

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017102201

# 长江口和黄东海沉积物单矿物分选的常用方法和流程

金秉福<sup>1</sup>, 王孟瑶<sup>1</sup>, 王昆山<sup>2</sup>, 张丽娜<sup>1</sup>, 王艳君<sup>1</sup>

1. 鲁东大学海岸研究所, 资源与环境工程学院, 烟台 264025

2. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061

**摘要:** 沉积物碎屑矿物组分既受物源控制, 又受水动力影响, 单矿物分选应首先选取适当的粒度, 细砂粒度经常采用, 但不是固定在这一粒度; 控制重液密度是重液分选的关键环节, 不同目标矿物, 可通过调配不同的比重液进行分离分选, 并可使用离心重液法提高分选效能; 磁选是分选不同磁性特征矿物的简单便捷方法, 钕铁硼强磁铁的使用, 可部分代替电磁分选仪的功能, 对样品量少、矿物种类多、磁性变化大地矿物组合可起到重要的分组作用; 化学分选采用不同浓度的各种溶剂在不同条件下处理试样, 有选择性地溶掉妨碍矿物, 留下目标矿物; 手工分选单矿物重点在于剔除其他方法难以分离的杂质, 保障样品的纯度和代表性; 角闪石和石英分选流程, 代表着单矿物分选的基本技术路线, 不同方法合理的前后衔接, 使单矿物分选高效、快捷、准确, 但还有一些矿物分选难题尚未解决, 需要深入研究和实践。

**关键词:** 单矿物分选; 重液分离; 磁选; 长江口沉积物

**中图分类号:** P575      **文献标识码:** A

## Methods of single mineral separation for sediments of the Changjiang estuary, the Yellow Sea and the East China Sea

JIN Bingfu<sup>1</sup>, WANG Mengyao<sup>1</sup>, WANG Kunshan<sup>2</sup>, ZHANG Lina<sup>1</sup>, WANG Yanjun<sup>1</sup>

1. Ludong University, Yantai 264025, China

2. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China

**Abstract:** Single Clastic minerals are commonly used for detecting provenance and water dynamics. Fine sands are the best for the study as such and thus required to be separated from the others although very fine sands are also convenient for the purpose. Mineral separation in heavy liquid is a common practice for single mineral separation, of which the key is to select the heavy liquid properly. Different target minerals can be separated and selected by blending specific gravity liquids together, and the separation efficiency can be improved by centrifugal separation. Magnetic separation is a simple and convenient method popularly used for sorting out different magnetic minerals. Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B permanent magnet may partly replace the function of an electromagnetic sorter, specifically for the samples in small volume, consisting of multiple minerals with changing magnetism. Chemical separation uses various solvents in different concentration to treat the samples under specific conditions, in order to dissolve obstructive minerals and keep target minerals. Manual separation is required if it is difficult to remove impurities by other methods. The separation of amphibole and quartz represents the basic procedure for single mineral separation, and the different methods are adopted in order to make mineral separation more efficient, fast and accurate. Of course, there are still some problems remained in mineral sorting and further studies are needed.

**Key words:** single mineral separation; heavy-liquid separation; magnetic separation; sediment in the Changjiang River estuary

沉积物物源识别一直是中国东部边缘海沉积演化研究的焦点问题之一, 长江和黄河每年输入的巨量泥沙对中国东部陆架海区的物质通量、陆架沉积体系的形成以及海洋生态环境有着重要的影响<sup>[1-3]</sup>。黄东海交界带是长江和黄河交汇沉积最强烈的海

区, 同时又有来自其他河流、沿海基岩、黄海沿岸流等来源碎屑物质, 沉积物类型多样, 沉积环境复杂多变, 是研究沉积物的源、汇变化的重点海区<sup>[4-6]</sup>。其中砂质沉积区分布最为广泛, 以细砂和粉砂质砂为主, 这样的沉积物类型, 物源分析应首选碎屑矿物方

**资助项目:** 国家自然科学基金项目“浅海多源沉积物辨析的碎屑角闪石和石英矿物化学标型特征研究”(41576057)

**作者简介:** 金秉福(1963—), 男, 教授, 主要从事海洋地质学研究, 研究方向是海洋沉积矿物学, E-mail: bfjin@126.com

**收稿日期:** 2017-10-22; **改回日期:** 2018-05-31. 周立君编辑

法<sup>[7-14]</sup>。

鉴于碎屑矿物在沉积地质学和环境演化研究中的作用被越来越多的学者所认识,目前单矿物研究逐渐成为现代沉积学的研究热点,随之而来的要求就是怎样高效、快捷、准确的挑选单矿物<sup>[15-18]</sup>。挑选出来的单矿物,其中数十颗至数百颗分别可用于电子探针测试(EPMA)、质子微探针(PIXE)、高分辨率二次离子质谱(SIMS)、激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)等单颗粒矿物化学测试<sup>[19-21]</sup>,可快速准确测量微小矿物样品中的元素和同位素的含量<sup>[22-26]</sup>,并伴随同位素示踪和定年技术等的使用<sup>[27,28]</sup>,可以弥补传统分析方法的缺陷,单矿物化学标型特征已成为沉积物物源分析中备受关注的指标<sup>[29-35]</sup>,使得沉积物物源研究正在从定性分析向定量分析转变。

单矿物定量分析还有一种方式是测试某一种矿物群体的常微量元素地球化学<sup>[36]</sup>。一般采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法,其测试精度高出电子探针 $10^2$ 数量级,可以对 $10^{-6}$ 级或超微量元素进行针对性分析。常微量元素地化测试需要的样本质量一般在50mg左右(最先进的仪器可以缩减至20mg),如果做平行样、再加上备用样,则需要200mg左右。对细砂粒级沉积矿物而言,50mg意味着含有1~2万颗矿物颗粒,直接从样品中手工挑选,是难以完成、且效率低下的任务,利用矿物不同特性进行同类矿物分选是必然的选择。不同的研究目的和研究对象,在矿物分选中所采取的方法不尽相同,但有一点是一样的,即分选出具有代表性尽可能多的目标矿物。鉴于这种矿物分选是为了科研需要,所以在分选过程中化学试剂的使用必须有所限制或统一规范,所采取的方法原则上传统可靠,加之在海洋调查中所采取的沉积物样品量有限,特别是柱状样更少,因此本文所推荐的方法,不是工业选矿法,也与陆地地质人工重砂选矿方法有所不同,而且长江、黄河和黄东海沉积物中矿物组合有较大的差异<sup>[7,9-11,14,37]</sup>,碎屑矿物鉴定分析可依照“我国近海海洋综合调查与评价专项技术规程——海洋底质调查”来进行<sup>[38]</sup>,单矿物分选业界并没有统一的技术规程,因此,分选方法应因地制宜,但大体的规则和方法要具有一定共性。本文是应青年学者和研究生要求,对国内外常用单矿物分离方法进行了归纳总结,并对某些传统方法进行了细节改进,在进行了一定数量样品分选实践的基础上提出,具有较强实用性以供读者参考。

## 1 矿物分选的常用方法

### 1.1 样品筛分

沉积物矿物成分的研究,一般是在进行粒度分析之后,常规碎屑矿物分析并不是分析沉积物的全部粒级,而是根据研究的目的,选择一定的粒级,用部分样来代表全样。通常情况下,碎屑矿物鉴定选取0.125~0.063mm(3~4 $\Phi$ )粒级,如果沉积物粒度较粗,选取0.25~0.125mm(2~3 $\Phi$ )粒级。这是因为:根据分析统计,此两粒级重矿物含量高,矿物种类多,具有代表性,而且易于鉴定。大于0.25mm的粒级,岩石碎屑较多,并由于颗粒较大,矿物在镜下透明度变低,鉴定难度增大;而小于0.063mm粒级矿物,由于粒度细小,易受静电、潮湿粘连等影响,也不易鉴定统计。但是,不同海区、不同沉积物类型,轻、重矿物含量和矿物种类会因所处粒级不同,而产生不小的差异,因此在粒级选取之前必须先做试验分析,然后确定本工作区矿物鉴定所应采取的粒级,而不是一定选择0.125~0.063mm(极细砂)这一粒级区间<sup>[39]</sup>。虽然长江进入黄东海海盆的泥沙悬浮体主要为这一粒级,但在不同水动力作用和地貌环境下,其粒度会有较大的差异,如以河漫滩相沉积为主的崇明岛表层沉积物以泥质粉砂为主,南通港附近的边滩沉积物则以中粗砂为主,两处样品碎屑矿物组成发现有较大的不同。像黄河沉积物是以粉砂为主,黄河物源极细砂这一粒级(含量较少)矿物成分分配并不能代表整个沉积物样矿物特征。用同样粒级的最大益处是便于不同物源水动力环境的直接对比。

而单矿物分选,可根据研究目的和研究矿物不同,选取相应粒度的矿物,从粗砂至粗粉砂都可以选取。例如研究锆石,粒度应在0.125~0.031mm(3~5 $\Phi$ )之间为宜,因为多数锆石天然粒度不大<sup>[40]</sup>,相比于细砂,锆石在单位体积内粗粉砂中颗粒数更多,比粗粉砂更细粒级的锆石,沉积物中也有不少,但挑选和后续工作难度变大;如果研究石英中的包裹体、石英表面形态<sup>[41]</sup>,则石英粒度大者为好。

粒度对矿物种类和矿物含量有相当大的控制作用,即粒度效应,相同水动力搬运来的沉积物矿物应具有相近的重力与浮力差,密度相近的矿物颗粒粒度呈现正态分布,密度相差较大的矿物,其粒度表现就相对复杂。颗粒的沉降速度一般与颗粒的粒度、密度、形状以及水介质的性质有关<sup>[42,43]</sup>,由于颗粒

的沉速与其密度成正比,在自然界里就造成了密度大而体积小的重矿物与密度小而体积大的轻矿物沉降在一起的现象。一般来讲,对轻矿物(也包括云母等片状矿物)来说,其粒度与形状是影响沉降速度的主要因素,但对重矿物来说,密度是最重要的。

总体而言,粒度变化会引起如下两个问题,值得注意:

(1)鉴定采用的碎屑粒度不同会导致矿物种类和矿物含量有较大的变化,一般来说,细粒会使矿物种类增多,尤其是重矿物,高密度矿物往往在极细砂或更细的粗粉砂中相对富集,可能使重矿物所占比例增加,岩屑减少,矿物磨圆度降低。矿物资料对比时应注意粒度是否相当(相同或相近)。一定要清楚数据来源于哪一个粒级,某些时候鉴定粒级(通常 3~4 $\Phi$ )并不是这个样品的主要粒级,甚至是含量很低的次要粒级,这种矿物鉴定数据只说明这个粒级的矿物特征,并不能代表整个样品的矿物特征,具体案例研究另文报道。

(2)砂矿资源评价时,应特别注意矿物资料所采用的粒度级别,理论上讲有用矿物在各个粒级上均可出现,如山东半岛滨海砂矿,钛铁矿在 2~4 $\Phi$ (细砂-极细砂)内所占比例最高,锆石在 3.5~4.5 $\Phi$  含量最高<sup>[44]</sup>,广西海岸带有有用重矿物也有类似的情况<sup>[45]</sup>,但这些粒级却不是砂矿资源的全部,通常鉴定计算数据只有这一两个粒级。

矿物粒级筛分,要使用正规厂商的标准套筛,从市场或网上购入的不同口径的筛子,应先在显微镜下测量口径的准确性,目前市场上能用于沉积物筛分最细的口径是 500 目,约 0.025mm,比 500 目更细小的筛子,筛网孔不是方形,且口径过于细小,已经不适合干筛或水筛沉积物了,中粉砂-泥级颗粒只能通过沉降法来获取不同的粒级。

## 1.2 重液分离

### 1.2.1 轻、重矿物重液分离

用三溴甲烷( $\text{CHBr}_3$ )来分轻、重矿物,其密度在 20 $^{\circ}\text{C}$  时是 2.89g/cm<sup>3</sup>。三溴甲烷其密度随温度、杂质或多次回收重复使用后会有一定变化,一般会变小,颜色也会变深(由无色变成淡黄色再深变成浅褐色),实验前要用密度仪或密度瓶进行测试,在密度变化范围 2.85~2.90g/cm<sup>3</sup> 内是允许的,对重液分离结果产生的影响不大,重液颜色变深也可用,只要其化学性质稳定、密度达标即可。有些学者为了更好地区分方解石和白云石,将三溴甲烷重液密度通过加稀释液的方法,降低到 2.80<sup>[38,46]</sup>,这样方解石

依然在轻矿物组合中,而白云石进入重矿物组合中,随之而来的是轻重矿物比例就会与重液密度是 2.89 时不一样,在进行不同批次矿物特征对比时,应对碎屑矿物的实验情况进行分析,规范对比条件。

### 1.2.2 单矿物重液分离

具有不同密度的矿粒在重液里会发生浮沉现象,利用矿物密度差异进行重液分选,是单矿物分选的主要方法之一。虽然许多矿物组合(矿物对)直接使用成品重液进行分选,就能得到满意的效果,但是在单矿物分选中常常还需要将原重液加入稀释剂,以降低原重液密度来分离密度差异很小的矿物对或矿物组合,调配液的密度必需介于轻重两矿物密度之间,即:

$$D_{\text{轻矿物}} < D_{\text{调配液}} < D_{\text{重矿物}}$$

在已知矿物密度的情况下,可用下面公式来求出调配液的配比毫升数。

$$V_2 = \frac{V_1(D_1 - D)}{D - D_2}$$

式中  $V_1$  和  $D_1$  为重液的体积和密度; $V_2$  和  $D_2$  代表稀释剂的体积和密度; $D$  是要配制的调配液密度。

二碘甲烷与三溴甲烷一样,都是单矿物分选中最常用的两种重液,密度小于 2.89 的重液,可用三溴甲烷与二甲基亚砷或无水乙醇来调配;密度介于 2.89 至 3.32 的重液可用二碘甲烷与三溴甲烷,通过调配来获得;而密度大于 3.32 的重液,由于试剂中含有贵金属和重金属,除价格高外,还有较大的毒性和腐蚀性,只有必要时才使用(见表 1)。有一种方法,往二碘甲烷中加入过量的单质碘,可使重液密度达到 3.4 以上,绿帘石漂浮,实现绿帘石与石榴子石、锆石等矿物组合分离的目的。以斜长石+石英为代表的几组常见矿物对组合,使用调配重液分选所采用的密度见表 2。

表 1 中,列举了常用重液种类和特征<sup>[15,47]</sup>,其中新型重液——多钨酸钠,由于无毒无味、密度可随意调配、回收方便,这种突出优点使其成为许多岩矿实验室逐渐选用的重液<sup>[48-50]</sup>,但目前国际市场上因其价格昂贵、国内尚无国产分析用产品,而且其具有氧化性、遇钙离子沉淀性以及黏度大等因素,其适用性不如三溴甲烷广泛。

新型稀释剂二甲基亚砷( $\text{CH}_3$ )<sub>2</sub>SO 是一种含硫有机化合物,常温下为无色无味的透明液体,具有高极性、高沸点、热稳定性好、与水混溶的特性,能溶于乙醇、丙醇、苯和氯仿等大多数有机物,被誉为“万能溶剂”。用二甲基亚砷作为稀释剂,比无水乙醇、二甲苯及丙酮配制出的重液更稳定,更符合环保要求。

表1 常用重液种类和特性

Table 1 Common heavy liquids and their properties

重液名称	化学成分	密度	颜色	异味	挥发性	黏性	毒性	稀释剂	洗涤液
三溴甲烷	CHBr <sub>3</sub>	2.89	无色	有	较大	很小	有	二甲基亚砷/无水乙醇	工业酒精
四溴乙炔	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Br <sub>4</sub>	2.97	无色	有	较大	小	有	无水乙醇	工业酒精
多钨酸钠	Na <sub>6</sub> [W <sub>12</sub> (O H) <sub>2</sub> O <sub>38</sub> ]	3.1	无色	无	小	较大	无	水	水
杜列液	HgI <sub>2</sub> +KI	3.17	黄色	无	小	大	有	水	水
二碘甲烷	CH <sub>2</sub> I <sub>2</sub>	3.32	无色	有	较小	较小	有	二甲基亚砷	乙醚
碘化银钡汞	HgI <sub>2</sub> +BaI <sub>2</sub> +AgI	3.5	黄色	无	小	较大	有	水	水
克列里奇液	CH <sub>2</sub> (COOTl) <sub>2</sub> +HCOOTl	4.2	褐色	无	小	较大	有	水	水

表2 几组常见矿物对组合重液分选所使用的调配重液密度

Table 2 The specific gravity of some blended heavy liquids

矿物对组合	重液密度	基础重液	稀释剂	分离方法	单矿物产品
斜长石+石英	2.60~2.65	三溴甲烷	二甲基亚砷	离心法	上浮斜长石,下沉石英
石英+方解石	2.68~2.70	三溴甲烷	二甲基亚砷	离心法	上浮石英,下沉方解石
白云母+黑云母	3.0~3.1	二碘甲烷/杜列液	二甲基亚砷/蒸馏水	自然沉降/离心法	上浮白云母,下沉黑云母
黑云母+角闪石	3.10~3.15	二碘甲烷/杜列液	二甲基亚砷/蒸馏水	自然沉降/离心法	上浮黑云母,下沉角闪石
角闪石+绿帘石	3.32	二碘甲烷		自然沉降/离心法	上浮角闪石,下沉绿帘石
绿帘石+石榴子石+ 锆石+金红石	3.40~3.45	二碘甲烷+单质碘或 用碘化银钡汞液		自然沉降/离心法	上浮绿帘石,下沉石 榴子石+锆石+金红石

用它来冲洗二碘甲烷,效果明显好于工业酒精,也比乙醚更安全。

调配重液时,将需要分离的两种矿物的代表性样品(大颗粒在重液中容易分辨观察,如果试样是细粒,则采用相应的岩矿标本)各一块投入到需调配的重液中,作为密度的指示矿物,当在基础重液中缓慢滴入稀释剂后,矿物对中密度小的矿物上浮,密度大的矿物下沉时,便用此重液来分选试样。

### 1.2.3 离心重液分离

重液的表面张力,能使许多高密度的细粒金属矿物(<0.1mm)漂浮在液面上,即使不断搅拌也较难下沉,借助离心机则较容易使试样轻重矿物相互分离<sup>[51,52]</sup>。密度差异小、粒度又特别细的矿物组合,如果单靠自身的重力沉降来进行分选,往往效果不佳,可借助于调配重液及离心力场。矿物颗粒在离心力场里比在重力场里的沉降速度大1000~2000倍,从而大大提高了分选的速度和纯度。分离细粒矿物试样应采用长离心管离心机,使用双层离心套管分离,或采用单管冷冻法取出上下层产品。离心机的转速也不是越快越好,超高的转速重液会使离心管破裂,要根据离心管的材质和矿物分离的要求,通过前期预实验来选择适当转速。

### 1.3 磁性分选

矿物的磁性受很多因素的影响,有时同一矿种(不同产地、不同岩体)亦有很大的差别;甚至同一产地,不同部位的同一矿种,其磁性也往往有别,这是由于它们在生长过程中的条件不同,杂质含量不同、结晶结构不同等所引起。磁选是在不均匀磁场中,利用矿物之间的磁性差异而使不同矿物实现分选的一种富集方法<sup>[53]</sup>。

在磁选中,常用比磁化系数这一概念,它是矿物的体积磁化系数与其密度的比值,表示单位质量的矿物颗粒在单位强度的磁场中磁化时所产生的磁矩:

$$X = X_0 / \rho$$

式中, $X$ —矿物的比磁化系数, $m^3/kg$ ;  $X_0$ —体积磁化系数, $X_0 = J/H$ ,是矿物颗粒的磁化强度 $J$ 与磁化磁场强度 $H$ 的比值; $\rho$ —矿物的密度, $kg/m^3$ 。

在磁选富集实践中,常按矿物的比磁化系数大小,将其分成四类<sup>[47,54]</sup>:

①强磁性矿物:其比磁化系数 $X > 3800 \times 10^{-8} m^3/kg$ ,在磁场强度 $H = 7.2 \times 10^4 \sim 13.6 \times 10^4 A/m$ 的弱磁场磁选机中即可选出,为易选矿物,属于这类

矿物很少,主要有磁铁矿、磁黄铁矿、自然铁、铁铂矿、钛磁铁矿等。

②中磁性矿物:比磁化系数  $X = 45 \times 10^{-8} \sim 900 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,在  $H = 25 \times 10^4 \text{ A/m}$  的中等磁场磁选机中可以选出,这类矿物如角闪石、黑云母、石榴子石(暗色)、赤铁矿、钛铁矿、电气石(暗色)、褐铁矿、绿帘石、辉石(暗色)、铬铁矿、软锰矿等。

③弱磁性矿物:比磁化系数  $X > 12.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,在  $H = 48 \times 10^4 \sim 160 \times 10^4 \text{ A/m}$  的强磁场磁选机中可以选出,属于这类矿物较多,主要有角闪石(淡色)、石榴子石(淡色)、楣石、白云母(部分无电磁性)、闪锌矿、黄铜矿、独居石、磷钇矿、绿帘石(淡色)、电气石(淡色)等。

④无磁性矿物:比磁化系数  $X < 12.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,在目前技术条件下,尚不能用磁选法使之成为磁性产品,这类矿物亦较多,主要有方铅矿、辉铋矿、自然金、红柱石、磷灰石、重晶石、黄铁矿、金红石、白钨矿、萤石、铅石、石英、正长石、方解石等。

磁性分选常用的方法有:磁选、电磁选以及焙烧磁选和磁化法。磁选是用永磁铁选出强磁性矿物,由于普通磁铁磁场强度有限,只能选出强磁性矿物,为了分离中等磁性和弱磁性矿物,必须用电磁分选仪,以获得较大的磁场强度<sup>[55]</sup>,但电磁选必须在磁选之后进行。电磁分选仪种类较多,仪器上有调节磁场强度的键钮,可调节电流大小,从而获得不同大小的磁场强度<sup>[56]</sup>,可将电磁性矿物分成中等磁性和弱磁性矿物或更多的等级。

电磁分选仪属矿山选矿设备,一般海洋地质实验室并不常用这样专业设备,用于科研的小型精密磁选仪市面上也不多见,加之海洋调查科研试样量较少,矿物种类较多,用小型的电磁分选仪也较难完全适用。在没有电磁分选仪的情况下,使用钕铁硼强力磁铁,也可达到电磁铁同样的分选目标。笔者实用状况表明其效果较好,效率高,样品也不会产生相互交叉混染。

近些年才出现的钕铁硼永磁材料是以金属间化合物  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  为基础的强磁铁,具有极高的磁能积和矫顽力,可吸起相对于自身质量 640 倍的重物,对弱磁性矿物也可进行有效吸附分离。每类钕铁硼磁性材料产品按最大磁能积大小划分若干个牌号: N35—N52、35M—50M、30H—48H 等,形状也多种多样,可依据需要来选购。

一般电磁铁和强磁铁周围磁场的比磁力随位置变化而急剧变化,磁铁对磁性矿物的吸引力,也是随磁铁与矿物间距离而急剧变化,利用改变间距的大

小,从而达到利用固定磁场强度,分选不同磁性矿物的目的,比如强磁性矿物(绝大部分是磁铁矿)分选,可用倒置的培养皿扣在平铺矿物砂的玻璃板上,强磁铁放在培养皿底板面上,这时强磁性矿物就会跳跃起来被吸附在培养皿底板玻璃内层,将磁铁移走,再放回,数遍之后就会将强磁性矿物中夹带的弱磁性矿物分选掉,然后将培养皿与磁铁一起移走到另一白纸上,再移走磁铁,强磁性矿物就分离出来,整个过程不过一两分钟,分选效率很高。分选完磁铁矿之后,分选中磁性矿物钛铁矿,可将强磁铁用塑料薄膜或韧性光滑软纸包裹,贴近重矿物薄层,但不与矿物接触,则吸附上来的矿物大部分是钛铁矿。分选角闪石则必须将强磁铁轻轻放在矿物薄层上,与矿物零距离接触,中等磁性矿物以及大部分弱电磁性矿物也都吸附在磁铁上,移出磁铁至另一个玻璃板上,扒下塑料薄膜,用刷子刷净,几遍之后,这样就会分选出无磁性矿物和磁性矿物组,为下一步分选打下基础。

轻矿物也需要用强磁铁吸一吸,其作用是:吸出未分离干净的黑云母、进入轻矿物中的风化黑云母、以及白云母、海绿石、绿泥石、含金属矿物的岩屑、含金属矿物包裹体的轻矿物等,甚至也能吸出具有淡绿色半蚀变半风化态的斜长石(斜长石绢云母化、绿帘石化、绿泥石化等引起的,绿色越深磁性越大,无磁性斜长石呈灰白色、白色),这样玻璃板上剩余的无磁性矿物中,石英含量会有较大幅度提高。

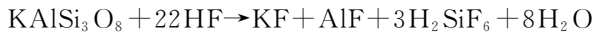
#### 1.4 化学分选

利用矿物在各种溶剂中的可溶性和溶解速度的差异,采用不同浓度的各种溶剂在不同条件下处理矿样,有选择性的溶解掉杂质矿物,留下目标矿物。矿物的可溶性及溶解速度,主要与矿物的化学组成、结晶结构以及各种元素的结合力有关,其次与溶剂的种类、数量、浓度、矿物粒级、温度、压力、时间有关。长江口和黄东海沉积物中,不少矿物可以通过化学分选的方式溶蚀掉或清洗干净。矿物化学可溶性可查阅相关分析手册<sup>[47]</sup>,常见的化学分选举例如下:

碳酸盐矿物:这类矿物大部分是次生或自生矿物,一般作为妨碍矿物用酸溶解掉,用稀盐酸效果最好,硝酸次之,硫酸又次之,也可以用乙酸,虽然反应速度较慢,但相对可靠。Ca、Se、Ba、Cu 及 Bi 的碳酸盐,在冷盐酸中便可溶解,并产生剧烈气泡。Mg、Mn、Fe 及 Zn 的碳酸盐矿物,在常温下不易被盐酸溶解或溶解甚微,必须加热才能完全溶解。

磷酸盐矿物:Ca、Mg、Mn、Cu、Pb、U及Zn等的磷酸盐矿物,均易溶于酸,即使在常温下其作用也很显著,因此,如果用盐酸进行样品前处理,常见矿物磷灰石因此会被溶蚀,甚至会被完全溶解而消失,独居石、磷钇矿能溶于热浓硫酸或磷酸,其他酸则很难溶。

硅酸盐矿物:这类矿物大多数易被氢氟酸所分解,生成硅氟酸,如:



氢氟酸对K、Na、Ca等的硅酸盐矿物作用最为强烈,而对某些Be、B、Ti、Zr的硅酸盐矿物作用极其微弱。在室温下较长时间的浸泡,氢氟酸使大量硅酸盐矿物溶解,而一些氢氟酸不溶矿物保留富集起来。用此法可分选石英长石组合中的石英,角闪石绿泥石中的角闪石、以及从沉积物中回收重晶石、锡石、刚玉、自然金、黄铁矿、金红石、电气石、磷钇矿、锆石、绿柱石等。

长石-石英矿物组分选方法之一就是利用化学方法去掉沉积物中除石英以外的所有物质,其关键技术用焦硫酸钾 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$ 在高温下释放出强氧化性的 $\text{SO}_3$ 气体, $\text{SO}_3$ 气体破坏层状硅酸盐的铝硅氧八面体结构,形成非定型硅,之后加入硅氟酸( $\text{H}_2\text{SiF}_6$ )浸泡除去其他硅酸盐矿物(主要是长石)。取样放于瓷坩埚中,加入焦硫酸钾,混匀,在马弗炉里用 $650\sim 700^\circ\text{C}$ 熔融 $30\sim 45\text{min}$ ,取出冷却,用2%的稀盐酸加热溶解过滤,长石全溶,用水洗涤后即得纯石英<sup>[57]</sup>。

为了消除石英和长石颗粒上沾有的氢氧化铁斑点,以草酸为溶剂的化学溶解法,既能迅速溶解掉长石和石英颗粒上的铁膜(黄河沉积物和黄海潮流沙脊中石英和长石表面铁染情况较明显,严重影响轻矿物的鉴定,也对其矿物化学成分测定产生不利的干扰),又不影响轻矿物中海绿石用钾-氩法测定同位素年龄值的可靠性<sup>[47]</sup>。操作方法:首先配制5%~10%的草酸水溶液( $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ),然后将样品倒入溶液中,在水浴锅中加热至 $60\sim 70^\circ\text{C}$ ,并进行搅拌,如果铁膜较重,可换一次草酸溶液,并加入新鲜金属铝片,浸泡24h,就可获得表面纯净的石英、长石矿物等矿物砂样。

钛铁矿、褐铁矿、赤铁矿、磁铁矿是长江口和东海沉积物中常见的铁质金属矿物,它们共生一起,首先用永磁铁、强磁铁和电磁铁进行磁性分选,之后,可通过化学溶蚀的方法,将钛铁矿中混入的褐铁矿溶蚀掉,保留钛铁矿等目标矿物。

在角闪石的分选过程中,一直有部分褐铁矿混

杂在角闪石矿物中,用化学法去除褐铁矿简单有效,方法如下:加10%~15%的HCl于盛有试样的小烧杯中,在水浴锅中加热至 $90\sim 100^\circ\text{C}$ ,待溶液变成浅绿色后,投入少量 $\text{SnCl}_2$ 粉末以加速溶解,浸泡3h左右,待褐铁矿完全溶解后,用清水涮洗,淘出褐铁矿的杂质残余,烘干即可。在此过程中,稀盐酸对角闪石不仅不能产生溶解,而且还会清除角闪石表面附着的次生矿物。

## 1.5 手工分选

由于长江和黄河沉积物中矿物种类众多,即使利用以上3种方法或其他更多的方法<sup>[47]</sup>,也不能将某种矿物不通过人工分选而达到100%的纯净,人工分选是单矿物分选必须经过的一个步骤,包括手工淘洗、簸选、镜下挑选、镜下验证等环节。

云母是片状矿物,其水动力行为与长石、石英不同,且云母的密度与三溴甲烷的密度非常接近,因此云母在轻、重矿物中都能见到它们的身影,当云母含量高时,比如崇明岛和启东近岸沉积物中,云母含量高达沉积物总量的5%,在分离轻、重矿物时,由于云母的特殊性,轻、重矿物分离效果较差,严重影响重矿物组成变化,因此,必须先将云母分选出去。云母的分离简单有效的方法是悬浮分离法,磁选法、簸选法、碾压法相结合才能分选出纯净的黑云母和白云母。黑云母部分已强烈风化(变成风化黑云母)、水化(变成水黑云母)甚至褐铁矿化(变成红褐色褐铁矿),其化学成分与新鲜黑云母有一定差异,因此,在去除云母片之间碳酸盐时,化学分选应注意用酸种类、浓度和浸泡时间,稀乙酸是较好的选择之一。

手工挑选单矿物时,要注意矿物颗粒的代表性、随机性和精度。任何一种矿物,其性质特征都有一定的变化范围,在矿物学论著中都会阐述,但在实际矿物分选中会遇到比理论具有更大幅度的变化,其原因是多种多样,有的是矿物本身会因晶体缺陷、类质同象、含有包裹体、含有杂质、后期蚀变、物理磨损、化学风化等;也可能是仪器误差、试剂问题、时间控制、技术运用等引起的。这些因素都会导致分选出来的精砂矿物,并没有达到矿物测试的纯度要求,必须进行镜下矿物逐颗验证筛选,将妨碍矿物挑出,留下目标矿物。对单个矿物要进行电子探针分析的样品(比如锆石),一般有测试数目要求,但不能简单地将样品中容易识别、颗粒大的目标矿物挑够数量就行,因为这种有选择性的样品不具有随机性。应该将试样规范缩样后的某一份样品全部目标矿物都挑选出来,然后再随机数够所需矿物数量。这样虽

然效率低,工作强度大,但这是保证后续实验数据精准的关键一步,没有捷径可循。

## 2 单矿物分选的实验流程

### 2.1 分选流程设计的依据

前面论述的分选方法,合理的衔接起来即组成单矿物分选流程,分选的方法很多,但处理每个样品并非所有方法都适用,分选方法的选择应主要考虑以下 3 个因素。

#### (1) 分选样品目的要求

对进行碎屑矿物鉴定和单矿物探针分析的样品,首先对实验样品进行粒度筛选,之后进行轻、重矿物分离。留足鉴定用量后,其余样品可进行不同密度液提纯,再根据实际所需矿物特性进行磁选或者在不破坏目标矿物的前提下进行化学分选。将目标矿物纯度尽可能的提高,这样在镜下手工挑选出欲进行单颗粒分析的矿物,每种选出具有代表性的 120 颗以上即可<sup>[58]</sup>。

对要求准确定量分析的样品分选方法较为复杂,群体定量分析的矿物分选一般需要 20~50mg,因此在筛选所需粒级时就要确定满足测试矿物所需的样品量,即按目标矿物在样品中的比例,筛出该粒级样品应该分析的重量,然后合理选择上述矿物分选方法,必要时对某种方法可重复多次,以提高目的矿物纯度。再在显微镜下进行手工挑选,挑出非目标矿物,最大程度保证目标矿物的高纯度。

#### (2) 矿物组合的特点

河口海岸沉积物中一般都有几十种轻重矿物,不同矿物在磁性、电性、密度、可溶性等性质上各不相同,利用它们的差异选择不同的分离分选方法和流程,最好选择差异大的性质,必要时需要多种方法联合使用。一般原则是将复杂矿物群,先分成不同的矿物类,再分成矿物组,最后才分选出矿物种。一般情况下不太可能通过一套流程将所有矿物都分选出来,为了简化分选流程分选过程中目标矿物尽可能得到保护,而非目标矿物往往会当作妨碍矿物被牺牲掉。

#### (3) 实验室条件

根据实验室现有的设备、人员技术和环保要求来选择分选方法,发挥专业实验室的特长。要重视环境保护,如铊、氢氟酸等试剂污染环境、危害健康,尽可能少用或不用。

### 2.2 分选流程——以分选角闪石和石英为例

角闪石和石英是长江和黄、东海碎屑沉积物中含量最多的碎屑重矿物和轻矿物,代表着沉积物的基本来源和沉积分异状态,它们最能体现沉积物的主体特征,本文以角闪石单矿物分选作为实例来代表重矿物的分选流程(表 3),其他重矿物可参考该流程中的说明,来制定相应的分选方法和流程。石英作为轻矿物的代表,其分选方法和流程见表 4,其中用配制重液的方法来分离石英和长石<sup>[59]</sup>,比用高温熔蚀法要好,前者产品不仅有石英,也有长石。斜长石和钾长石的单矿物沉积学意义也不小,可有效示踪物源、风化作用和沉积物成熟度。

## 3 单矿物分选中常出现的问题和难题

### 3.1 常出现的问题

单矿物分选过程中最忌讳出现的是混样问题,轻者造成误差,重者可使样品全部作废。分选过程每一环节都需要无缝接轨,每件仪器设备都需要认真除尘清洗,逐个防范混样漏洞,如采用一次性尼龙筛网,不断更新长期使用的不锈钢固定筛网;对电磁分选仪进行无死角清扫等措施。

选择性化学溶解法对矿物鉴定和其他项目测试有无影响,其可靠性问题需要进行实验验证评估<sup>[60]</sup>,特别是分选要进行地球化学分析的单矿物,除了避免使用高浓度强酸碱、强氧化性、强还原性试剂等可能引起的矿物成分溶蚀变化外,还要注意某些试剂可能产生的化学附着。

由于河口和陆架沉积物来源复杂,同种矿物物化性质会在一定区间内变化,往往造成理论上可行的分离流程,却因矿物组合间出现性质交集,而产生分选纯度不够的现象,除了减少样品用量、增加分离次数外,还需改善实验装备,使用高纯度实验试剂,以减少实验环境对分选的不利影响。

### 3.2 需要深入研究的难题

本文上面描述的单矿物分选方法,如重液分离法、磁选法是利用矿物天然的固有性质,由于长江和黄东海沉积物中许多矿物可选性相近,目前,仅能分选含量较多、个性较强的矿物,手工挑选的工作量还是很大,分选效率不高。人为地扩大矿物间可选性差别即人工矿性改造技术<sup>[61]</sup>,值得深入研究,在工业选矿中常使用的浮选法、薄膜法、磁化法等,可以

表3 长江口沉积物角闪石单矿物分选流程

Table 3 The single mineral separation of detrital amphibole from the Changjiang estuary sediments

步序	试样	方法	产品	实验说明
①	沉积物原样	水筛分样	广粒级(1~5Φ) 或细砂(2~3Φ) 极细砂(3~4Φ)	根据需要选择粒级,碎屑矿物鉴定分析一般用3~4Φ,分选单矿物可用广粒级,但过粗、过细可舍弃
②	极细砂 (3~4Φ)	重液分选,CHBr <sub>3</sub> , 密度 $d = 2.89$	轻矿物组(Lm) 重矿物组(Hm)	试样倒入重液后,搅拌3次,间隔15min,静置8h,收样,冲洗,烘干,称重,鉴定
③	重矿物组 (Hm)	普通磁铁磁选 钹铁硼强磁铁磁选 或电磁仪分级磁选	磁铁矿物组(M <sup>+</sup> ) 钛铁矿组(II <sup>+</sup> ) 角闪石粗矿(Am <sub>1</sub> ) 无磁矿物组(Nm)	Nm组主要由锆石、磷灰石、石榴石、黝帘石、透闪石等浅色-无色矿物组成,再经过CH <sub>2</sub> I <sub>2</sub> 重液分选,下沉产品中锆石、金红石、萤石、榍石、磷钇矿、独居石、重晶石等含量会大幅度提高,再进一步重液分选(采用高密度重液)或直接镜下手选就可获得所需单矿物
④	角闪石粗矿 (Am <sub>1</sub> )	重液分选,CH <sub>2</sub> I <sub>2</sub> , 密度 $d = 3.32$	角闪石细矿(Am <sub>2</sub> ) 绿帘石钛铁矿组(EI)	绿帘钛铁矿组(EI)中以绿帘石为主,钛铁矿次之,在CH <sub>2</sub> I <sub>2</sub> 中放入饱和单质碘或用碘化银钡汞重液来分离此组,上浮产品主要为绿帘石
⑤	角闪石细矿 (Am <sub>2</sub> )	化学分选, HCl (10% ~ 15%) + SnCl <sub>2</sub> (少许)热水浴	角闪石精矿(Am <sub>3</sub> )	化学选择性溶解,去除褐铁矿、赤铁矿
⑥	角闪石精矿 (Am <sub>3</sub> )	电磁选	普通角闪石组(Hb <sub>1</sub> ) 阳起石组(Act) 黑云母组(Bi)	若黑云母较多,调配重液分选, $d = 3.10$ ,上浮产品为黑云母,下沉产品是角闪石
⑦	普通角 闪石组 (Hb <sub>1</sub> )	双目镜下手工挑选	普通角闪石精选矿 (>95%)	镜下去除绿帘石、电气石、黑云母、岩屑等少量杂质矿物

表4 长江口沉积物石英单矿物分选流程

Table 4 The separation process of quartz single minerals in the sediments of the Changjiang River estuary

步序	试样	方法	产品	实验说明
①	沉积物原样	水筛分样	广粒级(1~5Φ) 或细砂(2~3Φ) 极细砂(3~4Φ)	根据需要选择粒级,碎屑矿物鉴定分析一般用3~4Φ,分选单矿物可用广粒级,但过粗、过细可舍弃
②	极细砂 (3~4Φ)	重液分选,CHBr <sub>3</sub> ,密度 $d = 2.89$	轻矿物组(Lm) 重矿物组(Hm)	试样倒入重液后,搅拌3次,间隔15min,静置8h,收样,冲洗,烘干,称重,鉴定
③	轻矿物组(Lm)	磁选	无磁轻矿物组(Lm' <sup>'</sup> ) 云母+杂质岩屑	用电磁仪或强磁铁磁选,分离开磁性矿物和无磁性矿物
④	无磁轻矿物组 (Lm' <sup>'</sup> )	调配重液分选, $d =$ 2.68,离心冷冻	长英质矿物(FQ) 方解石组(Cal)	若不要方解石,可加10%盐酸浸泡,同时可溶掉轻矿物上的铁锈
⑤	长英质矿物(FQ)	调配重液分选, $d =$ 2.60,离心冷冻	长石组(F <sup>+</sup> ) 石英组(Q <sup>+</sup> )	或用文中描述的焦硫酸钾熔蚀法溶解掉长石
⑥	石英组(Q <sup>+</sup> )	双目镜下手工挑选	石英精选矿(>95%)	镜下去除残留的长石、岩屑、生物碎屑等



引进到微量矿物分选中来,但需要针对性和抗干扰性研究。

现在我们可以对粗粉砂通过离心重液法进行轻重矿物分选,但对细粉砂和泥质样品中的轻重矿物分选存在相当大的困难<sup>[52]</sup>,即使有部分单矿物选出,但无法进行手工挑选,其纯度也不会很高。但微细颗粒具有在液体中易悬浮的特性,电泳法+湿式磁选法会有较好的效果<sup>[47]</sup>,有深入研究的必要。

此外,密度都大于 3.32,又无电磁性差异的高密度矿物组合,如锆石、楣石、金红石等现在只能在高密度矿物组内进行手工挑选,批量机选流程尚不完善;含有微包裹体、受到风化、蚀变、自生矿物附着等影响的矿物组合,其物理和化学性质发生了一定程度的改变,要提纯或剔除它们都有很大的难度。这些矿物分选难题尚未解决,需要深入研究和实践,应吸取其他学科的知识,重视国内外新技术、新方法和新仪器在单矿物分选中的引进和推广。

## 4 结论

长江口和黄东海沉积物单矿物分选常用的方法有重液分选法、磁选法、选择性化学溶蚀法以及手工挑选法,其中的原理并不复杂,但包含着诸多的技巧,也需要大量的实践经验。重液分选的关键是重液的选用和调配重液的配制;磁选法方便快捷,但许多矿物磁性特征存在交集,电磁或强磁分选可将复杂磁性矿物群分成不同的矿物组合,然后结合其他方法进一步分选;化学分选是去除杂质、提纯目标矿物的有效手段,应在对目标矿物不产生影响的可靠性下使用;手工分选单矿物重点在于剔除其他方法难以分离的杂质,或直接挑选目标矿物。角闪石和石英的单矿物分选流程是多种方法结合、逐步连续分组、直至分出单种纯矿物的过程,其他矿物分选可在其基础上制定相应的分选方法和流程。目前,河口和陆架陆源沉积物单矿物分选还有许多尚未解决的问题和难题。

## 参考文献 (References)

- [1] Bianchi T, Allison M. Large-river delta-front estuaries as natural "recorders" of global environmental change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106: 8085-8092.
- [2] Hori K, Saito Y, Zhao Q H, et al. Sedimentary facies and Holocene progradation rates of the Changjiang (Yangtze) delta, China[J]. Geomorphology, 2001, 41: 233-248.
- [3] 李广雪, 刘勇, 杨子庚. 末次冰期东海陆架平原上的长江古河道[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 35 (3): 284-289. [LI Guangxue, LIU Yong, YANG Zigeng. Ancient Yangtze River on the last glacial plains of East China Sea[J]. Science in China (Ser. D), 2004, 35 (3): 284-289.]
- [4] Yang S Y, Wang Z B, Guo Y. Heavy mineral compositions of the Changjiang (Yangtze River) sediments and their provenance-tracing implication[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35: 56-65.
- [5] 胡邦琦, 李军, 李国刚, 等. 长江和黄河入海沉积物的物源识别研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(6): 147-156. [HU Bangqi, LI Jun, LI Guogang, et al. Distinguishing the Changjiang and Huanghe sediments: A review[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(6): 147-156.]
- [6] 范代读, 王扬扬, 吴伊婧. 长江沉积物源示踪研究进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(5): 515-528. [FAN Daidu, WANG Yangyang, WU Yijing. Advances in provenance studies of Changjiang Riverine sediments[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(5): 515-528.]
- [7] 孙白云. 黄河、长江和珠江三角洲沉积物中碎屑矿物的组合特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10(3): 23-34. [SUN Baiyun. Detrital mineral assemblages in the Huanghe, Changjiang and Zhujiang River delta sediments[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1990, 10(3): 23-34.]
- [8] Crowley S F, Stow D A V, Croudace I W. Mineralogy and geochemistry of Bay of Bengal deep-sea fan sediments, ODP Leg 116: evidence for an Indian subcontinent contribution to distal fan sedimentation[J]. Geological Society Special Publication, 1998, 131: 151-175.
- [9] 王昆山, 石学法, 林振宏. 南黄海和东海北部陆架重矿物组合分区及来源[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(1): 31-40. [WANG Kunshan, SHI Xuefa, LIN Zhenhong. Assemblages, provinces and provenances of heavy minerals on the shelf of the southern Yellow Sea and northern East China Sea [J]. Advances in Marine Science, 2003, 21(1): 31-40.]
- [10] 林晓彤, 李巍然, 时振波. 黄河物源碎屑沉积物的重矿物特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(3): 17-21. [LIN Xiaotong, LI Weiran, SHI Zhenbo. Characteristics of mineralogy in the clasticsediments from the Yellow River provenance, China [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(3): 17-21.]
- [11] 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, 24(4): 570-578. [WANG Zhongbo, YANG Shouye, LI Ping, et al. Detrital mineral compositions of the Changjiang river sediments and their tracing implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 570-578.]
- [12] Chen J, Wang Z H, Chen Z Y, et al. Diagnostic heavy minerals in Plio-Pleistocene sediments of the Yangtze Coast, China with special reference to the Yangtze River connection into the sea[J]. Geomorphology, 2009, 113: 129-136.
- [13] 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.

- [14] 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 heavy minerals in the surface sediment of the tidal sand ridges area in south Yellow sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(5): 1-11.]
- [15] 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.[RAN Yingxin, ZHU Baohua. Classification and Identification of Heavy Sand Mineral [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1987.]
- [16] 梁学谦.单矿物分选学问题的研究[J].矿产与地质,1990,4(1):82-84.[LIANG Xueqian. Study on the problem of single mineral separation [J]. Mineral Resources and Geology, 1990, 4(1): 82-84.]
- [17] 朱玉伦.单矿物分析进展[J].岩矿测试,1992,11(1-2):121-129.[ZHU Yulun. Recent advances in mineral analysis [J]. Rock and Mineral Analysis, 1992, 11(1-2): 121-129.]
- [18] 李卫,谭凯旋.单矿物分选方法及其在构造地质研究中的意义[J].大地构造与成矿学,1998,22(S):83-86.[LI Wei, TAN Kaixuan. Single mineral sorting method and its significance in tectonic geology [J]. Earth Tectonics and Metallogeny, 1998, 22(S): 83-86.]
- [19] 周士涛,刘永康.运用离子探针研究矿物指纹标型特征——以康滇地轴云南段晋宁期花岗岩中矿物为例[J].地质学报,1991,1:27-32.[ZHOU Shitao, LIU Yongkang. A SIMS study of the fingerprint characteristics of minerals—with special reference to minerals from the Jinningian granites in the Yunnan sector of the Xikang Yunnan axis [J]. Acta Geologica Sinica, 1991, 1: 27-32.]
- [20] Kosler J, Sylvester P J. Present trends and the future of zircon in geochronology: Laser ablation ICPMS Zircon [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53: 243-271.
- [21] Bernstein S, Frei D, McLimans R K, Knudsen C, Vasudev V. Application of CCSEM to heavy mineral deposits: Source of high-Ti ilmenite sand deposits of South Kerala beaches, SW India [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2008, 96: 25-42.
- [22] Triebold S, Eynatten H V, Zack T. A recipe for the use of rutile in sedimentary provenance analysis [J]. Sedimentary Geology, 2012, 282: 268-275.
- [23] 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 crystallochemistry characteristics and genetic analysis of amphibole in the sediments of Huanghe River [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(1): 131-143.]
- [24] Linka M K, Stawikowski W. Garnet and tourmaline as provenance indicators of terrigenous material in epicontinental carbonates (Middle Triassic, S Poland) [J]. Sedimentary Geology, 2013, 291: 27-47.
- [25] 高文华,高抒,王丹丹,等.废黄河沉积记录中来自不同河流物质的信息——基于重矿物与地球化学元素分析[J].地理科学,2015,35(12):1631-1639.[GAO Wenhua, GAO Shu, WANG Dandan, et al. Sediment source information of different catchments in the sedimentary records of the abandoned Yellow River: Heavy Mineral and Geochemical Analyses [J]. Geography Science, 2015, 35(12): 1631-1639.]
- [26] 刘铁莹,金秉福,陈志华,等.南极普里兹湾主要碎屑矿物特征及物源分析[J].海洋学报,2016,38(5):96-107.[LIU Yiyang, JIN Bingfu, CHEN Zhihua, et al. Characteristics and provenance of main detrital minerals in the Prydz Bay Antarctic [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 38(5): 96-107.]
- [27] Demény A, Harangi Sz, Vennemann T W. Amphiboles as indicators of mantle source contamination: Combined evaluation of stable H and O isotope compositions and trace element ratios [J]. Lithos, 2012, 152: 141-156.
- [28] Pierce E L, Hemming S R, Williams T. A comparison of detrital U-Pb zircon,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  hornblende,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  biotite ages in marine sediments off East Antarctica: Implications for the geology of subglacial terrains and provenance studies [J]. Earth-Science Reviews, 2014, 138: 156-178.
- [29] Morton A C. Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research [J]. Geological Society Special Publication, 1991, 57: 31-45.
- [30] 金秉福,林振宏,杨群慧,等.沉积矿物学在陆缘海环境分析中的应用[J].海洋地质与第四纪地质,2002,22(3):113-118.[JIN Bingfu, LIN Zhenhong, YANG Qunhui, et al. Application of sedimentary mineralogy to the environmental analysis in marginal seas [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(3): 113-118.]
- [31] 王建刚,胡修棉.砂岩副矿物的物源区分析新进展[J].地质论评,2008,54(5):670-678.[WANG Jianguang, HU Xiumian. Applications of geochemistry and geochronology of accessory minerals in sandstone to provenance analysis [J]. Geological Review, 2008, 54(5): 670-678.]
- [32] 陈静,王哲,王张华,等.长江三角洲东西部晚新生代地层中的重矿物差异及其物源意义[J].第四纪研究,2007,27(5):700-708.[CHEN Jing, WANG Zhe, WANG Zhanghua, et al. Heavy mineral distribution and its provenance implication in late Cenozoic sediments in western and eastern of the Changjiang River Delta [J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(5): 700-708.]
- [33] 简星,关平,张巍.碎屑金红石:沉积物源的一种指针[J].地球科学进展,2012,27(8):828-846.[JIAN Xing, GUAN Ping, ZHANG Wei. Detrital rutile: A sediment provenance indicator [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(8): 828-846.]
- [34] 张凯棣,李安春,董江,等.东海表层沉积物碎屑矿物组合分布特征及其物源环境指示[J].沉积学报,2016,34(5):902-911.[ZHANG Kaidi, LI Anchun, DONG Jing, et al. Detrital Mineral Distributions in Surface Sediments of the East China Sea: Implications for Sediment Provenance and Sedimentary Environment [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(5): 902-911.]
- [35] 骆丁,宗开红,苗巧银.长江镇江段第四纪沉积物重矿物特征及其指示意义[J].地质学刊,2016,40(2):243-246.[LUO Ding, ZONG Kaihong, MIAO Qiaoyin. Characteristics of

- heavy minerals in the Quaternary sediments of Zhenjiang section, Yangtze River and their indicative significance[J]. *Journal of Geology*, 2016, 40(2): 243-246.]
- [36] 金秉福, 岳伟, 王昆山. 黄河、辽河和鸭绿江沉积角闪石矿物化学特征对比及物源识别[J]. *海洋学报*, 2014, 36(4): 11-21. [JIN Bingfu, YUE Wei, WANG Kunshan. Chemical composition of detrital amphibole in the sediments of the Huanghe River, Liao River and Yalu River, and its implication for sediment provenance[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(4): 11-21.]
- [37] 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, 27(1): 7-12. [WANG Kunshan, WANG Guoqing, CAI Shanwu. Heavy mineral characteristics of surface sediments in the subaqueous yangtze river delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(1): 7-12.]
- [38] 国家海洋局 908 专项办公室. 我国近海海洋综合调查与评价专项技术规程[M]. 北京: 海洋出版社, 2006. [National Ocean Bureau 908 Special Office. Special Technical Regulations for Comprehensive Survey and Evaluation of Offshore Ocean in China [M]. Beijing: Maritime Press, 2006.]
- [39] 陈丽蓉. 中国海沉积矿物学[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 12-17. [CHEN Lirong. Sedimentary Mineralogy of the China Sea [M]. Beijing: Maritime Press, 2008: 12-17.]
- [40] Yang S Y, Zhang F, Wang Z B. Grain size distribution and age population of detrital zircons from the Changjiang (Yangtze) River system, China[J]. *Chemical Geology*, 2012, 296-297: 26-38.
- [41] 张光威, 杨子庚, 王圣洁. 南黄海第四纪时期石英砂表面结构特征及其环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, 16(3): 37-47. [ZHANG Guangwei, YANG Zigeng, WANG Shengjie. Characteristics of Quartz Sand Surface Structure in the South Yellow Sea during the Quaternary Period and Its Environmental Significance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1996, 16(3): 37-47.]
- [42] 刘宝珺. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1980: 27-39. [LIU Baojun. Sedimentary Petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980: 27-39.]
- [43] 肖红, 唐达生. 砂矿颗粒沉降运动规律试验研究[J]. *矿冶工程*, 2015, 35(3): 1-3. [XIAO Hong, TANG 1111 Dasheng. Experimental study on the settlement rule for placer particles [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 11112015, 35(3): 1-3.]
- [44] 刘洪树. 山东半岛滨海砂矿粒度特征与富集关系的初步研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1985, 5(3): 91-100. [LIU Hongshu. Primary study of relationship between grain size distribution and enrichment of coastal place in Shandong Peninsula [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1985, 5(3): 91-100.]
- [45] 王凤, 金秉福. 广西海岸带有用重矿物粒级分布[J]. *海洋科学*, 2010, 34(12): 57-66. [WANG Feng, JIN Bingfu. Grain size distributions of heavy minerals in the littoral zone of Guangxi Province[J]. *Marine Sciences*, 2010, 34(12): 57-66.]
- [46] 刘建国, 李安春, 徐方建, 等. 两种密度三溴甲烷分离重矿物效果的对比分析[J]. *海洋科学*, 2008, 32(1): 32-37. [LIU Jianguo, LI Anchun, XU Fangjian, et al. Result comparison of heavy mineral separation with different specific densities of bromoform[J]. *Marine Sciences*, 2008, 32(1): 32-37.]
- [47] 周正. 单矿物分选学[M]. 广州: 广东科技出版社, 1997: 161-178, 221-233, 338-399. [ZHOU Zheng. Single Mineral Sorting [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1997: 161-178, 221-233, 338-399.]
- [48] Okay N, Ergun B. Source of the basinal sediments in the Marmara Sea investigated using heavy minerals in the modern beach sands[J]. *Marine Geology*, 2005, 216: 1-15.
- [49] Vincent S J, Morton A C, Hyden F, et al. Insights from petrography, mineralogy and U-Pb zircon geochronology into the provenance and reservoir potential of Cenozoic siliciclastic depositional systems supplying the northern margin of the Eastern Black Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 45: 331-348.
- [50] Bassisa A, Hinderer M, Meinhold G. New insights into the provenance of Saudi Arabian Palaeozoic sandstones from heavy mineral analysis and single-grain geochemistry[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 333: 100-114.
- [51] 张美怡, 卢静. 重液法分离密度差值很小的单矿物的技术及其应用[J]. *地质通报*, 2010, 29(11): 1726-1729. [ZHANG Meiyi, LU Jing. Application of heavy liquid technology methods to separate single mineral with small density difference [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(11): 1726-1729.]
- [52] 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.]
- [53] 张桂芳, 吕增建. 磁选在稀土矿提钐中应用试验研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2007, 6: 10-13. [ZHANG Huifang, LV Zengjian. Study on application of magnetic separation in extracting Sc from rare earth ore[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2007, 6: 10-13.]
- [54] Augusto P A, Augusto P, Castelo-Grande T. Magnetic classification[J]. *Minerals Engineering*, 2002, 15(1-2): 35-43.
- [55] Svoboda J. 磁场强度对磁选效率的影响[J]. *国外金属矿选矿*, 1996, 12: 39-44. [Svoboda J. Effect of magnetic field strength on magnetic separation efficiency[J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*, 1996, 12: 39-44.]
- [56] 刘羽. 实验分析用纯矿物的分离——Franz 磁选仪与多钨酸钠重液联用法[J]. *武汉化工学院学报*, 1998, 20(3): 37-39. [LIU Yu. Separation of pure minerals for experimental analysis—operation with franz magnetic separator and sodium polytungstate solution[J]. *Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology*, 1998, 20(3): 37-39.]
- [57] 万世明, 蒋恒毅, 李安春. 海洋沉积物中的石英单矿物的化学分离[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(3): 123-128. [WANG Shiming, JIANG Hengyi, LI Anchun. Chemical separation of quartz single mineral in marine sediments [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(3): 123-128.]

- ration of quartz from marine sediment samples[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(3): 123-128.]
- [58] Vermeesch P. How many grains are needed for a provenance study[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224: 441-451.
- [59] 王凤花, 张陈辉, 陈小金, 等. 钾长石、斜长石及石英单矿物快速分离方法[J]. *矿产与地质*, 2000, 14(4): 248-250. [WANG Fenghua, ZHANG Chenhui, CHEN Xiaojin. Potash feldspar, plagioclase and quartz single mineral rapid separation method [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2000, 14(4): 248-250.]
- [60] 卜文瑞, 李力, 朱爱美, 等. 海底蚀变玄武岩中次生组分去除实验研究[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(10): 1167-1172. [BU Wenrui, LI Li, ZHU Aimei, et al. Leaching experiments of secondary components in altered submarine basalts[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(10): 1167-1172.]
- [61] 杨平伟. 表面改性磁种对矿物表面磁化的影响研究[D]. 中南大学硕士论文, 2014: 27-49. [YANG Pingwei. Research of the influence of surfacially modified magnetic seeds on the surface magnetization of mineral[D]. Central South University, 2014: 27-49.]