

文章编号:1000-0550(2011)04-0767-09

南海表层沉积物的沉降法和激光法粒度 分析结果对比和校正^①

张富元¹ 冯秀丽² 章伟艳¹ 林霖² 张霄宇³ 姚旭莹¹

(1. 国家海洋局海底科学重点实验室、国家海洋局第二海洋研究所 杭州 310012;

2. 中国海洋大学 山东青岛 266003; 3. 浙江大学 杭州 310012)

摘要 沉降法与激光法粒度分析的主要差异是黏土粒径,这个差异将直接影响到黏土、粉砂含量和沉积物类型。本文对激光法黏土粒径和含量及沉积物类型进行系统校正。南海东部水深 >2 000 m 海域沉降法得出的砂、粉砂、黏土含量分别为 3.66%、42.43%、53.91%。激光法砂、粉砂、黏土含量分别为 9.26%、61.11%、29.64%。粉砂、黏土含量相差达约 20%。沉降法得出沉积物类型主要是粉砂质黏土(69.81%) ,其次是黏土质粉砂(19.81%) ,其他类型只占 11.38%。激光法主要是黏土质粉砂(89.62%) ,其次是砂质粉砂(10.38%) ,没有其他类型。两种方法得出的相同沉积物类型占 21.69% ,不相同占 78.31% ,主要差别是黏土含量。如果不校正激光法结果,粒径含量和沉积物类型没有可比性。激光法黏土粒径校正为 <0.01 mm(粉砂粒径校正为 0.063 ~ 0.01 mm) ,黏土、粉砂的平均含量为 54.16%、36.17% ,接近沉降法的黏土(52.07%) 和粉砂(42.28%) 含量;校正后激光法与沉降法的相同沉积物类型占 91.51% ,不相同占 8.49% ,大部分黏土质粉砂已校正为粉砂质黏土;这些说明对黏土粒级的粒径和含量以及沉积物类型的三种校正已基本达到目的。相反,激光法按回归方程校正后的黏土、粉砂平均含量仍相差约 20% ,相同沉积物类型只占 21.69% ,不相同占 78.31% ,表明按回归方程对粒径含量和沉积物类型的校正没有实际意义。研究表明把激光法黏土粒径校正为 <0.01 mm(粉砂粒径 0.063 ~ 0.01 mm) 就能使黏土、粉砂含量和沉积物类型与沉降法基本相符合,达到校正基本目的。

关键词 南海表层沉积物 沉降法 激光法 粒度分析 对比和校正

第一作者简介 张富元 男 1952 年出生 研究员 海洋地质 E-mail: fy Zhang2003@163.com

中图分类号 P512.2 P736 **文献标识码** A

1 沉降法和激光法粒度分析的基本原理

1.1 沉积物粒度定义

沉积物粒度分析方法很多,各种分析方法所依据的理论或原理不同,使测得的颗粒直径不相同。粒度虽然在沉积学中是使用最广泛的术语,但是真正的质

点“大小”并没有统一的定义,也许只有个别例外,如象球体(直径)或立方体(边长)那样最简单的几何形体。但是对于象砂粒这样的外形很不规则的质点来说,粒度一般取决于测量的方法,而测量的方法又取决于研究的对象。当质点逐渐变得不相等时,与测量间的差异就逐渐增大。表 1 归纳了质点粒度的不同

表 1 质点大小的不同定义^[1]

Table 1 The different definition of particle size measurement

符号	名称	定义
d_s	表面直径	与质点表面积相同的球体的直径。
d_v	体积直径	与质点体积相同的球体的直径。
d_d	拖曳直径	在相同粘度的流体中,以相同速度运动时与质点具有相同速度运动阻抗的球体的直径。
d_a	投影面积直径	当观察方向杂垂直于稳定性平面时,与质点有同样投影面积的球体直径。
d_f	自由降落直径	在同样粘度、密度的流体中,与质点具有相同密度和相同的自由降落速度的球体直径。
d_{st}	斯托克斯直径	在层流($Re < 0.2$)范围内的自由降落直径。
d_A	筛析直径	质点可以通过的最小的正方形孔隙宽度。
d_{vs}	比面直径	与质点具有相同的表面积与体积比的球体直径。

①国家科学技术部基础性项目(编号:2006FY220400),浙江省 908 专项(编号:ZJ908-02-01),海洋二所基本科研专项(编号:JG1108)资助。
收稿日期:2010-06-20; 收修改稿日期:2010-09-25

定义。研究流体中颗粒动态时,颗粒拖曳直径或斯托克斯直径比体积直径有更大的意义。所以量测选择反映了研究对象以及所用的量测技术。一般地,对粒度的一种量测变换到另一种量测是以相应的同等直径来表示的。

1.2 沉积物粒度分析技术

沉积物粒度测定技术和方法的系统总结,以非地质观点写成的著作有美国材料试验学会(ASTM, 1959)、赫丹^[2]、艾伦^[3]和福克^[4]。沉积物粒度的传统测量技术一般包括直接量测、筛析法、双目显微镜、沉降法、电子显微镜。20世纪80年代,激光衍射法逐渐应用于沉积物粒度分析。不同粒度分析技术因采用的分析原理不一样,颗粒直径的计算方法也就不同,因此,不同方法得出的粒径大小也不相同。激光粒度分析的粒度大小依照体积直径(d_v)计算,沉降法粒度分析颗粒直径为 d_{st} (表1)。

1.3 沉降法分析的基本原理

沉降法依据的基本原理^[5],是测定作为沉降时间函数的某一预定深度处其悬浮液的浓度值,而悬浮液的浓度变化,服从于静水中质点(颗粒)的沉降规律,即斯托克斯(Stokes)定律。该定律的关系式为:

$$v = \frac{2}{9} \frac{(\rho_1 - \rho_2) g r^2}{\mu}$$

式中, r —颗粒(质点)半径; μ —液体的黏滞系数; v —颗粒沉降速度(cm/s); g —重力加速度(980 cm/s); ρ_1 —颗粒密度; ρ_2 —液体密度; d —颗粒直径(mm)。假定颗粒比重为2.65 g/cm³,介质为水,则沉降速度为

$$v = \frac{0.8983 d^2}{\mu}$$

有了颗粒的沉降速度和在沉降量筒中预定的取样深度,即可计算出大于某一粒径所有质点(颗粒),最终沉积至该点以下所需的时间。计算公式为

$$t = \frac{h}{v} \quad t—\text{沉降时间(s)}; h—\text{取样深度(cm)}。$$

1.4 激光法粒度分析的基本原理

传统的粒度分析方法主要是沉降法和筛选法。随着技术的发展,不断有新的方法被应用于粒度分析中。20世纪70年代,一些学者提出使用光学衍射原理测试颗粒的粒径^[6~8],并由此诞生了激光粒度分析仪。近十几年来,激光粒度分析在我国得到了不断发展和广泛应用^[9]。同时也发现两种粒度分析法得出的粒度数据差异大,资料对比困难。

激光粒度仪的工作原理是基于光与颗粒之间的作用,在光束中球形颗粒以一定的角度向前散射光线,这个角度接近于与颗粒直径相等的孔隙所产生的衍射角。当一束单色光束穿过悬浮的颗粒流时,颗粒产生的衍射光线通过凸透镜汇聚于探测器上。衍射光的强度 $I(\theta)$ 与颗粒的粒径 α 有如下关系:

$$I(\theta) = \frac{1}{\theta} \int_0^{\infty} \alpha^2 n(\alpha) J_1^2(\theta K_L \alpha) d\alpha$$

其中 θ 是散射角度, α 是颗粒半径, $I(\theta)$ 是以 θ 角散射的光强度, $n(\alpha)$ 是颗粒的粒径分布函数, $K_L = 2\pi/\lambda_L$, λ_L 为激光的波长, J_1 为第一型的贝叶斯函数。根据测得的 $I(\theta)$,可由以上方程求得粒径分布 $n(\alpha)$ 。详细的方程求解可参考Weiner^[10]以及Agrawal等^[11]。

2 样品采集和实验室粒度分析

南海东部(12.00°~22.00°N, 116.75°~121.25°E)海域^[12]106个表层沉积物采样器为大洋50型抓斗。激光法采用我所粒度分析实验室英国马尔文公司生产的MAM5005型激光粒度分析仪,粒径测量范围为0.05~2000 μm,粒级分辨率为0.01φ,重复测量的相对误差<3%。粒度分析按海洋调查规范^[13]要求进行,取湿沉积物样约1g置于烧杯中,将溶液样品加入0.5 mol/L的六偏磷酸钠5ml进行搅拌,静置24h后进行粒度分析。

沉降法(和筛析法)粒度分析由中国海洋大学完成,按照海洋调查规范^[5],取一定量的沉积物样品置于烘箱105℃的温度下烘干,取出并置于干燥器内,称取样品10~15g;将样品移入烧杯加蒸馏水,加20ml 0.5 mol/L的六偏磷酸钠,浸泡12h;将分析样倒入孔径为0.063 mm的小筛中过筛,用蒸馏水冲洗,使<0.063 mm的物质充分冲洗入量筒中。粒径>0.063 mm的物质烘干称重后筛析,用孔径间隔为0.5φ的筛子由粗到细振筛15 min,将各粒级样品烘干后称量,求出各粒级的质量百分数。将粒径<0.063 mm的物质加蒸馏水至1000 ml,在吸液前读取悬液温度;搅拌1 min,使物质充分悬散在悬液中,在最后1s内轻轻提出搅拌棒,沉降时间由此起算,按规定时间和深度吸取悬液;吸液前15 s将吸液管轻轻置于悬液的特定深度,吸液时应在20 s内匀速准确地吸取25 ml;将吸取的悬液置于小烧杯烘干后称重,求出各级粒级质量百分数。

3 沉降法和激光法粒度分析结果对比

3.1 南海表层沉积物

南海东部海域水深为 700 ~ 4 508 m 的 106 个表层沉积物沉降法和激光法粒度分析主要结果见表 2。粒度分析资料按水深 < 2 000 m 和 > 2 000 m 两个水深段进行统计分析。

沉降法: 水深 < 2 000 m 沉积物的平均粒径(M_z) 为 11.45 μm , 砂、粉砂、黏土的平均含量分别为 21.24%、41.14% 和 37.63%; 水深 > 2 000 m 沉积物的平均粒径为 3.37 μm , 砂、粉砂、黏土的平均含量分别为 3.66%、42.43% 和 53.91%。

激光法: 水深 < 2 000 m 沉积物的平均粒径为 12.30 μm , 砂、粉砂、黏土的平均含量分别为 12.95%、62.06% 和 25.00%; 水深 > 2 000 m 沉积物的平均粒径为 9.69 μm , 砂、粉砂、黏土的平均含量分别为 9.26%、61.11% 和 29.64%。

这些统计数据表明: 沉降法与激光法得出的粒度分析数据差别很大, 特别是粉砂、黏土含量和平均粒径的差异非常大, 这些差异最终严重地影响到沉积物类型, 导致水深 > 2 000 m 海域的沉积物类型为黏土质粉砂, 而不是粉砂质黏土。

3.2 东太平洋表层沉积物

东太平洋中国多金属结核开辟区表层沉积物沉降法和激光粒度分析结果见表 3。沉降法粒度分析得出砂、粉砂、黏土平均含量分别为 2.66%、23.94% 和 73.40%, 平均粒径为 2.20 μm 。激光法得出的砂、粉砂、黏土平均含量分别为 13.92%、53.16% 和 32.92%, 平均粒径为 9.80 μm 。从激光法的黏土含量和平均粒径看, 东太平洋沉积物类型仍然达不到深海黏土类应有的水平。因此对激光法粒度分析数据进行科学合理的校正工作是必须要做的, 否则像南海东部、东太平洋水深 > 2 000 m 的深海区域就没有深海黏土类沉积物, 这不符合现有深海沉积物类型分布

表 2 南海东部海域表层沉积物的粒度结构和平均粒径($n = 106$)

Table 2 Grain size structure and mean of surface sediments of eastern South China Sea

沉降法	水深/m	$M_z/\mu\text{m}$	$M_d/\mu\text{m}$	砂(2 ~ 0.063mm, %)	粉砂(0.063 ~ 0.004mm, %)	黏土(< 0.004mm, %)
南海东部	3329	4.28	5.79	5.65	42.28	52.07
<2000m($n = 12$)	1305	11.45	19.90	21.24	41.14	37.63
>2000m($n = 94$)	3587	3.37	3.99	3.66	42.43	53.91
激光法	水深/m	$M_z/\mu\text{m}$	$M_d/\mu\text{m}$	砂(2 ~ 0.063mm, %)	粉砂(0.063 ~ 0.004mm, %)	黏土(< 0.004mm, %)
南海东部	3329	9.99	10.43	9.68	61.21	29.11
<2000m($n = 12$)	1305	12.30	12.61	12.95	62.06	25.00
>2000m($n = 94$)	3587	9.69	10.16	9.26	61.11	29.64

表 3 太平洋中国多金属结核开辟区表层沉积物沉降法和激光法粒度分析对比

Table 3 Comparison of laser and pipette grain size analysis of surface sediments in Pacific

变化范围	水深 /m	沉降法($n = 14$) ^[14]			M_z	激光法($n = 30$)			M_z
		砂 /%	粉砂 /%	黏土 /%		砂 /%	粉砂 /%	黏土 /%	
		2 ~ 0.063mm	0.063 ~ 0.004mm	< 0.004mm	/ μm	2 ~ 0.063mm	0.063 ~ 0.004mm	< 0.004mm	/ μm
最小	4922	0.10	16.10	59.60	1.7	0.10	48.48	24.96	5.50
最大	5197	9.40	34.20	82.50	4.5	26.56	60.79	41.30	17.00
平均	5094	2.66	23.94	73.40	2.2	13.92	53.16	32.92	9.80

的实际情况。

4 激光法粒度分析结果校正

4.1 以往激光法粒度分析结果校正研究

20 世纪 80 年代后国内外广泛应用激光粒度分析仪, 随之引发的是激光法与传统法粒度分析数据的对比和校正。归纳起来可分为三方面工作: 通过激光法与沉降法(和筛析法) 粒度分析数据对比和相关分

析、建立回归方程对样品各粒级组分含量校正; 通过数学计算和用扫描电镜对沉积物样品形态的观测, 针对样品某一粒级的粒径和含量进行校正; 对沉积物样品进行除钙质和有机质的前处理, 对样品各粒级粒径和含量不校正。

(1) 国内对激光法和沉降法粒度数据主要进行对比和相关分析、建立回归方程以修正激光法与沉降法(和筛析法) 分析结果的差异。陈秀法等^[15]、陈仕

涛等^[16]激光法与沉降法的粒度分析对比表明,激光法结果相对偏粗,差异主要反映在 $>9\phi$,平均粒径的相关系数 $r=0.9864$, F 显著性检验表明回归方程可作为激光法与沉降法两种数据换算公式使用。全长亮等^[17]对江苏潮滩沉积物的激光法与沉降法(和筛析法)得出的粒级和粒度参数进行相关和回归分析,认为平均粒径存在良好的线性关系,沉降法测得的细颗粒较激光法多,两种方法之间的换算关系与研究区域和沉积物的粒度组成有关。

(2) 国外从沉降法与激光法粒度分析的不同原理着手,通过数学计算和扫描电镜对沉积物组分的形态观测,针对某一粒级粒径和含量进行校正。Martin等^[18]根据斯托克斯定律,对非球形颗粒的沉降行为的数学求导,证实了激光法直径和沉降法直径之间的相互关系。直径 $7.9\mu\text{m}$ 、高 $0.29\mu\text{m}$ 的一个板状颗粒(plate-like particles),以水平方式沉降,相当于一个直径 $2\mu\text{m}$ 的球形颗粒。若垂直沉降,直径 $6.5\mu\text{m}$ 、高 $0.23\mu\text{m}$ 的一个板状颗粒,也与一个直径 $2\mu\text{m}$ 的球形颗粒相当。这些数学计算证明了沉降法直径 $2\mu\text{m}$ 颗粒等于激光法直径 $8\mu\text{m}$ 。实验结果证实了重要因子是黏土颗粒的形状。实验还表明,无论是土壤、还是海洋和湖泊沉积物,黏土组分中都存在板状颗粒。Wolfgang等^[19~22]对土壤样品的激光粒度分析结果表明黏土含量少的样品,激光法和沉降法分析结果相同。随着样品中黏土含量增加,两种粒度分析结果的差异逐渐增大。差异主要来自黏土和粉砂组分中的板状颗粒。激光法粒度分析表明黏土含量要比沉降法的少。板状颗粒因为沉降慢,沉降法把它们作为直径小得多的颗粒。激光法粒度分析对颗粒进行全方位测定,测得的颗粒直径大于沉降法。所以,激光法粒度分析测得的粉砂含量比黏土的多。沉降法粒度分析表示有70%黏土,而激光法粒度分析结果可能只有20%。电子显微图证实了直径为 $10\mu\text{m}$ 的板状颗粒在沉降法样品中测定出是 $1\sim 2\mu\text{m}$ 颗粒占优势。Susumu^[23]对东亚陆架边缘悬浮体样品中不可燃组分分析表明,南海表层水中普遍存在着板状黏土矿物和生物骨骼碎片。章伟艳等^[24~26]用显微镜鉴定分析也得出长江口-杭州湾及其邻近海域沉积物中含有大量植物碎片。因此需要对南海东部海域表层沉积物的激光法黏土粒级的粒径和含量、沉积物类型这三方面作系统校正。

(3) 蓝先洪等^[27]对南黄海沉积物样品进行前处理(样品中加入过量的盐酸及过氧化氢),对样品除

钙质及有机质。激光法与沉降法(和筛析法)的粒度分析对比表明,激光法和筛析法结果很接近;黏土粒级的激光法与沉降法(和筛析法)分析结果呈弱正相关;激光法粒度分析结果可靠,可以替代传统的粒度分析方法。砂、粉砂、黏土三种粒级的相关系数(r)分别为 0.927 、 0.871 、 0.615 。这也表明尽管对样品进行去钙和有机质的前处理,激光法和沉降法得出的黏土粒级含量的相关性仍然较差。

4.2 沉降法和激光法粒度资料相关和回归分析

沉降法与激光法粒度分析的主要差异是黏土粒径,这个差异将直接影响到黏土、粉砂含量和沉积物类型。本文研究目的是对激光法的黏土和粉砂粒径校正、黏土和粉砂含量校正、沉积物类型校正。根据上述情况,先对两种粒度分析方法得出的粒度分析数据进行对比、相关分析和建立回归方程。南海东部海域106个表层沉积物样品的沉降法和激光法原始粒度分析数据对比、相关分析和回归分析表明:沉降法和未校正激光法的砂、粉砂、黏土的相关系数(r)分别为 0.4966 、 0.2973 、 0.3684 ,均为强正相关(注: $n=106$, $\alpha=0.05$, $r=0.196$, $\alpha=0.01$, $r=0.255$, $\alpha=0.001$, $r=0.324$),粉砂和黏土的相关性相对而言较砂的弱(表4)。未校正的砂、粉砂、黏土回归方程分别为:

$$\text{砂: } y=0.3876x+7.5003 \quad r=0.4966$$

$$\text{粉砂: } y=0.1492x+54.907 \quad r=0.2973$$

$$\text{黏土: } y=0.1823x+19.619 \quad r=0.3684$$

式中 y 为激光法, x 为沉降法。激光法按回归方程校正后的砂、粉砂、黏土与沉降法的相关系数(r)均为1,而回归方程仍未变化(表4)。从相关系数看,按回归方程校正的效果似乎非常显著,其实不然。

4.3 激光法黏土粒级的粒径和含量校正

根据Martin等^[18~22]的数学计算和电镜观测结果得出“沉降法颗粒直径 $2\mu\text{m}$ (0.002mm)等于激光法直径 $8\mu\text{m}$ (0.008mm),激光法直径为 $10\mu\text{m}$ (0.01mm)的板状颗粒用沉降法测定则是 $1\sim 2\mu\text{m}$ ($0.001\sim 0.002\text{mm}$)颗粒占优势”重要认识,我们将黏土粒级的粒径校正为 $<0.01\text{mm}$ 响应的粉砂粒级的粒径校正为 $0.01\sim 0.063\text{mm}$ 。在此基础上建立激光法校正后粉砂($0.063\sim 0.01\text{mm}$)、黏土($<0.01\text{mm}$)的回归方程分别为:

$$\text{粉砂: } y=0.129x+30.714 \quad r=0.2083$$

$$\text{黏土: } y=0.3013x+38.468 \quad r=0.3347$$

式中 y 为激光法, x 为沉降法。激光法校正后粉

表 4 激光法和沉降法的各粒级的相关和回归分析 (y = 激光法, x = 沉降法 n = 106)

Table 4 Relationship and regression of different grain size class based on laser and pipette analysis

原始分析/校正	定义	粒级	回归方程	相关系数
沉降法和激光法原始分析	砂: 沉降法 2 ~ 0.063mm 激光法 2 ~ 0.063mm	砂	$y = 0.3876x + 7.5003$	0.4966
	粉砂: 沉降法 0.063 ~ 0.004mm 激光法 0.063 ~ 0.004mm	粉砂	$y = 0.1492x + 54.907$	0.2973
	黏土: 沉降法 < 0.004mm 激光法 < 0.004mm	黏土	$y = 0.1823x + 19.619$	0.3684
激光法校正 2 (按回归方程校正)	砂: 沉降法 2 ~ 0.063mm 激光法 2 ~ 0.063mm	砂	$y = 0.3876x + 7.5003$	1
	粉砂: 沉降法 0.063 ~ 0.004mm 激光法 0.063 ~ 0.004mm	粉砂	$y = 0.1492x + 54.907$	1
	黏土: 沉降法 < 0.004mm 激光法 < 0.004mm	黏土	$y = 0.1823x + 19.619$	1
激光法校正 1 (黏土 < 0.01mm 粉砂 0.01 ~ 0.063mm)	粉砂: 沉降法 0.063 ~ 0.004mm 激光法 0.063 ~ 0.01mm	粉砂	$y = 0.129x + 30.714$	0.2083
	黏土: 沉降法 < 0.004mm 激光法 < 0.01mm	黏土	$y = 0.3013x + 38.468$	0.3347

激光法校正 1 是指黏土粒级的粒径范围为 < 0.01 mm 粉砂粒级的粒径范围为 0.01 ~ 0.063 mm; 激光法校正 2 是指按回归方程校正沉积物各粒级含量, 各粒级的粒径范围不变。

砂 (r = 0.2083) 和黏土 (r = 0.3347) 相关系数也属强正相关 相关系数大小与校正前基本不变 (表 4)。

图 1、图 2 分别是南海东部海域表层沉积物沉降法和激光法校正前的粉砂含量、黏土含量对比图, 表 5 是激光法各粒级含量校正前后对比。由图表可知, 沉降法粉砂含量围绕平均值 (42.28%) 波动, 而激光法粉砂含量围绕平均值 (61.21%) 波动; 沉降法黏土含量围绕平均值 (52.07%) 波动, 而激光法粉砂含量围绕平均值 (29.11%) 波动。沉降法和激光法校正前粉砂、黏土平均值相差和波动幅度达约 20%。

图 3、图 4 分别是南海东部海域表层沉积物沉降

法和激光法校正后的粉砂含量、黏土含量对比图。由图和表 5 可知, 激光法校正后粉砂 (0.01 ~ 0.063 mm) 平均含量为 36.17% 和黏土 (< 0.01 mm) 平均含量为 54.16%, 已非常接近沉降法的各自含量, 沉降法和激光法校正后粉砂、黏土含量变化曲线已在相当程度上相吻合, 可以说, 基本达到将激光法黏土、粉砂含量校正到沉降法水平的目的。相反, 按回归方程校正后的激光法粉砂、黏土平均含量没有变化, 仍然是 62.21%、29.11%, 而沉降法的粉砂和黏土含量分别为 42.28% 和 52.07%。沉降法和激光法粉砂、黏土含量变化曲线仍然相差悬殊, 含量相差幅度

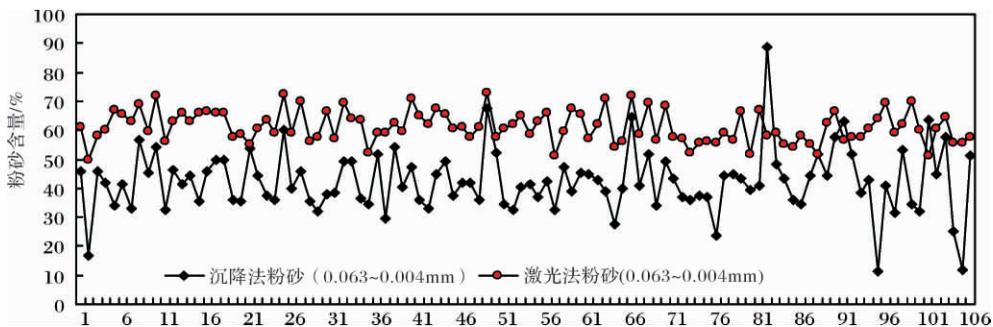


图 1 南海东部海域表层沉积物沉降法和激光法校正前的粉砂含量对比

Fig. 1 Comparison of silt percentage content by laser grain size analysis with pipette pre-calibration

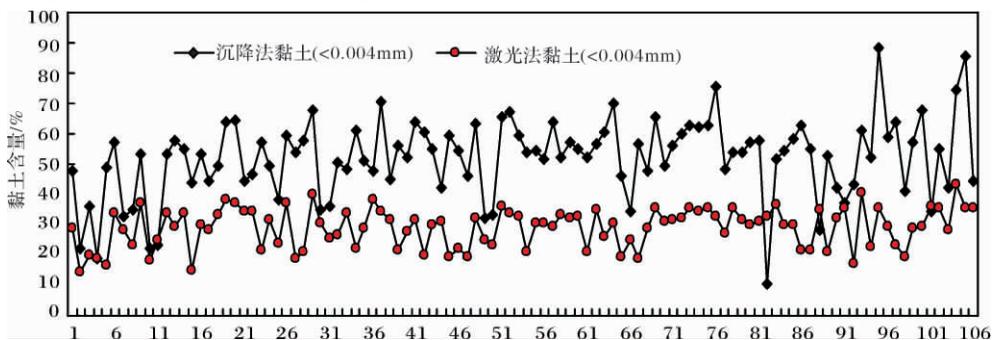


图 2 南海东部海域表层沉积物沉降法和激光法校正前的黏土含量对比

Fig. 2 Comparison of clay percentage content by laser grain size analysis with pipette pre-calibration

表5 激光法各粒级含量校正前后对比 (n=106)

Table 5 Comparison of different grain size class by laser with pipette pre- and post-calibration

范围	沉降法原始分析数据			激光法原始分析数据		
	砂(2~0.063mm)	粉砂(0.063~0.004mm)	黏土(<0.004mm)	砂(2~0.063mm)	粉砂(0.063~0.004mm)	黏土(<0.004mm)
最小	0.04	11.49	10.35	0.16	49.94	14.70
最大	59.95	88.73	88.46	35.36	72.94	43.55
平均	5.61	42.28	52.07	9.68	61.21	29.11
范围	激光法按数学计算校正			激光法按回归方程校正		
	砂(2~0.063)	粉砂(0.063~0.01mm)	黏土(<0.01mm)	砂(2~0.063mm)	粉砂(0.063~0.004mm)	黏土(<0.004mm)
最小	0.16	22.57	29.35	7.52	56.62	21.51
最大	35.36	54.76	76.66	30.74	68.15	35.75
平均	9.68	36.17	54.16	9.68	61.21	29.11

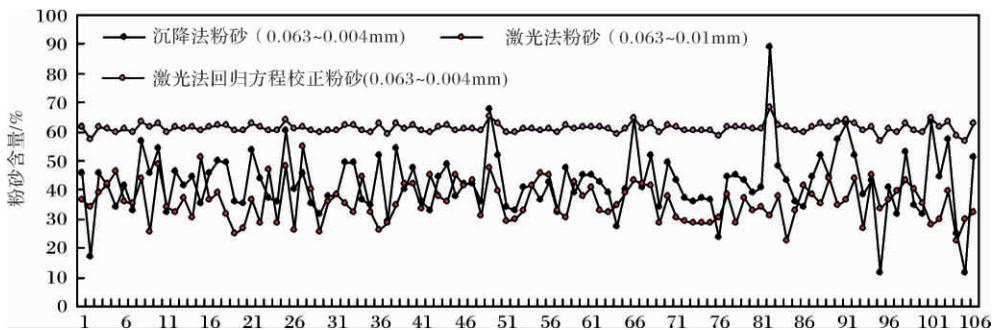


图3 南海东部海域表层沉积物沉降法和激光法校正后的粉砂含量对比

Fig. 3 Comparison of silt percentage content by laser grain size analysis with pipette post-calibration

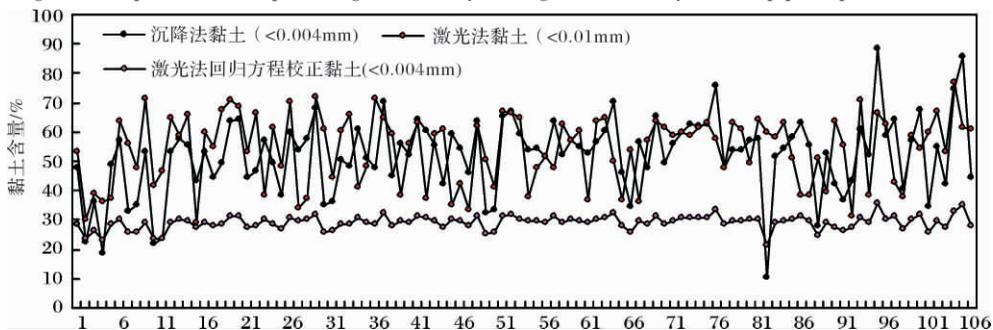


图4 南海东部海域表层沉积物沉降法和激光法校正后的黏土含量对比

Fig. 4 Comparison of clay percentage content by laser grain size analysis with pipette post-calibration

达约20% ,只是波动幅度略比校正前小些 ,实际上没有起到校正作用。当然 ,需要说明的是本次仅涉及南海东部海域表层沉积物的研究。

4.4 激光法沉积物类型校正

沉积物粒度分析的主要目的是为确定沉积物类型 ,对激光法沉积物类型校正是我们研究的最终目的。本文主要讨论沉降法和激光法粒度分析差异 ,因此只根据粒度结构划分沉积物类型 ,不涉及深海沉积物分类^[28] 其他方面知识。沉降法粒度分析得出南海东部海域表层沉积物类型主要是粉砂质黏土(69.81%) ,其次是黏土质粉砂(19.81%) ,其他类型所占比例(11.38%) 很小;激光法的主要沉积物类型

是黏土质粉砂(89.62%) ,其次是砂质粉砂(10.38%) ,没有其他类型 ,与沉降法的主要差别是粉砂-黏土级含量。如果激光法的黏土、粉砂粒径不作校正 ,激光法沉积物类型与沉降法沉积物类型相同的只占21.69% ,不同的占78.31%(表6)。

激光法黏土粒级校正为<0.01 mm(粉砂粒径校正为0.01~0.063 mm) ,校正后激光法沉积物类型与沉降法沉积物类型相同的占91.51% ,不同的只占8.49% ,值得一提的是大部分黏土质粉砂已校正为粉砂质黏土 ,起到校正激光法沉积物类型的作用。

激光法各粒级含量按回归方程校正 ,9个站由原来的ST校正为YT ,校正后2个站为ST ,其余104个

表 6 沉降法与激光法粒度分析得出的沉积物类型对比 ($n = 106$)

Table 6 Comparison of sediment types based on laser grain size analysis with pipette

沉积物类型(Shepard 分类) ^[13]	TS	YS	ST	T	S-T-Y	YT	TY	Y
沉降法原始分析(黏土 <0.004mm 粉砂 0.004 ~ 0.063mm) 测站数	1	1	2	1	3	21	74	3
激光法原始分析(黏土 <0.004mm 粉砂 0.004 ~ 0.063mm) 测站数			11			95		
激光法校正 2(黏土 <0.004mm 粉砂 0.004 ~ 0.063mm) 测站数			2			104		
激光法校正 1(黏土 <0.01mm 粉砂 0.01 ~ 0.063mm) 测站数					1	23	81	1

激光法校正 1 是指黏土粒级的粒径范围为 <0.01mm, 粉砂粒级的粒径范围为 0.01 ~ 0.063mm.

激光法校正 2 是指按回归方程校正沉积物各粒级含量, 各粒级的粒径范围不变.

TS 为粉砂质砂, YS 黏土质砂, ST 砂质粉砂, T 粉砂, S-T-Y 砂-粉砂-黏土, YT 黏土质砂, TY 粉砂质黏土, Y 黏土.

站为 YT, 没有其它沉积物类型。校正后激光法沉积物类型与沉降法沉积物类型相同的只占 21.69%, 不同的占 78.31%, 与校正前一样, 实际上没有起到校正激光法沉积物类型的作用。

5 结论

本研究目的是对激光法黏土粒径和含量及沉积物类型的系统校正。南海东部水深 >2 000 m 海域沉降法得出砂、粉砂、黏土含量分别为 3.66%、42.43%、53.91%, 激光法得出砂、粉砂、黏土含量分别为 9.26%、61.11%、29.64%, 两种粒度分析得出的粉砂、黏土含量相差达约 20%。沉降法得出南海东部海域表层沉积物类型主要是粉砂质黏土 (69.81%), 其次是黏土质粉砂 (19.81%), 其他类型所占比例很小 (11.38%)。激光法得出沉积物类型主要是黏土质粉砂 (89.62%), 其次是砂质粉砂 (10.38%), 没有其他类型, 激光法与沉降法得出的沉积物类型相同的只占 21.69%, 不同的占 78.31%, 主要差别在于黏土、粉砂含量。沉降法与激光法粒度分析结果差别很大, 如果不作校正, 两种分析方法得出的粒度结构和沉积物类型对比没有意义。

激光法的黏土粒径校正为 <0.01 mm (响应的粉砂粒径校正为 0.063 ~ 0.01 mm), 黏土、粉砂的平均含量分别校正为 54.16%、36.17%, 已非常接近沉降法的黏土 (52.07%) 和粉砂 (42.28%) 含量; 校正后激光法与沉降法的相同沉积物类型占 91.51%, 不同的占 8.49%, 大部分黏土质粉砂已校正为粉砂质黏土; 校正后粉砂、黏土相关系数 (r) 分别为 0.320 3、0.334 7, 属强正相关, 说明黏土粒级粒径、粒级含量和沉积物类型的三种校正已基本达到目的。相反, 激光法按回归方程校正后的黏土、粉砂平均含量没有变化, 仍然是 29.11%、62.21%, 沉降法和激光法黏土、粉砂含量相差仍达 20%, 只是波动幅度比校正前略小, 校正后相同沉积物类型只占 21.69%, 不同的占

78.31%, 表明按回归方程对粒级含量和沉积物类型的校正没有实际意义。

沉降法、激光法粒度分析资料进行粒度结构对比、沉积物类型划分和图件编制、沉积学基础研究, 首先需要对不同分析方法得出的数据资料进行认真对比和校正。本次研究表明, 沉降法与激光法粒度分析的主要差异在黏土粒级, 激光法黏土粒径校正为 <0.01 mm (粉砂粒径校正为 0.063 ~ 0.01 mm), 就能对黏土粒径和含量及沉积物类型的三种校正达到基本目的, 而按回归方程校正没有实际意义。

参考文献 (References)

- 佩蒂庄 F J, 波特 P E, 西弗 R 著. 砂和砂岩 [M]. 北京: 科学出版社, 1977: 276-279 [Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. Sand and Sandstone [M]. Spring-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1977: 276-279]
- Herdan G. Small Particle Statistics [M]. New York: Academic Press, 1960
- Allen T. Particle Size Measurement [M]. London: Chapman and Hall, 1968
- Folk R L. A review of grain-size parameters [J]. Sedimentology, 1966, 6: 73-97
- 国家海洋局. 海洋调查规范第四分册(海洋地质调查) [S]. 1975: 16-29 [Specifications for Oceanographic Survey-Part 4: Marine geology survey [S]. State Oceanic Administration, 1975: 16-29]
- Cornillault J. Particle size analyzer [J]. Applied Optics, 1972, 265-268
- Weiss E L, Frock H N. Rapid analysis of particle size distributions by laser light scattering [J]. Powder Technology, 1976: 14: 287-293
- McCave I N, Bryant R S, Cook H F, et al. Evaluation of a laser-diffraction-size analyzer for user with natural sediments [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1986, 56: 561-564
- 张富元, 章伟艳, 杨群慧. 南海东部海域沉积物粒度特征 [J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 452-460 [Zhang Fuyuan, Zhang Weiyan, Yang Qunhui. Characteristics of grain size distributions of surface sediments in the Eastern South China Sea [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 452-460]
- Weiner B B. Particle and spray sizing using laser diffraction [J]. So-

- ciety Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1979, 170: 53-56
- 11 Agrawal Y C, Riley J B. Optical particle sizing for hydrodynamics based on near forward scattering [J]. Society Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1984, 489: 68-76
 - 12 张富元, 章伟艳, 张德玉, 等. 南海东部海域沉积物类型的研究 [J]. 海洋学报, 2004, 26(5): 94-105 [Zhang Fuyuan, Zhang Weiyan, Zhang Deyu, *et al.* Research on surface sediment types and distributions from the eastern South China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(5): 94-105]
 - 13 中华人民共和国国家技术监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范第8部分: 海洋地质地球物理调查(GB/T12763.8-2007) [S]. 2008 [中华人民共和国国家技术监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. Specifications for Oceanographic Survey-Part 8: Marine Geology and Geophysics Survey [S]. GB/T12763.8-2007]
 - 14 金翔龙主编. 东太平洋多金属结核矿带海洋地质与矿床特征 [M]. 北京: 海洋出版社, 1997: 84-172 [Jin Xianglong. Marine Geology and Deposit Features for Mineral Belt of Polymetallic Nodules in Eastern Pacific Ocean [M]. Beijing: Ocean Press China, 1977: 84-172]
 - 15 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, 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]
 - 16 陈仕涛, 王建, 朱正坤, 等. 激光衍射法与比重计沉降法所测粒度参数的对比研究——以海滩泥沙为例 [J]. 泥沙研究, 2004, 3: 63-68 [Chen Shitao, Wang Jian, Zhu Zhengkun, *et al.* Comparison of the grain size measured by the laser diffract instrument with that by the hydrometer: a case study of beach silts [J]. Journal of Sediment Research, 2004, 3: 64-68]
 - 17 全长亮, 高抒. 江苏潮滩沉积物激光粒度仪与移液管-筛析分析结果的对比 [J]. 沉积学报, 2008, 26(1): 46-53 [Tong Changliang, Gao Shu. Comparison between grain size data by laser and pipette-sieve methods for tidal flat sediments on Jiangsu coast [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(1): 46-53]
 - 18 Martin Konert, Jef Vandenbergh. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction [J]. Sedimentology, 1997, 44: 523-535
 - 19 Wolfgang Mutter. Particle Technology in Soil Research [C]//Fritsch GmbH. Manufacturers of Laboratory Instruments, Industries Trasse 8, D-55743 Idar-oberstein, Germany, 1998
 - 20 McCave I N, Bryant R J, Cook H F, *et al.* Evaluation of a laser dif-
 - fraction size analyzer for use with natural sediments [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1986, 56: 561-564
 - 21 Loizeau J L, Arbouille D, Santiago S, *et al.* Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyzer for use with sediments. Sedimentology, 1994, 41: 353-361
 - 22 Van Dongen W. Bepaling korrel grootte verdeling van waterbodems en zwevende stof. IJking van de laserbuigings methode met de zeef- en pipet methode volgens NEN 5753 [J]. Afstudeerverslag HLO-chemie, RijkswaterstaatLRIZA, Lelystad, 1989
 - 23 Susumimu H, Emery K O, Satoshi Y. Non-combustible suspended matter in surface waters off eastern Asia [J]. Sedimentology, 1974, 21: 555-575
 - 24 章伟艳, 金海燕, 张富元, 等. 长江口—杭州湾及其邻近海域不同粒级沉积有机碳分布特征 [J]. 地球科学进展, 2009, 24(11): 1202-1209 [Zhang Weiyan, Jin Haiyan, Zhang Fuyuan, *et al.* Organic carbon distribution in the Yangtze River Estuary-Hangzhou Bay and its adjacent sea area [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(11): 1202-1209]
 - 25 张霄宇, 张富元, 高爱根, 等. 长江口及邻近陆架沉积物中 Pt、Pd 分异的物源示踪 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2009, 34(4): 604-609 [Zhang Xiaoyu, Zhang Fuyuan, Gao Aigen, *et al.* Source tracing implication of Pt and Pd fractionation in the surface sediment of continental shelf around Changjiang Estuary [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2009, 34(4): 604-609]
 - 26 张霄宇, 张富元, 高爱根, 等. 稀土元素在长江口及邻近陆架表层沉积物中的分布及物源示踪研究 [J]. 中国稀土学报, 2009, 27(2): 282-288 [Zhang Xiaoyu, Zhang Fuyuan, Gao Aigen, *et al.* Distribution and source tracing implication of Rare Earth Elements in surface sediments of Changjiang River Estuary and adjacent continental shelf [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2009, 27(2): 282-288]
 - 27 蓝先洪, 张志殉, 李日辉, 等. 南黄海沉积物不同粒度分析结果的对比研究 [J]. 海洋地质动态, 2006, 22(10): 5-7 [Lan Xianhong, Zhang Zhixun, Li Rihui, *et al.* Comparison of results by different grain size measurement methods for sediments from Southern Yellow Sea [J]. Marine Geology Letters, 2006, 22(10): 5-7]
 - 28 张富元, 李安春, 林振宏, 等. 深海沉积物分类与命名 [J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(6): 517-523 [Zhang Fuyuan, Li Anchun, Lin Zhenhong, *et al.* Classification and denomination of deep sea sediments [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2006, 37(6): 517-523]

Comparison and Calibration of Laser Grain Size Analysis with Pipette-sieve Method: A solution for the underestimation of the clay fraction of surface sediments from the Eastern South China Sea

ZHANG Fu-yuan¹ FENG Xiu-li² ZHANG Wei-yan¹ LIN Lin² ZAHNG Xiao-yu³ YAO Xu-ying¹

(1. Key Lab of Submarine Sciences of SOA, Second Institute of Oceanography of SOA, Hangzhou 310012;

2. Ocean University of China, Qingdao Shandong 266003; 3. Zhejiang University, Hangzhou 310012)

Abstract Classically, the grain size of sediment samples is determined by the sieve method for the coarse fractions and by the pipette method, based on the Stokes' sedimentation rates, for the fine fractions. Results from the pipette method are compared with results from laser diffraction size analysis using a set of randomly selected 106 surface sediments which are collected from the Eastern South China Sea. The aim of this research is to calibrate systematically the grain size and content of clay fraction and sediment type achieved from laser diffractometry.

The contents of sand, silt, and clay in sediments of eastern South China Sea with depth more than 2 000 m were 3.7%, 42.4% and 53.9%, respectively, obtained from standard sedimentation method, and 9.3%, 61.1%, 29.6% respectively from laser diffractometry. The deviation of contents of silt and clay fraction obtained from the two methods is about 20%. The sediment types obtained from the eastern South China Sea obtained from sedimentation method are essentially silty clay of 69.8%, and secondly is clay 19.8%. There is very small amount of other types, only 11.4%. The main sediment type based on laser diffractometry is clayey silt of 89.6%, and secondly is sandy silt of about 10.4%, there is no any other types obtained. The agreement of sediment type between the two methods is only 21.7%, which means there are significant discrepancies for the contents of clay fraction achieved from two different methods.

Therefore, it is not possible to compare the contents of different grain size and sediment type obtained from the two methods without calibration. The grain size of clay fraction from laser method was calibrated to <0.01 mm, and $0.063 \sim 0.01$ mm for silt correspondingly. The contents of clay and silt fraction are 54.2% and 36.2%, respectively, after calibration, which is very close to the result of 52.1% for the clay fraction and 42.3% for the silt fraction from the sedimentation method. The agreement between sedimentation method and calibrated laser method is 91.5%. Most of clayey silt is calibrated to silty clay. The correlation coefficients are 0.3203 for the silt fraction and 0.3347 for the clay fraction after calibration. The relationship appears to be positively strong, indicating that the calibration for grain size and content of clay fraction is successful.

However, there is no distinct improvement for the content of clay and silt fraction calibrated according to regressive equation. The contents are 29.1% and 62.2%, respectively. The discrepancy between the content of clay and silt fraction from two methods is 20%, but there is lower amplitude of variation. The agreement of sediment type with regressive method is only 21.7%, which means the discrepancy arrives at 78.3%, indicating that calibration with regressive equation for content of clay and silt fraction and sediment type. The research suggested that after the grain size were calibrated to <0.01 mm for clay fraction and $0.063 \sim 0.01$ mm for silt fraction, the contents of clay and silt fraction and sediment type agreed well with those from sedimentation method. There is almost no improvement using regressive calibration.

Key words surface sediments in South China Sea; pipette method; laser method; grain size analysis; comparison and calibration