文章编号:1000-0550(2014)03-0478-07

联用筛析法与激光法进行粒度接序分析的界点选择①

冷　伟　范代读
(同济大学海洋地质国家重点实验室　上海　200092)

摘　要　筛析法、激光法和图像法是三种常用的粒度分析方法,但由于测试原理的不同,三种测试方法有不同的适用性。筛析法和图像法能够精确测量砂质颗粒的粒径,但不适用于泥质细颗粒(<0.063 mm)的粒径测量;相反,激光法无法准确测量中粗砂粒级颗粒(2~0.21 mm),但能高精度测量较细沉积物粒径。分选较差的天然沉积物粒径分布范围较广,需要综合运用筛析法—激光法进行接序粒度测试。通常选用 2 mm 为界点开展接序粒度分析,但因激光法在测量中粗砂颗粒时误差较大,易导致接序粒度分析结果准确性不高。建议以 0.21 mm 为分界点开展接序粒度分析,分别避开筛析法和激光法测量精度不高的粒级区间,可使测试结果的准确性得到有效的提高。

关键词　粒度分析 激光法 筛析法 图像法 接序粒度分析

第一作者简介　冷　伟　女　1989 年出生　硕士研究生　海洋沉积及层序地层学　E-mail: w_leng@ 126.com
通讯作者　范代读　男　教授　E-mail: ddfan@ tongji.edu.cn

中图分类号　P585　**文献标识码**　A

粒度分析是以沉积物为对象进行科学研究或工程实践的常规方法,如泥沙动力学、沉积学、土壤科学、水利与海岸工程、岩土工程等。常用的粒度分析方法有筛析法、激光法、沉降法、图像法、超声法、库尔特法等。因测试原理的差别,不同方法分析结果存在一定差异,有的差别较小不影响后续的分析研究,有的则需要认真考虑方法的可靠性或测试结果的合适校正方法。目前对筛析法、激光法进行了较详细的比较研究,二者对标准的玻璃珠样的测试结果非常近似,但对于天然沉积物激光法平均粒径偏粗,分选偏差,造成二者差异的主要原因是测试原理的不同和颗粒的不规则性[1~3]。也有学者发现,细颗粒为主的天然沉积物的激光法平均粒径比筛析法和图像法偏细[4~7],这除了受颗粒形态不规则影响外,主要因细颗粒易凝结而影响筛析法和图像法的分析效果。因此,针对不同粒径组成的天然沉积物要选择合适的粒度分析方法[8,9]。本文根据长江三角洲钻孔河流相、河口湾相沉积物粒度特征,设计了一套实验流程,即分粒径区间采用激光法、筛析法和图像法进行粒度测量,对比分析不同方法对粒度参数计算的影响和原因,进而讨论自然界中分选不好的沉积物样品进行粒度分析的合适方法与实验流程。

1　方法介绍与实验流程

1.1　不同粒度分析方法的工作原理

筛析法是用一套按孔径大小顺序叠置的标准筛来分离一定量的沉积样,通过天平称量各粒级的质量,再计算各粒级的相对含量来表征沉积物组成。由于天然沉积物颗粒的不规则性,一般认为在筛析振动过程中对筛孔敏感的主要是颗粒的中轴[7](图 1)。筛析法的优点是设备简易、易于操作,缺点是只对松散的或弱胶结的沉积物适用,对于粒径<0.044 mm 的颗粒不再适用。

激光法是利用光学米氏理论,以激光为光源,采用波长一定的单色光通过测定各特定角度衍射和散射光能量,计算其占总光能的比例来表征各粒级颗粒分布的丰度。激光法测出的是颗粒的体积等效球体的直径(图 1),但一个不规则形状颗粒的衍射效果是不会和等体积球体衍射效果完全相同的,其衍射效果应该是介于长轴、短轴之间多个不同粒径球体衍射效果的组合。激光法的优点是测量快速,重现性高,缺点是不适用于较粗颗粒的沉积物,激光法的测量范围是 0.02~2 000 μm。

图像法目前已实现智能化,通常是在显微镜下摄

①国家自然科学基金(批准号:41076016,41276045)、中国地质调查局海洋地质保障工程专项(编号:GZH201100203)与中央高校基本科研业务费专项联合资助
收稿日期:2013-05-07;收修改稿日期:2013-08-13

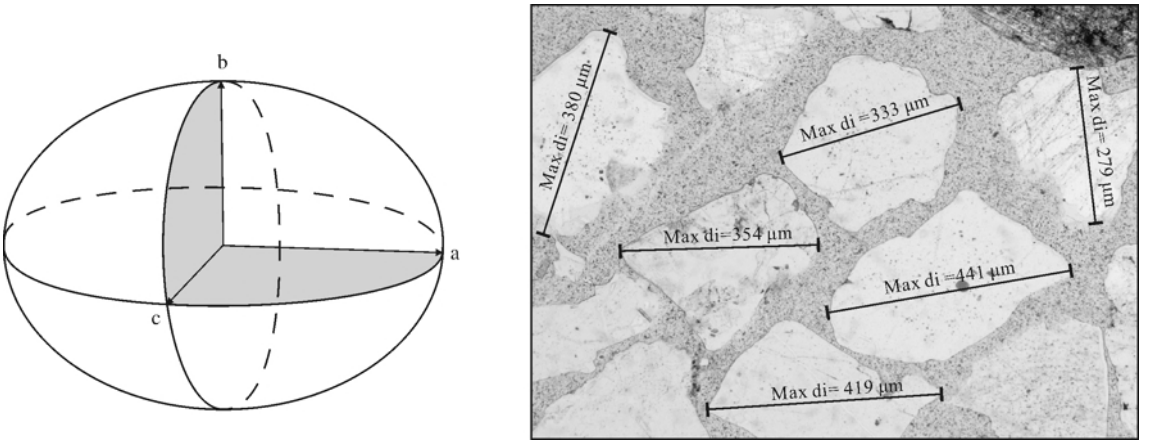

图 1　三种粒度分析方法测试原理示意图

左图:2a、2b、2c 分别为理想球体颗粒的长、中、短轴,筛析法测量的粒径近似于中轴(2b),激光法粒径是体积等效球体的直径:$2(a^2b)^{1/3}$;右图:图像法粒径直接测量切片中颗粒的最长轴。

Fig.1　Schematic diagrams of the methodology for three particle size analyses

取样品玻片中任意视域的沉积物颗粒图像到计算机中(图 1),通过地质统计软件对颗粒的二维图像进行颗粒大小的辨别、测量统计,一般要求每个样品玻片在镜下至少量测 300 个颗粒的粒径,进而统计各粒级的颗粒百分比来表征粒度分布特征。然而,样品玻片的切面不可能刚好都通过碎屑颗粒的中心,测量的粒径大都小于其实际粒径,大颗粒比小颗粒有更多的机会出现在任一被统计的切面上,由于天然沉积物颗粒的不规则性,对玻片中得到的粒度数据需要进行校正[10]。

1.2　实验设计与流程

本次实验分析的 10 个样品来自长江三角洲的长兴岛 CX03 孔,为晚第四纪河流相或河口湾相沉积,编号 N:1~10,按以下流程进行测试分析和对比研究(图 2)。

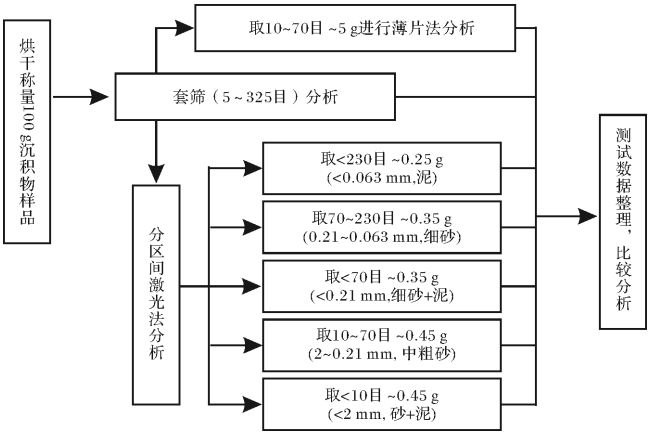

图 2　实验流程图

Fig.2　Experimental flow chart

(1) 取充分烘干打散样品 100 g,进行筛析法分析,套筛包括 5 目(4 mm)~325 目(0.044 mm),筛孔间距近似 1/4 ϕ,误差控制在 2%之内。

(2) 在筛析实验过程中,依次选择以下五个区间分别取适量样品(0.2~0.5 g)进行激光法分析:N-1:10 目(2 mm)以下,N-2:10~70 目,N-3:70 目(0.21 mm)以下,N-4:70~230 目,N-5:230 目(0.063 mm)以下。样品预处理采用依次加入浓度为 30%的过氧化氢(H_2O_2)和浓度 10%的稀盐酸去除有机质和碳酸盐,再用去离子水反复洗酸至悬浮液呈中性,上机测试前用超声波振荡分散,分析仪器型号为 Beckman Coulter LS230[11]。

(3) 对 10~70 目区间的样品进行图像粒度分析:取适量的松散沉积物进行注胶做成标准玻片,然后在显微镜下观察,使用软件 AxioVision 进行抓图,然后同步到地质统计分析软件 OLYCIA g3 进行人工半自动测量统计。

筛析法和激光粒度分析均在同济大学海洋地质国家重点实验室完成,图像法粒度分析在中石化无锡地质研究所完成。粒度参数计算采用福克和沃德公式[12]。由于测试的沉积物粒度分布较宽,均含有一定量的砾石等粗组份和泥质等细组份,三种常用粒度测试方法都难以实现对整个样品所有粒级组成的精确测量,因此需要采用接序分析法。根据测试原理与精度的差别,一般粗、细组分粒度测量分别采用筛析法和激光法,再综合计算粒级组成与粒度参数。接序分析的粗、细组份分界点通常选择 2 mm,即激光粒度

分析仪的测试上限,但是否合理尚未见讨论。本次实验还选择 0.21 mm(中、细砂分界)为接序界点进行相关粒度分析(图 2),测量和计算结果与其它方法进行对比,作为合理选择接序粒度分析分界点的依据。

2 结果与讨论

2.1 全样粒级组成

全样筛析结果表明,除 10 号样品外,其余的均以中粗砂粒级为主,其百分含量大多在 50%以上。细砂含量次之,泥质含量较少,一般小于 10%,除了 4 和 10 样品泥质含量分别达到 18.31%和 11.67%(表 1)。易黏结的细颗粒沉积物含量较低,一般来说比较适合用筛析法进行粒度分析。只有筛析法可以测量 10 个样品的全粒级分布范围,因此,在结果与讨论中均先以筛析法结果来划分粒级,之后再进行不同方法分析结果的对比分析。

表 1 全样粒级组成(%)

Table 1 Percentages of different particle sizes (%)

样品编号	砾石 >2 mm	中粗砂 0.21~2 mm	细砂 0.063~0.21 mm	泥 <0.063 mm
1	2.08	59.15	37.06	1.71
2	5.20	74.34	11.02	9.44
3	11.60	71.16	10.76	6.48
4	1.40	48.43	31.86	18.31
5	11.83	53.53	31.25	3.39
6	3.41	76.80	10.82	8.97
7	11.06	51.62	30.22	7.10
8	7.24	67.61	22.12	3.03
9	17.72	63.50	16.19	2.59
10	47.25	25.34	15.74	11.67

2.2 筛析法—激光法分析结果对比

激光法只能测量<2 mm 以下的粒级,对细颗粒测量较精确;而筛析法一般很少用比 325 网孔更细小的筛子进行测量,因此将更细组份的沉积物都统一计量到最小网目所对应的 0.044 mm 粒级上。由此可见,两种方法在粒度测量区间有互补,对于天然沉积物尤其粒径分布范围较大者,如本次所选择的 10 个样除了砂粒级外,既有砾石又有泥,受限于粒度测量方法本身的不足,均无法精确地给出样品全粒级的百分含量,这时需要同时运用两种方法进行测量,然后将结果进行接序计算得到全样的粒度分布特征。但两种方法由于测试原理不同,对粒径测量可能有较大差别。

2.2.1 频率分布特征

按 1/4 ϕ 等间距作频率分布曲线图进行对比分析发现,激光法通常呈扁平圆滑曲线,明显存在细尾,而筛析法呈尖锐的多峰态(图 3)。据激光法粒度特征可将 10 个样品分为三类:①类型一:单峰型,正偏态,包括样品编号 N=1,3,6;②类型二:双峰型,正偏态,包括样品编号 N=2,5,7,8,9;③类型三:三峰型,负偏态,包括样品编号 N=4,10。进一步比较发现,两种方法在细砂粒级的测量结果相接近,但激光法测量的中粗砂粒级百分含量较筛析法低。因筛析法将小于0.044 mm颗粒计在一起,如果样品泥质组份较多,将在 0.044 mm 处形成峰值。

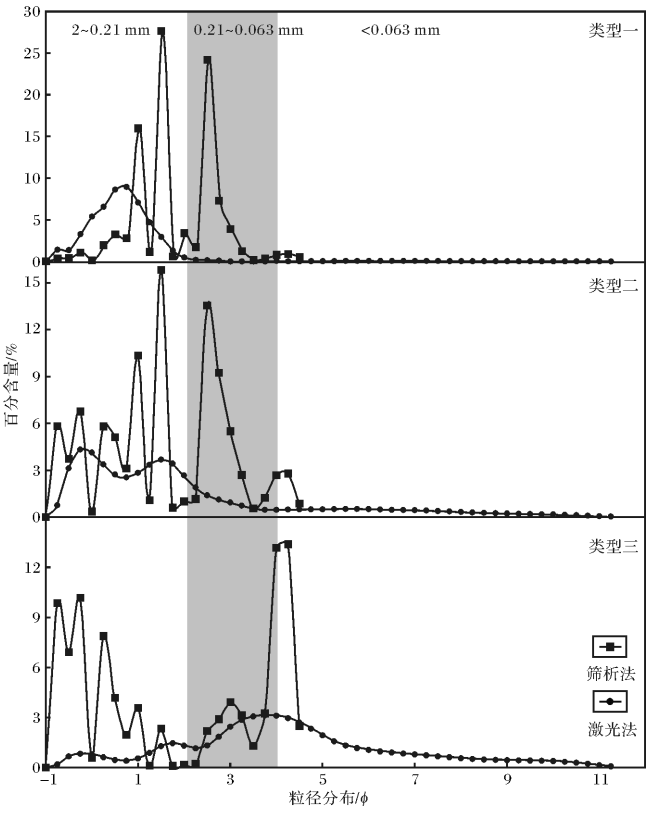

图 3 激光法和筛析法粒度频率分布对比图

Fig.3 Comparison of size frequency distribution between laser and sieve methods

2.2.2 平均粒径

按图 2 分区间分别计算平均粒径,对比发现激光法平均粒径均比筛析法要小(图 4)。其中,泥质粒级平均粒径的差异较显著,这主要由于筛析法将小于0.044 mm组份全部计入到该粒级上有关。中粗砂粒级的平均粒径差异往往较细砂粒级的大,这是由于中粗砂颗粒更不规则,激光法测量的是不规则颗粒的体积等效球体的直径,导致测定的粒径值要比相同体积的球形颗粒要大一些[7],不规则状的天然沉积物颗粒只要中径略小于筛孔便能通过,导致筛析测定值比实际值偏小[7],从而增大了两者之间的差异。

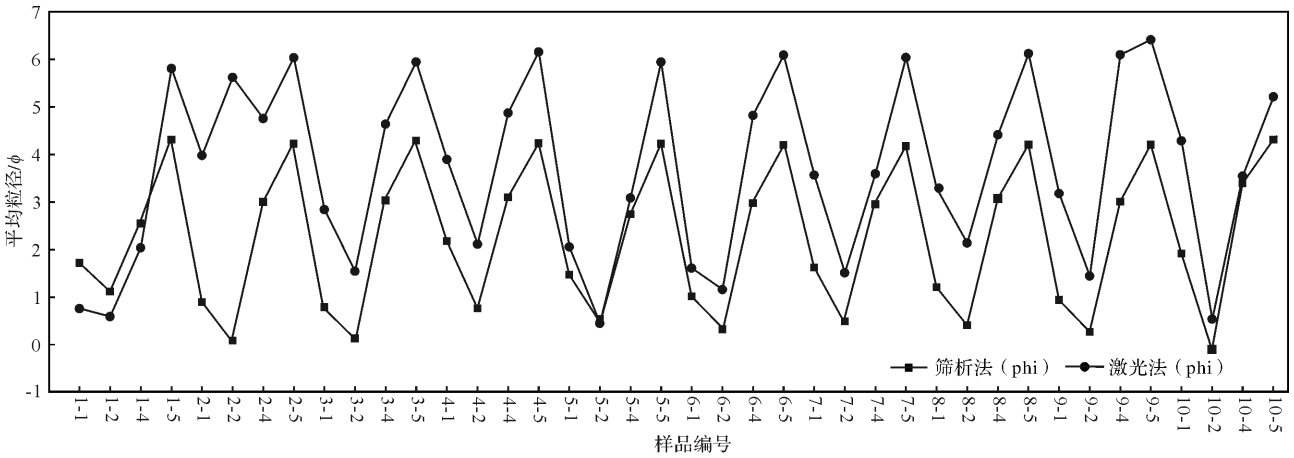

图 4　激光法和筛析法平均粒径比较

N-1:<2 mm, N-2:2~0.21 mm, N-4:0.21~0.063 mm, N-5:<0.063 mm

Fig.4　Difference in mean sizes between laser and sieve measurement

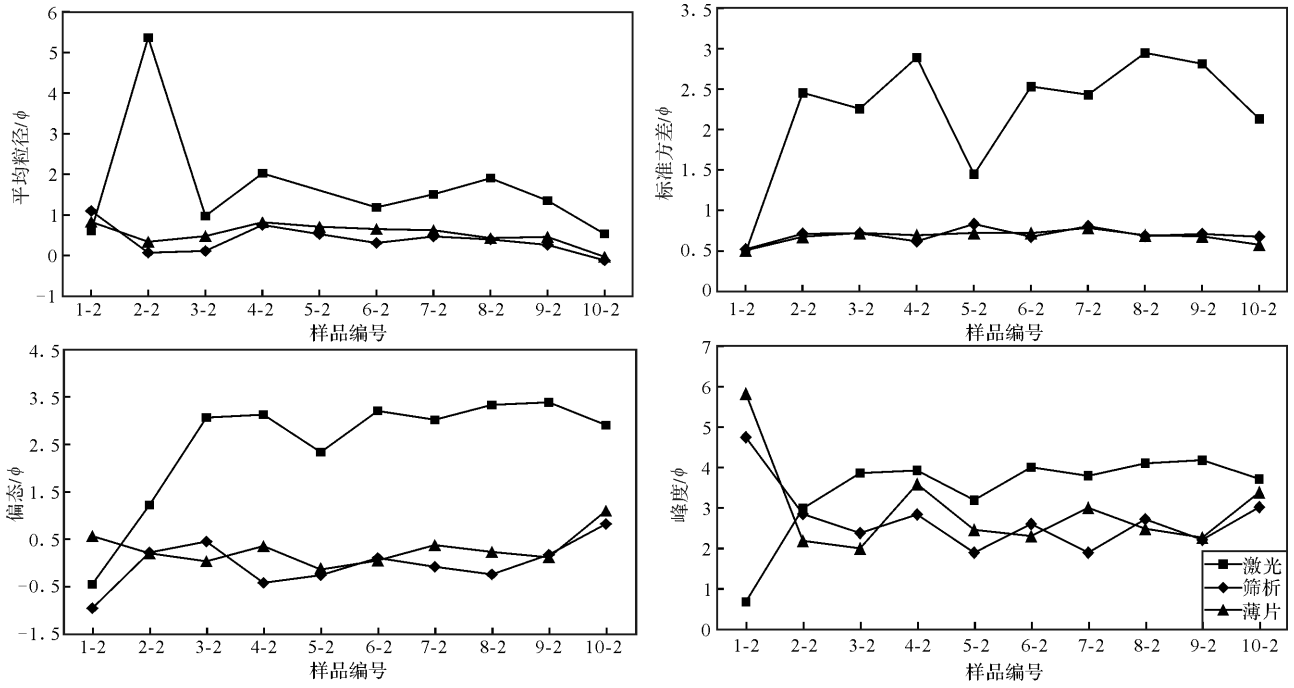

图 5　三种粒度分析方法得到的中粗砂粒级的粒度参数对比

Fig.5　Parametric comparison of middle-coarse sand composition among three size analytical methods

2.3　中粗砂粒级的粒度参数对比

对比中粗砂的三种测试结果发现,筛析法和图像法的粒度参数非常接近,但二者与激光法差别较大(图 5)。筛析法和图像法测得的平均粒径和标准偏差分别比激光法小 1 ϕ 和 2 ϕ,且后者更正偏,峰度值更大。其中 2-2 样品激光法的结果可能是个异常值,与上机测试时设置的泵速过低有关,应予于剔除。

虽然筛析法和图像法在中粗砂粒径分析时粒度参数非常接近,但通过频率分布曲线对比可知二者仍存差异(图 6)。筛析法测试颗粒粒径分布较全面,但多极值;图像法分析结果缺失>1 mm(0 ϕ)的颗粒,且粒径分布较为均匀集中,较少出现异常极值,这是由于注胶切片时很少能正好切穿颗粒的最大直径。同时发现,同一样品的筛析法和图像法测试的偏度相反,反应了两种测试方法各自的缺点。筛析法在进行天然沉积物测试时,由于颗粒的不规则或者是筛孔的

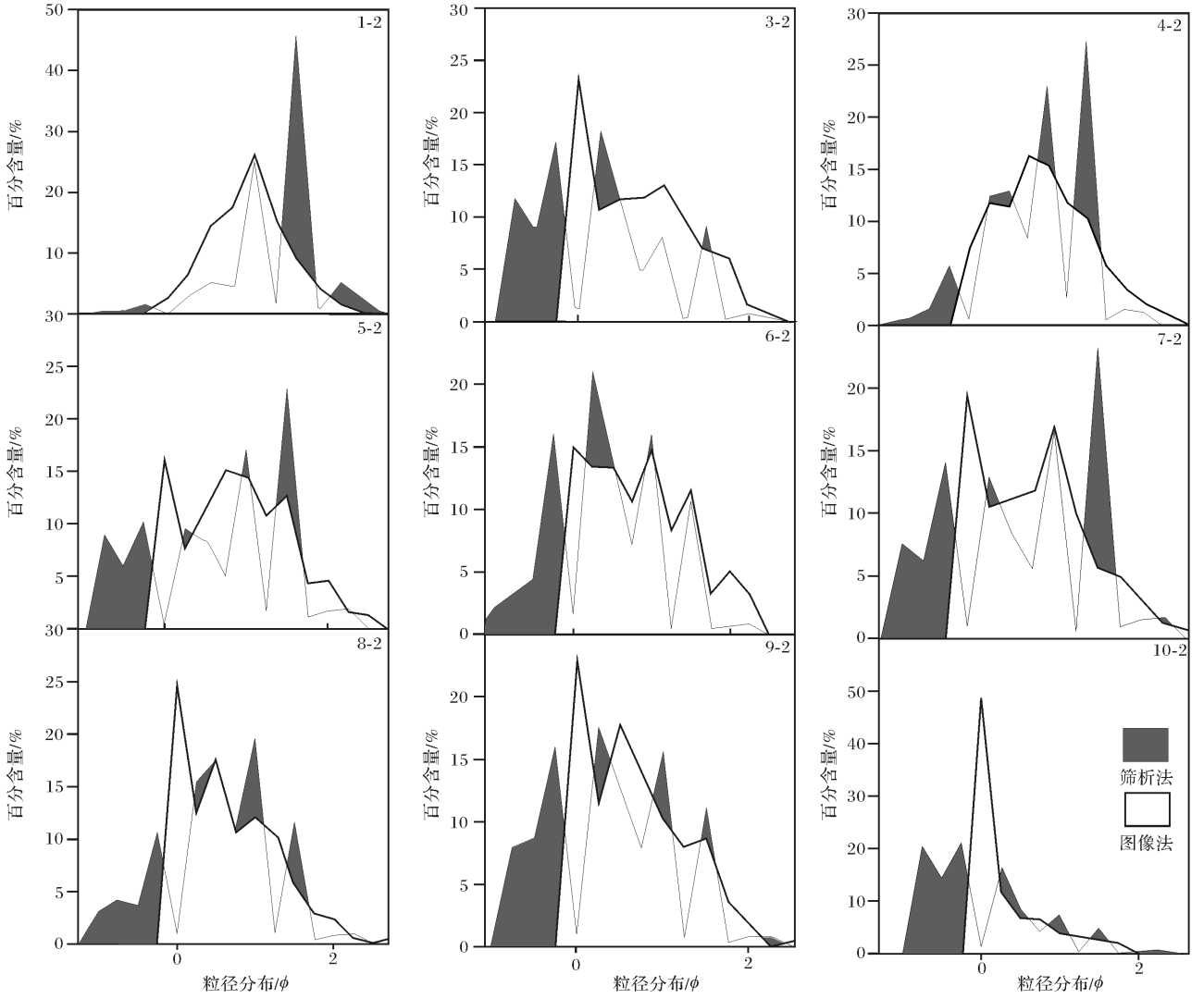

图 6 2~0.21 mm 区间筛析法和图像法粒径分布对比

Fig.6 Size frequency distribution of sieve and image analysis among 2~0.21 mm particle size range

变形等因素,容易造成粗颗粒落到细粒级,导致偏态为负;而在进行图像法统计时,颗粒越不规则切片图像越易切到颗粒长轴,造成偏态为正。因此对分选较差的沉积物进行粒度分析时,要考虑到颗粒不规则的影响。

2.4 筛析法—激光法接序测试的分界粒径选择

分别选择 2 mm 和 0.21 mm 为界点进行接序测试和计算粒度参数,将结果与样品的全套筛析结果进行对比分析(图 7)。以 2 mm 为界点的接序法平均粒径与筛析法相差较大,二者相关性差,前者明显偏细。以 0.21 mm 为界点的接序法平均粒径与筛析法非常接近,二者相关性高。之前分析表明,中粗砂粒级组份进行激光法测试所得平均粒径严重偏细(图 5),这应该是导致以 2 mm 为界点的接序法平均粒径偏细的重要原因,尤其当测试样品里中粗砂组份较大时,准确性将进一步降低。以 0.21 mm 为界点做接序粒度分析,不仅成功避开激光法无法准确测量中粗砂粒级组份的限制,而且充分利用了筛析法和激光法各自测量沉积物粒级组成方面的优势,从而提高了测量结果的准确性。

可见,当沉积物粒级组成较复杂、分布区间较宽,需要采用筛析法和激光法进行接序粒度分析时,常用方法选择 2 mm 为界点粒级进行接序测试是不合适的,建议采用 0.21 mm 为界点,以保证测试结果的准确性。

3 结论

粒度分析是以沉积物为研究对象的常规分析方

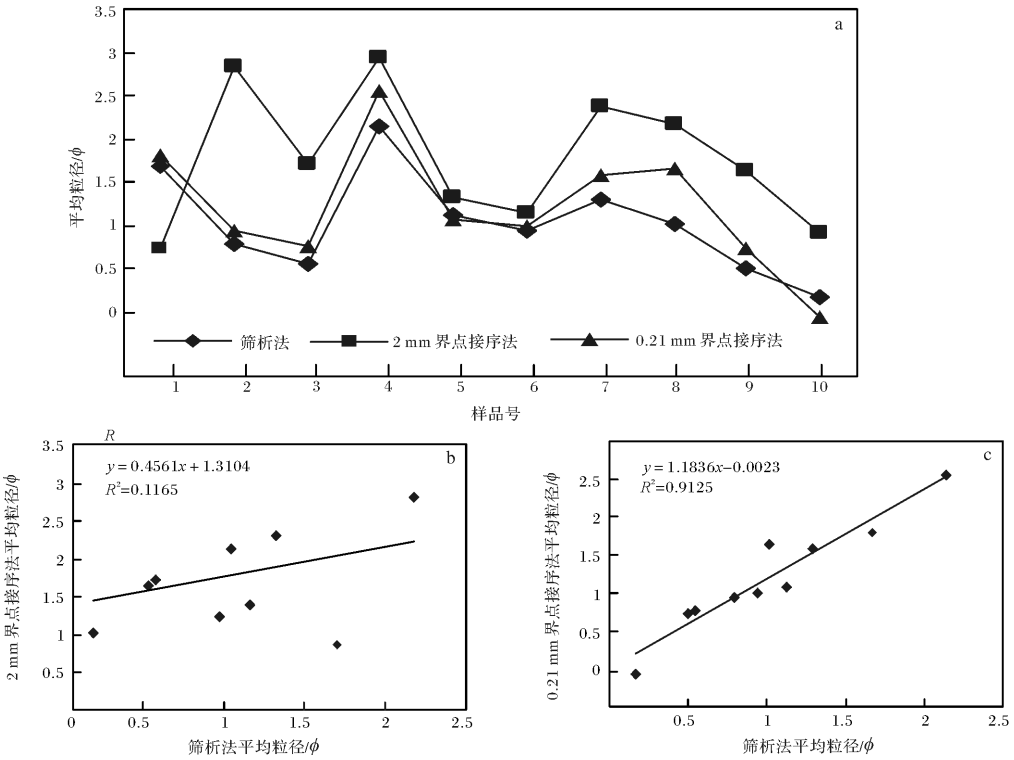

图 7　筛析法—激光法接序测试分界粒径选择研究

a. 10 个样品筛析法平均粒径、2 mm 界点接序法平均粒径和 0.21 mm 界点接序法平均粒径比较;b. 筛析法与 2 mm 界点接序法平均粒径相关性分析;c. 筛析法与 0.21 mm 界点接序法平均粒径相关性分析。

Fig.7　Test boundaries fraction selection of sieve and laser analysis

法。本文通过对天然沉积物分粒径区间进行实验分析与比较研究发现:①筛析法和图像法均能够较准确地测量中粗砂粒级组份(2~0.21 mm)的粒径分布,且二者测量结果相接近,相关性高,激光法测得粒径明显偏细,不能保证对中粗砂颗粒测量的准确性;②筛析法和激光法均可以较准确地测量细砂粒级组份(0.21~0.063 mm),二者测量结果相似度较高,可互相替代;③受沉积物颗粒性质和筛孔大小等的限制,筛析法不适用于泥质细颗粒(<0.063 mm)的测量,激光法成为细颗粒沉积物粒径测量的最主要方法,且测量准确度高;④对于粒级组成复杂的沉积物样需要联合运用筛析法—激光法进行接序粒度测试时,如通常选用以 2 mm 为界点进行接序粒度分析,则会因激光法对中粗砂粒级无法准确测量,使结果存在较大的误差,所得平均粒径偏细;建议以 0.21 mm 为界点开展接序测试,可显著提高测量结果的准确性。

致谢　中石化无锡地质研究所刘伟新为图像法粒度分析提供了帮助,谨致谢忱。

参考文献(References)

1　Loizeau J L, Arbouille D, Santiago S, *et al*. Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyze for use with sediments [J]. Sedimentology, 2006, 41(2): 353-361

2　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]

3　陈秀法,冯秀丽,刘冬雁,等. 激光粒度分析与传统粒度分析方法相关对比[J]. 青岛海洋大学学报:自然科学版,2002,32(4):608-614 [Chen Xiufa, Feng Xiuli, Liu Dongyan, *et al*. Correlation comparison between laser method and pipette-sieve method of grain size[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(4): 608-614]

4　牛占,李静,和瑞莉,等. 筛法/激光粒度仪法接序测定全样泥沙级配的调整处理[J]. 水文,2006,26(1):72-75 [Niu Zhan, Li Jing, He Ruili, *et al*. The correction method of grain size of total load for the phenomena of results of two series of grain size analysis inter crossed during the analysis with both sieve method and laser grain size analyzer [J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26(1): 72-75]

5　冉敬,杜谷,潘忠习. 沉积物粒度分析方法的比较[J]. 岩矿测试,2011,30(6):669-676 [Ran Jing, Du Gu, Pan Zhongxi. Study on

methods for particle size analysis of sediment samples [J]. Rock and Mineral Analysis, 2011, 30(6): 669-676]

6 李文凯,吴玉新,黄志民,等. 激光粒度分析和筛分法测粒径分布的比较[J]. 中国粉体技术,2007,13(5):10-13 [Li Wenkai, Wu Yuxin, Huang Zhimin, *et al*. Measurement results comparison between laser particle analyzer and sieving method in particle size distribution [J]. China Powder Technology, 2007, 13(5): 10-13]

7 王慎文,谢春安,唐渊明,等. 激光法粒度筛析校正研究[J]. 沉积学报,2012,30(4):716-723 [Wang Shenwen, Xie Chun´an, Tang Yuanming, *et al*. Rectification study of particle analyzing result between laser instrument and sieving method [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(4): 716-723]

8 Beuselinck, L, Govers G, Poesen J, *et al*. Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method [J]. Catena, 1998, 32(3): 193-208

9 Blott S J, Pye K. Particle size distribution analysis of sand-sized particles by laser diffraction: an experimental investigation of instrument sensitivity and the effects of particle shape [J]. Sedimentology, 2006, 53(3): 671-685

10 朱莲芳,雷怀彦,师育新. 三种粒度分析方法的比较[J]. 沉积学报,1990,8(2):127-133 [Zhu Lianfang, Lei Huaiyan, Shi Yuxin. Comparison of three analytical methods of grain grade [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8(2): 127-133]

11 王德杰,范代读,李从先. 不同预处理对沉积物粒度分析结果的影响[J]. 同济大学学报:自然科学版,2003,31(3):314-318 [Wang Dejie, Fan Daidu, Li Congxian. Influence of different pretreatments on size analysis and its implication [J]. Journal of Tongji University: Nature Science, 2003, 31(3): 314-318]

12 Folk R L, Ward, W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27(1): 3-26

Selecting Nodal Size for the Application of Combined Using Sieving and Laser Methods in Grain-size Analysis

LENG Wei FAN Dai-du

(**State Key Laboratory of Marine Geology**, **Tongji University**, **Shanghai** 200092)

Abstract: Three common grain size analysis methods, including sieving, laser and image analysis, have their different applicability because of the varied measurement principles. Sieving and image analyses are accurate to measure size of sandy grains but not of muddy grains (<0.063 mm). In contrast, laser analysis can measure accurately the fine-grained size but not for coarse particles with size larger than 0.21 mm. It is therefore needed to combine using sieving and laser methods consecutively (SLMC) in order to measure poorly sorted natural sediment samples with wide size distribution. A nodal size of 2 mm is commonly selected to carry out SLMC size analysis, but the measurement precision is usually not good enough because of inaccurate probing of middle-coarse sand grains by laser method. It is recommended to choose 0.21 mm as the nodal size for SLMC size analysis, and the measurement accuracy can be effectively improved when poor probing size ranges of sieving and laser methods have been successfully avoided.

Key words: grain size analysis; sieving; laser; image analysis; consecutively using sieving and laser methods in size analysis