



浙江省沿海砾石滩地形地貌特征与发育模式

张敏, 时连强, 郭俊丽, 原峰, 唐玲

Topographic and geomorphological characteristics and development pattern of gravel beaches along the coast of Zhejiang Province

ZHANG Min, SHI Lianqiang, GUO Junli, YUAN Feng, and TANG Ling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023121202>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海滩也缺乏砂-砾过渡粒级的沉积物

The grain size gap at gravel-sand transition in beach sediments

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(6): 69-73

海岸冲淤动态的理论分析: 物质收支、剖面形态、岸线进退

Theoretical framework for coastal accretion-erosion analysis: material budgeting, profile morphology, shoreline change

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(2): 1-17

沉积物供给影响下厦门岛东南部海滩响应差异性研究

The study of the difference of beach response under sediment supply in southeast of Xiamen Island

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(4): 96-108

山东半岛东南部典型砂质岸滩季节性演化及控制因素探讨——以海阳万米海滩为例

Seasonal evolution of the typical sandy coast of southeastern Shandong Peninsula and controlling factors—Take the 10 000-meter beach in Haiyang as an example

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(1): 57-67

热带西太平洋沉积物浮游有孔虫壳体发育过程的三维重建与壳体形态对生态和古海洋的指示意义

Three-dimensional reconstruction of ontogeny of planktonic foraminifera in tropical West Pacific sediments and its ecological and paleoceanographic implications

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(4): 17-29

北极拉普捷夫海沉积物痕量金属赋存形态及富集机制

Speciation and enrichment of trace metals in Laptev Sea shelf sediment

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(4): 61-72



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张敏, 时连强, 郭俊丽, 等. 浙江省沿海砾石滩地形地貌特征与发育模式 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(2): 55-67.

ZHANG Min, SHI Lianqiang, GUO Junli, et al. Topographic and geomorphological characteristics and development pattern of gravel beaches along the coast of Zhejiang Province[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(2): 55-67.

浙江省沿海砾石滩地形地貌特征与发育模式

张敏^{1,2}, 时连强^{1,3}, 郭俊丽^{1,3}, 原峰², 唐玲²

1. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

2. 广东省海洋发展规划研究中心, 广州 510220

3. 自然资源部海洋空间资源管理技术重点实验室, 杭州 310012

摘要: 利用2019年7月和2020年7—8月的浙江省海滩现场调查数据, 结合历史数据资料, 系统分析了浙江省不同区域砾石滩的剖面地形特征、平面形态特征和表层沉积物粒度特征; 同时, 利用相关性分析、主成分分析、聚类分析和非度量多维尺度分析等数理统计方法, 探讨了影响浙江砾石滩发育的主要因子, 阐明了浙江砾石滩的发育模式。结果表明: ①从剖面形态可以看出, 浙江砾石滩剖面形态大多呈斜线型, 部分砾石滩呈肩滩型。从平面形态可以看出, 浙中海域砾石滩海滩规模较大, 岬角遮蔽能力较弱, 因此受到的波浪作用最强。从沉积物粒度分布特征可以看出, 浙中海域雀儿岙岛以北的砾石滩沉积物较粗, 而浙中海域和浙南海域砾石滩则具有较多的扁长和杆状砾石。②浙江砾石滩可分为3个类群: 第一类群主要分布在浙中浙南海域, 受潮流作用较强; 第二类群主要分布在浙北海域, 受潮汐作用较弱, 规模较小, 而第三类群分布较为分散, 规模较大。③地质构造背景、水动力环境以及沉积物来源等对浙江砾石滩的形成过程具有重要的影响, 其中地质构造背景是海滩发育的主要影响因素。砾石滩在进行生态保护和生态恢复过程中, 还需要考虑波浪作用和潮汐作用的影响。

关键词: 平面形态; 发育模式; 剖面形态; 沉积物粒度; 砾石滩

中图分类号: P737.1

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023121202

Topographic and geomorphological characteristics and development pattern of gravel beaches along the coast of Zhejiang Province

ZHANG Min^{1,2}, SHI Lianqiang^{1,3}, GUO Junli^{1,3}, YUAN Feng², TANG Ling²

1. State research center for island exploitation and management, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

2. Guangdong Center for Marine Development Research, Guangzhou 510220, China

3. Key Laboratory of Ocean Space Resource Management Technology, MNR, Hangzhou 310012, China

Abstract: Using on-site survey data from July 2019 and July-August 2020 in Zhejiang Province, combined with historical data, we systematically analyzed the characteristics of topological profiles, planar morphology, and surface sediment grain size of gravel beaches in various locations of Zhejiang Province. Meanwhile, using mathematical statistical methods such as correlation analysis, principal component analysis, cluster analysis, and non-metric multidimensional scaling, the main factors affecting the development of the gravel beaches were explored, and the development pattern of the gravel beaches was elucidated. Results indicate that in the profile morphology, it can be seen that most of the gravel beach profiles are oblique line typed, and some of them have a beach berm. In planform, gravel beaches in the central Zhejiang sea area are relatively larger, have weaker headland, and thus the shielding ability is weak and undergo stronger wave action. In distribution pattern of sediment particle size, the gravel beaches north of Que'er Ao Island in the central Zhejiang sea area have coarsest pebbles and thicker deposits, while those in the central and southern Zhejiang sea areas have more prolate and club-shaped gravels. The gravel beaches in Zhejiang could be placed into three groups by cluster analysis. The first group is mainly seen in the central and southern Zhejiang, and is strongly affected by tidal currents. The second group is mainly distributed in the northern Zhejiang, with weaker tidal effects and smaller. The

资助项目: 浙江省自然科学基金联合基金重点项目“浙江砂质海岸与淤泥质海岸生态修复关键技术研究”(LHZ22D060001); 国家重点研发计划项目“典型海岸侵蚀防护与活力海岸构建关键技术”(2022YFC3106201); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“岬湾海滩砂泥分界线迁移动力机制研究——以舟山沙海滩为例”(JG2315); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“多时间尺度浙江典型岬湾海滩动力地貌演变及控制机制”(XRJH2309)

作者简介: 张敏(1995—), 女, 工程师, 主要从事海洋大数据建设研究, E-mail: cheungmin@sio.org.cn

通讯作者: 时连强(1977—), 男, 正高级工程师, 主要从事河口海岸过程与资源环境效应研究, E-mail: lqshi@sio.org.cn

收稿日期: 2023-12-12; **改回日期:** 2024-01-29. 张现荣编辑

third group distributed more sporadically in the province and relatively coarser. The geological structure background, hydrodynamic environment, and sediment supply have important impacts on the formation process of the gravel beaches, among which the geological structure background is the main factor on beach development. For the ecological protection and ecological restoration regarding the gravel beaches, the influences of wave action and tidal action must be considered.

Key words: plane morphology; developmental pattern; profile morphology; sediment grain size; gravel beach

砾石滩一般发育在基岩海岸附近,其沉积物多来源于海岸侵蚀、海底侵蚀、山体滑坡、河流输入以及沿岸的运输等,在波浪、潮流或者风暴等的作用下,侵蚀堆积成砾石滩^[1-2]。由于砾石滩具有高度渗透性及分选作用,砾石滩会呈现不同的剖面形态,因此其剖面形态可以反映出海滩的稳定性特征^[1,3-5]。影响海岸形态发育的因子包括地质构造背景、水动力作用强度、沉积物来源及海湾开口方向等,在对海滩平面形态的研究中,抛物线关系是当前确定岬间海湾静态平衡形态最广泛使用的经验关系^[6-9]。在波浪、潮汐、风暴等外力作用下,滩上的砾石会发生磨蚀和搬运,其粒度大小及形态特征相应发生变化,因此砾石的粒度特征能够反映出搬运作用的强弱以及磨蚀作用的长短^[10-11]。

中国砾石海滩主要分布在浙江的岛屿海岸^[12],研究浙江砾石滩的地形地貌特征与发育模式对于丰富国内砾石滩沉积动力学研究方法具有重要的科学意义,但浙江对海滩的研究以砂质海滩为主^[13-14],对于砾石海滩的研究较少^[2,15-17],尤其缺少对其发育模式的探索。本文拟利用夏季在浙江省采集的砾石滩地形数据和沉积物数据,分析浙江省砾石滩的地形地貌特征、平面形态特征和沉积物粒度特征,并借助多种统计方法探讨其发育模式,为砾石滩的生态保护与绿色利用提供参考。

1 研究区概况

浙江沿海及海岛所处构造单元均属华夏古陆部分,古陆基底为中元古界蓟县系陈蔡群变质岩系;盖层为中生代火山沉积岩系,呈现大面积分布,变质岩系基底少见,其绝大部分被后期火山-沉积岩系覆盖。沿海基岩地区主要出露中生代火山-沉积岩系,分布在苍南沿海、温岭玉环沿海、三门湾及象山港沿岸地区;另外还有燕山晚期侵入岩有零星分布,主要出露于象山县爵溪海岸和甌江河口南部沿海平原中。火山岩系和侵入岩的地层时代均为白垩纪,前者岩性主要为熔结凝灰岩、流纹岩、粉砂岩、砂岩、沙砾岩、玄武岩等,后者岩性则以花岗岩为主^[12]。

浙江省地处中国东南沿海、长江三角洲南翼,自北向南大体上可以分为浙北海域、浙中海域和浙南海域(图1)。浙北海域主要是舟山市的舟山群岛,此区岛屿星罗棋布,分布范围广阔,水道纵横交错,砾石滩主要分布在舟山群岛外侧岛屿上,如位于朱家尖岛东侧的乌石塘砾石滩和小乌石塘砾石滩;浙中海域岛屿少而分散,风浪相对较大,砾石滩主要分布在台州市临海市和椒江区的海岛上,还有部分砾石滩分布于宁波市象山县,如天作塘砾石滩;浙南海域为温州市所辖范围,此区岛屿多而相对集中,砾石滩较少,主要位于洞头区域,分别为仰天澳砾石滩、大背澳砾石滩和南策砾石滩^[18]。

浙江省属典型的亚热带季风气候区,受东亚季风影响,冬夏盛行风向有显著变化,年平均风速为2.6 m/s。浙北海域波浪除风浪外,全年大多数时间都出现涌浪,常浪向为ESE、SE及SSE,年平均波高1.0 m,潮汐类型为正规半日潮和不正规半日潮,平均潮差1.86~3.31 m;浙中海域开敞,盛行混合浪,其中以涌浪为主的混合浪居多,浪向以N-NE向为主,年平均波高1.2 m,潮汐性质为正规半日潮,平均潮差为2.45~5.05 m;浙南海域常浪向为E向,年平均波高1.0 m,属于正规半日潮海区,平均潮差为3.68~4.48 m^[12,19]。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

2019年7月和2020年7—8月,对浙江省25个长度大于100 m的砾石滩的地形剖面和表层沉积物进行了实地测量(表1)。从后滨直至最低潮位处,利用基于CORS系统的RTKGPS沿布设好的剖面进行地形测量,获得各测点的地理坐标值和高程数据,其中坐标系统采用CGCS2000,高程基准为1985国家高程基准,最终共得到了64条地形剖面数据。

在测量海滩地形的同时进行表层沉积物采样,沿剖面分别在后滨、滩肩和滩面各采集一个站位的样品,对于滩肩不发育的海滩,采样站位分别位于高潮带、中潮带和低潮带。砾石滩采样方法是在采

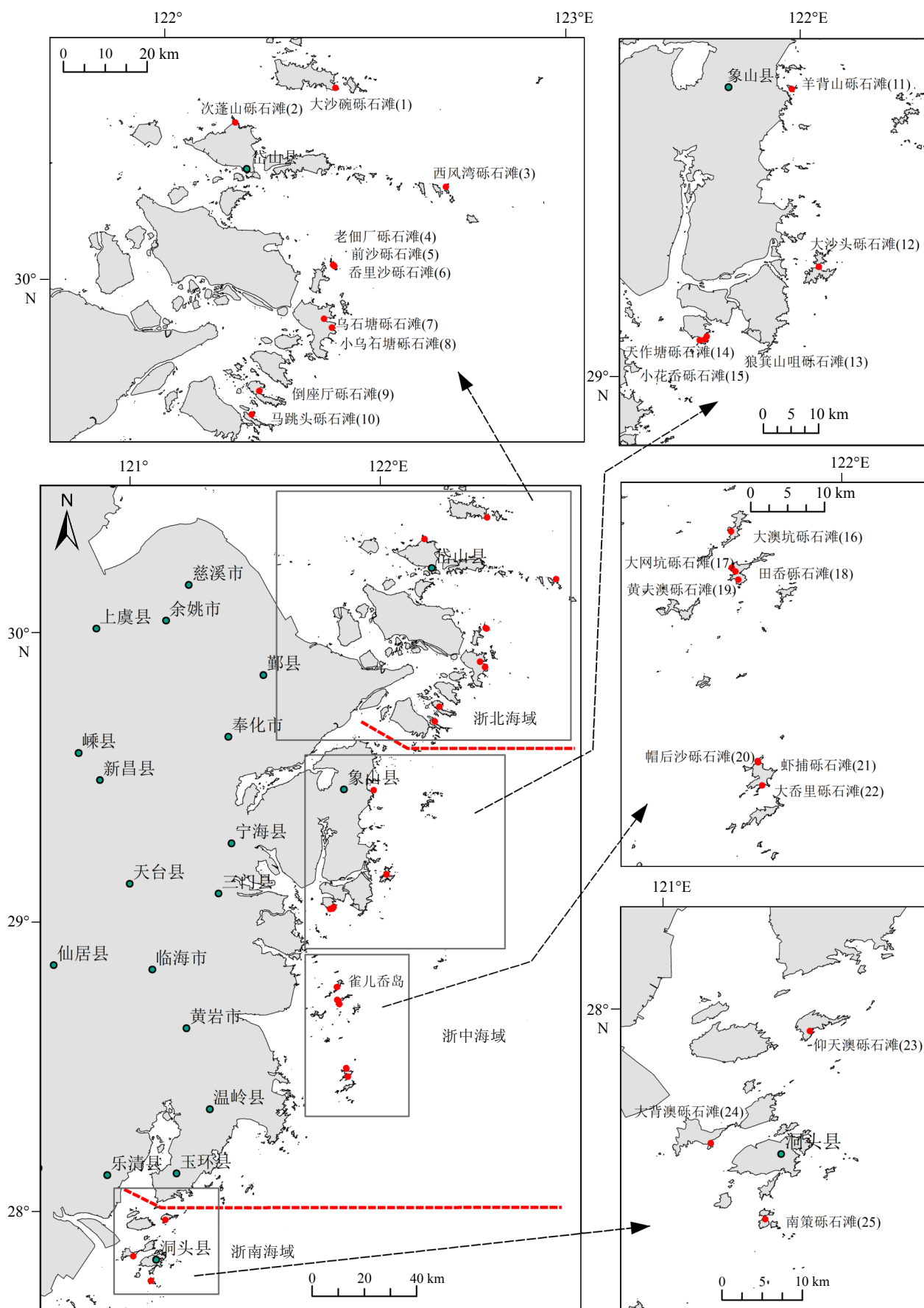


图 1 研究区域与研究砾石滩分布图

Fig.1 The study area and the locations of gravel beaches in Zhejiang Province

表1 海滩测量位置和时间信息
Table 1 Specifications of survey on gravel beaches

序号	海滩名称	所在地区	所在海域	测量时间	位置	平均潮差/m	平均波高/m	所在区域岩性
1	大沙碗砾石滩	舟山市	浙北海域	2020.7.13	30.42°N、122.43°E	2.28	1.10	熔结凝灰岩夹凝灰质砂岩
2	次蓬山砾石滩	舟山市	浙北海域	2020.7.10	30.34°N、122.18°E	1.91	1.10	熔结凝灰岩
3	西风湾砾石滩	舟山市	浙北海域	2020.7.4	30.2°N、122.7°E	2.62	1.10	碱长花岗岩
4	老佃厂砾石滩	舟山市	浙北海域	2020.7.7	30.04°N、122.42°E	2.32	0.50	熔结凝灰岩夹凝灰质砂岩
5	前沙砾石滩	舟山市	浙北海域	2020.7.7	30.03°N、122.42°E	2.32	0.50	熔结凝灰岩夹凝灰质砂岩
6	岙里沙砾石滩	舟山市	浙北海域	2020.7.7	30.03°N、122.43°E	2.32	0.50	熔结凝灰岩夹凝灰质砂岩
7	乌石塘砾石滩	舟山市	浙北海域	2019.7	29.92°N、122.4°E	2.42	0.50	碱长花岗岩
8	小乌石塘砾石滩	舟山市	浙北海域	2019.7	29.9°N、122.42°E	2.42	0.50	碱长花岗岩
9	倒座厅砾石滩	舟山市	浙北海域	2020.8.24	29.76°N、122.24°E	2.75	0.50	碱性花岗岩
10	马跳头砾石滩	舟山市	浙北海域	2020.8.24	29.71°N、122.22°E	2.75	0.50	花岗斑岩
11	羊背山砾石滩	宁波市	浙中海域	2020.8.29	29.47°N、121.98°E	2.45	0.40	碱长花岗岩
12	大沙头砾石滩	宁波市	浙中海域	2020.8.19	29.18°N、122.04°E	3.62	0.40	含角砾熔结凝灰岩
13	狼箕山咀砾石滩	宁波市	浙中海域	2020.8.17	29.07°N、121.83°E	3.84	0.50	石英正长斑岩
14	天作塘砾石滩	宁波市	浙中海域	2020.8.17	29.06°N、121.83°E	3.84	0.50	石英正长斑岩
15	小花岙砾石滩	宁波市	浙中海域	2020.8.17	29.06°N、121.82°E	3.84	0.50	石英正长斑岩
16	大澳坑砾石滩	台州市	浙中海域	2020.8.13	28.79°N、121.85°E	3.60	0.50	含角砾熔结凝灰岩
17	大网坑砾石滩	台州市	浙中海域	2020.8.12	28.75°N、121.85°E	3.60	0.50	熔结凝灰岩
18	田岙砾石滩	台州市	浙中海域	2020.8.12	28.74°N、121.85°E	3.60	0.50	熔结凝灰岩
19	黄夫澳砾石滩	台州市	浙中海域	2020.8.12	28.73°N、121.86°E	3.60	0.50	熔结凝灰岩
20	帽后沙砾石滩	台州市	浙中海域	2020.8.16	28.51°N、121.89°E	3.39	0.50	熔结凝灰岩与流纹岩、流纹斑岩互层
21	虾捕砾石滩	台州市	浙中海域	2020.8.16	28.51°N、121.89°E	3.39	0.50	熔结凝灰岩与流纹岩、流纹斑岩互层
22	大岙里砾石滩	台州市	浙中海域	2020.8.16	28.48°N、121.89°E	3.39	0.50	熔结凝灰岩
23	仰天澳砾石滩	温州市	浙南海域	2020.8.6	27.98°N、121.19°E	4.26	0.30	熔结凝灰岩夹凝灰质砂岩与流纹岩
24	大背澳砾石滩	温州市	浙南海域	2020.8.5	27.85°N、121.06°E	4.01	0.30	熔结凝灰岩
25	南策砾石滩	温州市	浙南海域	2020.8.5	27.77°N、121.13°E	4.01	1.00	熔结凝灰岩

样点分别量取 1 m^3 的样方(图2),在样方内随机选取砾石进行现场测量,采样重量以 Gale 和 Hoare^[20]提出的方法为标准。共采集样方 65 个,测量砾石 1948 颗。利用游标卡尺分别测量每颗砾石的 3 个轴(图3):长轴(A)、中轴(B)和短轴(C)。

浙江省砾石滩主要属于岬湾型海滩,具有上、下控制岬角(有时下岬角不明显或缺失)、遮蔽段、切线段(有时还分出过渡段)等共同的地貌要素,这些要素可以用最大凹入度 a 、湾口弦长 b 、直线段长度 L 、岬角长度 S 、湾口方向角 γ 、螺旋型切角 β 、凹入长度与湾口弦长之比 a/b 、海滩平均宽度 w 和海滩长度 l (图3)等形态因子来表示。本文以 2018 年

的实测岸线矢量数据为基础,结合 2018 年航空影像数据,借助 Arcgis 软件得到各个砾石滩平面形态因子值。

2.2 研究方法

粒度分析:通过测量砾石的 A、B、C 三个轴,进而可以计算出砾石的形态参数:砾石平均粒径(D)、最大投影球度(MPS: maximum projection sphericity)、扁长指数(OPI: oblate-prolate index)以及盘状-杆状指数(DRI: disc-rod index)等(表2),这组参数是粗颗粒沉积物结构分析中的重要参数,可以提供沉积物的产地、搬运特征及沉积动力环境等有



图 2 砾石滩采样样方现场照片
拍摄时间: 2020 年 8 月 24 日。

Fig.2 Photo of quadrat sampling on gravel beaches
Photos were taken on August 24th in 2020.

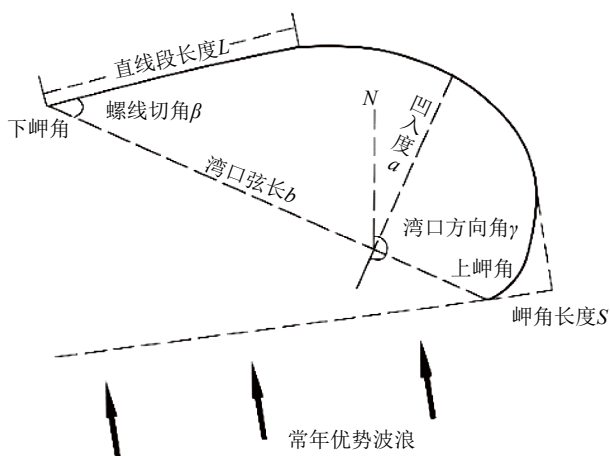


图 3 弧形海岸形态要素定义示意图^[6]

Fig.3 Parameters definition for arc-shaped coast^[6]

关信息^[15]。

主成分分析法: 为了找出影响砾石滩平面形态的主要因子, 用主成分分析方法对砾石滩地貌动力因子进行分析。主成分分析会得到各主成分的特征值、方差贡献率和累计方差贡献率, 当累计方差贡献率大于等于 70%~85%, 表征了主成分能反映

地貌动力因子代表的主要信息。在各主成分因子载荷中, 当某一因子在该主成分总载荷中占比较大时, 说明该因子与这一主成分的相关性较大, 正负号代表正负相关性。

分层聚类分析法: 为了确定浙江省砾石滩类型, 运用分层聚类分析方法对砾石滩进行聚类分析, 以分成多种类群。

非度量多维尺度分析法: 运用非度量多维尺度分析法进一步探讨各类群砾石滩的关系, 非度量多维尺度分析与主成分分析都属于降维分析方法, 但主成分是基于数据线性结构特征, 而非度量多维尺度分析则适用于复杂的非线性结构数据。

3 结果与分析

3.1 地形地貌特征

3.1.1 剖面形态特征

砾石海滩具有高度渗透性, 因此在极端风暴条件下也不会形成沙坝地形, 在波浪和潮汐的作用

表 2 砾石形态参数计算方法及指示意义

Table 2 Calculation methods and referential meaning of gravel shape parameters

形态参数	计算公式	指示意义
D	$D = \frac{\sum D_n}{n}$ $D_n = \sqrt[3]{A \times B \times C}$	/
MPS	$[C^2/(A \times B)]^{1/3}$	反映的是在流体中拖曳力与重力作用的平衡, 是表征水中砾石发生搬运或沉降行为的一个重要指标, 球度值越大, 说明磨蚀作用越长
OPI	$10 \times [(A-B)/(A-C)-0.5]/(C/A)$	用来从扁长砾石中分辨出扁圆砾石的一个非常有用的指标, 数值越大, 扁长砾石越多
DRI	$(A-B)/(A-C)$	用来分辨杆状砾石和盘状砾石的一个非常有效的指标, 数值越大, 杆状砾石占比越大

下,由于砾石的分选作用,剖面一般呈带状分布,主要表现为两种形态:第一种形态从波峰到波基呈单一直线,对水动力环境的响应较弱,海滩形态较为稳定,为斜线型;第二种形态是复合的、塌陷的形式,可能在中低潮位置或附近出现明显的坡度转折点,通常由海滩沉积物的变化反映出来,为滩肩型,因此海滩剖面形态可以反映海滩的稳定性^[1,3-5]。砾石滩的剖面形态会受人为扰动的影响,但在海滩调查过程中,除天作塘砾石滩(14号)外,其他海滩在调查时未受到人为活动的影响。

浙江砾石滩水平宽度较小,滩面较陡,坡度(*i*)变化范围为0.06~0.21,平均值为0.14。剖面形态大多呈斜线型,部分海滩呈滩肩型(图4—6)。

浙北海域砾石滩坡度值总体较大,以滩肩型为主。滩肩型砾石滩海滩宽度范围为18.85~37.88 m,除乌石塘砾石滩(7号)和小乌石塘砾石滩(8号)外,呈自北向南逐渐减小的趋势,滩肩以下坡度较

滩肩以上陡。斜线型海滩较为稳定,宽度较滩肩型小,为18.46~26.53 m,除大沙碗砾石滩(1号)外,海滩宽度自北向南呈逐渐增大的趋势,坡度值则与滩肩型相近。

由图1可以看出,浙中海域滩肩型砾石滩开口朝向为东南向,滩肩较宽,但海滩宽度均小于30 m,滩肩以下坡度值明显大于滩肩以上,大沙头砾石滩(12号)因受外海海岛遮蔽作用最弱,水动力作用最强,坡度最大。斜线型海滩宽度均大于25 m,较滩肩型砾石滩宽度大,并且大部分海滩剖面上发育滩脊沟槽,但坡度与滩肩型砾石滩相近。天作塘砾石滩(14号)和小花岙砾石滩(15号)所处位置均受海岛岬角遮蔽作用,海滩坡度较小,分别为0.98和0.06,其中前者属于人工海滩,剖面形态较为平直,海滩宽度最大,为76.19 m。

浙南海域只有三个砾石滩,仰天澳砾石滩(23号)属于滩肩型,海滩宽度为45.59 m,但滩肩以

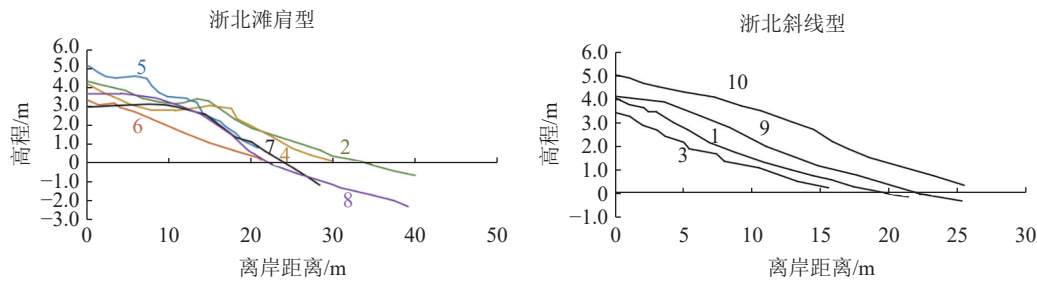


图4 浙北海域砾石滩剖面形态

Fig.4 Profile shape of the gravel beaches in the northern Zhejiang

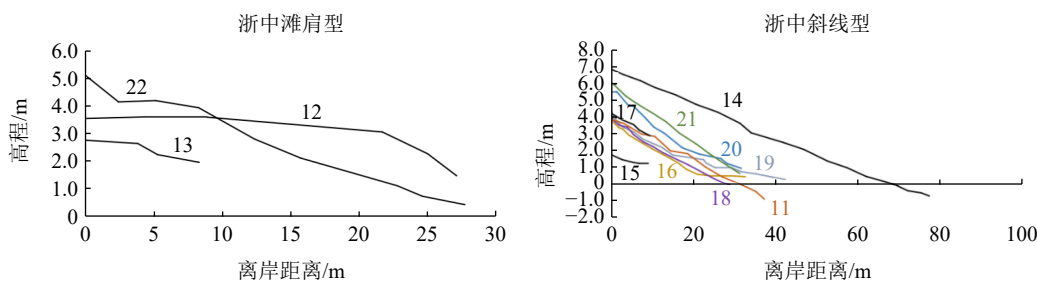


图5 浙中海域砾石滩剖面形态

Fig.5 Profile shape of the gravel beaches in the central Zhejiang

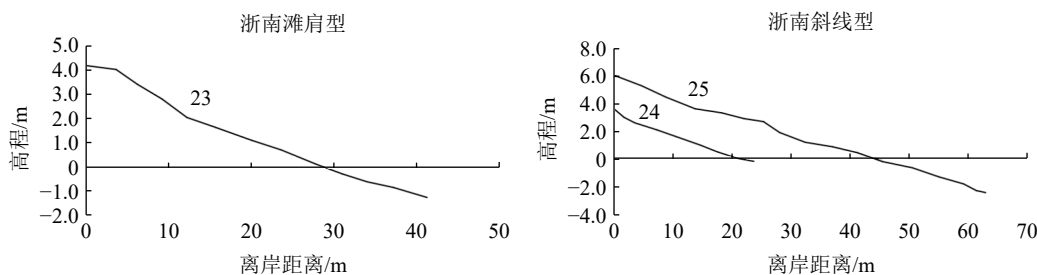


图6 浙南海域砾石滩剖面形态

Fig.6 Profile shapes of the gravel beaches in the southern Zhejiang

上宽度较窄; 大背澳砾石滩(24号)和南策砾石滩(25号)都属于斜线型, 宽度分别为 24.79 m 和 66.41 m, 三个砾石滩的坡度值相近。

通过比较可知, 对于滩肩型砾石滩, 浙南海域的宽度最大, 浙北的次之, 浙中的最小, 海滩坡度自北向南逐渐减小; 而斜线型砾石滩宽度由北向南则呈逐渐增大的趋势, 浙北海域砾石滩坡度比浙中和浙南的大。

3.1.2 平面形态基本特征

浙江省砾石滩多为岬湾型海滩, 从图 7 可以看出, 浙北海域乌石塘砾石滩和小乌石塘砾石滩、浙中海域大沙头砾石滩和大岙里砾石滩及浙南海域大背澳砾石滩及仰天澳砾石滩的平面形态均具有上、下控制岬角(有时下岬角不明显或缺失)、遮蔽段、切线段(有时还分出过渡段)等共同的地貌要素, 符合弧形海岸形态。

浙中海域砾石滩 a 值较浙北和浙南海域的大(图 8), 反映出较强的波浪作用。浙中海域砾石滩

b 值最大, 表明遮蔽作用较弱, 浙北的次之, 浙南的最小。浙北海域砾石滩 L 值较小, 说明砾石滩不被岬角遮蔽的岸段较短, 浙中和浙南的相对较长。浙中和浙南海域砾石滩岬角长度 S 主要为 0~90 m, 浙北的则多小于 50 m, 岬角遮蔽范围较小。浙北海域砾石滩湾口朝向以 EN 为主, 浙中的以 WS 向的居多, 而浙南的则是 EN 和 ES 两个朝向。浙北、浙中和浙南海域砾石滩 β 和 a/b 值相差不大, 但浙北和浙南海域部分海滩 a/b 值相对较大, 反映更强的遮蔽作用。砾石滩的 w 值大部分为 <60 m, 浙北海域的较小, 为 18~30 m; 浙中海域的相对较大, 主要分布在 20~50 m。砾石滩的 l 值大部分为 <400 m, 其中浙中的较长, 为 100~400 m, 浙北和浙南的相对较短。

3.2 沉积物粒度特征

对浙江砾石滩沉积物的 MPS、OPI、DRI 和平均粒径等进行分析(表 3、图 9), 从整体上看, 浙中海



图 7 浙江典型砾石滩平面形态

Fig.7 Typical planar morphology of gravel beaches in Zhejiang Province

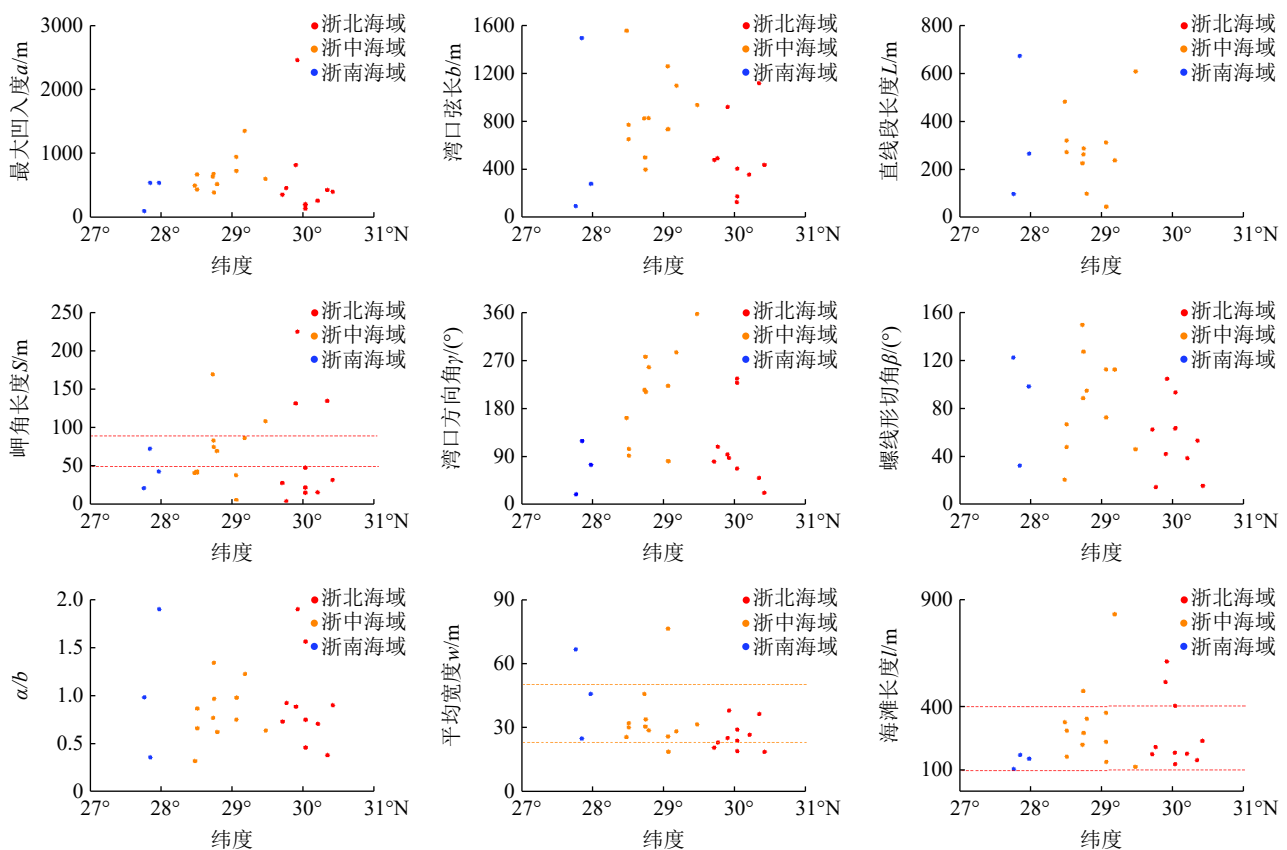


图8 砾石滩各平面参数分布

Fig.8 Distribution of planar parameters of gravel beaches in Zhejiang

域雀儿岙岛以北砾石滩沉积物颗粒最粗,雀儿岙岛以南与浙北、浙南都相对较细。浙北和浙南海域砾石滩沉积物的 MPS 较大,反映出较长时间的磨蚀作用。浙中和浙南海域沉积物 OPI 较大,反映出较多的扁长砾石,而浙北海域相对较小,说明扁长砾石较少。浙中和浙南海域沉积物的 DRI 较大,表明杆状砾石较多,而浙北海域相对较小。

浙北海域中,岱山县海域砾石滩沉积物 MPS 较大, OPI 和 DRI 也偏大,反映出较长时间的磨蚀作用以及较多的扁长和杆状砾石,这与 Landon 提到的砾石在搬运过程中由棱角逐渐被磨圆,并又逐渐变化为盘状或扁长状这一结论一致^[21]。

3.3 结果分析

3.3.1 聚类分析

对浙江海域 25 个砾石滩进行聚类分析(图 10),取距离阈值 21,可以分成 3 大类群。

第一类群主要分布在浙中海域和浙南海域,包括大澳坑、大沙头、大网坑、黄夫澳、狼箕山咀、天作塘、田岙、小花岙、南策和仰天澳等砾石滩。此类群海滩所在海域潮差较大,平均潮差为 3.60~4.26 m,潮流作用较强, a/b 值偏大,为 0.62~1.89,海

滩形态整体呈 U 型。

第二类群分布在浙北海域,包括大沙碗、次蓬山、岙里沙、马跳头、倒座厅、老佃厂、前沙和西风湾等砾石滩。此类群海滩所在海域潮汐作用较弱,平均潮差为 1.91~2.75 m,海滩规模也较小。

第三类群包括乌石塘、虾捕、小乌石塘、帽后沙、大背澳、大岙里和羊背山等砾石滩,分布在朱家尖岛、羊背山岛、上大陈岛和霓屿岛上。此类群海滩湾口弦长较大,为 771.33~1552.37 m,规模较其他两个类群大。

3.3.2 非度量多维尺度分析

非度量多维尺度分析是将研究对象(样本或变量)之间的相似(或不相似)距离简化到低维空间进行定位、分析和归类,同时又保留对象之间原始关系的数据分析方法。这种方法通过直观空间定位图形进行海滩类群分布的展示,能够进一步验证砾石滩发育模式的分类。利用非度量多维尺度分析方法对砾石滩的相似性进行排序,能更加直观地反映各海域海滩的分类情况。分析指标变量选取粒度特征因子、剖面形态因子和平面形态因子。从图 11 可以看出,砾石滩的分类总体上与聚类分析一致,第二类群的大背澳砾石滩(图上 24 号点)与

表 3 沉积物粒径信息

Table 3 Specifications of sediment grain-size parameters

序号	海滩名称	MPS	OPI	DRI	平均粒径/cm
1	大沙滩砾石滩	0.71	0.85	0.53	4.42
2	次蓬山砾石滩	0.69	0.54	0.54	4.03
3	西风湾砾石滩	0.67	0.78	0.55	4.12
4	老佃厂砾石滩	0.63	-1.22	0.45	3.75
5	前沙砾石滩	0.69	0.59	0.54	3.78
6	岙里沙砾石滩	0.62	-0.55	0.49	3.35
7	乌石塘砾石滩	0.62	-1.87	0.44	3.74
8	小乌石塘砾石滩	0.65	-1.26	0.46	4.01
9	倒座厅砾石滩	0.50	-4.82	0.41	3.54
10	马跳头砾石滩	0.56	0.60	0.46	4.17
11	羊背山砾石滩	0.64	1.81	0.67	4.84
12	大沙头砾石滩	0.64	-0.65	0.47	5.30
13	狼箕山咀砾石滩	0.65	0.84	0.54	4.58
14	天作塘砾石滩	0.62	-0.44	0.50	4.70
15	小花岙砾石滩	0.59	0.39	0.53	3.65
16	大澳坑砾石滩	0.60	2.93	0.66	3.29
17	大网坑砾石滩	0.47	-2.04	0.48	2.57
18	田岙砾石滩	0.48	-5.45	0.48	3.28
19	黄夫澳砾石滩	0.65	1.72	0.57	4.33
20	帽后沙砾石滩	0.63	2.31	0.61	3.60
21	虾捕砾石滩	0.63	1.93	0.59	3.66
22	大岙里砾石滩	0.62	0.10	0.53	2.92
23	仰天澳砾石滩	0.60	-0.96	0.48	4.39
24	大背澳砾石滩	0.60	1.77	0.59	4.11
25	南策砾石滩	0.69	2.80	0.65	3.94

第一类群有重叠,这在非度量多维尺度分析中是一个正常的现象,一方面是因为这些海滩的地貌动力因子很相似,另一方面也表现了浙江岬湾型砾石滩影响因子的复杂性。

4 讨论

砾石滩的形成过程受到很多因素的共同影响,在对海滩进行生态修复和生态保护的过程中,只有明确海滩的发育条件,才能制定相应的保护和修复方案。本文参考前人研究方法,对浙江省海滩地貌动力因子进行主成分分析,发现地质构造背景、沉

积物来源和水动力条件对海滩具有重要的影响,符合前人的结论^[22]。对海滩的主要影响因子进行分析及更深入的探讨,以研究砾石滩的发育模式。

4.1 主要影响因子分析

结合前人的研究方法和成果^[6-7,23],对标准化处理后的 25 个海滩的地貌动力因子(海滩坡度 i 、平均粒径 Mz 、最大凹入度 a 、直线段长度 L 、湾口弦长 b 、岬角长度 S 、湾口方向角 γ 、螺线型切角 β 、最大凹入度与湾口弦长之比 a/b 、平均潮差 TR 和平均波高 \bar{H})分类型分区域进行主成分分析。

从表 4 可以看出,前 4 个主成分对总方差的累计贡献率达到 73.36%,因此可以用前 4 个主成分来分析浙江海域砾石滩的主要动力地貌特征。提取各指标因子在前 4 个主成分中的载荷(表 5)。

在第一成分中,最大凹入度 a 、直线段长度 L 、湾口弦长 b 和岬角长度 S 的载荷相对较大,分别为 0.26、0.23、0.21 和 0.22,表明地质构造背景是砾石滩形成的决定性因素。

第二主成分中,海滩坡度 i 和沉积物平均粒径 Mz 载荷占比较大,载荷量分别为 0.33 和 0.29,表明沉积物来源是砾石滩形成过程的重要影响因素。

第三、第四主成分中,最大凹入度与湾口弦长之比 a/b 、平均潮差 TR 、湾口方向角 γ 和平均波高 \bar{H} 的因子载荷最大,载荷量分别为 0.51、-0.39、0.53 和 0.35,反映了波浪作用、潮汐作用以及海滩开口方向对海滩形成过程的影响。

4.2 主要影响因素探讨

4.2.1 地质构造背景

地质构造是海岸地貌形态发育的基础^[6,24]。我国滨海砾石沉积地貌主要发育在构造隆起带上,浙江海岛区处于中生代以来的中国东部活动大陆边缘构造环境中,古近纪开始,沿海区全面隆起,处于剥蚀、侵蚀构造环境,因此具有发育砾石滩的条件^[25]。从图 1 可以看出,浙江砾石滩多分布于浙江海岛上,这与砾石滩的地质构造发育条件相符。由于地质构造背景的不同,海滩的遮蔽作用也不同,从平面形态上可以看出,浙中海域砾石滩的遮蔽作用最弱,浙南海域最强,当遮蔽作用较弱时,会受到更强的水动力作用,更有利于砾石滩发育,因此浙中海域有较多的砾石滩,而浙南海域只有 3 个。

4.2.2 沉积物来源

砾石滩的沉积物来源一般有 3 种:发育在冰碛海岸或高寒海岸的砾石滩,其沉积物来源于冰碛

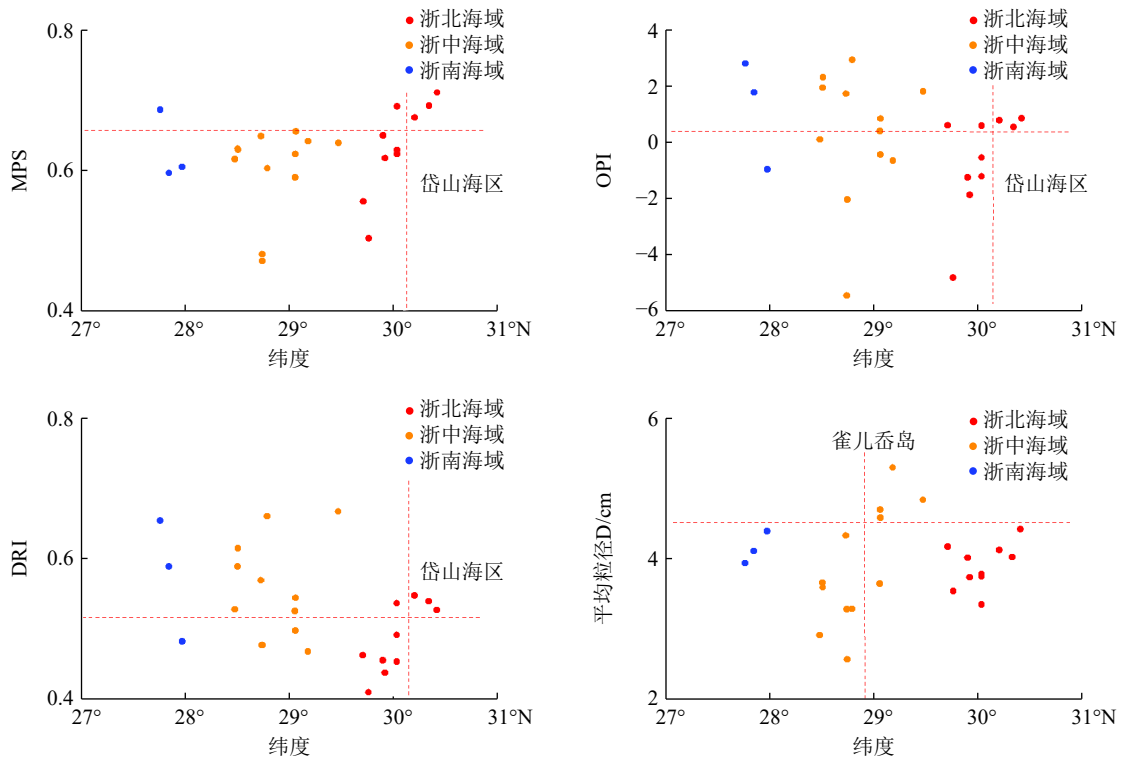


图9 砾石滩各粒度参数分布

Fig.9 Distribution of grain size parameters regarding the gravel beaches

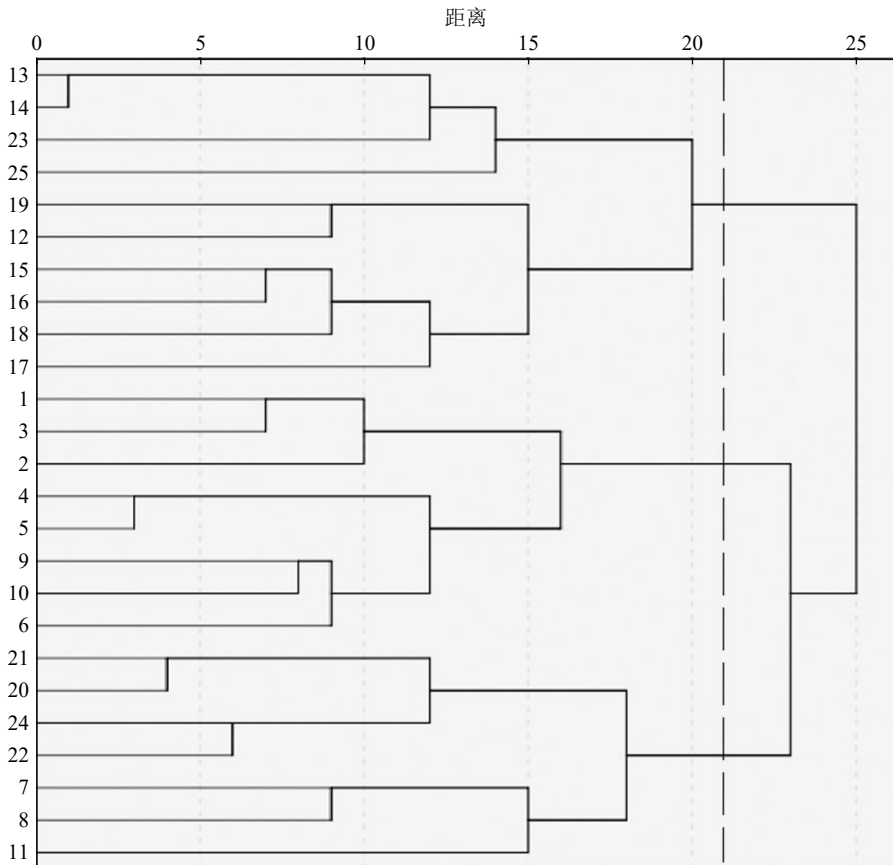


图10 砾石滩聚类图

Fig.10 Dendrogram of the gravel beaches

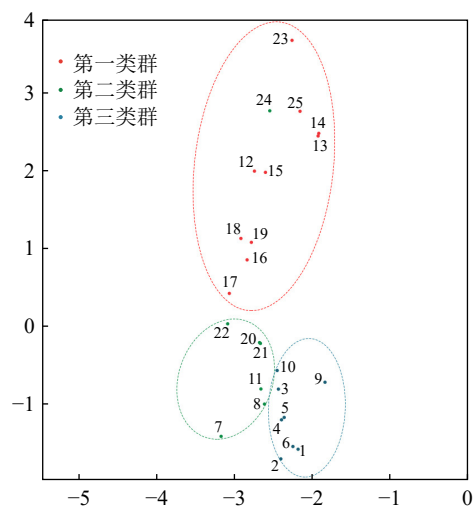


图 11 砾石滩在二维非度量尺度空间上的分布

Fig.11 Gravel beaches in the MDS two-dimensional space

表 4 砾石滩各主成分特征值、方差贡献率和累计贡献率

Table 4 The eigenvalues, variance contribution rate and accumulated contribution rate of principal components of gravel beaches

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	3.107	28.247	28.247
2	2.261	20.552	48.798
3	1.596	14.510	63.309
4	1.106	10.053	73.362
5	1.059	9.625	82.987
6	0.810	7.367	90.354
7	0.424	3.852	94.206
8	0.347	3.154	97.360
9	0.163	1.481	98.841
10	0.090	0.816	99.657
11	0.038	0.343	100.000

物;发育在构造海岸的砾石滩,其沉积物来源于河流;当发育于波浪作用占主导地位的海岸带地区时,沉积物多源于海岸侵蚀^[15]。浙江砾石滩多分布

于海岛上,这些地区不存在河流,源于河流的沉积物较少,因此沉积物多来源于海岸侵蚀。第四纪以来,在气候频繁波动和海平面升降作用的影响下,浙江沿海经历了复杂的沉积环境演化,在浙江海岛的沟谷下游堆积了一些以坡洪积、冲洪积和残积为主的松散物,在海水长期冲刷和侵蚀作用下,这些松散物中的砾石被剥蚀下来并堆积于附近海岸,久而久之形成砾石滩^[26]。另外,浙江海岛海蚀地貌发育,有海蚀崖、海蚀柱、海蚀穴、海蚀槽、海蚀台地等,这为砾石滩的形成也提供了一定的沉积物来源^[25]。

4.2.3 水动力条件

动力因子与砾石滩的形成密切相关,其中波浪作用是影响砾石滩发育的主要条件^[1]。

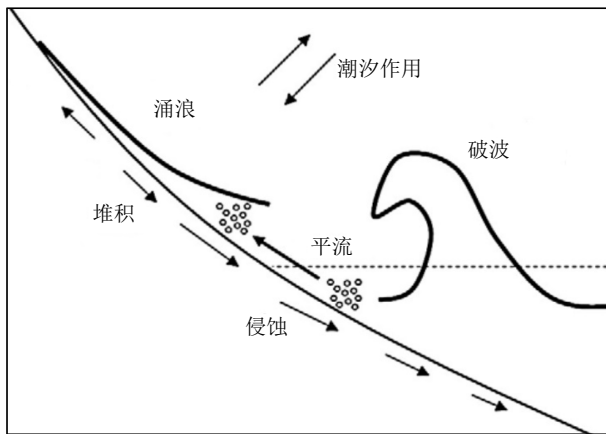
对于浙北海域砾石滩,岱山县海域受到源于杭州湾西部和东海大浪的影响,而普陀区在夏季则会受到较强的台风影响^[18],由于均受到较强的波浪作用,浙北海域遮蔽作用又介于浙中海域和浙南海域中间,因此这两个海区发育有较多的砾石滩,且岱山县区域砾石滩有更粗的沉积物颗粒。浙中海域风浪相对较大,海滩遮蔽能力作用较弱,同时该海域的海岛较少,波浪在传播过程中积蓄的大部分能量会直接作用于海岛上,砾石滩受到的风浪作用会更大,因此砾石滩多发育于浙中海域海岛上。由于浙中海域东南方向遮蔽物较少,受到水动力作用更强,因此多发育滩肩型砾石滩,且斜线型砾石滩较浙北和浙南海域有较多的小滩脊发育,再次表明了浙中海域较强的水动力环境。其中浙中海域雀儿岙岛以北的砾石滩颗粒较粗,可能由于该海域夏季以 SE 向浪为主,其余各季均以 E 向浪为主^[18],因此雀儿岙岛以南区域受到的波浪作用较弱。浙南海域水动力条件较弱,遮蔽作用较强,砾石滩最少,且都集中分布在洞头地区。

本文在对海滩地形地貌分析的过程中发现,在波浪作用较强的浙中海域,海滩规模较大,岬角遮蔽能力较弱,但滩面平均坡度值较小。包砺彦在对雷州半岛南部青安湾海滩地形发育进行分析的过

表 5 砾石滩指标因子在主成分中的载荷

Table 5 Loads of principal components index factor of gravel beaches

因子	<i>i</i>	<i>Mz</i>	<i>a</i>	<i>L</i>	<i>b</i>	<i>S</i>	γ	β	<i>a/b</i>	TR	\bar{H}
第一主成分	-0.130	0.041	0.257	0.227	0.214	0.217	0.104	0.150	0.096	0.123	-0.188
第二主成分	0.333	0.292	0.108	0.208	0.206	0.189	-0.074	-0.290	-0.121	-0.007	0.096
第三主成分	0.156	0.121	0.250	-0.134	-0.242	0.164	-0.312	0.166	0.507	-0.144	0.138
第四主成分	-0.150	0.222	0.008	-0.228	-0.071	0.333	0.526	0.279	-0.187	-0.387	0.354

图 12 砾石滩成因图^[28]Fig.12 Cause map of gravel beaches^[28]

程中发现,波浪强度越大,滩面越平缓^[27],这是由于当波浪强度变大时,上冲流初始速度也变大,滩面上相应点的水动力强度随之增大,受上冲流影响的范围也变大,致使海滩上部不仅遭受侵蚀,受侵蚀范围也广,而被侵蚀物质则堆积在滩面下部,致使滩面变得平缓,本文的分析结果与这一结论吻合。在主成分分析中,潮差的主成分载荷值高于波高,显示潮汐因子更强的相关性,在前人的研究中也出现了相同的结果^[6],但并不代表潮汐的重要性超过了波浪,在波浪主导的环境中,潮汐通过改变水深,从而改变冲浪和冲刷带的地理界限,延伸了波浪作用范围,泥沙能在更大范围内进行调整,从而对海岸平面弧形形态塑造产生影响,影响砾石滩的发育过程^[4,6](图 12)。

5 结论

(1)浙江砾石滩剖面形态大多呈斜线型,海滩宽度由北向南呈逐渐增大的趋势,浙北海域砾石滩坡度最大,平均值为 0.18,浙中海域砾石滩发育滩脊沟槽,稳定性较低;部分砾石滩呈滩肩型,浙南海域滩肩型砾石滩宽度最大,平均值为 45.59 m,海滩坡度自北向南逐渐减小。从平面形态可以看出,浙中海域砾石滩海滩规模较大,岬角遮蔽能力较弱,因此受到的波浪作用最强。从沉积物粒度特征可以看出,浙江海域较粗的砾石滩沉积物分布于浙中海域雀儿岙岛以北地区,而浙中海域和浙南海域砾石滩则具有较多的扁长和杆状砾石。

(2)通过聚类分析,可以将浙江砾石滩分成三类群,第一类群砾石滩主要分布在浙中海域和浙南海域,受到的潮流作用较强,海滩形态整体呈 U 型;第二类群砾石滩主要分布在浙北海域,受到

的潮汐作用较弱,海滩规模较小;第三类群砾石滩分布较为分散,海滩规模较大。

(3)地质构造背景、水动力环境以及沉积物来源等对浙江砾石滩的形成过程具有重要的影响,其中地质构造背景是海滩发育的基础,沉积物主要来源于海岸侵蚀,包括海岛坡积物及海蚀产物,波浪作用是影响砾石滩发育的主要条件,潮汐通过改变波浪作用基面延伸了波浪的作用范围。

参考文献 (References)

- [1] 王爱军,高抒. 砾石海滩的沉积和形态动力特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(1): 113-118. [WANG Aijun, GAO Shu. Sedimentodynamic and morphodynamic characteristics of gravel beaches[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(1): 113-118.]
- [2] 李从先,陈刚,孙和平,等. 古海滩砾石层与海平面变动 [J]. 海洋科学, 1986, 10(4): 1-4. [LI Congxian, CHEN Gang, SUN Heping, et al. Fossil beach gravel as a record of sea level change[J]. Marine Sciences, 1986, 10(4): 1-4.]
- [3] 王永红. 海岸动力地貌学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. [WANG Yonghong. Coastal Dynamic Geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 2012.]
- [4] Hart B S, Plint A G. Gravelly shoreface and beachface deposits[M]// Plint A G. Sedimentary Facies Analysis: A Tribute to the Research and Teaching of Harold G. Reading. Oxford: Blackwell Science, 1995: 75-101.
- [5] Carter R W G, Orford J D. The morphodynamics of coarse clastic beaches and barriers: a short- and long-term perspective[J]. Journal of Coastal Research, 1993(15): 158-179.
- [6] 李志强,李维泉,陈子燊,等. 华南岬间弧形海岸平面形态影响因素及类型 [J]. 地理学报, 2014, 69(5): 595-606. [LI Zhiqiang, LI Weiquan, CHEN Zishen, et al. Influencing factors and classifications of arc-shaped coasts in South China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5): 595-606.]
- [7] 戴志军,李春初. 华南弧形海岸岸线形态与地貌发育模式 [J]. 地理学报, 2004, 59(5): 738-744. [DAI Zhijun, LI Chunchu. Coastline configuration and geomorphologic development mode of arc-shaped coast in South China[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(5): 738-744.]
- [8] González M, Medina R. On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches[J]. Coastal Engineering, 2001, 43(3-4): 209-225.
- [9] Schiaffino C F, Brignone M, Ferrari M. Application of the parabolic bay shape equation to sand and gravel beaches on Mediterranean coasts[J]. Coastal Engineering, 2012, 59(1): 57-63.
- [10] Sneed E D, Folk R L. Pebbles in the lower Colorado river, Texas a study in particle morphogenesis[J]. The Journal of Geology, 1958, 66(2): 114-150.
- [11] Komar P D. Selective gravel entrainment and the empirical evaluation

- of flow competence[J]. *Sedimentology*, 1987, 34(6): 1165-1176.
- [12] 张海生. 浙江省海洋环境资源基本现状 [M]. 北京: 海洋出版社, 2013. [ZHANG Haisheng. Basic Status of Marine Environmental Resources in Zhejiang Province[M]. Beijing: China Ocean Press, 2013.]
- [13] 程林, 时连强, 夏小明, 等. 浙江朱家尖岛东沙滩沉积与地貌动态变化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(1): 37-44. [CHENG Lin, SHI Lianqiang, XIA Xiaoming, et al. Sedimentation and recent morphological changes at Dongsha Beach, Zhujiajian Island, Zhejiang Province[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(1): 37-44.]
- [14] 郭俊丽, 时连强, 童宵岭, 等. 浙江朱家尖岛东沙滩对热带风暴“娜基莉”的响应及风暴后的恢复 [J]. 海洋学报, 2018, 40(9): 137-147. [GUO Junli, SHI Lianqiang, TONG Xiaoling, et al. The response to tropical storm Nakri and the restoration of Dongsha Beach in Zhujiajian Island, Zhejiang Province[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 40(9): 137-147.]
- [15] 王爱军, 高抒, 杨畅. 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, 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.]
- [16] 张敏. 浙江省沿海滩地形地貌特征与发育模式研究 [D]. 杭州: 自然资源部第二海洋研究所, 2021. [ZHANG Min. Study on geomorphological characteristics and development model of beaches in Zhejiang Province[D]. Hangzhou: Second Institute of Oceanography, MNR, 2021.]
- [17] 郭俊丽, 时连强, 陈沈良, 等. 台风季节朱家尖岛砂、砾质岬湾海滩的不同沉积地貌动态变化 [J]. 热带海洋学报, 2022, 41(4): 82-96. [GUO Junli, SHI Lianqiang, CHEN Shenliang, et al. Dynamic variations of different sedimentary geomorphology of sandy and gravel embayed beaches on the Zhujiajian Island during typhoon season[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2022, 41(4): 82-96.]
- [18] 王康塔. 浙江省海岛资源综合调查 [R]. 杭州: 国家海洋局第二海洋研究所, 1994. [WANG Kangshan. Comprehensive survey of island resources in Zhejiang Province[R]. Hangzhou: Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 1994.]
- [19] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志 (第六分册): 浙江省南部海湾 [M]. 北京: 海洋出版社, 1993. [Compiling Council of Chinese Embayment. Chinese Embayment, Part 6[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993.]
- [20] Gale S J, Hoare P G. Bulk sampling of coarse clastic sediments for particle - size analysis[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1992, 17(7): 729-733.
- [21] Landon R E. An analysis of beach pebble abrasion and transportation[J]. *The Journal of Geology*, 1930, 38(5): 437-446.
- [22] 王文介. 粤东锯齿状海岸弧形砂质海滩的发育 [J]. 热带海洋, 1985, 4(2): 15-21. [WANG Wenjie. Development of the arc-shaped sandy beach at bays on the crenulate coast of east Guangdong[J]. *Tropic Oceanology*, 1985, 4(2): 15-21.]
- [23] Hsu J R C, Silvester R, Xia Y M. Applications of headland control[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1989, 115(3): 299-310.
- [24] 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]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(2): 106-114.]
- [25] 齐岩辛, 张岩, 陈美君, 等. 浙江海岛区地质遗迹资源及其价值 [J]. 地质调查与研究, 2013, 36(4): 311-317. [QI Yanxin, ZHANG Yan, CHEN Meijun, et al. Geoheritage resources and their value in the Island Area, Zhejiang Province[J]. *Geological Survey and Research*, 2013, 36(4): 311-317.]
- [26] 陈俊兵, 刘龙龙, 吴振, 等. 杭州湾舟山群岛海域晚第四纪声学地层 [J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(12): 49-57. [CHEN Junbing, LIU Longlong, WU Zhen, et al. Shallow acoustic stratigraphy of the late quaternary in the Zhoushan Islands of Hangzhou Bay[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(12): 49-57.]
- [27] 包砺彦. 雷州半岛南部青安湾海滩的沉积特征和地形发育 [J]. 热带海洋, 1989, 8(2): 75-83. [BAO Liyan. Sedimentary characteristics and landform developments of Qingan Bay Beach in southern Leizhou Peninsula[J]. *Tropic Oceanology*, 1989, 8(2): 75-83.]
- [28] 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.