王孟瑶, 金秉福, 岳伟. 长江口表层沉积物重矿物在不同粒级中的分布与研究意义[J]. 海洋学报, 2019, 41(11): 89–100, doi:10.3969/j.issn.0253−4193.2019.11.009

Wang Mengyao, Jin Bingfu, Yue Wei. Patterns of heavy mineral combination in different grain-size categories and their sedimentary significance: A case study for surfical sediments in the Changjiang River Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(11): 89–100, doi:10.3969/j.issn.0253−4193.2019.11.009

长江口表层沉积物重矿物在不同粒级中的分布与研究意义

王孟瑶[1,2], 金秉福[1*], 岳伟[3]

(1. 鲁东大学 海岸研究所/资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025; 2. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241; 3. 江苏师范大学 地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 在粒度分析基础上, 以 0.5Φ 为间距对长江口表层沉积物的不同粒级分样进行碎屑重矿物分析, 并对各粒级重矿物特征与广粒级 (1.5Φ～6Φ) 进行相似度分析。结果表明, 长江口沉积物粒度跨度大, 从粗砂到泥 (黏土) 均有分布, 粉砂含量高。样内不同粒级分样重矿物含量、种类和组合均有一定变化, 样间表现出较一致的规律性。长江口出现碎屑重矿物 30 种左右, 粗粒级分样中矿物种数为 10 余种, 细粒级分样中重矿物种类增至 20 多种; 3.5Φ～4.5Φ 是重矿物种类多、矿物成分复杂的粒级区段。粗粒级 (粒径大于 3Φ) 云母族富集, 其重矿物组合为云母+角闪石, 随粒级变细 (粒径小于 4Φ) 云母急剧减少; 闪石族分布粒级广泛, 在 3Φ～5Φ 粒级含量相对较高; 帘石族、稳定矿物尤其是金属矿物在粒径小于 3.5Φ 粒级逐渐增多。长江口重矿物整体组合为普通角闪石+绿帘石+褐铁矿, 榍石为特征矿物。相似度分析表明, 长江口沉积物样品中主要粒级与广粒级重矿物特征相近, 能代表沉积物整体重矿物特征。长江口碎屑重矿物特征深受粒度分布的影响, 其矿物种类、矿物组合和矿物指数及其所蕴含的水动力和物源意义都要结合粒度特征来综合分析。

关键词: 重矿物; 广粒级; 粒度分析; 相似度分析; 长江口

中图分类号: P736.22　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253−4193(2019)11−0089−12

1　引言

长江是亚洲第一大河, 发源于青藏高原的唐古拉山脉西南侧, 干流自西而东横贯中国中部, 数百条支流辐辏南北, 于崇明岛以东注入东海, 全长 6 397 km, 流域面积为 180 万 km^2, 水系发育, 多年平均输沙量约为 3.9 亿 t, 是我国陆架海沉积物最主要的物质来源之一[1−3]。长江每年携带巨量沉积物进入河口区, 在地质、地貌、海水、潮汐、地球偏向力等复杂因素的影响下, 泥沙迅速沉积, 口门处的沙洲不断消长移动, 江口多处分汊。碎屑物开始迅速沉积, 导致长江河口区成为长江物质进入东海盆地的重要沉积中心[4], 另有相当一部分长江物质被输送到陆架区直至陆坡、海槽等更远的海域。随着长江碎屑物质的搬运并在边缘海地区不断沉积, 众多的自然地理信息如构造沉积、河流演变、气候变化和地表物质循环等得以保存。因此, 长江口区是开展陆源沉积物从源到汇过程研究理想的天然实验室, 逐渐成为研究的热点区

收稿日期: 2018−11−19; **修订日期:** 2018−12−28。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41576057, 41706048)。

作者简介: 王孟瑶(1992—), 女, 山东省莒县人, 研究方向为河口海岸过程分析与应用。E-mail: wmy1327@126.com

*** 通信作者:** 金秉福(1963—), 男, 教授, 主要从事海洋地质研究。E-mail: bfjin@126.com

域[5−7]。然而，由于长江流域地质背景复杂，广泛分布陆源碎屑岩、碳酸盐岩、中酸性火成岩及片岩、片麻岩等变质岩类[8]，致使沉积物的物质来源相对复杂，矿物组分空间变异性大。为了有效识别长江沉积物物源，建立碎屑矿物端元，需全面了解长江入海前的矿物学特征。

许多学者对长江口表层沉积物的极细砂粒级重矿物做了大量研究。长江口窄河段河床和潮流分汊河段沙坝沉积区，重矿物含量高达 13.26%，比重大的金属矿物如石榴子石、榍石等稳定矿物含量较高[9]；在河口口门、边滩等地沉积的细颗粒矿物，重矿物含量少，矿物种类较少，云母类片状矿物多，在 10%～50% 之间[10]，磁铁矿、锆石、金红石等含量甚低。王腊春等[11] 鉴定出长江口重矿物 21 种，认为其重矿物组合为角闪石–绿帘石–金属矿物（褐铁矿），金属矿物在长江沉积物中有较高含量，达 21%（河口区减少），辉石、石榴子石及锆石含量也较高，但云母含量甚微。王昆山等[12] 对长江水下三角洲沉积物重矿物进行分析，鉴定出重矿物 37 种，近河口区沉积物粒级粗，比重大的矿物如钛铁矿等含量高。同一河流的沉积物，因水动力条件不同使重矿物产生明显的沉积分异，重矿物含量、种类、组合都不尽相同，可以反映不同的沉积环境，而不同重矿物特征却使长江沉积物物源判别变得模糊，很难建立长江碎屑矿物端元，引发许多学者对重矿物分析方法在物源分析应用的疑虑。通常情况下，碎屑矿物鉴定都选取 3Φ～4Φ（0.125～0.063 mm）极细砂粒级[13]，而相对较粗或较细的沉积物中极细砂粒级所占含量极少，用其代表沉积物重矿物特征似乎不太合理。近年来国外学者通过扩大粒级范围来对碎屑重矿物特征进行更为全面的分析[14−15]，目前很少有国内学者对此进行系统的研究。

本文在长江河口段表层沉积物粒度分析基础上，对能鉴定的多个粒级分样中的重矿物分布与含量等特征进行系统性解剖式分析，即采取广粒级矿物鉴定法。本研究广粒级是指 1.5Φ～6Φ 的粒级范围，以 0.5Φ 为粒度间距，将每件样品分成 6～8 个不同粒级分样，下限为 6Φ（约 0.015 6 mm），长江口表层沉积物样品粒度的上限有一定的跨度，但有一定含量的粗粒级一般在 1.5Φ（约 0.353 6 mm）以上，更粗的粒级所占样品权重很小且重矿物极少，故而忽略不计。以此探讨长江不同粒度控制下碎屑重矿物特征规律，测试某种矿物在某个粒级中的相对含量，获取这种矿物在几乎整个沉积物中的绝对含量，消除因分析粒级狭窄而导致结果的局限性、认识的片面性，从而实现对长江沉积物入海前沉积物类型及其重矿物特征进行全面的了解，建立与其他河源沉积物的对比标志。

2 样品来源

研究样品是 2016 年 3 月采自长江口河段，自扬州瓜洲到长江入海口的崇明岛河道的边滩、河床、河漫滩以及河道外的沼泽淤地表层，样品粒度目测有粗、中、细之分。取样用 GPS 定位，通过手持平铲挖取表层沉积物，采样窗口 20 cm×20 cm，深 10 cm 左右，本文使用 9 件样品，研究区与采样点位置见图 1。



图 1 长江口沉积物采样站位

Fig. 1 Changjiang River Estuary sediments sampling stations

3　研究方法

3.1　粒度分析与矿物分离方法

实验取原始沉积物样品干重 300～500 g 左右, 加入 30% 的双氧水, 去除样品中的有机质, 后再加入 10% 六偏磷酸钠溶液, 用超声波振荡对样品进行分散处理, 采用 Friedman 的沉积物粒度划分标准, 通过筛分法及 Stokes 沉降原理获得不同粒度区间的沉积物[16−18]。以 0.5Φ 套筛为间隔进行湿筛并烘干称重, 将样品分成 5.0Φ～4.5Φ、4.5Φ～4.0Φ、4.0Φ～3.5Φ、3.5Φ～3.0Φ、3.0Φ～2.5Φ、2.5Φ～2.0Φ 以及小于 2.0Φ 多个粒级, 筛下的粉砂质悬浮液, 按照沉降法(吸管法)粒度分析原理, 以 1Φ 为间隔单位, 提取出 5Φ～6Φ 粒级的沉积物。计算每个粒级区间的质量百分比, 同时各粒级取 2 g 左右作为重液分离样品。

沉积物矿物分离时, 称出 2 g 左右不同粒级的矿物利用三溴甲烷(d_{20}^4=2.88～2.89 g/cm^3, d_{20}^4为恒温 20℃ 下矿物的质量与 4℃ 相同体积的水的质量比)进行轻重矿分离, 小于 5Φ 区间内间隔 0.5Φ 的不同粒级矿物采用分液漏斗在恒温(20±1)℃ 下进行搅拌分离, 每次搅拌 2 min, 间隔 15 min 再搅拌一次, 共 3～4 次; 对 5Φ～6Φ 区间内矿物使用离心机进行分离[19]。对分离好的矿物进行酒精反复冲洗、烘干和称重, 计算重矿物重量百分含量, 获得重矿物碎屑矿物鉴定样品。重矿物样品的定量分析采用体视显微镜和偏光油浸法相结合的方法[20−21], 在浸油薄片上计数 300～400 颗粒进行鉴定, 细粒部分鉴定 500～800 颗, 统计每种矿物所占的百分含量, 并对矿物颜色、形状、风化程度及光学性质进行鉴定和描述。

3.2　相似度分析方法

本文的分粒级重矿物研究方法, 每个样品产生了 6～8 组分样数据, 为了对比不同粒级分样与广粒级重矿物特征(用粒度含量加权值计算)的相关性大小, 数据处理采用相似度比较方法。相似度是数据深度分析和挖掘的重要手段, 在复杂样品之间关系确认上发挥重要作用[22−23]。本文采用夹角余弦法计算相似度, 采用比较各向量之间的夹角余弦值来反映样品的相似程度[24], 计算公式如下:

$$\cos\theta=\frac{\sum_{k=1}^{n}x_{ik}x_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n}x_{ik}^2}\sqrt{\sum_{k=1}^{n}x_{jk}^2}},\qquad(1)$$

式中, cosθ 为样品 i 和样品 j 的相似度值; x_{ik} 为样品 i 的指标 k 的测量值; x_{jk} 为样品 j 的指标 k 的测量值; n 为指标数。夹角余弦将每个样品的多种指标看作多维空间中的向量, 使两个样本性质相似性的问题转化为多维空间的两个向量的相似性问题, 利用 cosθ 值来定量表征指纹信息间的相似性, 如果 cosθ 越接近 1 则说明两个向量越相似。

4　结果分析

4.1　长江沉积物粒度特征

沉积物的粒度分布特征是判别沉积环境的重要标志, 包括粒度大小和各粒级分布状况, 可直接反映沉积环境的水动力条件和沉积环境变化[25−26]。对长江口 9 个表层沉积物样品分别进行粒度分析, 使用图解法计算其粒度参数[27], 得出表 1。

长江口 9 件样品中沉积物整体粗细跨度大(表 1), 平均粒径在 2.67Φ～6.25Φ 之间, CJT3、CJN3 样品属细砂质沉积物, 其余多为粉砂质, CJT2 和 CJJ2 样品最细, 属于泥质粉砂沉积物类型, 总体看来长江河口段沉积物大部分为正偏(细偏), CJT2 和 CJJ2 样品为负偏。标准偏差在 0.44～1.28 之间, 泥沙分选性大都中等。

4.2　主要重矿物种类在不同粒级中的分布

本文根据矿物的物理化学性质将主要重矿物分为闪石族(普通角闪石、阳起石、透闪石)、帘石族(绿帘石、斜黝帘石、黝帘石)、云母族(白云母、黑云母、水黑云母)、稳定矿物类(石榴子石、榍石、磷灰石、电气石、锆石、金红石)及铁质金属矿物类(磁铁矿、钛铁矿、赤铁矿、褐铁矿) 5 类矿物, 计算不同粒

表 1　长江口表层沉积物粒度参数

Tab. 1　Grain size parameters of the Changjiang River Estuary surface sediments

	CJG3	CJT2	CJT3	CJJ2	CJN1	CJN2	CJN3	CJN4	CJC4
平均粒径(Φ)	4.85	6.20	2.67	6.25	5.95	4.62	3.14	4.86	5.13
标准偏差	1.11	0.60	0.45	0.54	1.28	0.85	0.44	0.64	0.78
偏态	0.42	−0.28	0.61	−0.13	0.37	0.29	0.57	0.21	0.35
峰态	0.90	1.58	0.95	1.17	1.15	1.37	1.49	1.64	1.07

级段主要重矿物颗粒百分比，做出主要重矿物在不同粒级中的分布变化图（图 2），加入粒度频率曲线并标注平均粒径值，对比分析不同粗细沉积物中重矿物分布及含量的异同。

由图 2 可见，同一样品不同粒级分样中重矿物种类有很大的不同，其各自含量也有明显变化趋势。云母族在粗粒端（小于 3.0Φ）含量高，甚至能占近 100%，主要以水黑云母为主，黑云母次之，白云母含量较少，粒径小于 4Φ 云母减少殆尽甚至消失；闪石族在各个粒级中分布广泛且含量较高，主要以普通角闪石为主，其次为阳起石，透闪石含量最低，大于 3Φ 粒级含量都较高，在 3.5Φ～4.5Φ 之间占到了 50% 以上。其他矿物种类比如帘石族、稳定矿物类在大于 3.5Φ 随粒级减小种类增多和含量逐渐增高且含量相对均匀化、趋平化。帘石族以绿帘石为主，黝帘石（斜黝帘石）在大于 4Φ 粒级后出现；稳定类矿物中榍石含量最高，其次为石榴子石、锆石、磷灰石，电气石和金红石所占含量很低且多在大于 4.5Φ 粒级出现，为挑选单矿物比如锆石、石榴子石提供最适合的粒度范围参考。铁质金属类矿物多以褐铁矿为主，在各个粒级中都有分布，尤其在 CJN1、CJJ2 两样品的粗粒端富集，钛铁矿和磁铁矿所占含量也很高，赤铁矿含量较少，但后三者多在大于 4Φ 粒级以后出现。从图 2 中看出，3Φ～4Φ 极细砂粒级为传统矿物分析区段，多以闪石族矿物为主，帘石族和云母族次之，而铁质金属类矿物和稳定类矿物含量较低。

为探究不同粗细沉积物之间异同，图 2 中样品由粗到细依次排序。CJT3 样品为细砂组分为主的沉积物，其云母消失粒级和稳定类矿物、铁质金属矿物出现粒级要比其他样品提前 1Φ 的粒级区间，传统矿物分析粒级中铁质金属类矿物含量较高，与闪石族矿物含量相当，而没有云母族矿物。平均粒径大于 4Φ 的样品中（除 CJN3 和 CJT3 外的其余样品）云母族在传统鉴定粒级（3Φ～4Φ）均占有一定含量，因此会有云母多出现在较细沉积物中的说法。另外，在 CJN1、CJJ2 两样品的粗粒端富集有片状或者板状的褐铁矿，与其他样品有所不同。但整体看来，不同样品间重矿物分布变化又有一定的规律性，表现在小于 2.5Φ 和大于 4.5Φ 的沉积物粗、细两端，在粗粒级端，矿物种类少，片状矿物含量高；随着粒级变细，重矿物种类数增加，比重大稳定性较高的矿物出现，3.5Φ～4.5Φ 是样品中重矿物种类多，矿物成分复杂的区段。在粗粒级分样中，重矿物组合为云母+角闪石，特征矿物是褐铁矿；在细粒级分样中，重矿物组合是角闪石+绿帘石+褐铁矿，特征矿物为榍石。

4.3 主要重矿物含量及其特征指数在不同粒级中的分布

使用加权方法（样品不同粒级的主要重矿物族类含量，各粒级所占全部粒级的含量和各粒级重矿物含量的乘积之和）计算长江口沉积物中主要重矿物族类在广粒级中含量，获取其在几乎整个沉积物中的绝对含量，再将其与优势粒级（粒级含量最多粒级）、次优粒级（粒级含量次多粒级），以及 3Φ～4Φ 常用鉴定粒级中各自矿物含量相对比，分析在不同粒级区段主要重矿物族类的相对含量与绝对含量的差异大小。同时计算不同粒度下重矿物特征指数，对比分析不同粒度控制下重矿物稳定性和成熟度差异。稳定矿物/不稳定矿物（SM/UM）的比值可以对沉积物风化程进行判定，是进行区分物源与沉积环境的指标之一[28–29]，重矿物中普通角闪石、阳起石，黑云母、水黑云母，及普通辉石、紫苏辉石等由于化学性质不稳定，易受物理和化学风化，属于不稳定矿物（UM）；而有的矿物在外生条件下抗化学风化的性能强，比如石榴子石、榍石、磷灰石、电气石、锆石和金红石等属于重矿物中的稳定矿物（SM）。SM/UM 的值高表示风化程度高，水动力条件强，反之，则表示风化程度低，不稳定矿物得以保存。另外，ZTR 指数为锆石、电气石、金红石所占颗粒百分含量之和，代表重矿物的成熟度[30–31]，ZTR 指数愈大，矿物的成熟度指数愈高，系统的研究可以指示沉积物的搬运距离和物源方向。

长江口表层沉积物样品中广粒级含量达 58.97%～99.86%，优势粒级含量为 28.52%～53.25%，而常用粒级含量在个别样品极低（CJJ2 样品为 1.62%）。重矿物含量在长江口沉积物中差异明显（表 2），在常用粒级（3Φ～4Φ）中重矿物含量变化在 0.30%～36.58% 之间，在优势粒级中变化在 0.25%～5.40% 之间，在广粒级变化在 0.33%～7.92% 之间。重矿物含量因矿物成分不同而不同，在常用粒级（3Φ～4Φ）中 CJT3、CJN3 两样品因铁质金属类矿物含量高使得重矿物含量出现高值，分别为 36.58% 和 15.54%；而 CJC4 样品因地处河口区，云母含量较高使得重矿物含量只占到了 0.30%，在广粒级中也有相类似的体现。一般而言，平均粒度较粗且优势粒级在 3Φ～4Φ 的样品如样 CJG3、CJN2 重矿物含量相对较高，在广粒级中分别为 3.24% 和 4.55%。CJT2、CJJ2 两个样品主要粒级越细，重矿物含量越少，它们整体沉积物颗粒细小，属于泥质粉砂类型的沉积物，重矿物含量少是其自然特征。

长江口表层沉积物中含碎屑重矿物 30 余种，在同一个样品中，广粒级中可见重矿物种数比分粒级中

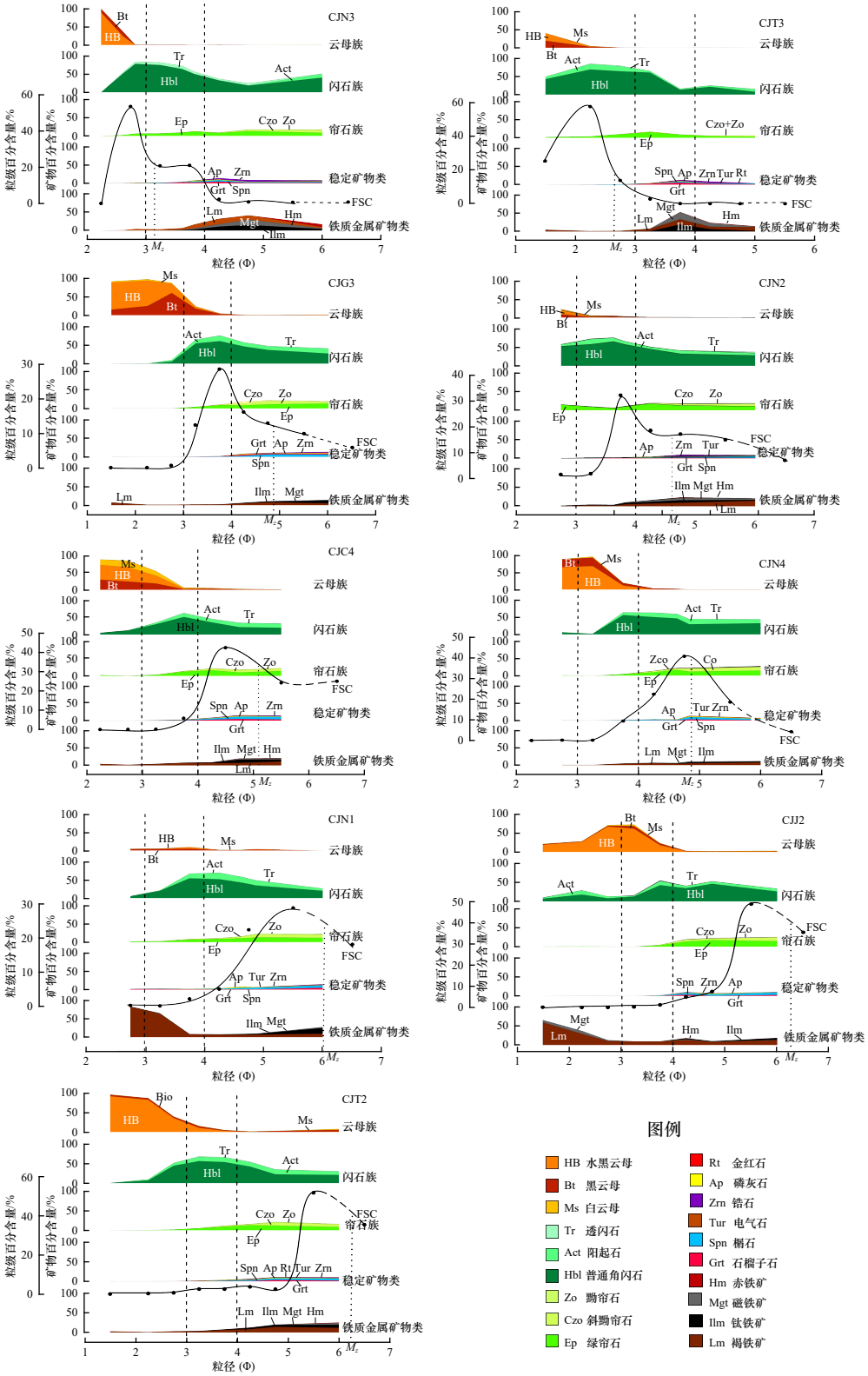


图 2　长江表层沉积物粒度频率分布与主要重矿物在不同粒级中的含量

Fig. 2　Grain-size content and major heavy minerals content in the multiple grains of the Changjiang River Estuary surface sediments

FSC 为粒度频率分布曲线, CJN3 等为样品编号, 短虚线对应 Φ 值为粒度平均值 M_z, 长虚线范围内为 3Φ～4Φ 传统矿物分析粒级区段, 矿物百分含量为主要重矿物族类的颗粒百分比, 粒级百分含量为不同粒级的重量百分比

FSC is particle size frequency distribution curve, CJN3 et al are the sample numbers, the short dotted lines correspond Φ values for the average particle size (M_z), the long dotted line represents the traditional mineral analysis grain size (3Φ–4Φ), the percentage of mineral is the volume content of major heavy minerals, the percentage of grain size is the weight percentage of different grain size

表 2 长江口沉积物典型粒级主要重矿物含量及其矿物指数

Tab. 2 Major heavy minerals contents and mineral indexes of typical grain sizes sediments in the Changjiang River Estuary

样品编号	粒级范围(Φ)	粒级含量/%	重矿物含量/%	重矿物种类数	闪石族/%	帘石族/%	云母族/%	铁质金属矿物类/%	稳定矿物类/%	SM/UM	ZTR
CJT3	广粒级(1.5～5.0)	90.44	4.73	23	77.94	9.52	3.59	4.17	1.93	0.01	0.03
	优势粒级(2.0～2.5)	52.22	3.45	12	86.25	4.38	5.00	1.88	0.63	0.01	0.00
	次优粒级(<2.0)	22.99	0.73	9	49.85	2.48	41.18	5.57	0.00	0.00	0.00
	常用粒级(3.0～4.0)	2.62	36.58	19	63.93	17.56	0.00	10.56	5.06	0.04	2.10
CJN3	广粒级(2.0～6.0)	99.86	7.92	27	69.68	9.55	2.72	10.19	4.51	0.04	0.33
	优势粒级(2.5～3.0)	53.25	3.04	15	70.90	4.90	18.38	3.22	1.07	0.01	0.00
	次优粒级(3.5～4.0)	21.15	18.84	19	66.12	11.59	0.76	11.59	5.79	0.09	0.50
	常用粒级(3.0～4.0)	42.04	15.54	21	70.52	10.46	0.75	9.73	4.74	0.06	0.44
CJN2	广粒级(2.0～6.0)	89.26	4.55	25	56.29	15.12	2.95	15.12	4.98	0.11	1.33
	优势粒级(3.5～4.0)	32.28	5.40	20	71.09	8.79	4.47	7.60	2.53	0.03	0.15
	次优粒级(4.0～4.5)	18.72	7.48	18	51.29	19.48	1.43	16.91	4.58	0.09	0.29
	常用粒级(3.0～4.0)	34.27	5.62	20	68.14	10.34	3.99	9.44	2.79	0.03	0.20
CJG3	广粒级(1.5～6.0)	81.42	3.24	24	62.42	14.43	5.97	6.38	6.29	0.10	0.65
	优势粒级(3.5～4.0)	28.52	3.82	21	76.18	10.67	5.21	2.98	2.23	0.03	0.25
	次优粒级(4.0～4.5)	16.18	5.41	20	57.54	19.10	1.26	7.29	9.05	0.15	0.75
	常用粒级(3.0～4.0)	40.98	2.59	20	74.46	9.68	8.23	2.93	2.02	0.02	0.27
CJN4	广粒级(2.5～6.0)	91.52	2.00	26	59.74	18.39	5.10	7.52	4.13	0.13	0.71
	优势粒级(4.5～5.0)	40.76	3.47	25	52.89	22.99	1.69	9.03	8.60	0.16	0.85
	次优粒级(4.0～4.5)	22.41	0.95	16	63.54	14.36	3.59	7.73	3.87	0.06	0.00
	常用粒级(3.0～4.0)	9.60	1.36	15	57.15	4.52	28.86	5.15	1.19	0.01	0.00
CJC4	广粒级(2.0～6.0)	97.80	0.33	24	41.67	21.62	3.86	13.86	11.72	0.23	1.18
	优势粒级(4.0～4.5)	42.33	0.25	22	46.22	22.14	5.27	9.14	8.79	0.18	1.05
	次优粒级(5.0～6.0)	25.01	0.15	22	32.18	22.61	1.06	21.54	14.63	0.45	2.19
	常用粒级(3.0～4.0)	6.13	0.30	20	62.37	13.79	7.66	7.89	3.00	0.03	0.12
CJN1	广粒级(2.5～6.0)	58.97	1.40	24	48.93	19.86	3.42	13.92	8.43	0.20	0.91
	优势粒级(5.0～6.0)	28.84	0.38	17	26.94	22.60	0.00	28.32	15.30	0.57	2.74
	次优粒级(4.5～5.0)	22.44	4.29	21	55.45	18.28	3.30	10.06	8.22	0.05	0.00
	常用粒级(3.0～4.0)	2.32	1.86	19	60.50	7.68	9.54	17.88	2.55	0.05	0.00
CJT2	广粒级(1.5～6.0)	64.06	0.97	24	43.47	14.18	10.22	17.83	7.88	0.16	1.41
	优势粒级(5.0～6.0)	51.61	0.99	24	30.70	16.45	8.42	25.65	10.75	0.29	2.48
	次优粒级(4.0～4.5)	3.73	4.02	23	55.10	16.33	2.24	12.86	6.73	0.12	2.04
	常用粒级(3.0～4.0)	4.56	4.56	20	67.67	8.87	10.88	6.09	3.10	0.04	0.58
CJJ2	广粒级(1.5～6.0)	63.43	0.73	23	37.31	24.54	5.09	18.08	9.87	0.16	0.40
	优势粒级(5.0～6.0)	48.82	1.14	22	33.61	26.11	3.89	19.72	10.83	0.29	0.56
	次优粒级(4.0～4.5)	7.61	1.58	21	53.26	23.37	2.72	10.87	7.34	0.24	1.18
	常用粒级(3.0～4.0)	1.62	1.77	18	43.88	3.81	38.83	10.34	1.37	0.01	0.14

注: 表中广粒级粒级含量是指各个分粒级累计含量; 广粒级重矿物含量是指各个分粒级重矿物含量加权值; SM/UM为稳定矿物/不稳定矿物的比值, ZTR为锆石、电气石、金红石所占颗粒百分含量之和, 代表重矿物的成熟度。

多, 粗粒级分样中矿物种数少, 一般为 10 种左右; 细粒级分样中增多, 达 20 种以上。长江广粒级重矿物中闪石族含量较高, 在 37.31%～77.94% 之间, 其中主要为普通角闪石, 整体粒级粗的沉积物如样 CJT3、CJN3 闪石族高达重矿物含量的 3/4, 中粉砂质至更细沉积物中闪石族含量减少, 但也在 30% 之上。帘石族矿物含量在以细砂质组分为主的样品 CJT3(9.52%)到泥质粉砂质组分为主的 CJJ2(24.54%)随沉积物的变细而逐渐增加, 稳定矿物类(含量 1.93%～11.72%)和铁质金属类矿物(含量 4.17%～18.08%)也随粒级的细化而成倍增加。

同一样品矿物成分和含量在不同粒级分样的变化, 导致重矿物 SM/UM 比值和 ZTR 指数数值随粒径增大而增大, 但 SM/UM 比值小于 1, 稳定矿物含量较少。ZTR 指数在 2 以下, 说明长江口表层沉积物重矿物成熟度很低, 流域支流众多以及风化剥蚀较快, 导致许多碎屑矿物可能未经过长期风化或者长距离搬运磨蚀。不同样品中, 长江细砂质沉积物 CJT3 的 SM/UM 比值为 0.01。沉积物粒度越细, SM/UM 比值相对增大, 长江粉砂质沉积物 SM/UM 比值在 0.10～0.23 之间, 这与稳定矿物自身晶形大小有关。说明不同粒级物源可能不同或者风化程度不一致, 也说明长江沉积物物源相当复杂多样。

5　讨论

5.1　长江河口表层沉积物不同粒级重矿物分布特征差异的原因

沉积物的粒度组成和矿物组合尤其是重矿物的特征都是对不同沉积分异作用的体现, 比重较大但体积小的矿物与比重较小但体积较大的矿物一同沉积[14]。沉积物的颗粒大小、形状、比重是沉积分异的主要内部因素, 由于各种矿物的大小、形态、比重等物理及化学性质的不同, 被搬运物沿搬运方向依次沉积下来[15]。它们之间的关系可以用改进后的 Stokes 公式来表示,

$$V=\frac{1}{18}K\frac{gD^2(\gamma_1-\gamma_2)}{\mu}, \qquad (2)$$

式中, V 为颗粒的沉降速度(单位: mm/s); K 为颗粒形态修正系数; γ_1 为颗粒的比重; γ_2 为介质的比重; D 为颗粒的直径; g 为重力加速度(单位: mm/s^2); μ 为介质的黏度 [单位: g/(mm·s)]。其中最主要的自变量是粒径 D, 而且 D^2 与沉降速度成正比。因此, 沉积分异作用首先表现为粒度随水动力变化而变化, 其次, 非球形矿物颗粒运动与矿粒的体积、比重和形态的组合变化有关, 从而形成所谓“等效沉积”效应[14], 自然矿物颗粒绝大部分是不规则的颗粒, 其沉降速度与表面光滑的球形颗粒不同, 因而引入颗粒形态修正系数 K 可有效拟合矿物形状不同而带来的沉降速度上的差异。由于不规则颗粒的表面积要比同体积的球形颗粒大, 因此沉降时受到的阻力就大, 沉降速度就必然会降低[32]。

粗粒级中云母所占含量较高, 是由于其晶体结构为片状, 物理风化大多沿片状解理方向劈裂变薄, 形成板状或片状[20], 不易破碎变细, 且沉降速度远小于其他类球状矿物, 故而颗粒大的云母在强水动力下不会与同等体积的矿物共同沉积, 而会与比重大的较小矿物一同沉积, 且在粗粒级中富集。闪石族矿物做为主要造岩矿物之一, 原生矿物晶形较大且比重和硬度适中, 受物理风化后可以破碎成不同大小的颗粒, 而在各个粒级中分布广泛, 含量也较高[33]; 帘石族矿物比重略大于闪石族矿物, 若一同沉积, 则比闪石族矿物颗粒更细小, 故多出现在比闪石族富集粒级更细的粉砂分样中。稳定类矿物比如锆石、电气石、磷灰石和金红石等在母岩中原生晶形小[34], 而多在细粒级中富集; 铁质金属类矿物比重大(一般 d>4.0 g/cm^3), 也多在细粒级(粒径大于 3.5Φ)富集。故而, 同一样品不同粒度所沉积的重矿物种类和含量有所不同, 原因在于各种矿物的大小、形状、比重等物理及化学性质的不同, 在搬运过程中的会出现差异沉降, 沉积物中不同粒度下矿物组成及含量呈现明显的差异性也是对沉积分异作用的响应。

5.2　长江沉积物在广粒级中重矿物特征及与传统矿物分析比较

传统只鉴定间隔 1Φ 极细砂粒级, 可能存在放大或缩小某种矿物含量或者遗漏特定粒级中才会出现的矿物种类等问题, 广粒级矿物鉴定方法则更加能代表整体样品重矿物特征, 从而减少对判定物源母岩性质造成的偏差[14]。在同一个样品中, 长江口广粒级中可见重矿物种数比分粒级中多; 广粒级中重矿物含量在 0.33%～7.92% 之间, 而在常用粒级(3Φ～4Φ)中变化范围较大, 在 0.30%～36.58% 之间。普通角闪石是河流碎屑沉积物中主要重矿物之一, 长江口沉积物中闪石族矿物在广粒级中占 55% 以上, 而闪石族矿物在传统鉴定粒级(3Φ～4Φ)中含量一般达到高值, 平均占 63% 以上。云母族矿物以水黑云母为主, 受风化影响比较严重, 3Φ～4Φ 常用鉴定粒级中较粗的沉积物样品 CJT3、CJN3 样品云母族含量极少甚至为 0, 而在较细的沉积物样品 CJJ2 中云母族矿物占 38.83%

之高，与沉积物越细云母含量越高的传统观点相契合[12,35]，但就广粒级中云母含量看来并非如此，无论何种粗细的沉积物，其云母族都有一定含量，在2.27%～10.22%之间，相差不大，但其云母含量又因比重液、温度、转速不同而产生差异，需各种因素一致情况下讨论。另外3Φ～4Φ传统矿物分析粒级中的稳定矿物和铁质金属矿物含量大都会较之广粒级中含量产生较低的偏差，长江口表层沉积物中广粒级稳定矿物平均含量为6.55%，而在3Φ～4Φ传统鉴定粒级中含量仅为2.87%；同样，铁质金属矿物平均含量在3Φ～4Φ传统鉴定粒级中为8.89%，低于广粒级中铁质金属矿物11.91%的含量。

从以稳定矿物–不稳定矿物–铁质金属矿物为端元的三角图（图3）可以看出，随粒级的变细，分样中矿物成分呈现有规律的变化。除CJJ2和CJN1两样品粗粒级自生褐铁矿富集导致铁质金属矿物类含量高外，所有样品粗粒分样中均以不稳定矿物为主，随粒级变细，矿物成分不断向稳定矿物和铁质金属矿物方向延展。从具有代表性的CJT2样品所在的三角图可以看出，粒径4Φ为不稳定矿物与稳定且比重较大矿物的界限粒级，更细的粒级（粒径大于4Φ）中不稳定矿物减少，稳定矿物与铁质金属矿物含量增多。

榍石是长江口的特征矿物，广粒级中稳定矿物占重矿物含量的6.55%左右，其中榍石就占到了3.07%。榍石在长江口碎屑矿物各个粒级中分布广泛，随着粒径变小，其含量呈现逐渐增加的趋势。褐铁矿几乎是每个粒级都有的矿物，其含量也较高，为铁质金属类矿物的主要成分，尤其在河口区个别样品的粗粒级中含量较高。原因是长江三角洲地区河漫滩型沉积物经历多次沉积和成土过程而形成古土壤层即第一硬土层[36–37]，成土期是褐铁矿等氧化性矿物形成时期，末次冰期海平面在低位变动，气候寒冷干燥，土壤的化学过程以氧化作用为主，淋滤到土壤下层的Fe主要以氢氧化物的形式沉淀下来，形成褐铁矿，故而长江口地区褐铁矿含量较高[38]。鉴定样品中褐铁矿以皮壳状，不规则粒状为主，也说明这些褐铁矿非原生，是次生或自生的褐铁矿，是化学成因而非水流搬运沉积所形成。

5.3 长江口沉积物碎屑重矿物特征相似度分析

不管选用哪个分粒级进行矿物鉴定都只能代表沉积物样品的部分特征，同一个样品中从粗到细多个粒级（即广粒级）矿物综合特征，能较好反映重矿物整体特征[14]，但若对样品广粒级进行鉴定，不仅鉴定难度增加数倍，且鉴定时间及成本更是扩大到无法估

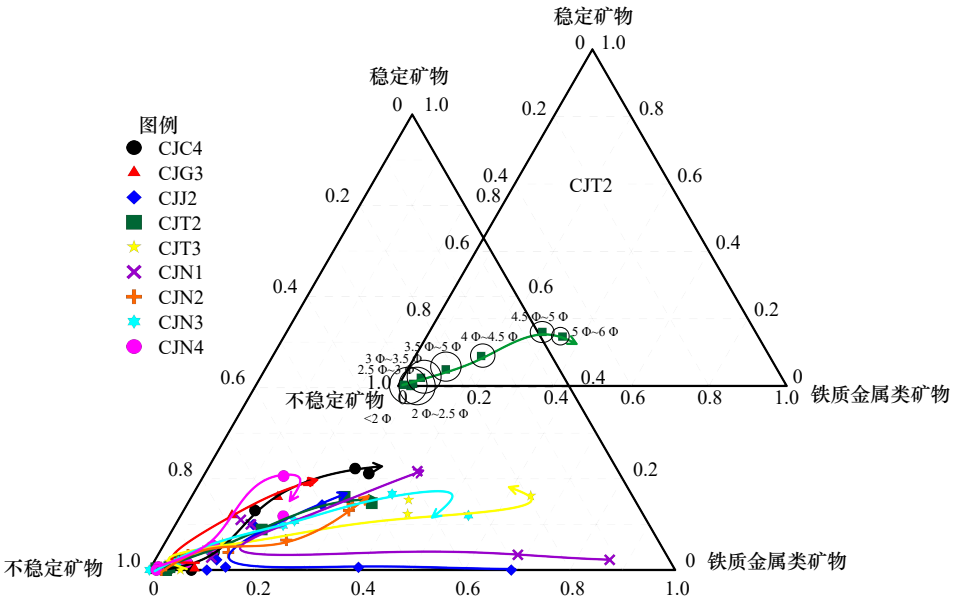


图3 三端元矿物类在不同粒级的含量变化趋势

Fig. 3 Trends of triad minerals at different particle sizes

不稳定矿物包括：普通角闪石、阳起石、普通辉石、透辉石、紫苏辉石、黑云母、水黑云母；稳定矿物包括：锆石、金红石、电气石、石榴石、磷灰石、榍石；铁质金属矿物包括：钛铁矿、磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿；图中小三角图以样品CJT2为例，其中圆圈大小代表颗粒粒径大小

Unstable minerals include hornblende, actinolite, augite, diopside, hypersthene, biotite, hydrobiotite; stable minerals include ziron, rutile, tourmaline, garnet, apatite, sphene; Fe-metallic minerals include ilmenite, magnetite, hematite, and lignite; small triangular chart takes the CJT2 as representative sample of the Changjiang River; the circle size represents the particle size

量。故而, 需要找出最能代替广粒级近似代表沉积物整体碎屑重矿物特征的部分粒级, 并且该粒级最好还在鉴定条件之内。本文以长江 9 个样品中各广粒级碎屑重矿物特征为参考粒级, 即其重矿物种类与含量指标为该样品的参考标准, 计算不同粒级分样与参考粒级的相似程度, 鉴于粗粒端粒级重矿物含量与种类少且所占百分含量极低, 故表中不予列出, 只考虑优势粒级、次优粒级和常用鉴定粒级(3Φ～4Φ)(表 3)。

表 3　长江口典型样品重矿物相似度分析

Tab. 3　Analysis of heavy mineral similarity of typical samples in the Changjiang River Estuary

样品/广粒级(Φ)	优势粒级(Φ)/相似度	次优粒级(Φ)/相似度	常用粒级(Φ)/相似度
CJT3/1.5～5.0	2.0～2.5/0.996	<2/0.853	3.0～4.0/0.982
CJN3/2.0～6.0	2.5～3.0/0.980	3.5～4.0/0.998	3.0～4.0/1.000
CJN2/2.0～6.0	3.5～4.0/0.985	4.0～4.5/0.992	3.0～4.0/0.991
CJG3/1.5～6.0	3.5～4.0/0.993	4.0～4.5/0.982	3.0～4.0/0.988
CJN4/2.0～6.0	4.5～5.0/0.988	4.0～4.5/0.997	3.0～4.0/0.920
CJC4/2.0～6.0	4.0～4.5/0.991	5.0～6.0/0.950	3.0～4.0/0.946
CJN1/2.0～6.0	5.0～6.0/0.886	4.5～5.0/0.994	3.0～4.0/0.950
CJT2/1.5～6.0	5.0～6.0/0.955	4.0～4.5/0.949	3.0～4.0/0.880
CJJ2/1.5～6.0	5.0～6.0/0.994	4.5～5.0/0.954	3.0～4.0/0.722

由表 3 可知, 长江口沉积物优势粒级与广粒级相似度普遍高, 介于 0.886～0.996 之间, 平均为 0.974, 次优粒级也与广粒级相似度较大, 因此, 优势粒级与次优粒级集合而成的主要粒级可以代替广粒级近似代表沉积物整体碎屑重矿物特征。常用粒级则表现出差异性: 当常用粒级(3Φ～4Φ)是沉积物主要粒级时, 用它作代表来反映全样矿物特征, 相似度很大; 但当它是次要粒级甚至是微量粒级时, 再用它来代表全样, 则相似度较低, 代表整个沉积物样品应有的矿物特征较差, 反映的仅是该粒级范围内的矿物特征。3Φ～4Φ 粒级段虽在长江口任何沉积物中均有一定含量且重矿物种类较多, 但该粒级段含量在沉积物多为细砂质以上亦或者中粉砂质以下时, 其粒级段所占含量较低。即当沉积物是细砂质或粉砂质时, 用极细砂粒级来做重矿物分析合理, 但当沉积物是砂质或泥质时, 碎屑重矿物分析采用粒级细粒或粗粒端的极细砂时, 分析结果则需要考虑其粒级代表性。选择具有代表全样重矿物特征粒级, 其首要因素是对沉积物的粒度分布特征进行分析, 还要结合重矿物分析的目的和实际矿物鉴定的可操作性。从矿物综合特征相似度来论, 选择沉积物主要粒级较为合适, 因为主要粒级重矿物特征与广粒级重矿物综合特征最为相似。

6　结论

(1)基于以 0.5Φ 为间距的不同粒级(1.5Φ～6Φ)重矿物分析, 长江口沉积物重矿物特征在样品内部不同粒级分样中分布不同, 尤其表现在小于 2.5Φ 和大于 4.5Φ 的沉积物粗、细两端, 在粗粒级端, 矿物种类少, 片状矿物含量高, 以云母和褐铁矿富集为特征; 随着粒级变细, 重矿物种类数增加, 稳定矿物和铁质金属矿物富集。

(2)广粒级分析出长江口表层碎屑重矿物种类约 30 种, 以普通角闪石和绿帘石为主要矿物, 次要矿物是黑云母(包括水黑云母)和褐铁矿, 稳定矿物少于不稳定矿物(SM/UM<1), 重矿物成熟度低, ZTR 指数小于 2。广粒级分析认为传统鉴定粒级(3Φ～4Φ)夸大了闪石族与云母族含量, 缩小了稳定矿物和铁质金属矿物的含量, 实际云母含量大都在 10% 以下, 平均粒径越细云母含量越高的现象不显著。

(3)广粒级特征与样品整体特征接近, 能较全面反映沉积物全样碎屑重矿物特征, 物源信息丰富全面。主要粒级是广粒级中的骨干部分, 与广粒级相似度大, 可以用这部分来代替广粒级近似代表沉积物整体特征。矿物分布、矿物组合和矿物指数及其所蕴含的水动力和物源意义都要结合粒度特征综合分析, 防止以偏概全。

参考文献:

[1]　水利部长江水利委员会. 长江流域及西南诸河水资源公报[M]. 武汉: 长江出版社, 2008.

Changjiang Water Resources Commission. Bulletin of the Yangtze River Basin and the Southwestern Rivers[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2008.
[2] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报(2013)[M]. 武汉: 长江出版社, 2014.
Changjiang Water Resources Commission. Changjiang River Sediment Bulletin (2013)[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2014.
[3] 程天文, 赵楚年. 我国主要河流入海径流量、输沙量及对沿岸的影响[J]. 海洋学报, 1985, 7(4): 460−471.
Chen Tianwen, Zhao Chutian. Chinese major rivers entering the sea, runoff, sediment transport and impact on the coast[J]. Haiyang Xuebao, 1985, 7(4): 460−471.
[4] Yue Wei, Jin Bingfu, Zhao Baocheng. Transparent heavy minerals and magnetite geochemical composition of the Yangtze River sediments: Implication for provenance evolution of theYangtze Delta[J]. Sedimentary Geology, 2018, 364: 42−52.
[5] Dong Linsen, Shi Xuefa, Liu Yanguang, et al. Mineralogical study of surface sediments in the west Arctic Ocean and their implications for material sources[J]. Advances in Polar Science, 2014, 25(3): 192−203.
[6] Sevastjanova I, Hall R, Alderton D. A detrital heavy mineral viewpoint on sediment provenance and tropical weathering in SE Asia[J]. Sedimentary Geology, 2012, 280: 179−194.
[7] 王昆山, 姜晓黎, 叶青, 等. 南黄海潮流沙脊区表层沉积物重矿物分布及来源[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(5): 1−11.
Wang Kunshan, Jiang Xiaoli, Ye Qing, et al. Distribution and source of heavey minerals in the surface sediment of the tidals and ridges area in South Yellow Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2013, 33(5): 1−11.
[8] 贾军涛, 郑洪波, 杨守业. 长江流域岩体的时空分布与碎屑锆石物源示踪[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(9): 1375−1380.
Jia Juntao, Zheng Hongbo, Yang Shouye. Temporal and spatial distribution of rock mass in the Yangtze River basin and zircon source tracing[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(9): 1375−1380.
[9] 吕全荣, 严肃庄. 长江河口重矿物组合的研究及其意义[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 1981(1): 73−83.
Lv Quanrong, Yan Suzhuang. A study of mineral groups in the Changjiang estuarine region and their significance[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 1981(1): 73−83.
[10] 吕全荣. 长江口细颗粒沉积物的矿物特征和沉积分异[J]. 上海地质, 1992(3): 18−25, 40.
Lv Quanrong. Mineral characteristics offine: mgrain sediment and its sedimentary differentiation in Changjiang Estuary[J]. Shanghai Geology, 1992(3): 18−25, 40.
[11] 王腊春, 陈晓玲, 储同庆. 黄河、长江泥沙特性对比分析[J]. 地理研究, 1997(4): 72−80.
Wang Lachun, Chen Xiaoling, Chu Tongqing. A contrast analysis on the loads character of the Changjiang River and the Yellow River[J]. Geographical Research, 1997(4): 72−80.
[12] 王昆山, 王国庆, 蔡善武, 等. 长江水下三角洲沉积物的重矿物分布及组合[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007(1): 7−12.
Wang Kunshan, Wang Guoqing, Cai Shanwu, et al. Heavy mineral characteristicsof surface sediments in the subaqueous Yangtze River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007(1): 7−12.
[13] 国家标准化管理委员会. 海洋调查规范[M]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
National Standardization Management Committee. Marine Survey Specification[M]. Beijing: China Standard Press, 2007.
[14] Garzanti E, Andò S, Giovanni Vezzoli. Grain-size dependence of sediment composition and environ-mental bias in provenance studies[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 277(3/4): 422−432.
[15] Krippner A, Meinhold G, Morton A C, et al. Grain-size dependence of garnet composition revealed by provenance signatures of modern stream sediments from the western Hohe Tauern (Austria)[J]. Sedimentary Geology, 2015, 321: 25−38.
[16] 刘秀明, 罗祎. 粒度分析在沉积物研究中的应用[J]. 实验技术与管理, 2013, 30(8): 20−23.
Liu Xiuming, Luo Wei. Application of grain size analysis in sediments research[J]. Experimental Technology and Management, 2013, 30(8): 20−23.
[17] 刘善品, 何况, 吴小斌, 等. 细粒沉积物(岩)中重矿物提取方法的改进[J]. 地质科技情报, 2012, 31(1): 131−136.
Liu Shanpin, He Kuang, Wu Xiaobin, et al. Improving the methods of heavy minerals pretreatment and minerals separation in mudstone and siltstone[J]. Geological science and technology information, 2012, 31(1): 131−136.
[18] 周正. 单矿物分选学[M]. 广州: 广东科技出版社, 1997: 161−178.
Zhou Zheng. Single Mineral Sorting[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1997: 161-178.
[19] 任迎新, 朱宝华. 重砂矿物分选及鉴定[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1987.
Ren Yingxin, Zhu Baohua. Classification and Identification of Heavy Sand Mineral[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1987.
[20] Mange M A, Maurerg H F W. Heavy Minerals in Colour[M]. London: Chapman & Hall, 1992: 11-16.
[21] Son Y S, Baek J S. A modified correlation coefficient based similarity measure for clustering time-course gene expression data[J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(3): 232−242.
[22] Anderberg M. Cluster Analysis for Application[M]. New York: Academic Press, 1973.
[23] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
Xu Jianhuan. Mathematical Methods in Modern Geography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.
[24] 刘红, 何青, 王元叶, 等. 长江口表层沉积物粒度时空分布特征[J]. 沉积学报, 2007(3): 445−455.

Liu Hong, He Qing, Wang Yuanye, et al. Emporaland spatial characteristics of surface sediment grain-size distribution in Changjiang Estuary[J]. Geographical Research, 2007(3): 445−455.
[25] 邓程文, 张霞, 林春明, 等. 长江河口区末次冰期以来沉积物的粒度特征及水动力条件[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 185−198.
Deng Chengwen, Zhang Xia, Lin Chunming, et al. Grain-size charactereristics and hydrodynamic conditions of the Changjiang estuarine deposits since last glacial[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(6): 185−198.
[26] 金秉福. 粒度分析中偏度系数的影响因素及其意义[J]. 海洋科学, 2012, 36(2): 129−135.
Jin Bingfu. Influencing factors and significance of the skewness coefficient in grain size analysis[J]. Marine Sciences, 2012, 36(2): 129−135.
[27] 刘宝珺. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
Liu Baojun. Sedimentary Petrology[M]. Beijng: Geological Press, 1980.
[28] 战庆, 王张华, 王昕, 等. 长江口区晚新生代沉积物粒度特征和沉积地貌环境演变[J]. 沉积学报, 2009, 27(4): 674−683.
Zhan Qing, Wang Zhanghua, Wang Xin, et al. Grain-size characteristics and geomorphology evolution in Late Cenozoic Era sediments Changjiang Estuary[J]. Geographical Research, 2009, 27(4): 674−683.
[29] Morton A C, Hall C R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones[J]. Sedimentary Geology, 1999, 124(1/4): 3−29.
[30] 赵红格, 刘池洋. 物源分析方法和研究进展[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 409−415.
Zhao Hongge, Liu Chiyang. Approaches and prospects of provenance analysis[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 409−415.
[31] 王中波, 杨守业, 李萍, 等. 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其示踪意义[J]. 沉积学报, 2006(4): 570−578.
Wang Zhongbo, Yang Shouye, Li Ping, et al. Detrital mineral compositions of the Changjiang River sedmients and their tracing implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006(4): 570−578.
[32] Vezzoli G, Garzanti E. Erosion patterns in the Changjiang (Yangtze River) catchment revealed by bulk-sample versus single-mineral provenance budgets[J]. Geomorphology, 2016, 15(261): 177−192.
[33] 金秉福, 岳伟, 王昆山. 黄河沉积中角闪石矿物晶体化学特征和成因分析[J]. 海洋学报, 2013, 35(1): 131−143.
Jin Bingfu, Yue Wei, Wang Kunshan. The crystaliochemistry characteristics and genetic analysis of amphibiole in the sediments of the Huanghe River[J]. Haiyang Xuebao, 2013, 35(1): 131−143.
[34] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004(16): 1589−1604.
Wu Yuanbao, Zhen Yongfei. Study on the mineralogy of zircon and its constraints on the interpretation of U-Pb age[J]. Periodical of Ocean University of China, 2004(16): 1589−1604.
[35] 陈丽蓉. 渤海、黄海、东海沉积物中矿物组合的研究[J]. 海洋科学, 1989(2): 1−8.
Chen Lirong. Study on mineral combinations in sediments of Bohai Sea, Yellow Sea and East Sea, China[J]. Marine Science, 1989(2): 1−8.
[36] 金秉福, 张云吉, 宋键. 长江三角洲第一硬土层中微结核的矿物化学特征及其成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007(3): 9−15.
Jin Bingfu, Zhang Yunji, Song Jian. Characteristics of mineral chemistry and formation of the micro-nodules in the first stiff clay layer in the Yangtze River Delta[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2007(3): 9−15.
[37] 邓兵, 吴国瑄, 李从先. 长江三角洲地区第一古土壤层及其古气候记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(3): 29−37.
Deng Bin, Wu Guoxuan, Li Congxian. Paleoclimate recorded in the first layer of paleosol in Yangtze Delta area[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1999, 19(3): 29−37.
[38] Yang Shouye, Li Congxian. Elemental composition in the sediments of the Yangtze and the Yellow River and their tracing implication[J]. Progress in Natural Science, 2000, 10(8): 612−618.

Patterns of heavy mineral combination in different grain-size categories and their sedimentary significance: A case study for surfical sediments in the Changjiang River Estuary

Wang Mengyao [1,2], Jin Bingfu [1], Yue Wei [3]

(1. *Institute of Coast/School of Resources and Environmental Engineering*, *Ludong University*, *Yantai* 264025, *China*; 2. *State Key Laboratory for Estuarine and Coastal Research*, *East China Normal University*, *Shanghai* 200241, *China*; 3. *School of Geography*, *Geomatics and Planning*, *Jiangsu Normal University*, *Xuzhou* 221116, *China*)

Abstract: On the basis of particle size analysis, heavy mineral analysis was carried out in different size fractions

with a spacing of 0.5Φ of the Changjiang River Estuary surface sediment. Heavy mineral similarity value calculated between the each grain group and wide window grain size group (1.5Φ to 6Φ). The results show that the surface sediments of the Changjiang River Estuary have a large grain size span, ranging from coarse sand to mud, and the silt content is high. Intrasample variability of heavy mineral contents, species and compositions is ubiquitous, intersample variability has certain regularity. There are about 30 kinds of heavy minerals in the Changjiang River Estuary, about ten kinds of minerals in the coarse-grained fractions, the number of heavy minerals in fine-grained fractions has increased to more than twenty. 3.5Φ to 4.5Φ is a fraction with numerous and complex heavy minerals. Mica is rich in the coarse-grained grade (<3Φ), and the heavy mineral combination is mica+hornblende, but almost absent in fine grains of >4Φ. The amphibole group almost exist all range of grain sizes and the content is high in grain of 3Φ to 5Φ. Epidote group, stable minerals, and especially Fe-metallic minerals increase at fine grain of >3.5Φ. The heavy minerals combination is hornblende+epidote+limonite in the Changjiang River Estuary, sphene is the characteristic mineral. Similarity analysis shows that the main grain size and the wide grain size of the sediment have similarities in the characteristics of heavy minerals, which is the most suitable size for replacing the heavy minerals of the whole sediment. The heavy mineral characteristics are deeply affected by the particle size distribution in the Changjiang River Estuary. Mineral type, mineral combination and indice, and the hydrodynamic and provenance implications must be combined with the grain size analysis.

Key words: heavy minerals**;** wide window strategy**;** grain size analysis**;** similarity**;** Changjiang River Estuary