

李高聪, 陈洁花, 仝长亮, 等. 雷州半岛南部海滩沉积物单一样和平行样粒度分布信息的对比[J]. 海洋学报, 2023, 45(12): 67–79, doi:10.12284/hyxb2023157

Li Gaocong, Chen Jiehua, Tong Changliang, et al. Comparative analysis on grain size distribution information between single sample and duplicate samples of beach sediment, southern Leizhou Peninsula[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(12): 67–79, doi:10.12284/hyxb2023157

雷州半岛南部海滩沉积物单一样 和平行样粒度分布信息的对比

李高聪^{1,2,3}, 陈洁花¹, 仝长亮^{2,3*}, 王中锋⁴, 王华强⁵,
唐杰平¹, 李志强¹, 周亮^{6*}

(1. 广东海洋大学 电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088; 2. 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海南海口 570206; 3. 海南省地质测试研究中心, 海南海口 570206; 4. 广东海洋大学 水产学院, 广东 湛江 524088; 5. 交通运输部南海航海保障中心 广州海事测绘中心, 广东 广州 510320; 6. 江苏师范大学 地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 前人已开展了大量的关于沉积物粒度测试、数据分析与信息提取工作, 但针对所采集的沉积物样品是否具有代表性的研究仍较为罕见。基于众数、中值粒径、粒级组含量、沉积物类型和粒度参数等指标, 本文对比分析了雷州半岛南部海滩 30 组沉积物平行样的粒度分布参数的定量和定性结果的异同、相关性和一致性。研究结果表明: (1) 平行样的众数、中值粒径和粒级组含量均表现出一定程度的差异性; (2) 平行样的偏态和峰态特征值差异较为明显, P1 平均值分别为 $-2.90 \sim -1.53$ 和 $11.23 \sim 21.59$, P2 为 $-2.55 \sim -1.52$ 和 $11.23 \sim 21.59$, P3 为 $-2.81 \sim -1.86$ 和 $13.41 \sim 27.69$; (3) 粒度参数的数值结果有约 2/3 的组合呈不相关关系 ($R^2 \leq 0.29$); (4) 分选系数、偏态和峰态分别有 1/3、1/2 和 4/15 的定性结果存在差异。沉积物粒度分布信息的空间异质性和样品采集的随机性是上述差异的主要原因。为了尽可能消除样品采集的随机性和刻画粒度分布信息的时空异质性, 建议未来样品采集时同时采集平行样。本文提供了一个以海滩沉积物为研究对象的平行样粒度参数结果对比的典型案例, 结果有助于提升对沉积物样品有效采集策略方面的认识。

关键词: 粒度参数; 沉积物平行样; 矩值法; 定量和定性对比; 雷州半岛南部海滩

中图分类号: P736.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)12-0067-13

1 引言

粒度分布特征是海洋沉积物的基本性质之一, 在沉积物的物源、粒径输运趋势、水动力强度和沉积环境演变等信息提取的研究中扮演重要角色^[1-3]。一般而言, 沉积物粒度信息的提取包含 3 个主要步骤, 即

样品采集、粒度测试和数据分析与信息提取。其中, 样品采集步骤是粒度测试和数据分析与信息提取步骤的必要准备, 是为定性和定量刻画特定沉积环境某些地貌部位的沉积物粒度的分布特征或特定沉积记录提取目标所服务的。粒度测试则是通过特定的仪器和方法获取所采集沉积物样品的粒度大小及其占

收稿日期: 2023-04-07; 修订日期: 2023-08-07。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42176167); 广东省科技厅科技基础条件建设项目(2021B1212110005); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2023A1515012041); 海南省海洋地质资源与环境重点实验室开放课题重点课题项目(HNHYDZZYHJKF015); 2022 年海南省自然科学基金项目(422RC800); 广东海洋大学科研启动经费项目(060302112010)。

作者简介: 李高聪(1987—), 男, 广东省梅州市人, 博士, 主要从事河口海岸环境演变研究。E-mail: geli@gdou.edu.cn

* **通信作者:** 仝长亮(1981—), 男, 正高级工程师, 主要从事海洋地质资源和环境研究工作。E-mail: tongchangliang@163.com; 周亮(1985—), 男, 副教授, 主要从事河口海岸环境演变研究。E-mail: geolzhou@jsnu.edu.cn

比分布数据,是沉积物样品粒度分布特征信息提取的直接结果^[4-7]。数据分析与信息提取则是针对粒度测试的结果开展分类、数理统计或特征值提取等工作,旨在获取其沉积物的类型、粒度参数、端元组分或敏感粒级等特定粒度统计信息,是粒度分布特征信息提取的间接成果^[6-10]。

研究综述表明,前人在基于沉积物样品的信息提取方面已展开了大量的工作,并取得了较为丰富的研究成果。例如,在沉积物样品正式测试之前,需对样品开展相关的前处理,包括去除杂质、去除碳酸钙成分、将样品溶液配置为中性和去除有机质成分等操作;沉积物粒度测试常用的方法包括筛析法、沉降法、激光法、图像法和电阻法等;粒度数据分析的方法包括沉积物类型划分、粒度参数计算(图解法和矩值法)、粒度端元划分、敏感粒级提取、粒径趋势分析、动力单元分区等^[11-23]。尽管如此,前人的研究主要集中在粒度测试和数据分析与信息提取步骤方面,而针对如何采集包含有采样点足够的粒度分布信息的沉积物样品方面的研究则较为罕见。与此同时,现有大多数研究工作在特定站点的沉积物样品采集时往往只采集了单一沉积物样品。鉴于单一沉积物样品在是否包含研究站点主要的粒度分布信息方面存在的不确定性,亟需开展沉积物单一样和平行样(本文指在同一站点取多个样品)在粒度分布信息方面是否存在差异的对比研究。

针对特定沉积环境的粒度分布信息提取工作是否需要采集沉积物平行样以及如何采集沉积物样品的问题,本文选取了雷州半岛南部海滩的表层沉积物为典型研究对象,对比了单一样和平行样的沉积物类型和粒度分布参数的特征值,分析了定量结果的回归关系,对比了定性结果的异同。在此基础上,本文还系统分析了海滩沉积物平行样粒度参数差异的原因,探讨了是否取平行样对粒度参数信息提取研究的可能影响,并给出了沉积物有效采样的策略建议。

2 材料与方 法

2.1 样品采集与测试

沉积物粒度分析的样品取自 2021 年 10 月 31 日的低潮位时段雷州半岛南部的白沙湾海滩和青安湾海滩。其中,白沙湾布设 1 条采样断面,编号为 P1,青安湾布设 2 条采样断面,编号分别为 P2 和 P3(图 1)。采样断面根据受人类活动影响较小岸段,无植被分布区域和即时水边线的位置选定,包含前滨和后滨区域。采样断面均按离岸方向等距间隔 1 m 布设 10 个

表层沉积物(取表层 5 cm)样品站点(编号 1~10);在样品站点(编号 ii)左右两侧 1 m 间隔位置同时采集 2 个平行样品(编号 i 和 iii);2 个海滩 3 条断面共计采集了 90 个表层沉积物样品。为了便于区分,本文将沉积物样品按“剖面”+“站点”+“序号”进行命名,如编号“P1-2-i”和“P2-iii”分别指白沙湾第 2 个站点左侧平行样品和青安湾第一条采样断面右侧的 10 个平行样品。

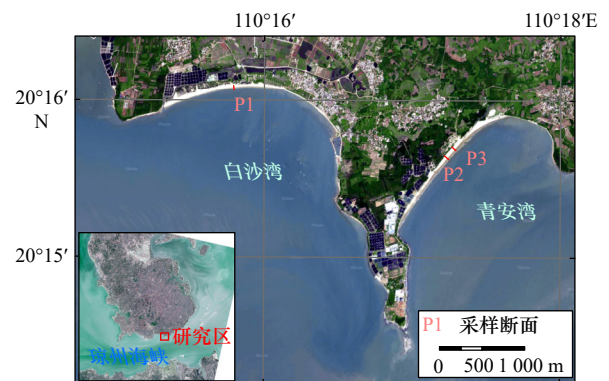


图 1 采样断面分布

Fig. 1 Location of the sampling sites

沉积物样品的粒度测试在广东海洋大学图海楼海岸带观测实验室采用筛分法完成。筛分法采用 ST-A100 振动筛分仪开展粒度测试工作,其测量范围为 20~30 mm。具体实验步骤参照《海洋调查规范 第 8 部分:海洋地质地球物理调查》(GB/T 12763.8-2007)^[24]中筛析法处理沉积物粒度分析的相关步骤执行,简述如下:首先,对现场采集回来的沉积物样品进行预处理,去除沉积物样品杂质,混合均匀样品,随后取适量样品(1/4)用纯水浸泡,清洗样品至水中溶液呈中性;其次,将样品放置烘箱中烘干 8~12 h,待烘箱中样品冷却至室温;随后,取适量样品放置在振动筛分仪套筛的最上层,振动 15 min 后,分别称量和记录各层筛面上沉积物的重量,并将其记录在 Excel 表格中。

2.2 粒度参数分析方法

鉴于众数、中值粒径(d_{50})、粒级组分含量、沉积物类型和粒度参数是沉积物是否存在差异的主要指标,本文将对上述指标对比不同海滩表层沉积物平行样之间粒度信息的异同。首先,将样品基于筛分法所获得的不同粒径区间的重量结果转换为占比百分数结果。其次,基于 GRADISTAT Version 4.0 软件^[9],获取沉积物的 d_{50} 、粒级组分占比、沉积物类型和粒度参数结果。最后,采用图表法对比每个样品粒度参数的数值结果和定性结果的异同,并分析其原因。采用 Friedman 提出的矩值法计算粒度参数的数值,并确定

表 1 粒度参数的计算公式^[5,9]
Table 1 Equations of grain size parameters^[5,9]

粒度参数	公式
平均粒径(Φ)	$\frac{\sum_i^n X_i f_i}{100}$
分选系数	$\left[\frac{\sum_i^n f_i (X_i - \bar{X})^2}{100} \right]^{1/2}$
偏态	$\frac{\sum_i^n (X_i - \bar{X})^3 f_i}{100\sigma^3}$
峰态	$\frac{\sum_i^n (X_i - \bar{X})^4 f_i}{100\sigma^4}$

注: X_i 为粒级组的中值(Φ), f_i 为各粒级范围的百分比含量, σ 为分选系数的结果。

表 2 粒度参数的定性描述术语及其数值范围^[5,9]
Table 2 Physical descriptive terms and their ranges applied to numerical values for grain size parameters^[5,9]

粒度参数	定性描述术语	数值范围
分选	分选极好	< 0.35
	分选好	0.35~0.50
	分选较好	0.50~0.70
	分选中等	0.70~1.00
	分选较差	1.00~2.00
	分选差	2.00~4.00
偏态	分选极差	> 4.00
	极负偏	< -1.30
	负偏	-1.30~-0.43
	近对称	-0.43~0.43
	正偏	0.43~1.30
峰态	极正偏	> 1.30
	很平坦	< 1.70
	平坦	1.70~2.55
	中等	2.55~3.70
	尖锐	3.70~7.40
	很尖锐	> 7.40

每个样品的分选、偏态和峰态参数对应的定性术语(表 1, 表 2)。与此同时, 定量结果之间相关性以拟合优度(R^2)的数值范围为依据, 即当 $R^2 \geq 0.8$ 、 $0.8 > R^2 \geq 0.3$ 和 $0.3 > R^2$ 时, 相关性的表述分别为强相关、

中度相关和弱相关。

3 结果

3.1 众数和中值粒径的特征值

图 2 显示了不同断面沉积物的众数和中值粒径之间均存在一定程度的差异性。就众数而言, P1 中断面 iii 的众数相对较小(粒径更粗), P2 中断面 ii 和断面 iii 有 1~2 个偏离点存在, P3 中 3 个断面的数值较为接近。就中值粒径而言, P1 中断面 iii 的数值较小, 而 P2 和 P3 中无明显规律。

3.2 粒级组分含量和沉积物类型

图 3 展示了不同断面沉积物各粒级组分含量的分布情况。总体而言, 9 条断面的粒级组分主要为细砂, 极细砂次要, 还包含少量极粗砂、粗砂和中砂, 它们的沉积物类型均归类为砂。P1 和 P3 中, 断面 i 和断面 ii 的组分含量相对接近, 而断面 iii 中中砂和粗砂组分有所增加。P2 中, 3 条断面的极细砂和细砂组分含量存在一些差异。

3.3 粒度参数的特征值

图 4 中平均粒径的平均值和标准偏差较为接近, 表明平行样的平均粒径结果几乎一致。断面 P1 的平均粒径的平均值 Φ 为 2.76~2.78, P2 的 Φ 为 2.87~2.88, P3 的 Φ 为 2.75~2.89。分选系数的平均值和标准偏差与平均粒径的情况类型, 亦表明平行样分选系数的结果近似相等。断面 P1 的分选系数的平均值为 0.25~0.28, P2 为 0.21~0.25, P3 为 0.22~0.41。偏态和峰态的平均值和标准偏差的差异相对明显, 表明平行样的偏态结果之间存在一定的差异。断面 P1 偏态平均值为 -2.90~-1.53, 标准偏差为 0.63~0.91; P2 平均值为 -2.55~-1.52, 标准偏差为 1.38~1.69; P3 平均值为 -2.81~-1.86, 标准偏差为 0.79~0.94。断面 P1 峰态的平均值为 11.23~21.59, 标准偏差为 4.53~6.56; P2 平均值为 17.93~26.39, 标准偏差为 14.28~16.50; P3 平均值为 13.41~27.69, 标准偏差为 5.75~10.02。

3.4 定量结果的相关性

平行样平均粒径之间的相关性表现为中度相关或不相关。其中, 样品 P1-ii 与 P1-i 之间和 P2-ii 与 P2-iii 之间的平均粒径呈中度相关, 其拟合优度为 $0.73 \sim 0.79$; 其他断面平行样之间无相关性 ($0.02 \leq R^2 \leq 0.23$)。就分选系数而言, 断面 P1 和 P3 的平行样之间表现为不相关 ($0.02 \leq R^2 \leq 0.05$), 而 P2 断面表现为低度相关和中度相关 ($0.42 \leq R^2 \leq 0.71$)。平行样偏态结果之间的相关性差异较大。其中, 断面

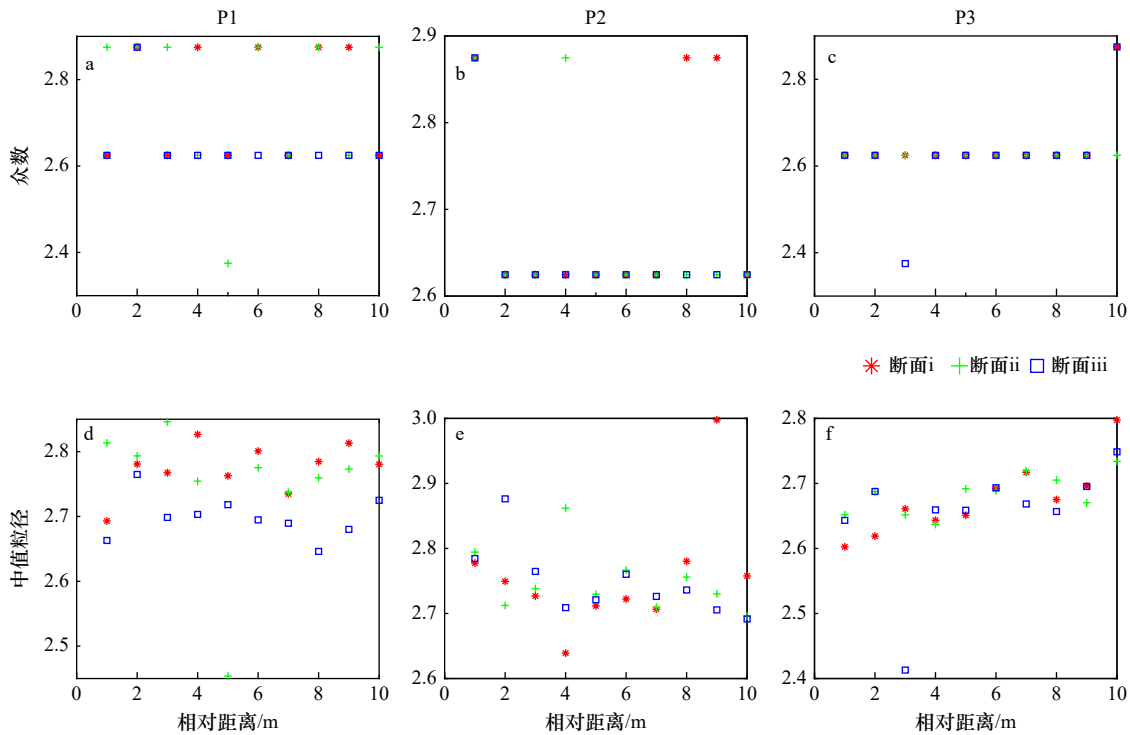


图 2 不同断面沉积物众数(a、b 和 c)和中值粒径(d、e 和 f)的特征值

Fig. 2 Characteristics values of the mode (a, b and c) and median size (d, e and f) of different profiles sediment

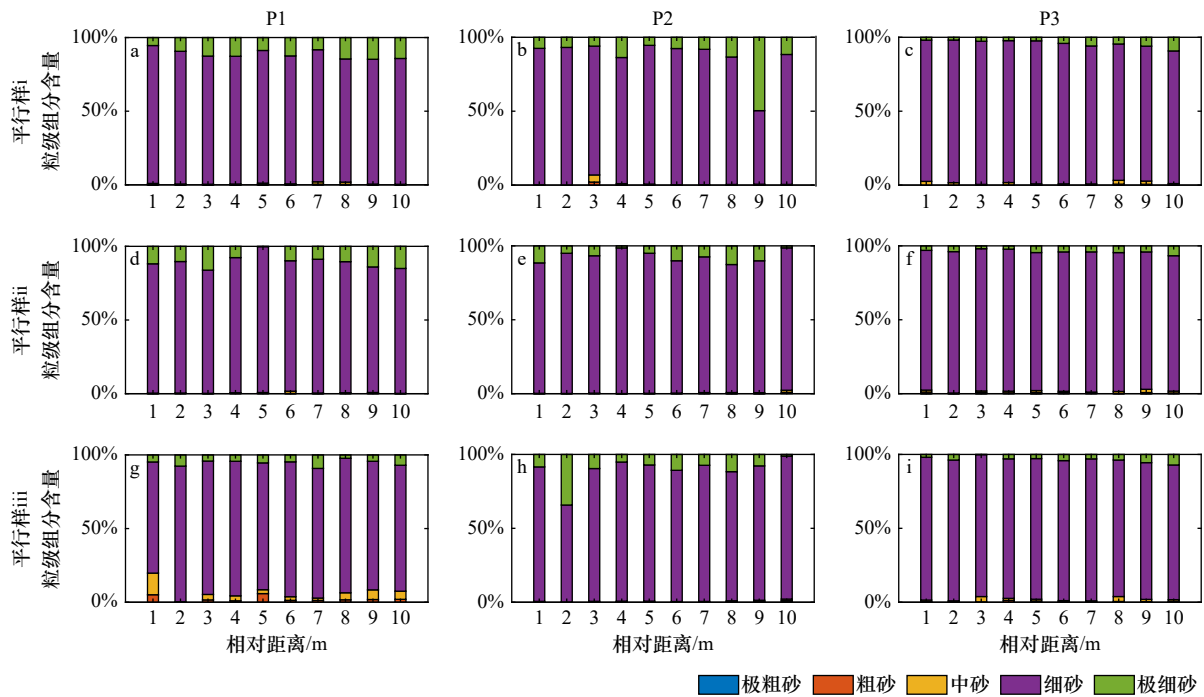


图 3 不同断面沉积物的粒级组分含量: P1(a、d 和 g), P2(b、e 和 h)和 P3(c、f 和 i)

Fig. 3 Sediment grain size fraction content of different profiles: P1 (a, d and g), P2 (b, e and h) and P3 (c, f and i)

P1 为不相关 ($0.05 \leq R^2 \leq 0.08$), 断面 P2-ii 与 P2-i 之间为中度相关 ($R^2 = 0.56$), 而 P2-ii 与 P2-iii 之间为不相关 ($R^2 = 0.03$), 断面 P3 平行样之间则表现为弱相关 ($0.31 \leq R^2 \leq 0.32$)。就峰态而言, 断面 P1 和 P3 的平行样之间表现为不相关 ($0.01 \leq R^2 \leq 0.29$), 而 P2 断

面表现为中度相关 ($0.50 \leq R^2 \leq 0.54$)。

3.5 定性结果的一致性

就分选系数而言, 平行样之间有 1/3 的呈现不一致。P1 均为分选极好 (图 5d); P2 除 7-iii 站点为分选好外, 其余均为分选极好 (图 5e); P3-ii 和 P3-iii 的站

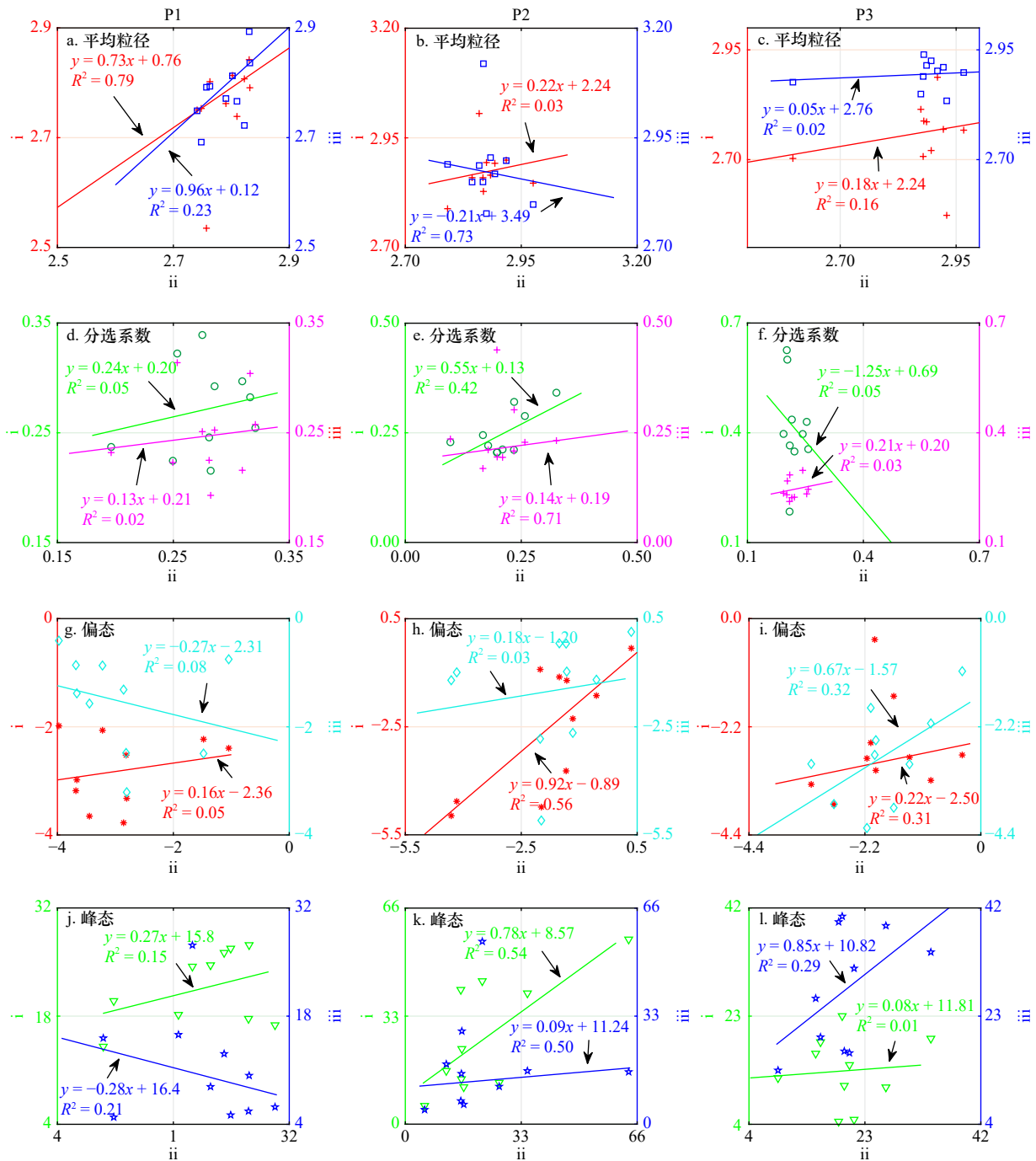


图4 粒度参数的数值结果及其线性拟合方程: 平均粒径(a、b和c); 分选系数(d、e和f); 偏态(g、h和i); 峰态(j、k和l)

Fig. 4 Regression equations and numerical values for the grain size parameters: mean size (a, b and c); sorting coefficient (d, e and f); skewness (g, h and i); and kurtosis (j, k and l)

点均为分选极好, 而P3-i的站点则分3种情况(图5f)。偏态有1/2的呈现不一致性。除P1-2-ii外, 其余P1-i和P1-ii均为极负偏, 而P1-iii则分3类(图5g); P2有80%的样品有不同术语表现(图5h), 而P3中3组样品的偏态存在差异(图5i)。峰态中有4/15的平行样呈现不一致性。P1有40%表现为左侧和中间站点均为很尖锐, 而右侧站点为尖锐的情况(图5j); 在P2中有20%表现为左侧和中间站点均为很尖锐, 右

侧站点为尖锐(图5k); 在P3中有2组站点表现为左侧尖锐, 中间和右侧很尖锐(图5l)。

4 讨论

4.1 研究区海滩沉积物平行样粒度参数差异的原因分析

本研究系统分析了雷州半岛南岸青安湾和白沙湾海滩表层沉积物30组平行样粒度参数定量和定性

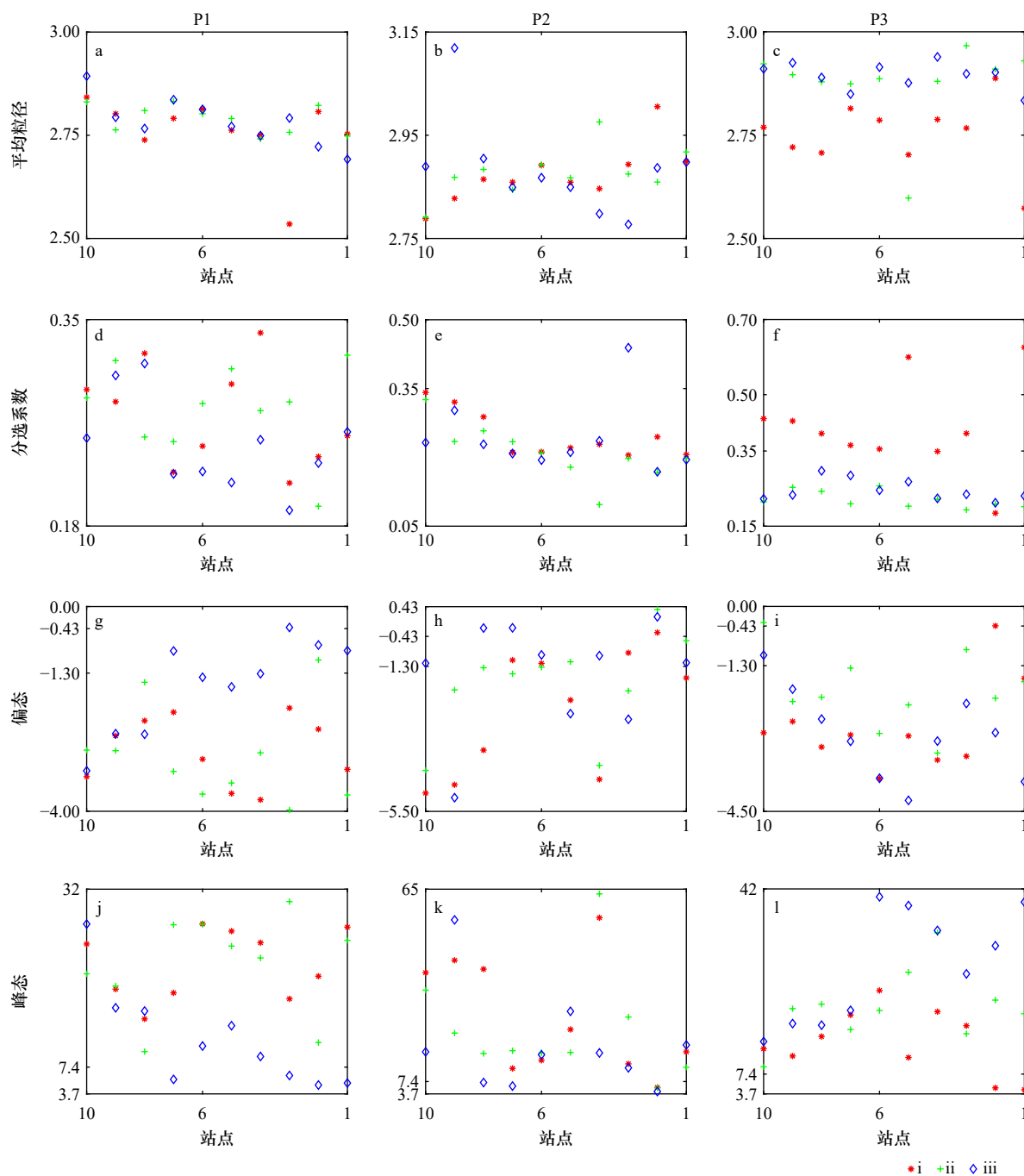


图5 粒度参数的定性描述术语划分结果: 平均粒径(a、b和c); 分选系数(d、e和f); 偏态(g、h和i); 峰态(j、k和l)
 Fig. 5 Physical descriptive terms of grain size parameters: mean size (a, b and c); sorting coefficient (d, e and f); skewness (g, h and i); and kurtosis (j, k and l)

结果之间的异同情况。结果表明, 3个采样断面平行样的众数、中值粒径、粒级组分之间均存在一定程度的差异性(图2, 图3), 偏态和峰态的特征值差异明显(表3), 粒度参数的数值结果之间主要呈不相关关系(图4), 粒度参数的定性术语结果之间至少有超过4/15的平行样表现出非一致性(图5)。因此, 本文研究的海滩沉积物平行样之间的粒度分布参数在定量和定性两个角度都存在一定程度的差异。就地理环

境背景而言, 青安湾和白沙湾具有一定的相似性, 均是发育于雷州半岛南端的小型袋状海湾, 两侧为玄武岩岬角, 后缘由北海组地层(棕红色-黄褐色砂砾层和黏土质砂层)组成的三级海积阶地, 阶地前缘有风成沙丘分布, 沙丘外缘逐渐过渡为砂质海滩^[25-26]。然而, 白沙湾和青安湾在主要地貌参数上存在差异, 前者的滩面平均宽度和海湾开敞度分别为52 m和0.87, 而后的为60 m和0.76^[27]。

表3 粒度参数数值结果特征值统计表
 Table 3 Characteristic values of grainsize parameters for the numerical values

粒度参数	采样断面编号	平行样	最小值	最大值	平均值	标准偏差
平均粒径(Φ)	P1	i	2.54	2.84	2.76	0.08
		ii	2.74	2.83	2.79	0.03
		iii	2.69	2.89	2.78	0.05
	P2	i	2.79	3.01	2.87	0.05
		ii	2.79	2.98	2.88	0.05
		iii	2.78	3.12	2.88	0.09
	P3	i	2.57	2.89	2.75	0.08
		ii	2.60	2.97	2.87	0.10
		iii	2.83	2.94	2.89	0.03
分选系数	P1	i	0.22	0.34	0.27	0.04
		ii	0.20	0.32	0.28	0.04
		iii	0.19	0.31	0.25	0.04
	P2	i	0.20	0.34	0.25	0.05
		ii	0.10	0.33	0.21	0.06
		iii	0.17	0.44	0.24	0.07
	P3	i	0.18	0.63	0.41	0.12
		ii	0.19	0.26	0.22	0.02
		iii	0.21	0.30	0.25	0.03
偏态	P1	i	-3.77	-1.98	-2.81	0.63
		ii	-3.97	-1.04	-2.90	0.91
		iii	-3.21	-0.41	-1.53	0.87
	P2	i	-4.97	-0.32	-2.55	1.69
		ii	-4.31	0.35	-1.80	1.38
		iii	-5.10	0.14	-1.52	1.52
	P3	i	-3.78	-0.43	-2.65	0.93
		ii	-3.22	-0.35	-1.86	0.79
		iii	-4.26	-1.07	-2.81	0.94
峰态	P1	i	14.06	27.21	21.59	4.53
		ii	9.95	30.28	21.53	6.54
		iii	4.92	27.8	11.23	6.56
	P2	i	5.62	56.45	26.39	16.50
		ii	5.50	63.58	22.86	15.57
		iii	4.41	55.80	17.93	14.28
	P3	i	4.49	23.02	13.41	5.75
		ii	8.76	33.81	19.89	6.38
		iii	13.48	40.53	27.69	10.02

前人研究表明,沉积物的时空分布特征主要受控于物源和搬运动力条件。在较大的时空尺度上,白沙湾和青安湾海滩的沉积物包含 4 个来源:(1)海岸侵蚀;(2)生物碎屑;(3)沿岸河流输沙;(4)内陆架改造物质。由于海滩两侧岬角为坚硬的火山岩,波浪作用较为微弱,海岸侵蚀所产生的物质主要用于充填基岩海岸。软壳动物介壳和珊瑚礁碎屑也是沉积物的一个来源,但其数量不多。两个海湾陆域的集水流域海拔较低,面积较小,河流不发育,所提供沉积物极为有限。在全新世中后期,海湾邻近内陆架沙坝在海平面上升的作用下向陆迁移,逐渐形成了现代海滩,是最主要的物质来源^[24]。在较短的时空尺度上,海滩沉积物的主要来源是邻近浅水区域沉积物的底移、跃移和再悬浮。通过分析可知,白沙和青安 2 个海滩的沉积物颗粒粒径的分布值域较为一致(ϕ 为 2.75 ~ 3.25) (图 6),均属于细砂-极细砂粒级。

由于白沙湾和青安湾海滩在空间上相邻但走向不一致,两个海滩的沉积物搬运动力条件既存在相似之处,也存在明显差异的地方。二者的潮汐为不规则全日潮,平均潮差为 0.82 m,属于弱潮海岸。波浪主要来自外海经琼州海峡传入,其次为琼州海峡本地产生的波浪。两个海滩的平均波周期较为一致,均为 3.60 s。但波浪传入后经沿岸地形的绕射和折射,以及受海滩走向的影响,两个海滩的平均波高存在差异,前者为 0.52 m,而后者为 0.60 m。白沙湾和青安湾海滩的前

滨坡度存在差异,前者为 3.5%,而后者为 2.5%^[27]。在上述因素的综合作用下,海滩沉积物受到分选性输运和磨损过程的影响,粒度分布特征往往呈现出一定的空间异质性。前人的研究也同样指出,在同一沉积环境中,由于物源和动力条件存在时空差异性,底质沉积物的粒度分布曲线往往随采样地点而异^[28]。此外,沉积物样品所蕴含的粒度分布信息与沉积物采集时间、地点、平面间隔和深度的具体选择有关,具有较强的主观性。比如,本研究中平行样的取样间隔是作者主观选择的,并没有具体的科学依据。未来的研究可将取样间距设计为 10 cm、20 cm、50 cm、1 m 和 2 m 等距离,并选择在不同沉积环境的不同地貌部位分别取样,系统研究沉积物样品是否具有代表性问题。因此,沉积物分布的空间异质性和样品的采集策略是平行样沉积物粒度参数差异的主要原因。

4.2 是否取平行样对粒度参数信息提取研究的可能影响及采样策略建议

粒度参数常用于刻画沉积物样品粒径分布的中心趋势(平均粒径)、均匀程度(分选系数)、不对称程度(偏态)和频率曲线两端的分选与中间部分分选的比率(峰态),是沉积物信息提取中最为常见的信息指标。瞿洪宝等^[22]采集了 141 个海南崖州湾海域的表层沉积物样,通过分析其粒级组分、粒度参数、沉积动力分区和沉积物输运趋势,探讨了沉积物空间分布及其受控机制。刘胜璟等^[28]采集了 5 根浙闽沿岸泥

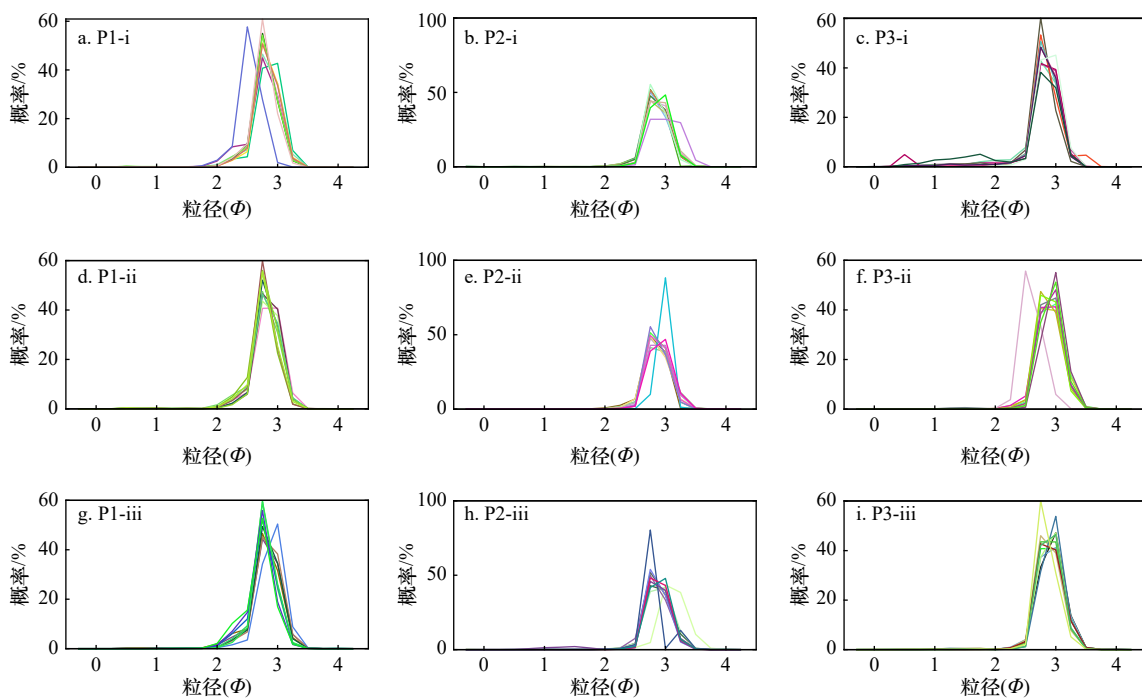


图 6 不同采样断面平行样的粒径概率分布曲线

Fig. 6 Grain size distribution curves of the duplicate samples of different sampling profiles

质区的柱状样,并将其分为1012个样品,通过分析其平均粒径、 ^{210}Pb 测年和粒度端元,探讨了粒度组分对长江入海输沙量减少的响应特征。梅西等^[21]对4300个表层沉积物样品开展了粒级组分、粒度参数、沉积物类型的分析,探讨了中国海域沉积物分布规律及沉积分异模式。然而,上述研究在沉积物样品采集时只采集了单一样品,并未采集平行样。前文的分析表明,在同一沉积环境中,沉积物的粒度分布会存在一定程度的空间异质性。由此产生一个疑问,即单一样品是否能蕴含足够的粒度分布信息。

鉴于数据可及性的问题,本文通过对比本文数据分析单一样品和平行样粒度参数的异同情况,试图解答单一样品是否包含有足够的沉积物粒度信息的疑问。本文将采样断面P1、P2和P3中的单一样设定为ii组样品,平行样则由i、ii和iii组样品共同组成。为了便于比较,本文采用相对误差(RE)来定量刻画不同采样断面单一样和平行样粒度参数数值的差异情况。RE的计算公式如下:

$$\text{RE} = \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中,RE为相对误差; i 为站点编号; x_i 为*i*号站点ii组样品的粒度参数数值; $\bar{x} (= \sum_{j=1}^k x_j/k)$ 为平行样粒度参数的平均值; $k(=3)$ 为任意站点平行样的总数, j 为平行样编号(i、ii或iii)。结果表明,3条断面的单一样与平行样粒度参数的数值结果存在一定程度的差异:平均粒径相对一致,其RE的值域为-4.69%~

5.43%(图7a);分选系数和峰态存在相对较大的差异,其RE值域分别为-48.11%~22.57%(图7b)和-45.88%~61.02%(图7d);偏态存在明显差异,其RE值域为-74.76%~533.52%(图7c)。此外,通过对比3条剖面粒度参数定性描述术语的结果可知,单一样和平行样同样存在一些差异。对于断面P1而言,除个别站点外,分选系数、偏态和峰态的术语结果几乎一致;在断面P2中,分选系数和峰态的结果一致,但偏态中有3/10的站点结果不一致;断面P3中,峰态的结果一致,而分选系数和偏态中均有2/10的站点结果不一致(图8)。因此,单一样和平行样所展示的粒度参数信息是存在一定差异的。

相较于粒度测试手段和粒度参数分析方法等后续的沉积物样品处理和分析过程,现场沉积物样品的采集是决定样品是否包含有该站点主要粒度信息的关键环节。为了避免单一样品所包含粒度信息的随机性和降低沉积物粒度分布存在的时空变异性,在样品采集时建议采集平行样品。在具体采集沉积物的样品时,需与研究的具体目标相结合,考虑样品的取样位置、取样间隔、取样深度和取样时间等问题。例如,在探讨沉积物输运趋势问题时,沉积物采样站点的取样间隔存在理论上的上限(最小值)和下限(最大值)。其上限由研究区沉积物输运的特征距离决定,其值一般为特征距离的1/2。特征距离指在研究的时间和空间尺度里,同一个沉积体系内存在直接的输运关系的两点间的最大距离^[11]。如果特征距离过大,可

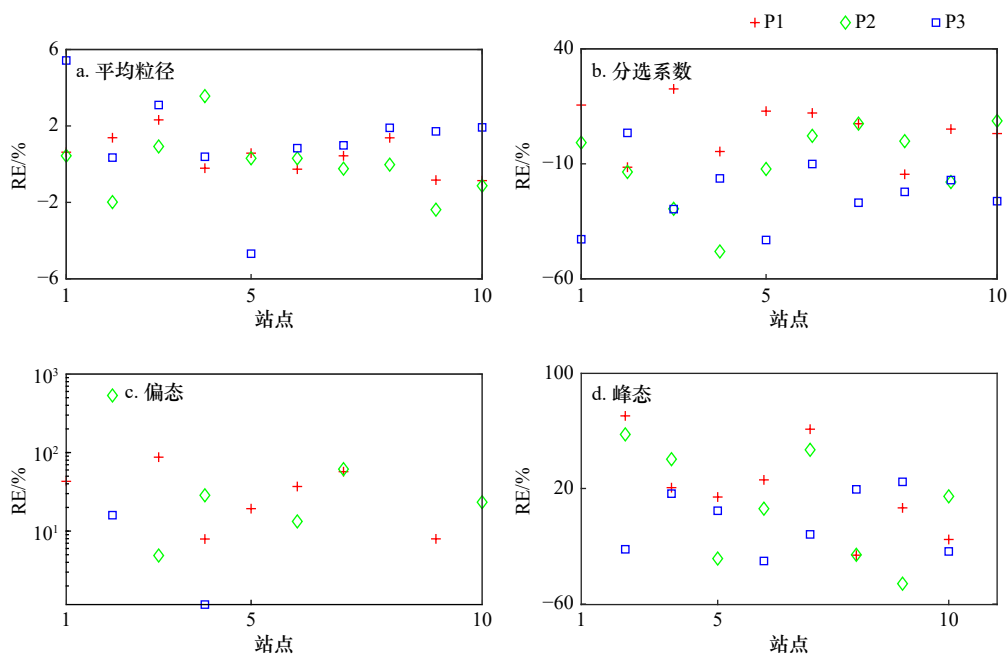


图7 单一样相对于平行样粒度参数数值的相对误差

Fig. 7 Relative errors between the grain size parameters of single sample and duplicate samples

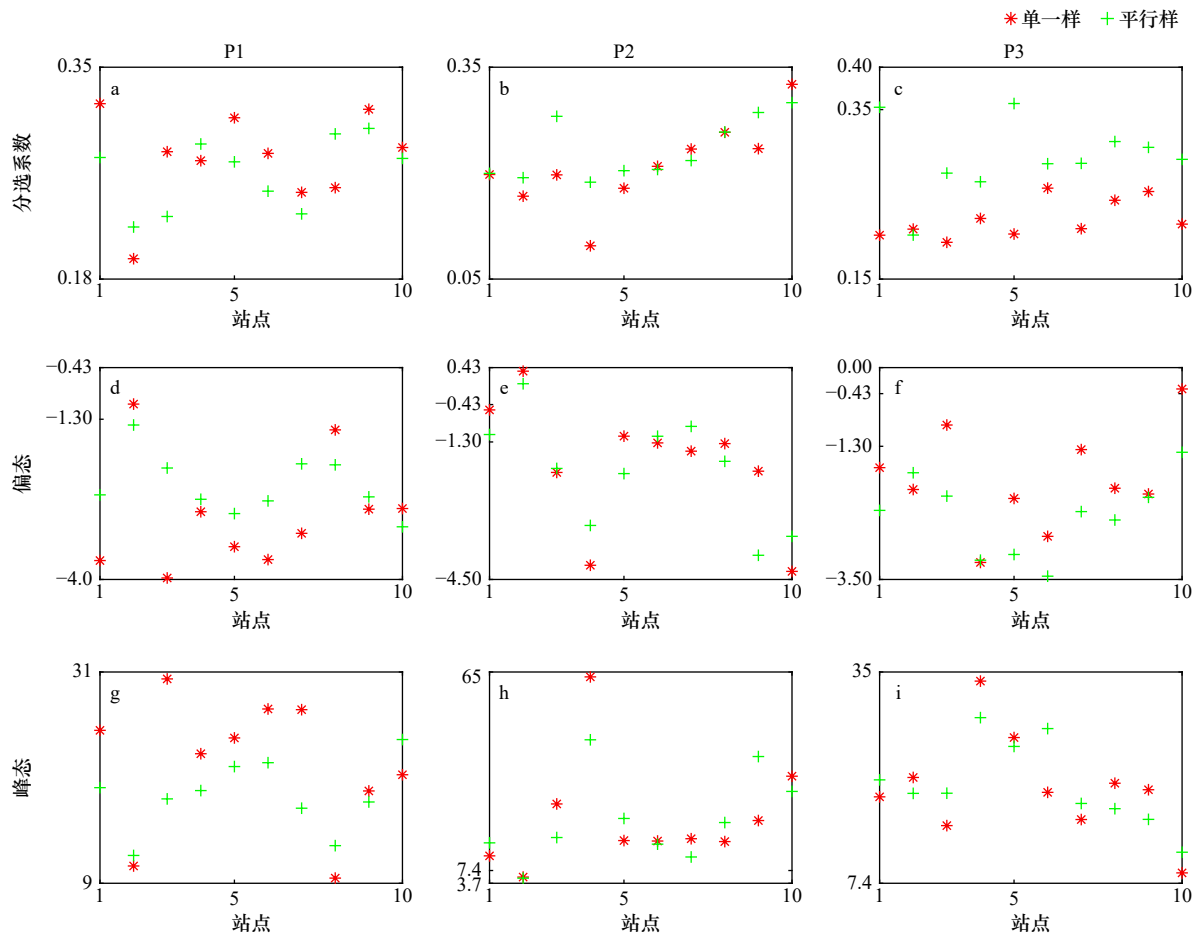


图 8 单一样和平行样粒度参数定性描述术语的结果对比: 分选系数(a, b 和 c); 偏态(d, e 和 f); 峰态(g, h 和 i)

Fig. 8 Physical descriptive terms of grain size parameters between single sample and duplicate samples: sorting coefficient (a, b and c); skewness (d, e and f); and kurtosis (g, h and i)

能会导出错误的信息或抹掉某些细节,若距离过小,则在增加成本的同时亦使效率低下。取样间隔的下限则取决于粒度信息空间分布的梯度和研究目标所设定的分辨率。从信号提取的角度而言,奈奎斯特频率(Nyquist Frequency)是离散系统通过采样在理论上所能提取信号的最高频率,其值的 2 倍是取样间隔的理论下限。而对于平行样的取样间隔而言,建议比采样站点取样间隔的下限至少低 1 个数量级,从而可在一定程度上刻画特定取样地点粒度信息的空间变异性。

本文仅讨论了常见的众数、中值粒径、粒级组分平均粒径、分选系数、偏态和峰态等粒度参数指标,其他可用于刻画沉积物的粒度分布信息的指标(如粒度端元、敏感粒级等)尚未被讨论。沉积物样品采用不同的前处理方法、不同的分样方法、不同的粒径测试方法是否对结果有影响^[29-32],尚未被讨论。此外,沉积学家对沉积物的分析常常还包括其他诸多指标,如粒形参数、化学元素含量和微塑料含量等^[33-36],亦尚未被讨论。为了系统评估是否采集平行样对沉

积物粒度相关信息提取的影响,未来研究将聚焦于如下 2 个方面:(1)开展针对沉积物粒度多粒度测试方法和多指标信息提取的单一样和平行样的对比研究;(2)开展多沉积环境的单一样和平行样沉积物信息提取的对比研究。

5 结论

(1)所有采样断面的沉积物均属于砂质沉积物,主成分为细砂,极细砂次之。平行样众数、中值粒径和粒级组分含量之间均存在一定程度的差异。

(2)平行样平均粒径和分选系数的特征值之间存在细微差异,但偏态和峰态差异明显。断面 P1 的偏态和峰态的平均值分别为 $-2.90 \sim -1.53$ 和 $11.23 \sim 21.59$,断面 P2 为 $-2.55 \sim -1.52$ 和 $11.23 \sim 21.59$,断面 P3 为 $-2.81 \sim -1.86$ 和 $13.41 \sim 27.69$ 。

(3)平行样粒度参数数值之间主要呈不相关关系,少数呈低度和中度相关关系。断面 P1 除 P1-ii 与 P1-i 外,均呈不相关关系($R^2 \leq 0.23$)。断面 P2 主要

呈中度相关关系($R^2 \geq 0.50$)。断面 P3 主要呈不相关关系($R^2 \leq 0.29$)。

(4) 平行样粒度参数定性术语均呈一定程度的不一致性。断面 P1 和 P2 的分选系数结果相对一致, 而

P3-i 与 P3-ii/iii 之间差异明显。P1-i 与 P1-ii 的偏态主要为极负偏, 而 P1-iii 分 3 类; P3 的偏态基本一致, 而 P2 断面仅有 2 组样品一致。平行样峰态主要为很尖锐, 但 P1-iii、P2-iii 和 P3-i 存在异质点(尖锐)。

参考文献:

- [1] Michael N A, Zühlke R. Source-to-sink: regional grain size trends to reconstruct sediment budgets and catchment areas[J]. *Basin Research*, 2022, 34(1): 393–410.
- [2] Gao Shu, Collins M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of “transport vectors”[J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 81(1/2): 47–60.
- [3] Chiverrell R C, Sear D A, Warburton J, et al. Using lake sediment archives to improve understanding of flood magnitude and frequency: recent extreme flooding in northwest UK[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(12): 2366–2376.
- [4] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1): 3–26.
- [5] Friedman G M. Comparison of moment measures for sieving and thin-section data in sedimentary petrological studies[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1962, 32(1): 15–25.
- [6] Swan D, Clague J J, Luternauer J L. Grain-size statistics I: evaluation of the Folk and Ward graphic measures[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1978, 48(3): 863–878.
- [7] Swan D, Clague J J, Luternauer J L. Grain-size statistics II: evaluation of grouped moment measures[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1979, 49(2): 487–500.
- [8] McManus J. Grain-size determination and interpretation[M]//Tucker M E. *Techniques in Sedimentology*. Oxford: Blackwell, 1988: 63–85.
- [9] Blott S J, Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(11): 1237–1248.
- [10] Wu Li, Krijgsman W, Liu Jian, et al. CFLab: A MATLAB GUI program for decomposing sediment grain size distribution using Weibull functions[J]. *Sedimentary Geology*, 2020, 398: 105590.
- [11] 贾建军, 高抒, 薛允传. 图解法与矩法沉积物粒度参数的对比 [J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(6): 577–582.
Jia Jianjun, Gao Shu, Xue Yunchuang. Grain-size parameters derived from graphic and moment methods: a comparative study[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(6): 577–582.
- [12] 孙有斌, 高抒, 李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析 [J]. *科学通报*, 2003, 48(1): 83–86.
Sun Youbing, Gao Shu, Li Jun. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal sea setting[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(2): 184–187.
- [13] 张才学, 孙省利, 陈春亮. 湛江港湾表层沉积物重金属的分布特征及潜在生态危害评价 [J]. *湛江海洋大学学报*, 2006, 26(3): 45–49.
Zhang Caixue, Sun Xingli, Chen Chunliang. Distribution features and evaluation on potential ecological risk of heavy metals in submarine surface sediments of Zhanjiang Bay[J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 2006, 26(3): 45–49.
- [14] 刘志杰, 龙海燕. 南海沉积物图解法和矩值法粒度参数计算及对比 [J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2009, 39(2): 313–316, 336.
Liu Zhijie, Long Haiyan. Comparing study on the grain-size parameters estimated from the graphical method and the moment method of the sediments from South China Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(2): 313–316, 336.
- [15] 刘志杰, 公衍芬, 周松望, 等. 海洋沉积物粒度参数 3 种计算方法的对比研究 [J]. *海洋学报*, 2013, 35(3): 179–188.
Liu Zhijie, Gong Yanfen, Zhou Songwang, et al. A comparative study on the grain-size parameters of marine sediments derived from three different computing methods[J]. *Haiyang Xuebao*, 2013, 35(3): 179–188.
- [16] 蔡国富, 范代读, 尚帅, 等. 图解法与矩值法计算的潮汐沉积物粒度参数之差异及其原因解析 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(1): 195–204.
Cai Guofu, Fan Daidu, Shang Shuai, et al. Difference in grain-size parameters of tidal deposits derived from the graphic and its potential causes[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(1): 195–204.
- [17] 王兆夺, 于东生, 罗福生, 等. 图解法和矩法计算泉州湾表层沉积物粒度参数的对比 [J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(7): 19–27.
Wang Zhaoduo, Yu Dongsheng, Luo Fusheng, et al. Comparison of grain size parameters from graphical and moment methods for surface sediments in Quanzhou Bay[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32(7): 19–27.
- [18] 李自超, 蒲晓强, 赵辉, 等. 湖光岩玛珉湖表层沉积物粒度特征及其物源指示意义 [J]. *广东海洋大学学报*, 2017, 37(3): 93–99.
Li Zichao, Pu Xiaoqiang, Zhao Hui, et al. Grain size characteristics of the surface sediments in Huguangyan Maar Lake and its significance to sediment source analysis[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2017, 37(3): 93–99.
- [19] 黄鑫, 蒲晓强. 热液活动对海底沉积物中有机质的影响 [J]. *广东海洋大学学报*, 2017, 37(1): 117–124.
Huang Xin, Pu Xiaoqiang. The influence of hydrothermal activities on the organic matter in sediment[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2017, 37(1): 117–124.

- [20] 李高聪, 李志强, 朱士兵, 等. 图解法和矩值法海洋沉积物粒度参数的对比 [J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(6): 96–101.
Li Gaocong, Li Zhiqiang, Zhu Shibing, et al. Comparative study on grain-size parameters of marine sediment derived from graphic and moment methods[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2020, 40(6): 96–101.
- [21] 梅西, 李学杰, 密蓓蓓, 等. 中国海域表层沉积物分布规律及沉积分异模式 [J]. 中国地质, 2020, 47(5): 1447–1462.
Mei Xi, Li Xuejie, Mi Beibei, et al. Distribution regularity and sedimentary differentiation patterns of China seas surface sediments[J]. Geology in China, 2020, 47(5): 1447–1462.
- [22] 瞿洪宝, 苟鹏飞, 孙龙飞, 等. 海南岛崖州湾表层沉积物空间分布特征及其受控机制 [J]. 海洋学报, 2021, 43(12): 70–81.
Qu Hongbao, Gou Pengfei, Sun Longfei, et al. Spatial distribution and its controlling mechanism of surface sediments in the Yazhou Bay, Hainan Island[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(12): 70–81.
- [23] 谭靖千, 高苑, Abarike G A, 等. 环雷州半岛海底表层沉积物 brGDGTs 组成分布特征及其环境意义 [J]. 广东海洋大学学报, 2021, 41(5): 84–93.
Tan Jingqian, Gao Yuan, Abarike G A, et al. Composition and distribution characteristics of brGDGTs and significance of environment in surface sediments of Leizhou Peninsula[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2021, 41(5): 84–93.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 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 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.8–2007, Specifications for oceanographic survey-Part 8: marine geology and geophysics survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [25] 包砾彦. 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.
- [26] 葛同明, 樊利民, 徐行, 等. 雷琼地区湛江组、北海组的古地磁学研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14(4): 61–70.
Ge Tongming, Fan Limin, Xu Xing, et al. Paleomagnetism of Beihai and Zhanjiang formations in Lei-Qiong region[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1994, 14(4): 61–70.
- [27] 朱士兵, 李志强, 张会领, 等. 基于地貌动力学的雷州半岛海滩状态分类研究 [J]. 地理研究, 2020, 39(6): 1269–1282.
Zhu Shibing, Li Zhiqiang, Zhang Huiling, et al. Morphodynamic classification of beaches on the coast of Leizhou Peninsula[J]. Geographical Research, 2020, 39(6): 1269–1282.
- [28] 刘胜璟, 高建华, 徐笑梅, 等. 浙闽沿岸泥质区沉积物粒度组分对长江入海输沙量减少的响应 [J]. 海洋学报, 2021, 43(3): 105–115.
Liu Shengjing, Gao Jianhua, Xu Xiaomei, et al. Response of sediment grain size composition of the Zhe-Min coastal mud to the sediment load reduction of the Changjiang River entering the sea[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(3): 105–115.
- [29] Syvitski J P M. Principles, Methods, and Application of Particle Size Analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [30] 孙有斌, 高抒, 鹿化煜. 前处理方法对北黄海沉积物粒度的影响 [J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(6): 665–671.
Sun Youbin, Gao Shu, Lu Huayu. Influence of different pretreatment procedures on the particle-size distribution of surficial sediments in the northern Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(6): 665–671.
- [31] 程鹏, 高抒, 李徐生. 激光粒度仪测试结果及其与沉降法、筛析法的比较 [J]. 沉积学报, 2001, 19(3): 449–455.
Cheng Peng, Gao Shu, Li Xusheng. Evaluation of a wide range laser particle size analyses and comparison with pipette and sieving methods[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(3): 449–455.
- [32] 陈莹璐, 张玉柱, 谭子辉, 等. MS2000 和 LS13320 激光粒度仪测定沉积物粒度结果的差异 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2018, 57(4): 48–55.
Chen Yinglu, Zhang Yuzhu, Tan Zihui, et al. Comparison of particle-size results of sediments measured by the MS2000 and LS13320 laser diffraction particle-size analyzers[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2018, 57(4): 48–55.
- [33] Wang Shanshan, Pan Cunhong, Xie Dongfeng, et al. Grain size characteristics of surface sediment and its response to the dynamic sedimentary environment in Qiantang Estuary, China[J]. International Journal of Sediment Research, 2022, 37(4): 457–468.
- [34] Yang Yang, Piper D J W, Xu Min, et al. Northwestern Pacific tropical cyclone activity enhanced by increased Asian dust emissions during the Little Ice Age[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1712.
- [35] van Rijn L C. Unified view of sediment transport by currents and waves. I: initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(6): 649–667.
- [36] Cera A, Pierdomenico M, Sodo A, et al. Spatial distribution of microplastics in volcanic lake water and sediments: relationships with depth and sediment grain size[J]. Science of the Total Environment, 2022, 829: 154659.

Comparative analysis on grain size distribution information between single sample and duplicate samples of beach sediment, southern Leizhou Peninsula

Li Gaocong^{1,2,3}, Chen Jiehua¹, Tong Changliang^{2,3}, Wang Zhongduo⁴, Wang Huaqiang⁵,
Tang Jieping¹, Li Zhiqiang¹, Zhou Liang⁶

(1. College of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Laboratory of Marine Geology Resources and Environment of Hainan Province, Haikou 570206, China; 3. Hainan Geology Detection and Research Centre of Hainan Province, Haikou 570206, China; 4. College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 5. The Guangzhou Hydrographic Center of the Navigation Guarantee Center for South China Sea, Ministry of Transport, Guangzhou 510320, China; 6. School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Previous research has conducted extensive work on sediment grain size testing, data analysis, and information extraction. However, studies on whether the collected sediment samples are representative are still relatively rare. Based on indicators such as the mode, median grain size, particle size distribution, sediment type, and grain size parameters, this study compared and analyzed the quantitative and qualitative results of the grain size distribution parameters of 30 parallel sediment samples collected from beaches in the southern part of Leizhou Peninsula, China. The study examined the differences, correlations, and consistencies of these parameters. The results showed that: (1) the mode, median grain size, and particle size distribution of parallel samples exhibited a certain degree of variability; (2) the skewness and kurtosis of parallel samples showed significant differences, with average values of P1 ranging from -2.90 to -1.53 and 11.23 to 21.59 , P2 ranging from -2.55 to -1.52 and 11.23 to 21.59 , and P3 ranging from -2.81 to -1.86 and 13.41 to 27.69 ; (3) about two-thirds of the combinations of grain size parameters had no correlation ($R^2 \leq 0.29$); (4) qualitative results of sorting coefficients, skewness, and kurtosis showed differences in $1/3$, $1/2$, and $4/15$ of the cases, respectively. The spatial heterogeneity of sediment grain size distribution information and the randomness of sample collection are the main reasons for these differences. To minimize the randomness of sample collection and characterize the spatiotemporal heterogeneity of grain size distribution information, parallel samples are recommended for future sample collection. This study provides a typical case of comparing the results of parallel sample grain size parameters for beach sediment, which can improve our understanding of effective sediment sample collection strategies.

Key words: grain size parameters; sediment duplicate samples; moment method; quantitative and qualitative comparison; southern beaches of Leizhou Peninsula