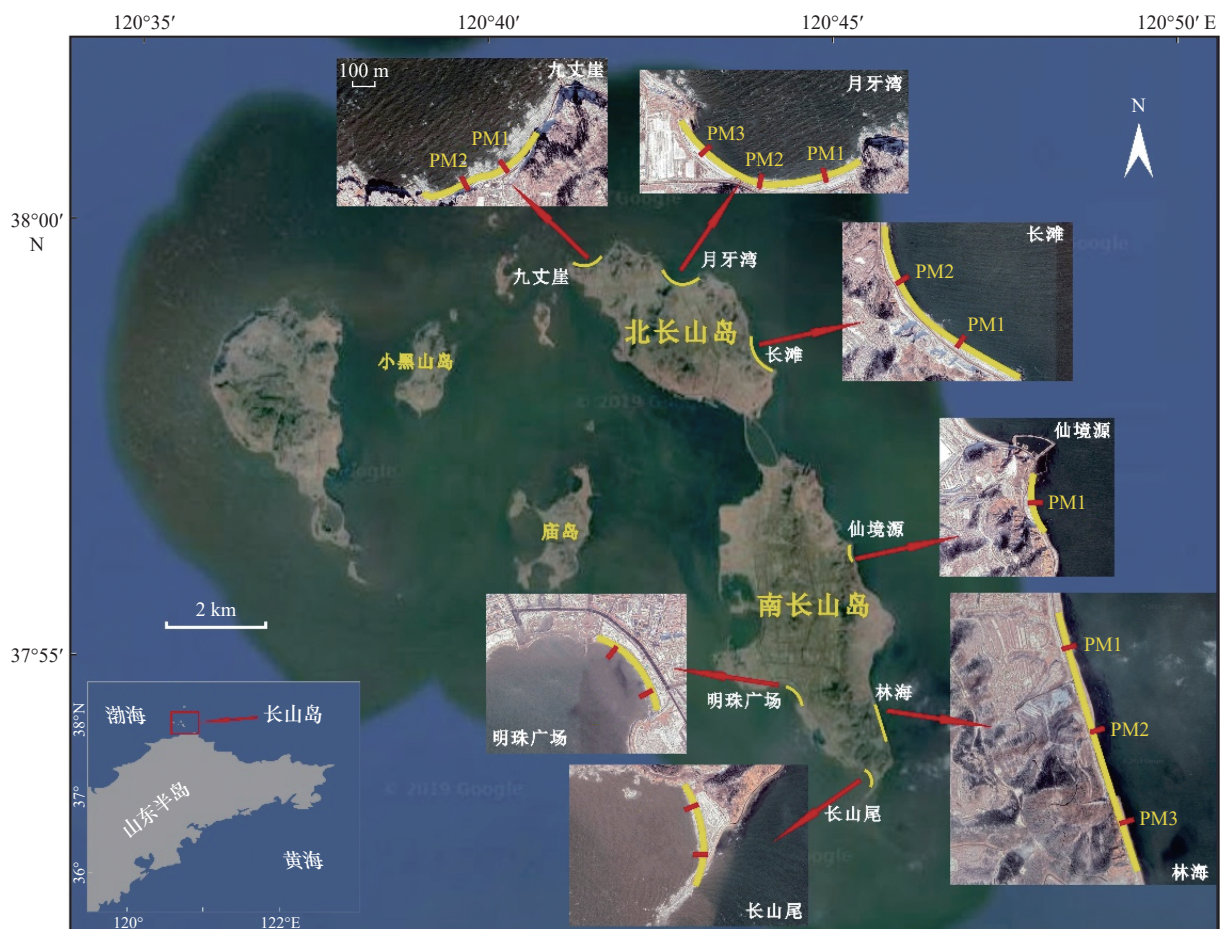


图1 研究区域位置及剖面分布

Fig. 1 Location and profile of the study area

8.25 km²。研究区在地质构造上属于胶辽古陆的一部分,受第四纪断裂活动的影响,长山岛沿岸形成各种陡峭的海蚀崖、海蚀平台等海岸地貌^[19],岛上基岩大范围出露,主要由上元古界蓬莱群浅变质岩组成,岩性包括千枚岩、板岩、石英岩、片岩等^[20]。

长岛地区年平均气温为 11.9℃,属于温带季风气候,易遭受寒潮袭击,平均每年发生寒潮 3.2 次(据 1958–1985 年统计),主要发生在 10 月至翌年 4 月。渤海海峡一带是北方最大风浪区之一,常年大风风向为 NW–NNE^[21],波浪四季都是以风成浪为主,频率占 95% 以上。该地区年平均波高可达 1.1 m,冬半年平均波高达 1.5 m,其中 N 和 NNE 向浪年平均波高达 1.7~1.8 m,而偏南向的波高则较小,平均为 0.7 m^[22]。潮汐属正规半日潮,平均潮差为 1.07 m,多年平均海平面为 0.065 m^[23–25]。

2.2 研究方法与数据来源

2.2.1 砾石滩样品采集和剖面测量

于 2016 年 10 月在南、北长山岛 7 个砾石海滩(北长山岛的月牙湾、九丈崖、长滩,南长山岛的仙境源、林海、长山尾、明珠广场)进行野外作业。依据海滩规模不同,每个砾石滩布设 1~3 条剖面,运用 RTK(Real-Time Kinematic)进行剖面测量。由陆向海,每个剖面选取 4 个位置(滩肩、滩肩顶、高潮线和水边线)进行拍照和样品采集,共拍照并采集样品 55 个,其中北长山岛 28 个,南长山岛 27 个。表层砾石照片拍摄使用佳能 EOS 550D 数码相机(镜头 EFS18–55 mm,光圈 F3.5)(图 2)。因此,本文探讨的是原位垂直投影形态的表层砾石形貌特征。

2.2.2 砾石参数获取

由于受光照、滩面平整度等外界因素的影响,获得的照片通常会存在图像噪声。为了更准确地获取砾石特征,需在提取信息之前,运用相关软件对原始图像进行降噪处理^[16]。本文应用 Photoshop 和 ImageJ(V1.52p)两款软件进行室内图像处理和数字信息提取。首先使用 Photoshop 的“镜头矫正”功能对图像进行几何形变的矫正。接着用“裁剪”工具沿样方外框进行裁剪,对照片做亮度、对比度和锐化处理,以获取更清晰砾石颗粒边缘,然后使用 ImageJ 软件“徒手工具”勾画单颗砾石边界(图 3),软件会自动获得砾石的直径、周长、面积和形状参数,这里的形状参数指磨圆度和形状比率。本研究只选取样方内具有完整形态的砾石,样方边缘的颗粒以及表面砾石颗粒存在相互叠置现象的砾石未纳入研究对象。本次研究选取的砾石测量参数及其计算方法见表 1,对所采集的 55 个样品,共获取 2 508 颗砾石的参数资料,平均每个样品约有 45 颗砾石。为方便砾石二维数据对比,使用卡尺



图 2 研究区砾石滩及采集样方图

Fig. 2 Pictures of gravel beach and the image collection of gravel in the study area

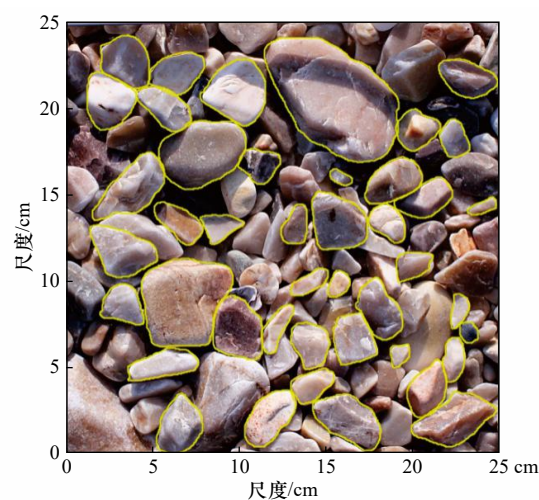


图 3 一个样品的砾石图像处理结果

Fig. 3 Image processing result of gravels in a gravel beach sample

测量砾石的长轴和短轴,并带入公式 $D = \sqrt{L_{\min}^2 + L_{\max}^2}$ 得出砾石粒径 D 。

2.2.3 粒径数据计算

沉积物粒度参数不仅可以用来识别沉积物的沉积环境类型、获取水动力等信息,还可以用来指示沉积物的输运方向。根据 ImageJ 软件获得的数据,参考 Folk-Ward 图解法计算表层砾石的粒度参数,包括平均粒径、分选系数、峰度和偏态。

3 结果

3.1 误差与稳定性

利用图像获取砾石形貌数据的过程中存在两个误差(拍照误差和徒手勾画误差)。拍摄过程中,将标有 25 cm×25 cm 刻度的不锈钢方框分别置于海滩 4 个特征位置的表面,在距地表 0.5 m 的高度手持数码相机

表1 软件统计得出的砾石颗粒形状参数(据文献[17])

Table 1 Gravel particle shape parameters obtained from software statistics (from reference [17])

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
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
颗粒粒径(D_F)	$D_F = \sqrt{M_{\min}^2 + M_{\max}^2}$	以Ferret粒径(D_F)表示, M_{\min} 和 M_{\max} 分别为最小和最大Ferret直径*
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)	$RD = \frac{4\pi \times A}{P^2}$	颗粒的磨圆程度, 圆形颗粒为1.0

注: *表示计算Ferret直径时首先确定颗粒投影面的重心位置, 然后计算通过重心位置的各个方向的直径大小, 从而确定最大Ferret直径(M_{\max})与最小Ferret直径(M_{\min}), 这两个值表明了颗粒的形状特征和最小过筛粒径^[26]。

机垂直拍摄, 为获取更清晰可靠的数字图像, 避免畸变, 每个样方拍摄3幅照片。

应用ImageJ(V1.52p)“徒手选择”工具对单颗砾石进行多次跟踪测量, 10组数据的砾石粒径统计相对误差小于5%, 变异系数小于3%, 标准误差为0.24。为进一步探讨ImageJ测量的可重复性和稳定性, 以及不同操作人对测量结果的影响, 以月牙湾海滩某采样点的66颗砾石为例, 进行多次重复测量对比。结果显示(图4a), 每次测量数值无显著性差异, 说明该ImageJ图像测量法可重复性较好, 稳定性也较高, 受使用者主观因素影响较小, 在大规模砾石测量时测量1次便可。

同时用卡尺测量来核验图像方法的可靠性。比较使用卡尺测量和使用ImageJ计算获得的二维砾石粒径(长、中轴的Ferret粒径), 发现两种方法测量结果的绝对误差为0.11~6.72 mm, 平均绝对误差为3.17 mm, 平均相对误差为8.9%, 相关系数 $R^2=0.9173$ 。总体说明软件计算结果是可靠的。拍照误差、徒手勾画误差均为系统误差, 最终获得的数据可以说明不同砾石滩的砾石形貌变化。

3.2 砾石滩剖面特征

研究区砾石海滩规模大小不等, 北长山岛砾石滩长度大于南长山岛(表2)。其中北长山岛的月牙湾海滩和长滩海滩规模较大; 南长山岛的仙境源海滩规模最小, 仅长240 m, 宽20 m。北长山岛砾石滩剖面平均坡度范围为21%~35%, 南长山岛为16%~33%, 平均坡度最大的是九丈崖海滩, 最小的是仙境源海滩。

根据剖面形态, 砾石滩可分为滩肩型和阶梯斜坡型两类(图5), 其中发育滩肩的有长滩海滩、林海海滩和明珠广场海滩, 九丈崖海滩、月牙湾海滩、仙境源海滩和长山尾海滩属于阶梯斜坡型砾石滩。长滩

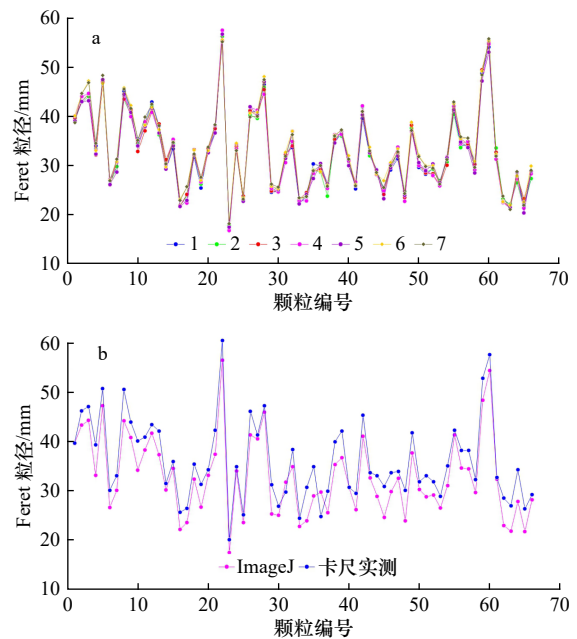


图4 ImageJ测量结果可重复性/稳定性对比(a) (1~7为不同人员测量的数据)和不同方式测量的砾石二维数据对比(b)

Fig. 4 Comparison of repeatability/stability of measurement results of ImageJ software (a)(1~7 are measured by different people), and comparison of 2-D gravel data in different ways (b)

海滩滩肩最窄, 平均宽约6 m; 林海海滩滩肩平均宽11 m, 在高潮线附近可见台阶; 明珠广场滩肩发育最宽, 平均宽28 m。阶梯斜坡型砾石滩与滩肩型砾石滩相比, 海滩形态弯曲度较大, 高潮线或水边线处多发育滩脊-沟槽。九丈崖海滩、长山尾海滩和仙境源海滩砾石滩发育一级阶梯, 月牙湾发育二级阶梯。

3.3 砾石形貌特征

3.3.1 粒径

研究区海滩表层砾石粒径分布范围为4~79 mm,

表 2 砾石滩基本信息

Table 2 Basic information of different gravel beaches

海岛	海滩	海滩长度/m	海滩宽度/m	朝向	平均坡度
北长山岛	九丈崖	620	50	NW	35%
	月牙湾	954	50	N	21%
	长滩	978	30	NE	25%
	平均值	851	43		27%
南长山岛	仙境源	240	20	NE	16%
	林海	480	30	E	28%
	明珠广场	450	60	S	33%
	长山尾	400	28	E	33%
	平均值	523	46		28%

主要为中砾。北长山岛海滩砾石的平均粒径略小于南长山岛。在北长山岛,九丈崖海滩的砾石最粗,粒径分布范围为 9~79 mm,为中砾,分选较好;月牙湾海滩砾石最小,为中粒,粒径介于 6~30 mm 之间,分选最好。在南长山岛,明珠广场海滩砾石粒径最粗,粒径分布范围为 11~77 mm,分选较好;砾石粒径最细的是仙境源海滩砾石,介于 4~12 mm 之间,分选较好(表 3)。

在同一剖面上,由陆向海,各海滩平均粒径的变化具有良好的规律性,从滩肩向海砾石逐渐减小,71%的海滩在水边线处开始转折,向海方向平均粒径增大(图 6a,图 7a)。同一海滩,沿海岸线方向,不同剖面上相同特征位置处的砾石大小也有差异(图 7a)。北长山岛九丈崖海滩两条剖面的砾石粒径相差较大,PM1 的砾石粒径明显粗于 PM2;月牙湾 PM2 各特征点(除水边线)的砾石粒径比 PM1、PM3 粗,但 PM3

水边线处的砾石粒径约为 PM1、PM2 的 3 倍;自滩肩顶向海方向,长滩 PM2 砾石粒径粗于 PM1 的,且距海越近,粒度差距越大。南长山岛仙境源海滩由陆向海,砾石粒径逐渐变细;林海 PM1 在滩肩、滩肩顶处砾石粒径最细,PM3 砾石粒径在高潮线、水边线处比 PM1、PM2 的细;长山尾 PM1 砾石粒径均大于 PM2 的;明珠广场 PM1 砾石粒径比 PM2 的细。总体来说,自滩肩至高潮线附近,砾石粒径逐渐变小,水边线处转折有所增大。

3.3.2 磨圆度特征

砾石的磨圆度表示碎屑颗粒的棱角被磨圆的程度,磨圆度值越大说明磨圆的越严重。本文依据软件中的磨圆度测量数据,参考 Powers^[15]将砾石磨圆度划分为极棱角状(0.12~0.17)、棱角状(0.17~0.25)、次棱角状(0.25~0.35)、次圆状(0.35~0.49)、圆状(0.49~0.70)和极圆状(0.70~1.00)。

研究区海滩砾石磨圆度值分布范围为 0.59~0.75,北长山岛海滩砾石平均磨圆度与南长山岛几乎相同,均为圆状(图 6b)。不同海滩砾石磨圆度对比图(图 7b),采用 1 倍标准差间距将平均磨圆度进行分级。月牙湾海滩的磨圆最好(0.699),长滩海滩的磨圆度差(0.659),符合野外观察的情况。

由陆向海,南、北长山岛砾石磨圆度呈现逐渐增大的现象,说明砾石磨圆逐渐变好(图 7b)。各海滩具体而言又稍有不同,从滩肩到水边线,九丈崖海滩、长山尾海滩、林海海滩砾石磨圆度逐渐增大,磨圆越来越好;长滩海滩和月牙湾海滩从滩肩到高潮线磨圆度逐渐增大,但到水边线处急剧下降,磨圆度变差;明珠广场海滩和仙境源海滩砾石磨圆趋势相同,均表现为滩肩顶处磨圆度最大,向海、向陆均变差。同一海滩,不同剖面上相同特征位置处的砾石磨圆也

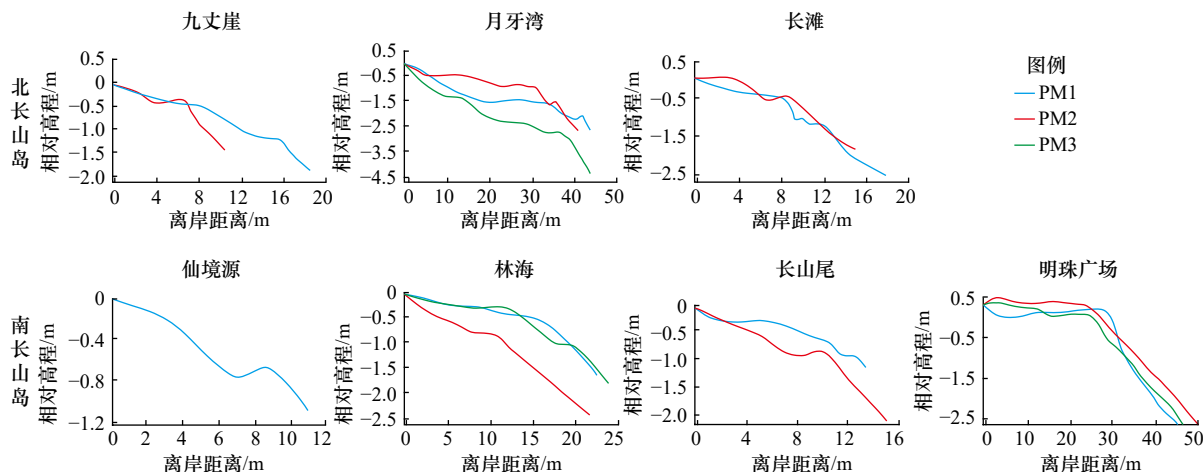


图 5 砾石滩剖面形态图

Fig. 5 Profile morphology of different gravel beaches

表3 各海滩沉积物粒度参数及分布

Table 3 Grain size parameters and distribution of gravels at different beaches

海岛	海滩名称	平均粒径/mm		中值粒径/mm	分选系数		偏态		峰态	
		平均值	粒级*		平均值	等级	平均值	等级	平均值	等级
北长山岛	九丈崖	32.49	中砾	32.49	0.63	较好	0.05	近对称	1.01	中等
	月牙湾	14.47	中砾	13.79	0.53	较好	-0.01	近对称	0.96	中等
	长滩	22.96	中砾	22.40	0.59	较好	0.05	近对称	0.85	宽
	平均	23.31	中砾	22.89	0.58	较好	0.03	近对称	0.94	中等
南长山岛	林海	25.32	中砾	25.66	0.50	较好	-0.06	近对称	0.97	中等
	明珠广场	31.58	中砾	32.69	0.69	较好	-0.09	近对称	1.00	中等
	长山尾	31.09	中砾	32.06	0.55	较好	0.10	近对称	1.04	中等
	仙境源	7.72	细砾	7.69	0.51	较好	-0.02	近对称	0.88	宽
	平均	24.23	中砾	24.52	0.56	较好	-0.02	近对称	0.97	中等

注: *粒级划分及命名参考GB/T 12763.8-2007《海洋调查规范第8部分海洋地质地球物理调查》。

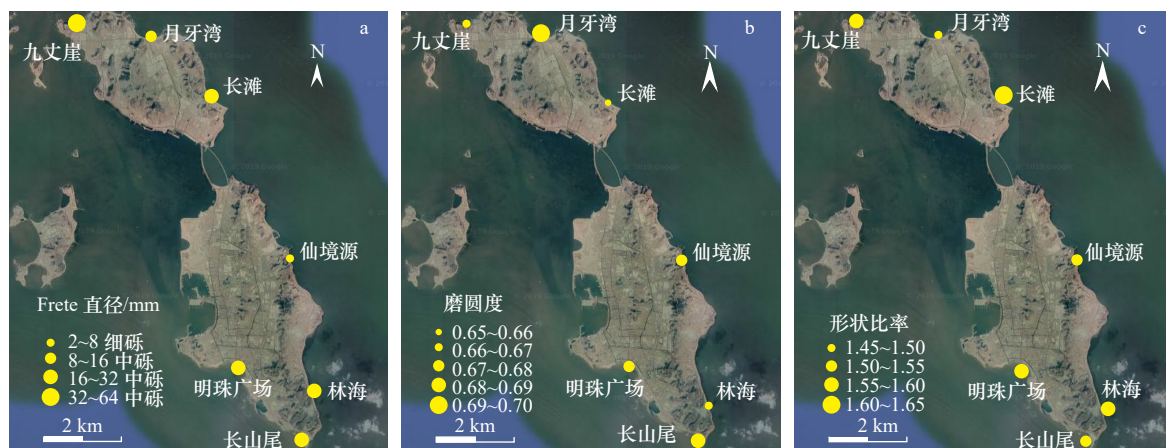


图6 不同砾石滩的砾石平均粒径(a)、磨圆度(b)和形状比率(c)分布

Fig. 6 The distribution of the mean particle size (a), roundness (b), and shape ratio (c) at different gravel beaches

有差异。北长山岛九丈崖海滩 PM2 在滩肩顶与高潮线处的砾石磨圆度要高于 PM1; 月牙湾海滩 PM1 在滩肩顶处的砾石磨圆度略大于 PM2 和 PM3, 但在高潮线、水边线位置 PM2 的砾石磨圆度高于 PM1 和 PM3, PM3 在滩肩处砾石磨圆度最大; 长滩海滩 PM1 在滩肩、水边线处砾石磨圆度略高于 PM2。南长山岛仙境源海滩滩肩顶处的磨圆相对较好; 林海海滩 PM3(除滩肩外)砾石磨圆度好于另外两个剖面; 长山尾海滩 PM1 砾石磨圆度在不同位置均高于 PM2; 明珠广场海滩 PM1 在滩肩顶与高潮线处的砾石磨圆度高于 PM2。总体来说, 各海滩砾石磨圆由陆向海逐渐变好。

3.3.3 形状比率特征

砾石的形状比率即砾石长短轴之比, 整体来看,

海滩砾石形状比率均值分布范围为 1.36~1.77。采用 1 倍标准差间距将各海滩砾石平均形状比率进行分级^[17](图 6c), 北长山岛略小于南长山岛, 其中月牙湾海滩的砾石形状比率值最小(1.49), 海滩砾石多为近椭圆形, 长滩海滩砾石形状比率值最大(1.61), 海滩砾石则更接近长条状。从陆向海方向, 海滩砾石形状比率呈逐渐降低的趋势, 砾石形状趋于近椭圆形(图 7c)。同一海滩, 不同剖面上相同特征位置处的砾石形状比率亦有些不同。北长山岛九丈崖海滩 PM1 高潮线处的砾石形状比率更大; 月牙湾海滩 PM1 水边线处的砾石形状比率大, PM2 滩肩处的砾石形状比率大, 在 PM3 滩肩顶与高潮线处的形状比率大; 长滩海滩 PM1(除高潮线)的砾石形状比率明显小于 PM2。南长山岛仙境源海滩砾石形状比率在滩

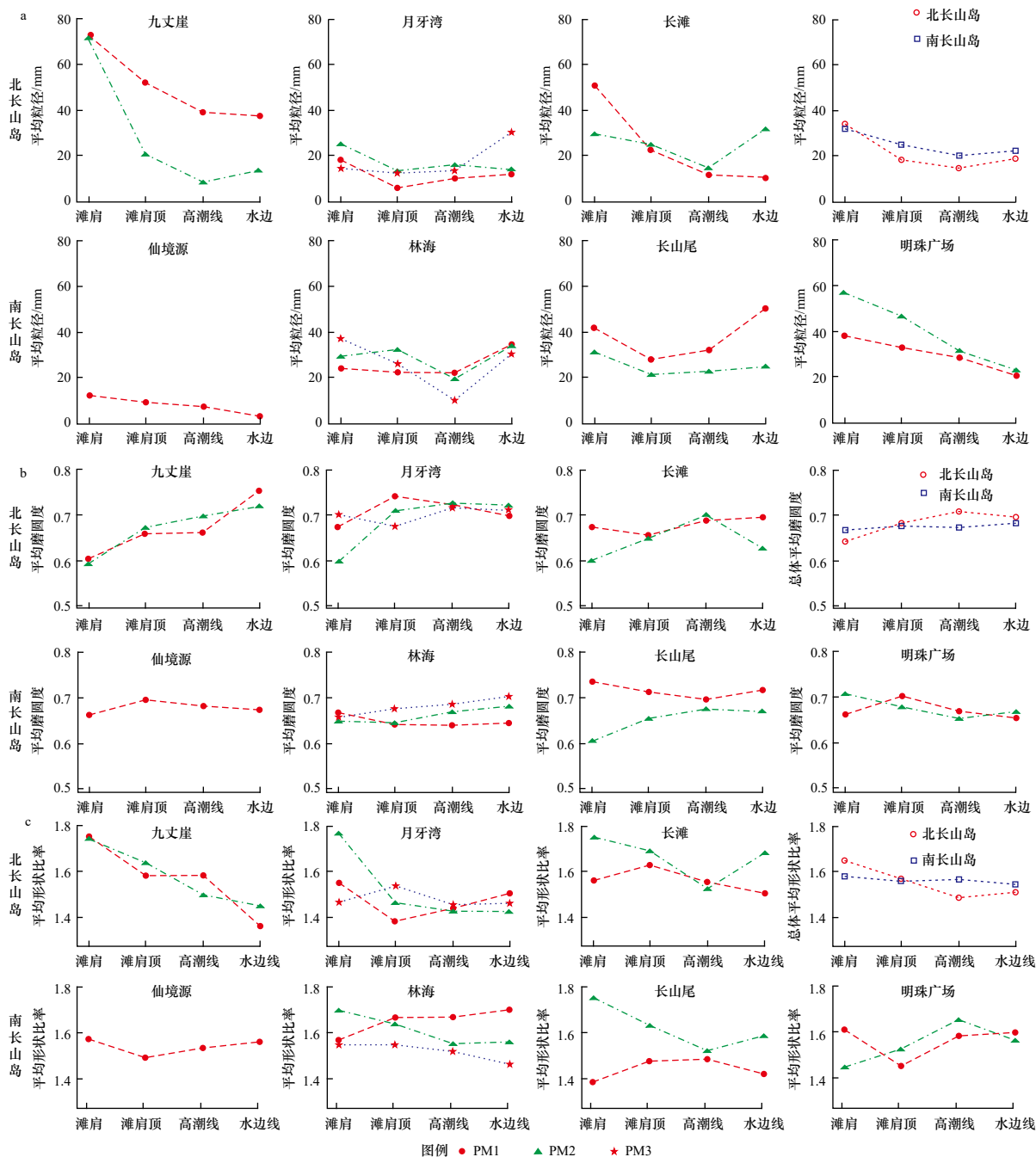


图7 各海滩不同剖面及南、北长山岛总体砾石粒度(a)、磨圆度(b)和形状比率(c)分布

Fig. 7 The distribution of gravel size (a), roundness (b), and shape ratio (c) in different gravel beaches sections and Changshan island

肩顶处最小;林海海滩在滩肩处PM2的砾石形状比率大于PM1和PM3;长山尾海滩PM1砾石形状比率明显小于PM2;明珠广场海滩在滩肩顶与高潮线处PM2的砾石形状比率比PM1大。总体来说,由陆向海砾石形状比率逐渐减小,表现为从近长条状向近椭圆状过渡。

研究区砾石磨圆度、形状比率均反映了沉积物磨蚀的成熟度^[2],二者呈明显负相关($R^2=0.98$),磨圆度越大的砾石形状比率值越小,砾石所受沉积环境的改

造程度越大。南、北长山岛砾石沉积物虽然没有经过较长距离的搬运,但其磨圆度均较高(0.676),对应Powers标准的圆状等级,砾石均已达到较成熟的阶段,说明它们必然在海洋环境中经历了长时间的磨蚀作用。

4 讨论

4.1 砾石来源

地质构造是海岸地貌形态发育的基础^[27]。从海岸地貌的内动力作用来讲,我国滨海砾石沉积地貌主

要发育在构造隆起带上, 在新构造运动的影响下, 长山岛处于胶辽隆起带, 具备砾石滩发育的条件。研究区以波浪作用为主, 海蚀崖等海岸地貌能够保证砾石供给。南、北长山岛出露的上元古界蓬莱群浅变质岩基岩中, 石英岩的磨蚀速率最低。Kuenen^[28]曾于室内进行水槽实验, 当保持岩石搬运速率为 70 km/d 时, 石英岩磨蚀速率为 0.021%/km, 仅次于燧石, 这种低磨蚀率也有助于粗颗粒物质的保存。以石英岩为主的海滩砾石, 主要来自近源风化产物, 包括附近岬角侵蚀物质、海滩后缓内侧砾石堤等^[19, 29-30]。长山列岛中北部岛屿(如南、北皇城岛, 大、小钦岛和砣矶岛)受地质构造、岩性及高能海水动力的影响, 以发育海蚀地貌为主; 而南部的岛屿(如南、北长山岛)能够形成诸多砾石海滩, 这与地理位置和沿岸流的作用密切相关^[19]。南、北长山岛位于渤海海峡的南部区域, 海水较浅, 低盐度逆时针沿岸流的作用利于形成海岸堆积地貌^[19, 22]。

4.2 砾石形貌影响因素

波浪、潮汐和风等外动力是塑造海岸地貌的重要外因, 海滩砾石粒径、剖面形态等主要取决于波浪和潮汐的强弱及此消彼长^[27]。本文引入崔金瑞和夏东兴^[31]的浪潮作用指数 K 来阐明波浪、潮汐与海岸地貌类型的关系。长岛地区年平均大风(风速 ≥ 10.8 m/s) 日为 116 d(1975-2005 年), 秋冬季更是风大浪急。应用南长山岛测站数据^[24] 计算得出 $K=1.65$ (大于 1), 表明该区水动力条件以波浪作用为主, 是典型的浪控海岸。

4.2.1 动力对于不同砾石滩砾石形貌的控制

不同位置的砾石海滩在地质条件与海水动力条件影响下^[19], 砾石形貌有所差异。研究区内来自北方的风浪强度大于东向^[23], 导致北向海滩(九丈崖海滩和月牙湾海滩)的平均粒径(23.48 mm)大于东向海滩(长滩海滩, 林海海滩和仙境源海滩)的平均粒径(18.66 mm); 而南部的明珠广场海滩和长山尾海滩受逆时针沿岸流强烈影响, 堆积的砾石较粗。同为北向的九丈崖海滩和月牙湾海滩, 砾石粗细差异的原因在于月牙湾海滩有岬角遮蔽, 可以减弱波浪及风暴潮对滩面的直接作用, 海滩砾石粒径相对较细。仙境源海滩向东开敞, 无强烈的沿岸流经过, 叠加北部岬角阻挡等因素, 作用于滩面的波浪能量较低, 形成了研究区粒度最细的砾石海滩。

纯砾石海滩砾石磨圆度的高低与粒径、沉积物分选程度及风浪流等因素存在一定的联系。一般来讲, 砾石粒径越大, 启动流速越大^[9], 磨蚀愈难。北长山岛

九丈崖海滩和长滩海滩的砾石粒径较粗, 其磨圆度相对差; 月牙湾海滩砾石粒径较细, 磨圆相对较好。如果砾石粒径相似, 则分选差的砾石磨圆度高。如九丈崖海滩与长滩海滩粒级虽然都处在中砾, 但九丈崖海滩砾石分选性比长滩差, 粒径小的砾石易被波浪推动并抛入大砾石间的缝隙中^[32], 边棱更易受到磨蚀^[33]。南长山岛的林海海滩因受海洋动力条件影响较弱, 加之颗粒粗、分选好的因素, 磨蚀程度为南长山岛最低。明珠广场海滩砾石虽比仙境源海滩粗, 但磨圆度处于同一等级, 究其原因发现明珠广场海滩分选较差, 且有一定的含沙量, 沙的填充加剧砾石磨蚀^[34], 形成的砾石磨圆度更高。庙岛海峡作为渤海海水外流的主要通道, 沿岸流与风浪叠加强化了水动力条件, 使得南长山岛较粗的长山尾海滩砾石磨圆度略好于该岛另外 3 个砾石海滩。

4.2.2 动力对于同一砾石滩砾石形貌的控制

沉积物输运受粒级的控制作用明显, 与细粒的沙质海滩沉积物发生沿岸输运不同的是, 粗粒的砾石海滩以横向运移为主^[4, 10]。研究区正常天气下沉积物的临界启动流速大于 1.1 m/s, 临界波高大于 1.0 m^[9], 据蓬莱观测站 1992-1994 年波浪资料, 秋冬季平均波高范围为 0.9~1.0 m^[35], 仍小于启动临界值。粗粒的砾石无法在弱能量的波浪或潮流条件下进行大规模搬运, 风暴潮的作用便显得格外重要。该区所处海域——渤海海峡是我国风暴潮最严重的地区之一, 其地形地貌及地理位置的特殊性使得这里一年四季均有风暴潮发生^[36], 加之每年数次的寒潮灾害, 为砾石的搬运提供了强劲的水动力条件。在极端情况下, 一次大的风暴潮可以将直径 1 m 的巨石从低潮线下部搬运至潮间带, 将 5~10 cm 的砾石抛到 8 m 高的砾石堤顶部^[37], 严重影响砾石的排列和分选。由于砾石海滩的颗粒粗、孔隙率大、渗透性强等特点, 在风暴潮环境下, 向岸的上冲流明显强于向海的回流, 大部分砾石发生向岸输移, 导致滩面侵蚀、滩肩堆积、滩面坡度明显变陡^[10-11]。从横向来, 绝大多数砾石海滩在水边线处的粒径比高潮线处大, 主要由于水边线是波浪发生破碎和消能的第一站, 水动力条件较强, 较细的物质被带走, 唯有粗颗粒能够留存下来。

砾石在水边线处受到海水反复冲洗的几率比后滨高得多, 磨蚀效果也相对好, 磨圆度最大, 磨圆度向陆方向呈现变差的趋势, 滩肩位置的磨圆度最差, 形成了长山岛的砾石堆积模式(图 8)。同一海滩不同剖面上的砾石形貌变化趋势相似, 但由于相同特征点在海滩的分布区域不同, 接收到的波浪能量不同, 长

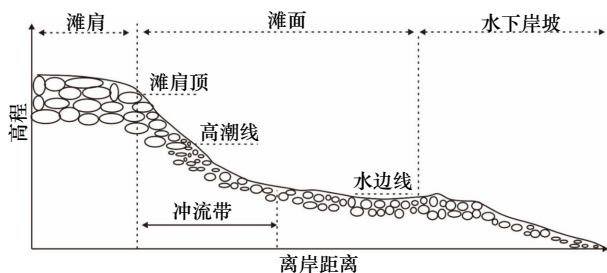


图 8 长山岛砾石滩沉积物分布模式图

Fig. 8 Pattern of gravel distribution in gravel beach in the Changshan Island

由陆向海, 砾石粒径先减小后增大, 磨圆变好, 形状比率变小
From land to sea, the gravel size decreases first and then increases, the roundness become better and the shape ratio become smaller

此以往, 导致砾石粒径、磨圆及形状比率有所差异, 例如, 北长山岛九丈崖海滩 PM1 与 PM2 滩肩处的砾石粒径大小一致, 而滩肩顶、高潮线和水边线处的砾石粒径差异显著。除了波浪因素, 砾石滩附近沿岸流也可能会影响砾石在滩面上的分布, 例如, 南长山岛长山尾海滩 PM2 各位置的砾石粒径均比 PM1 细。

4.2.3 人为影响

长岛风景旅游区每年吸引大量游客前来旅游观光, 人类活动对砾石形貌的影响不容忽视。游客“采石”的不文明行为^[38]不仅破坏旅游资源, 也对海滩研究数据的可靠性产生一定影响。另外旅游景区为提升游客舒适度, 大规模开发海滩后滨。本次野外工作时, 仙境源砾石滩后滨正在施工建设房屋和木栈道, 明珠广场已完成人工填砂工程, 原本的砾石海滩变成了砂砾滩。在“长岛球石”的大量流失, 降低海滩砾石磨圆度的同时, 还可能增大砾石启动的动力条件, 进而影响滩面砾石的分布。后滨环形公路、沿海木栈道等设施的修建, 大大缩短滩肩宽度, 影响砾石海滩坡度。除此以外, 我国基岩海岛开发过程中还存在开山采石现象。研究区北长山岛长滩海滩处于该岛上的重要采石区内, 采石过程中极可能引起小规模的山体崩塌、滑坡现象^[39], 产生的砾石会直接散落在滩面上, 造成长滩砾石分选、磨圆和粒径都有别于其他砾石滩, 破坏了自然规律。

4.3 砾石形貌对于砾石滩形貌的影响

海滩沉积物颗粒越粗, 海水的渗透率越大, 研究表明在冲流带下部波浪渗透率达到 40%, 在冲流带上部可高达 100%^[5], 由于上冲流和回流之间存在不对称性^[40], 加之砾石的启动流速较大, 沉积物在滩肩处不断堆积, 海滩的坡度随之增加。英格兰 Chesil 砾石海滩的最大坡度为 1 : 2, 这是波浪作用所形成海滩中的

最大坡度^[41]。长山岛各砾石海滩平均坡度介于 16%~35% 之间, 对研究区砾石海滩前滨坡度与颗粒中值粒径的分析发现, 二者呈明显的正相关($R^2=0.5493$), 海滩坡度越大其粒径越粗(图 9)。

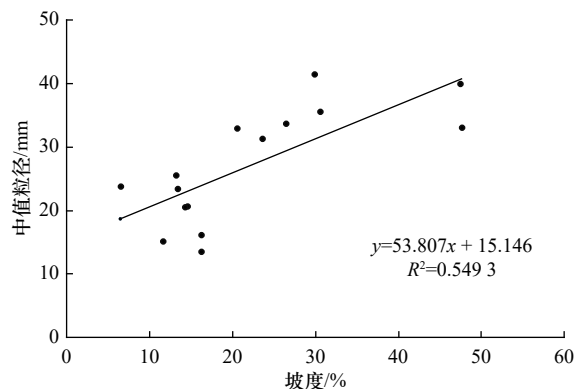


图 9 砾石滩前滨坡度与粒度关系

Fig. 9 Relationship between slope and grain size of gravel beach foreshore

除了砾石颗粒大小, 不同的砾石形状(如椭圆形、扁平形等)亦可能影响砾石滩剖面形态。研究发现, 相比椭圆形砾石, 颗粒较大的扁平形砾石更容易堆积在滩肩高处的位置。在中等能量波浪条件下, 上冲流可以把大而扁的砾石拖上滩面, 一旦到达滩肩, 由于海水渗透率高, 最扁的砾石留在此处, 不断增高滩肩, 而椭圆形的砾石在重力影响下沿滩面滚下来^[4]。

自全新世中期海平面趋于今天高度以来, 南、北长山岛沿岸海滩沉积物经过潮汐、波浪及海流 5 000~6 000 a 的相互作用^[42], 不断发生粒度、形态变化, 但作为高能环境下的堆积物, 研究砾石海滩的演变还需要未来进行长期的波浪和风暴潮数据监测。

5 结论

(1) 北长山岛海滩砾石的平均粒径略小于南长山岛, 主要为中砾。从滩肩到高潮线砾石平均粒径逐渐减小, 水边线处受到破波带影响出现转折, 粒径高于高潮线; 砾石分选较好、磨圆度较高, 且由陆向海磨圆度变好, 形状比率与磨圆度呈负相关($R^2=0.98$), 砾石已达到较成熟阶段。

(2) 研究区海岸为典型浪控海岸, 7 个砾石海滩由于地理位置、海滩开口朝向及水动力强度差异等, 导致各海滩砾石粒径分布也不同。九丈崖海滩与长山尾海滩直面风浪潮流冲刷, 粒径最粗; 而月牙湾海滩与仙境源海滩由于岬角的阻挡, 滩面受到波浪能量小, 粒径最细。风浪、海流和风暴潮共同影响砾石滩形貌变化。砾石的向岸搬运与强水动力条件密切相

关,只有在达到最大波高或者灾害性海浪出现时,才会发生大规模横向运移。

(3)砾石海滩前滨坡度与粒径呈正相关($R^2=0.5493$),由于砾石海滩颗粒粗,滩面渗透率高,向岸上冲流强度明显高于向海回流,导致滩肩高度增加,坡度不断变大。

(4)数字图像技术是量算砾石的一种有效方法,

有助于建立统一的颗粒形貌定量描述标准。随着技术发展,使用三维激光扫描等技术,可以获得更多的砾石形貌信息,从而理解砾石海滩的动力地貌演变过程。

致谢: 感谢陈昌祥、杨远东、常继强、杜佳在野外采样及数据分析等方面给予的帮助。感谢审稿人的意见,使得本文得到极大的提高。

参考文献:

- [1] Haslett S K. Coastal Systems[M]. London and New York: Routledge, 2000: 218.
- [2] 王爱军,高抒,杨旸. 浙江朱家尖岛砾石海滩沉积物分布及形态特征[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2004, 40(6): 747-759.
Wang Aijun, Gao Shu, Yang Yang. Sediment distribution and shape characteristics of gravel beaches, Zhujiajian Island, Zhejiang Province[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2004, 40(6): 747-759.
- [3] Johnson D W. Shore Processes and Shoreline Development[M]. New York: John Wiley & Sons, 1919: 39-40.
- [4] Ciavola P, Castiglione E. Sediment dynamics of mixed sand and gravel beaches at short time-scales[J]. Journal of Coastal Research, 2009, 56(1): 1751-1755.
- [5] Masselink G, Russell P, Blenkinsopp C, et al. Swash zone sediment transport, step dynamics and morphological response on a gravel beach[J]. Marine Geology, 2010, 274(1/4): 50-68.
- [6] Harley M D, Andriolo U, Armaroli C, et al. Shoreline rotation and response to nourishment of a gravel embayed beach using a low-cost video monitoring technique: San Michele-Sassi Neri, Central Italy[J]. Journal of Coastal Conservation, 2014, 18(5): 551-565.
- [7] Stark N, Hay A E. Pebble and cobble transport on a steep, mega-tidal, mixed sand and gravel beach[J]. Marine Geology, 2016, 382: 210-223.
- [8] 于跃,蔡锋,张挺,等. 人工砾石海滩变化及输移率研究[J]. 海洋工程, 2017, 35(5): 79-87.
Yu Yue, Cai Feng, Zhang Ting, et al. Study on evolution and transport rate of artificial gravel beach[J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(5): 79-87.
- [9] 徐杨杨,庄振业,赵东波,等. 山东长岛砾石海滩侵蚀及修复[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(5): 22-28.
Xu Yangyang, Zhuang Zhenye, Zhao Dongbo, et al. Erosion and restoration of the gravel beach around Long Island, Shandong[J]. Marine Geology Frontiers, 2018, 34(5): 22-28.
- [10] 束芳芳,蔡锋,戚洪帅,等. 不同沉积物养护海滩对台风响应的差异性研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(7): 103-115.
Shu Fangfang, Cai Feng, Qi Hongshuai, et al. Study on various response to typhoon of nourished beaches with different sediments[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(7): 103-115.
- [11] Shu Fangfang, Cai Feng, Qi Hongshuai, et al. Morphodynamics of an artificial cobble beach in Tianquan Bay, Xiamen, China[J]. Journal of Ocean University of China, 2019, 18(4): 868-882.
- [12] Han Min, Yang D Y, Yu J, et al. Typhoon impact on a pure gravel beach as assessed through gravel movement and topographic change at Yeocha Beach, south coast of Korea[J]. Journal of Coastal Research, 2017, 33(4): 889-906.
- [13] 陶金雨,张昌民,郭旭光,等. 磨圆度定量表征在扇三角洲沉积微相判别中的应用——以玛湖凹陷百口泉组砾岩为例[J]. 沉积学报, 2020, 38(05): 956-965.
Tao Jinyu, Zhang Changmin, Guo Xuguang, et al. Application of quantitative roundness characterization to identify sedimentary microfacies in fan delta deposits: A case study of conglomerates in the Baikouquan Formation, Mahu Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(05): 956-965.
- [14] Powers M C. A new roundness scale for sedimentary particles[J]. Journal of Sedimentary Research, 1953, 23(2): 117-119.
- [15] Powers M C. Comparison chart for estimating roundness and sphericity[J]. AGI Data Sedimentary Petrology, 1982, 23(2): 117-119.
- [16] 王献礼,张永双,曲永新,等. 基于数字图像处理技术的冰川堆积物粒度分析——以川西贡嘎山冰川堆积物为例[J]. 地质通报, 2010, 29(2/3): 469-475.
Wang Xianli, Zhang Yongshuang, Qu Yongxin, et al. Grain size analysis of glacial deposits based on digital image processing technology[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(2/3): 469-475.
- [17] 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.
Qian Guangqiang, Dong Zhibao, Luo Wanyin, et al. Gravel morphometric analysis based on digital images of different Gobi surfaces in Northwestern China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 625-633.
- [18] 赵岩,郑娇玉,郭鹏,等. ImageJ软件在泥石流固体颗粒分析中的应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(6): 877-881.
Zhao Yan, Zheng Jiaoyu, Guo Peng, et al. Applications of the ImageJ software in analysis of solid grains in a debris flow gully[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2015, 51(6): 877-881.
- [19] 曹家欣. 山东庙岛列岛与蓬莱沿岸地貌[J]. 海洋学报, 1989, 11(5): 603-610.
Cao Jiabin. Miaodao Islands and Penglai Coast landforms in Shandong Province[J]. Haiyang Xuebao, 1989, 11(5): 603-610.
- [20] 葛孚刚,王志才,王纪强,等. 山东省长岛第四纪断裂活动初步研究[J]. 防灾减灾学报, 2010, 26(4): 13-21.

- Ge Fugang, Wang Zhicai, Wang Jiqiang, et al. Preliminary study of quaternary faults on Changdao Island of Shandong Province[J]. *Journal of Disaster Prevention and Reduction*, 2010, 26(4): 13–21.
- [21] 高瑞华. 渤海海峡大风气候特征的初步分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2007: 25–27.
Gao Ruihua. A preliminary analysis of the climatic characteristics on the gale over Bohai Straits[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007: 25–27.
- [22] 中国科学院海洋研究所海洋地质研究. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 23.
The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. Bohai Geology[M]. Beijing: Science Press, 1985: 23.
- [23] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第三分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 186–189.
Compilation Committee of China Bay. Journal of China Bay (Volume 3)[M]. Beijing: China Ocean Press, 1991: 186–189.
- [24] 姜胜辉. 南、北长山岛海域沉积动力特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009: 12–16.
Jiang Shenghui. Study of sedimentary dynamic character at the South and the North Changshan Islands Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009: 12–16.
- [25] 李福林, 夏东兴, 王文海, 等. 登州浅滩的形成、动态演化及其可恢复性研究[J]. 海洋学报, 2004, 26(6): 65–73.
Li Fulin, Xia Dongxing, Wang Wenhai, et al. Discussion on the evolution cause and its recovery for the Dengzhou Shoal, China[J]. Haiyang Xuebao, 2004, 26(6): 65–73.
- [26] Merkus H G, Bellantone M. Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality[M]. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2009: 533.
- [27] 蔡锋, 苏贤泽, 曹惠美, 等. 华南砂质海滩的动力地貌分析[J]. 海洋学报, 2005, 27(2): 106–114.
Cai Feng, Su Xianze, Cao Huimei, et al. Analysis on morphodynamics of sandy beaches in South China[J]. Haiyang Xuebao, 2005, 27(2): 106–114.
- [28] Kuenen P H. Experimental abrasion of pebbles: 2. rolling by current[J]. *Journal of Geology*, 1956, 64(4): 336–368.
- [29] 谢宗荣. 庙岛群岛地质的新认识[J]. *地质论评*, 1959, 19(5): 226.
Xie Zongrong. A new geological understanding for Miaodao Islands[J]. *Geological Review*, 1959, 19(5): 226.
- [30] 金翔龙, 郑开云. 庙岛群岛地质的初步观察[J]. 海洋与湖沼, 1964, 6(4): 364–370.
Jin Xianglong, Zheng Kaiyun. A preliminary study on the geology of Miaodao Islands[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1964, 6(4): 364–370.
- [31] 崔金瑞, 夏东兴. 山东半岛海岸地貌与波浪、潮汐特征的关系[J]. 黄渤海海洋, 1992, 10(3): 20–25.
Cui Jinrui, Xia Dongxing. The relationship between coastal morphology and the characteristics of waves and tides of Shandong Peninsula[J]. *Advances in Marine Science*, 1992, 10(3): 20–25.
- [32] Komar P D. Beach Processes and Sedimentation[M]. 2nd ed. Englewood-Cliffs: Prentice-Hall, 1998.
- [33] Neate D J M. Underwater pebble grading of Chesil Bank[J]. *Proceedings of the Geologists' Association*, 1967, 78(3): 419–426.
- [34] Driscoll E G. Experimental field study of shell abrasion[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1967, 37(4): 1117–1123.
- [35] 张伟. 渤海海峡南部海域地貌特征及控制因素研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014: 29.
Zhang Wei. Study on the geomorphological characteristic and controlling factors in the southern Bohai Strait[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014: 29.
- [36] 王建华, 卜清军, 许长义. 渤海风暴潮研究进展简介[J]. *天津科技*, 2014, 41(6): 71–73.
Wang Jianhua, Bu Qingjun, Xu Changyi. Research progress of Bohai Sea storm surge[J]. *Tianjin Science & Technology*, 2014, 41(6): 71–73.
- [37] 张国栋, 王益友, 朱静昌, 等. 现代滨岸风暴沉积——以舟山普陀岛、朱家尖岛为例[J]. *沉积学报*, 1987, 5(2): 16–28.
Zhang Guodong, Wang Yiyu, Zhu Jingchang, et al. Modern coastal storm deposits of Putuo Island and Zhujiajian Island, Zhoushan[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1987, 5(2): 16–28.
- [38] 万兵力. 长山列岛国家地质公园主要地质遗迹特征与开发保护措施[J]. *山东国土资源*, 2009, 25(4): 53–55.
Wan Bingli. Main characteristics and the development protection measures of Changshan Islands National Geopark[J]. *Shandong Land and Resources*, 2009, 25(4): 53–55.
- [39] 刘乐军, 李培英, 王东亮, 等. 海岛环境下采石边坡的监测系统构建研究——以山东北长山岛山后村为例[J]. *海洋科学进展*, 2019, 37(1): 140–149.
Liu Lejun, Li Peiying, Wang Dongliang, et al. Monitoring system designing and practicing for the quarry slope on rock island: a case study of Beichangshan Island, Shandong Province[J]. *Advances in Marine Science*, 2019, 37(1): 140–149.
- [40] Kirk R M. Aspects of surf and runoff processes on mixed sand and gravel beaches[J]. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 1975, 57(1/2): 117–133.
- [41] Harrison W. Empirical equations for foreshore changes over a tidal cycle[J]. *Marine Geology*, 1969, 7(6): 529–551.
- [42] 王庆, 仲少云, 刘建华, 等. 山东庙岛海峡的峡道动力地貌[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(2): 17–24.
Wang Qing, Zhong Shaoyun, Liu Jianhua, et al. The channel dynamic geomorphology of Miaodao Strait, Shandong, China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(2): 17–24.

Morphological characteristics based on digital images of gravels from gravels beaches in the Changshan Island, Shandong Province

Wang Xing^{1,2}, Wang Yonghong^{1,2}, Xu Yangyang^{1,2}, Xiang Yawu^{1,2}

(1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, Qingdao 266100, China)

Abstract: As a kind of coastal accumulation body in high-energy environment, natural gravel beach is a good coastal protection barrier due to its coarse particle size and large porosity. The gravel morphology is an important parameter to understand the gravel formation process, but it is difficult to obtain the quantitative parameters of a large number of gravels quickly and accurately. In this study, we surveyed three gravel beaches (Jiuzhangya, Yueyawan, Changtan) in the Beichangshan Island, four gravel beaches (Xianjingyuan, Linhai, Changshanwei and Mingzhuguangchang) in the Nanchangshan Island in the Shandong Province. We measured beach profile, collected gravel samples and took gravel images. Using the software ImageJ for digital image measurement *in situ* without interference, we can quickly obtain a large number of gravel morphologic parameters, including particle size, grinding roundness and shape ratio. The results show that the range of the particle size is 4–79 mm, which was mainly pebbles. The average particle size of the beach in the Beichangshan Island is slightly smaller than that in the Nanchangshan Island, with the largest average particle size of gravels in the Jiuzhangya Beach of the Beichangshan Island and the smallest one in the Xianjingyuan Beach of the Nanchangshan Island. From beach berm to the high tidal line, the average particle size decreases gradually, but increases at waterline. The range of roundness of gravel is 0.59–0.75, and the grade is round. The gravel beaches have reached a relatively mature stage based on roundness, with the best roundness in the Yueyawan Beach and the worst roundness in the Changtan Beach of the Beichangshan Island. The gravel roundness increases from land to sea. The shape ratio ranges from 1.36 to 1.77, which is negatively correlated with the gravel roundness ($R^2=0.98$). The gravel gradually changed from long strip to elliptic shape from land to sea. The gravel beaches morphology of the Changshan Island is affected by the provenances, dynamic conditions and human activities. The slope range of the gravel beach in the study area is 16%–35%, and they are positively correlated with the gravel particle size.

Key words: gravel beach; digital image; morphologic characteristics; control factors