

doi:10.3799/dqkx.2012.009

深海沉积物分类与命名的关键技术和方案

张富元¹, 章伟艳¹, 张霄宇², 冯秀丽³, 林霖³, 朱克超⁴,
陈奎英⁵, 孟翊⁶, 冯旭文¹

- 1. 国家海洋局第二海洋研究所, 国家海洋局海底科学重点实验室, 浙江杭州 310012
- 2. 浙江大学地球科学系, 浙江杭州 310012
- 3. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266003
- 4. 广州海洋地质调查局, 广东广州 510706
- 5. 国家海洋局国家海洋信息中心, 天津 300171
- 6. 华东师范大学河口海岸研究所, 上海 200062

摘要: 对地质研究的对象进行科学合理的分类, 是地学研究的重要内容之一. 为建立科学合理、量化统一、操作简便的深海沉积物分类与命名方案, 详细分析国内外深海沉积物分类与命名现状, 深刻了解海洋沉积物组成与分布, 深入研究深海沉积物的水深、平均粒径和粘土含量 3 项参数指标, 通过分析涂片鉴定粘土、钙质生物、硅质生物这三者的含量、粒度和化学分析之间的差异, 建立钙质生物、硅质生物与 CaCO_3 、生物 SiO_2 的量化关系, 完成沉降法和激光法粒度分析资料的对比和校正, 分析深海沉积物分类与命名的兼容性和可比性. 在上述研究成果基础上, 自主创新提出深海沉积物分类与命名方案及其关键技术. 深海沉积物类型简分法把深海沉积物分为深海粘土、钙质软泥、硅质软泥、粘土—硅质—钙质软泥 4 类, 它能满足一般性海洋地质调查要求, 达到基本了解深海沉积物类型的目的, 在兼容世界深海沉积物类型现状的同时, 充分考虑到混合沉积物的存在. 深海沉积物类型细分法在简分法基础上细分了 16 种沉积物, 使分类与命名更加详细和全面, 满足海洋地质详细调查研究的要求. 深海沉积物分类与命名方案与浅海沉积物分类与命名比较, 在图形、类型指标、种类数量、冠字冠名法、混合沉积物表示法、可操作性等方面具有可比性, 使浅海到深海的沉积物分类与命名呈渐变和有机联系.

关键词: 深海; 沉积物; 分类与命名; 参数指标; 关键技术和方案; 海洋地质.

中图分类号: P731 文章编号: 1000-2383(2012)01-0093-12 收稿日期: 2011-07-26

Key Technique and Scheme of Classification and Nomenclature for Deep Sea Sediments

ZHANG Fu-yuan¹, ZHANG Wei-yan¹, ZHANG Xiao-yu², FENG Xiu-li³, LIN Lin³,
ZHU Ke-chao⁴, CHEN Kui-ying⁵, MENG Yi⁶, FENG Xu-wen¹

- 1. Key Laboratory of Submarine Sciences of Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration People's Republic of China, Hangzhou 310012, China
- 2. Department of Earth Science, Zhejiang University, Hangzhou 310012, China
- 3. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China
- 4. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China
- 5. China Oceanic Information Network, State Oceanic Administration People's Republic of China, Tianjin 300171, China
- 6. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract: Scientific classification of the geological objects is one of the most important basic research topics in geology. In this paper, thorough review of current research situation is made to establish the classification and nomenclature of deep sea sediments which unify the quantification and can be easily operated. Researches on various topics were conducted, eg., the compo-

基金项目: 国家科学技术部科技基础性工作专项(No. 2006FY220400); 中国大洋协会(No. DYXM125-01-01-06); 国家海洋局海洋二所基本科研专项(No. JG1108); 国家自然科学基金项目(Nos. 41076036, 41106050); 浙江省教育厅资助项目(No. N20100420).
作者简介: 张富元(1952—), 男, 研究员, 主要从事海洋地质研究和海洋矿产资源评价. E-mail: fy Zhang2003@163.com

sition and distribution of oceanic sediments, the relationship between water depth, average grain size and clay content, the discrepancy of clay, calcareous and siliceous content determination between smear and chemical analysis. The authors establish the quantitative relationship between calcareous and CaCO_3 , between siliceous and biogenic SiO_2 . This paper also compares and calibrates sedimentation method and laser method for grain size determination, and discusses generality and comparability of the classification and nomenclature system. Innovative key technique and scheme of classification and nomenclature for deep sea sediments were then put forward. The deep sea sediments are classified as deep sea clay, calcareous ooze, siliceous ooze, and clay-siliceous-calcareous ooze according to the simple classification method. The simple classification satisfies the general requirement of marine geological survey and basic understanding of sediment types. This method considers existing sediments mixture and existing classification methods. The deep sea sediments are further classified into 16 sub-types based on the sophisticated classification method, which therefore gives more detailed and comprehensive descriptions for the deep sea sediments and satisfies the requirement for comprehensive marine investigation. The classification and nomenclature for deep sea sediments are comparable with that for shallow sea sediments on diagram, indices, amount of types, naming methods, representation of mixture sediments and operability. Therefore, the classification and nomenclature for deep sea sediments is designed to be a succession of shallow sea sediments classification.

Key words: deep sea; sediments; classification and nomenclature; parameter and index; key technique and scheme; marine geology.

科学合理地制定统一标准,一方面可以使科学研究成果规范化和标准化,使不同时期和不同国度的资料具有可比性;另一方面,自主标准是创新性成果的最高体现和认同.有了自主标准,将实现由技术跟进到技术创新的彻底变革,这是我们发展自主标准的价值所在.浅海以陆源沉积物为主,沉积物粒度三角图分类已很好地解决了浅海沉积物分类与命名(中国国家标准化管理委员会,2007)问题.而深海沉积物成分复杂,来源不一,沉积作用过程不同于浅海沉积物,因此沉积物粒度三角图分类不适用于深海沉积物分类与命名.当前我国海洋调查研究正由浅海向深海拓展,并已取得了令人鼓舞的成果(张海生等,2001;潘家华等,2002;何高文等,2005; Zhang *et al.*, 2008; 张富元等,2011),然而对深海沉积物分类与命名问题国内外迄今为止没有很好地解决(张富元等,2006),以致深海沉积物分类与命名方法不同、调查研究结果不同、成果资料可比性差,严重地影响海洋调查资料的应用、基础工作的研究及业务发展.2004—2005年,国家海洋局第二海洋研究所承担修订《海洋地质地球物理调查规范》,笔者负责深海沉积物分类与命名工作,并提交了深海沉积物分类与命名预案,评委们认为笔者提出的深海沉积物分类与命名分类科学、合理、量化、操作简便,但有待更深入研究和完善.2006年笔者获得国家科学技术部科技基础性工作专项经费资助,开展深海沉积物分类与命名项目(No. 2006FY220400)研究,现已完成几十万字的深海沉积物分类与命名项目研究报告,部分研究成果已在海洋学报(张富元等,2010)、沉积学报(张富元等,2011)刊出.2010年10

月国家科学技术部委托国家海洋局科技司组织专家组对本项目进行验收并获得通过(等级优秀).此外,本项目组于2007年访问了美国海洋与大气局(NOAA)、科罗拉多大学(University of Colorado)、德克萨斯农工大学(Texas A&M University)、哥伦比亚大学拉蒙特地质观测研究所(Lamont-Doherty Earth Observatory),并与深海钻探计划、大洋钻探计划沉积物分类专家进行了相关学术交流,笔者在“深海沉积物分类与命名”方面所做的工作得到了同行专家的认可.本文根据本项目专家验收组建议,在系统归纳总结项目成果基础上,向国内外同行展示深海沉积物分类与命名的关键技术和方案.

1 深海沉积物分类与命名的关键技术

1.1 深海沉积物分类与命名的基本参数确定

任何一个自然科学家都需要对作为其学科基础的观测、概念和观点加以分析、归纳和分类,尤其是地质工作者更习惯于这样做.对地质研究的对象进行科学合理的分类,是地学研究的重要内容之一.为使深海沉积物分类与命名科学合理、定量统一,首先需要对沉积物组分进行分解和归类;深海沉积物最主要组分是生物组分和非生物组分,这2种组分的相对含量是深海沉积物(表层和柱状沉积物)分类的基础.

1.1.1 生物组分(biogenous fraction) 生物组分可分为钙质生物、硅质生物、鱼残骸、有机质等.钙质生物有颗石藻、有孔虫、翼足类软体动物等;硅质生物有硅藻、放射虫、硅鞭藻等.

1.1.2 非生物组分(non-biogenous fraction) 陆源

组分(terrigenous fraction)有石英、长石、云母等轻矿物,角闪石、磁铁矿、电气石等重矿物,粘土矿物、铁氧化物、岩屑等.

火山组分(volcanogenic fraction)有火山玻璃、浮岩、火山灰等.

自生组分(authigenic fraction)有氧化物和氢氧化物(铁锰结核)、硅酸岩、重金属硫化物、硫酸盐、碳酸盐和磷酸盐.

宇源组分(cosmogenic fraction)主要为陨石球粒.

深海柱状沉积物的物质组成与表层沉积物基本相似,典型例子是 Kyte *et al.* (1993)在采于北太平洋的(30°19'N,157°49.9'W,水深 5 705 m,沉积物岩心长 24.31 m)LL44-GPC3 柱状沉积物中 324 个样品 39 种元素的地球化学系统分析研究基础上,建立的北太平洋新生代的沉积作用模型.该模型表明北太平洋自 66.4 Ma 以来的柱状沉积物可细分为 8 种端元组分(表 1),按其成因可归为陆源、火山、自生和生物组分,以陆源沉积作用和火山沉积作用占优势.

纵观以上生物组分和非生物组分中的陆源、火山、宇源、自生共 5 种不同成因的深海沉积物,前 3 种物质可归属于“岩源”或硅质碎屑沉积物(Siliciclastic Sediments),深海沉积物中“岩源”物质以小于 4 μm 的粘土级物质为主,而大于 4 μm 的“岩源”物质含量少.Hyeong *et al.* (2006)对取自东北太平洋 328 cm 长的柱状沉积物中风尘颗粒研究表明,在近 13.5 Ma 的沉积物全样中值粒径(M_d)为 2.3~

2.6 μm,平均值为 2.5 μm.Ziegler *et al.* (2007)对太平洋 DSDP 1215 孔沉积物研究表明,20 Ma 以来亚洲风尘物质对太平洋输入增加,沉积物全样中值粒径为 3~4 μm.虽然在深海沉积物中有细小生物,但是大多数个体直径大于 4 μm,如放射虫为 50~400 μm,有孔虫为 32~1 000 μm,硅鞭藻为 10~100 μm,硅藻为 10~1 000 μm,钙质超微化石为 5~30 μm.因此,在各种深海沉积物分类与命名中,都将粘土作为沉积物分类的一个独立参数.生物和自生沉积物可归于生源(或生物化学)沉积物.深海沉积物中,钙质生物和硅质生物是 2 种最重要的生物组分和基本独立参数,钙质生物沉积作用主要发生在碳酸钙补偿深度之上,而硅质生物沉积作用主要发生在碳酸钙补偿深度之下.因此,深海沉积物分类与命名的 3 个基本独立参数确定为粘土、钙质生物和硅质生物.

1.2 深海沉积物的水深、平均粒径、粘土含量指标确定

1.2.1 深海沉积物的水深指标 深海沉积物的水深应是多少?为确定深海沉积物的水深是 500 m (Chester, 2000)、1 000 m(王琦和朱而勤,1989)、2 000 m(李学伦,1997),还是更深,笔者对南海中部(12°~20°N、111°~119°E)海域(李粹中,1987)水深为 82~4 420 m 的 118 个表层沉积物粒度资料按水深<200 m、200~2 000 m、>2 000 m 这 3 个水深段进行水深和沉积物粒度数据的统计分析.结果表明从陆架到陆坡再到深海,表层沉积物的平均粒径和粘土含量随水深增加呈规律性变小或增加.把水深

表 1 北太平洋 LL44-GPC3 岩心沉积物组分含量(Kyte *et al.* , 1993)

Table 1 Percents of sediment components in core LL44-GPC3 in the central North Pacific							
年代	更新世	上新世	中新世	渐新世	始新世	古新世	新生代
年龄(Ma)	0.00~1.80	1.08~5.10	5.10~23.70	23.70~36.70	36.70~57.80	57.80~66.40	0.00~66.40
沉积物样深度(m)	0.00~3.60	3.60~5.50	5.50~10.00	10.00~13.00	13.00~17.25	17.25~20.60	0.00~20.60
热液物质(%)	0.0	0.2	1.3	4.8	19.1	8.8	5.2
水成物质(%)	1.3	2.7	5.5	8.7	6.1	3.3	4.3
磷酸盐物质(%)	0.0	0.0	0.9	2.5	4.8	6.9	2.2
亚洲大陆硅酸岩质风尘(%)	95.9	94.1	74.3	29.9	16.5	10.3	58.9
北美大陆安山岩质风尘(%)	0.0	0.0	9.2	35.9	38.4	53.9	19.6
硅酸岩质火山物质(%)	0.0	0.0	0.1	9.8	0.4	0.0	1.2
夏威夷玄武岩质火山物质(%)	0.0	0.2	3.7	0.3	0.1	0.0	0.9
生物 Si(%)	0.0	0.0	0.4	1.2	6.7	10.6	2.7
盐分(%)	2.8	2.8	4.4	6.9	8.0	6.1	4.9

>2 000 m 区域内的表层沉积物再细分为>2 500 m、>3 000 m 和>3 500 m 进行统计发现,表层沉积物的平均粒径和粘土含量随水深增加几乎没有什么变化,平均粒径保持在 3.39~3.54 μm ,平均粘土含量维持在 54.91%~55.47%;对南海东部海域(12°~22°N、116°~122°E)中水深为 700~4 508 m 的 106 个表层沉积物的粒度和水深数据进行统计表明,在水深>2 000 m 区域内沉积物平均粒径和粘土含量随水深增加也没有表现出变小或增加的规律,平均粒径保持在 3.25~3.37 μm ,粘土含量维持在 53.91%~54.56%的水平上,表明2 000 m 水深具有划分深海沉积物的水深指示意义.浅海沉积物的水深为 $\leq 2\,000\text{ m}$,深海沉积物的水深为>2 000 m.

1.2.2 深海沉积物的平均粒径和粘土含量指标

除深海沉积物的水深指标外,平均粒径、粘土含量也是确定深海沉积物的非常重要参数指标. Rea *et al.* (1985)认为北太平洋深海沉积物中 75% 的非生物组分是大气降落的风尘,颗粒直径为 2.4~2.8 μm ,主要由 Si、Fe、Al、Na、Ca、Mg 和 Ti 等元素组成.笔者对东太平洋表层沉积物粒度分析得出砂、粉砂、粘土含量分别为 2.66%、23.94%、73.40%,平均粒径为 2.17 μm (金翔龙,1997).南海中部水深>2 000 m 海域表层沉积物的平均粘土含量为 55.19%,平均粒径为 3.39 μm ;南海东部水深大于 2 000 m 海域表层沉积物的平均粘土含量为 53.91%,平均粒径为 3.37 μm .南海中部、东部水深大于 2 000 m 海域的陆源沉积物以粘土级颗粒为主,表层沉积物平均粒径均小于 4.00 μm ,平均粘土含量大于 50%,表明深海沉积物的平均粒径小于 4.00 μm ,平均粘土含量大于 50%.

1.3 涂片鉴定分析深海沉积物的粘土、钙质生物、硅质生物及其含量

大洋(深海)海洋地质调查中为了划分沉积物类型,常用目镜半定量鉴定分析沉积物涂片中的物质组分(生物和非生物组分,钙质生物和硅质生物组分)、非生物组分的颗粒大小(粒度结构),鉴定分析沉积物中的粘土、硅质生物、钙质生物这三者的百分含量.沉积物涂片样品用涂刮法制作,先用不锈钢针(或清洁牙签)取少许沉积物放于载玻片上,加几滴蒸馏水,用不锈钢针轻轻涂刮样品,使之均匀分布于载玻片上.载玻片放入烘箱烘干后,将加拿大树胶滴在已烘干的样品上,盖上盖玻片,让其在室温下自然干燥,制成固定片,在双目镜下对各涂片进行粒度(砂、粉砂、粘土)组分、生物和非生物组分的半定量

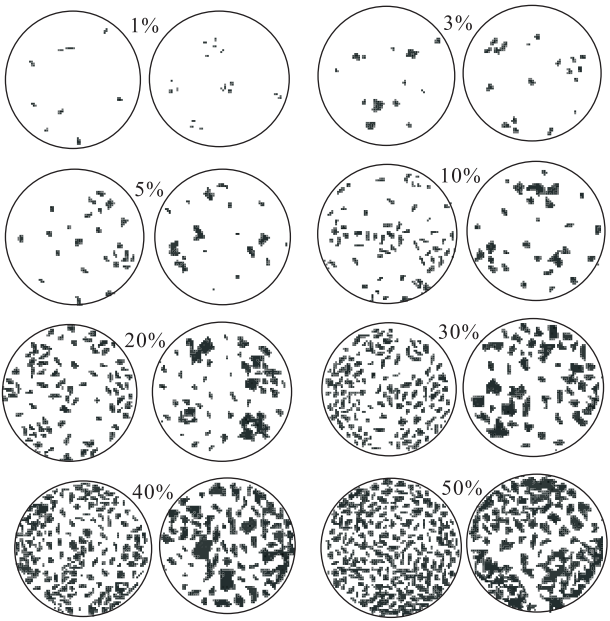


图 1 涂片鉴定沉积物组分和百分含量估计参考

Fig. 1 Reference of sediment component by means of smear identification and percentage estimation

鉴定分析(Rotwell, 1989;孟翊等,2001).

涂片鉴定分析工作包括:(1)鉴别沉积物中(钙质、硅质)生物组分和非生物组分,半定量分析这 2 种组分的百分含量;(2)观测非生物组分的粒度结构(砂、粉砂、粘土)、粒径大小,根据目镜比例尺确定 63 μm (砂与粉砂界线)和 4 μm (粉砂与粘土界线)的长度,估计砂、粉砂、粘土的百分含量;(3)鉴别钙质生物、硅质生物和估计各自百分含量;(4)识别沸石、铁锰微结核等具有特殊成因意义的物质,估计它们的百分含量.图 1 是涂片估计沉积物组分百分含量参考图(Terry and Chilingarian, 1955; Mazzullo *et al.*, 1988;孟翊等,2001).根据涂片半定量分析数据确定深海沉积物类型,基本上只能划分出钙质软泥、硅质软泥、深海粘土 3 类沉积物.

1.4 钙质生物、硅质生物的替代参数指标分析

因涂片鉴定分析难于正确详细区分沉积物成分、确定颗粒粒径大小和准确估计各成分含量,因此不能细分深海沉积物类型.即使在陆上实验条件完备的情况下,在目镜下用肉眼确定涂片中粘土级物质的大小及其含量、识别生物和非生物组分、估计各自含量、以及区分沉积物的粒度结构等工作都是极其困难的.定量分析砂、粉砂、粘土(粒度结构)及其含量,正确测定沉积物中 CaCO_3 、生物 SiO_2 (生物蛋白石)含量,都必须在实验室对沉积物进行粒度分析和化学分析.

海洋浮游生物骨骼是海洋沉积物的重要成分,有孔虫、钙质超微化石等钙质生物的主要化学成分是 CaCO_3 , 硅藻、放射虫、硅鞭藻等硅质生物的主要成分是生物 SiO_2 (生物蛋白石) (Leinen, 1977). 测定沉积物中 CaCO_3 、生物 SiO_2 含量可作为钙质生物和硅质生物含量的 2 个替代参数指标. 测定沉积物中生物 SiO_2 含量是一个非常棘手的问题 (Boström *et al.*, 1972; Ellis, 1972). 一种能有效测定沉积物中生物 SiO_2 含量的方法是, 利用沉积物元素含量比值计算出生物 SiO_2 含量. Al_2O_3 在海洋沉积物中对其他元素起稀薄作用, 其他元素氧化物含量与 Al_2O_3 含量的比值可有效地反映沉积物的组成和物源, SiO_2 与 Al_2O_3 含量比值为 3.3, 代表太平洋深海粘土特征 (Bischoff and Piper, 1979). 不同海区沉积物的生物 SiO_2 含量可按式 1 (Weaver and Pol-lard, 1973; Bischoff and Piper, 1979) 或式 2 (Boström *et al.*, 1972; Leinen, 1977) 计算:

$$c(\text{SiO}_2)_{\text{bio}} = c(\text{SiO}_2) - 3.3c(\text{Al}_2\text{O}_3), \tag{1}$$

$$c(\text{SiO}_2) = c(\text{SiO}_2)_{\text{bio}} + 3c(\text{Al}_2\text{O}_3), \tag{2}$$

式中, c 表示含量 (%); bio 表示生物; $3.3c(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 或 $3c(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 是非生物成因 SiO_2 的估算值.

南海东部海域深海区 (水深 2 100~4 772 m, 平均 3 600 m) 的 126 个表层沉积物化学分析得出 CaCO_3 、生物 SiO_2 含量分别为 4.63% 和 9.65%, 涂片鉴定钙质生物、硅质生物含量分别为 10.88% 和 22.18%, 两者相差 1 倍多, 涂片通常大大高估钙质生物和硅质生物含量 (Demaster, 1981; Dean *et al.*, 1985). 注意涂片半定量估计与化学定量分析之间的差异并进行科学合理的比对是很重要的. 粒度和化学分析数据经归一化得出的粘土、钙质生物、硅质生物含量、沉积物类型与相应的涂片项目的对比 (表 2), 表明可根据沉积物涂片镜下鉴定直接估计粘土、钙质生物、硅质生物含量, 也可利用粒度和化学分析数据经归一化求得粘土、钙质生物、硅质生物含量.

1.5 粒度分析数据对比和校正

传统粒度分析主要是沉降法和筛析法. 20 世纪

70 年代使用光学衍射原理测试颗粒的粒径 (Cornil-lault, 1972; Weiss and Frock, 1976; McCave *et al.*, 1986). 近十几年来, 激光粒度分析在我国得到了广泛应用 (张富元等, 2003), 发现不同粒度分析法得出的粒度数据差异大, 随之引发了激光法与传统法粒度分析数据的对比和校正 (陈秀法等, 2002; 陈仕涛等, 2004; 蓝先洪等, 2006; 全长亮和高抒, 2008; 张富元等, 2010).

1.5.1 沉降法和激光法粒度分析的基本原理 沉降法的基本原理是测定作为沉降时间函数的某一预定深度处的悬浮液的浓度值, 而悬浮液的浓度变化服从于静水中质点 (颗粒) 的沉降规律 (国家海洋局, 1975), 即斯托克斯 (Stokes) 定律. 该定律的关系式为:

$$v = \frac{2}{9} \frac{(\rho_1 - \rho_2)gr^2}{\mu}, \tag{3}$$

式中, r 为颗粒 (质点) 半径 (cm); μ 为液体的粘滞系数; v 为颗粒沉降速度 (cm/s); g 为重力加速度 (980 cm/s); ρ_1 为颗粒密度 (g/cm^3); ρ_2 为液体密度 (g/cm^3).

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, 一定粒径的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 a 有如下关系:

$$I(\theta) = \frac{1}{\theta} \int_0^\infty a^2 n(a) J_1^2(\theta K_L a) da, \tag{4}$$

式中, θ 是散射角度; a 是颗粒半径 (μm); $I(\theta)$ 是以 θ 角散射的光强度; $n(a)$ 是颗粒的粒径分布函数; $K_L = 2\pi/\lambda_L$; λ_L 为激光的波长 (nm); J_1 为第一型的贝叶斯函数. 根据测得的 $I(\theta)$, 可由式 4 求得球形颗粒的粒径分布 $n(a)$, 详细的方程求解可参考 Weiner (1979) 和 Agrawal and Riley (1984) 及中国国家标准化管理委员会 (2008).

1.5.2 沉降法、激光法粒度分析结果对比和校正 南海东部海域 ($12^\circ \sim 22^\circ \text{N}$ 、 $116^\circ \sim 122^\circ \text{E}$) 水深为

表 2 南海东部海域表层沉积物组分百分含量对比 (%) (激光粒度、化学分析与涂片鉴定)

Table 2 Comparison of component percentages of surface sediment from South China Sea

分析方法	样品数	CaCO_3	SiO_2	Al_2O_3	生物 SiO_2	粘土 (非生物组分)	钙质生物	硅质生物	沉积物类型
激光粒度、化学分析	126	4.63	54.67	13.64	9.65	69.29	8.60	22.12	含钙质含硅质粘土 (I ₄)
涂片鉴定分析	126	10.88			22.18	66.94	10.88	22.18	含钙质含硅质粘土 (I ₄)

注: 据张富元等, 2010, 深海沉积物分类与命名研究报告; 生物 SiO_2 的百分含量根据式 1 计算; 粘土 (非生物组分) 是指归一化百分含量.

700~4 508 m 的 106 个表层沉积物的沉降法粒度分析得出的砂、粉砂、粘土平均含量分别为 5.65%、42.28%和52.07%，平均粒径为(M_z)4.28 μm ；水深>2 000 m 沉积物的砂、粉砂、粘土平均含量分别为 3.66%、42.43%和 53.91%，平均粒径为 3.37 μm 。激光法粒度分析得出的砂、粉砂、粘土平均含量分别为 9.68%、61.21%和29.11%，平均粒径为 9.99 μm (表 3)。

东太平洋表层沉积物沉降法粒度分析得出的砂、粉砂、粘土平均含量分别为 2.66%、23.94%、73.40%，平均粒径 2.17 μm (金翔龙, 1997)。激光法得出的砂、粉砂、粘土平均含量分别为 13.92%、53.16%、32.92%，平均粒径 9.80 μm (表 3)。

激光法粒度分析结果是深海区(>2 000 m)绝大多数沉积物样品为粘土质粉砂，平均粒径>10 μm ；而沉降法分析结果则是粉砂质粘土，平均粒径<4 μm 。深海区域实际上是以粘土类和软泥类沉积物分布为主，平均粒径<4 μm 。如太平洋深海钻探计划 164~171 孔岩心中粘土类沉积物的砂、粉砂、粘土含量分别为 0.30%、20.36%、79.34%，太平洋(91°56.04'W—157°49.9'E、6°44.16'—38.6°N)区域内、水深 3 635~5 705 m 的表层沉积物的中值粒径(M_d)为 3.8 μm (Rea *et al.*, 1985; Zender *et al.*, 2004; Hyeong *et al.*, 2006)。以上数据表明沉降法与激光法得出的粉砂、粘土含量和平均粒径的差异很大，如果不作校正，对 2 种分析方法得出的粒度结构和沉积物类型进行对比没有意义 (Konert and Vandenberghe, 1997; 张富元等, 2011)。

2 种粒度分析方法得出的平均粒径、粘土和粉砂含量、沉积物类型相差如此之大的主要原因是测定沉积物颗粒粒径的方法原理不同。Konert and Vandenberghe (1997) 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 μm 、高

0.29 μm 的一个板状颗粒 (plate-like particle)，以水平方式沉降，相当于一个直径 2 μm 的球形颗粒；若垂直沉降，直径 6.5 μm 、高 0.23 μm 的一个板状颗粒，相当于一个直径 2 μm 的球形颗粒。这些数学计算证明了沉降法直径 2 μm 颗粒相当于激光法直径 8 μm ，实验结果也证实重要因子是粘土颗粒的形状。Honjo *et al.* (1974) 对东亚陆架悬浮体样品分析表明，南海表层水中普遍存在着板状陆源碎屑矿物、粘土矿物和生物骨骼碎片。章伟艳等 (2009) 用显微镜鉴定分析得出长江口—杭州湾及其邻近海域沉积物中含有大量包括植物碎片的板状沉积物颗粒。

沉降法粒度分析技术是根据斯托克斯 (stokes) 定律的基本原理获得沉积物颗粒的直径大小；激光法粒度分析技术则是利用光学衍射原理测试沉积物球形颗粒的粒径，而海洋沉积物颗粒沉降遵循斯托克斯定律。因此，粒度分析结果以沉降法为准，激光法粒度分析结果需进行校正。南海东部海域表层沉积物的沉降法和激光法的粒度分析结果对比表明 (张富元等, 2011)，激光法粘土粒径校正为 <0.010 mm (粉砂粒径为 0.063~0.010 mm)，南海东部海域表层沉积物的粘土、粉砂平均含量分别为 54.16%、36.17%，已非常接近沉降法粘土 (52.07%) 和粉砂 (42.28%) 含量 (图 2, 表 3)，基本达到校正粘土、粉砂的粒径和含量的目的。

2 深海沉积物分类与命名的冠字和冠名法

建立深海沉积物分类与命名的冠字、冠名法目的是使深海沉积物分类与命名严格量化统一。

(1) 组分 (粘土、硅质生物、钙质生物) 含量 0~25%，在其组分名称前冠“含” (“-bearing”) 字，如含粘土 (clay-bearing)、含硅质、含钙质；(2) 组分含量

表 3 南海、太平洋表层沉积物的沉降法和激光法粒度分析结果对比

Table 3 Comparison of laser grain size analysis with pipette analysis of surface sediments from South China Sea and Pacific

海区	粒度分析方法	水深(m)	$M_z(\mu\text{m})$	$M_d(\mu\text{m})$	砂(%) (2.000~0.063 mm)	粉砂(%) (0.063~0.004 mm)	粘土(%) (<0.004 mm)
南海东部海域	沉降法($n=106$)	3 329	4.28	5.79	5.65	42.28	52.07
	>2 000 m($n=94$)	3 587	3.37	3.99	3.66	42.43	53.91
南海东部海域	激光法($n=106$)	3 329	9.99	10.43	9.68	61.21(36.17)*	29.11(54.16)*
东太平洋	沉降法($n=14$)	5 094	2.17	1.94	2.66	23.94	73.40
(金翔龙, 1997)	激光法($n=30$)	5 094	9.80		13.92	53.16	32.92

注：标注星号的括号内分别是指 36.17% 为粉砂粒径校正为 0.063~0.010 mm 的含量和 54.16% 为粘土粒径校正为 <0.010 mm 的含量； M_z 为平均粒径； M_d 为中值粒径； n 为样品数。

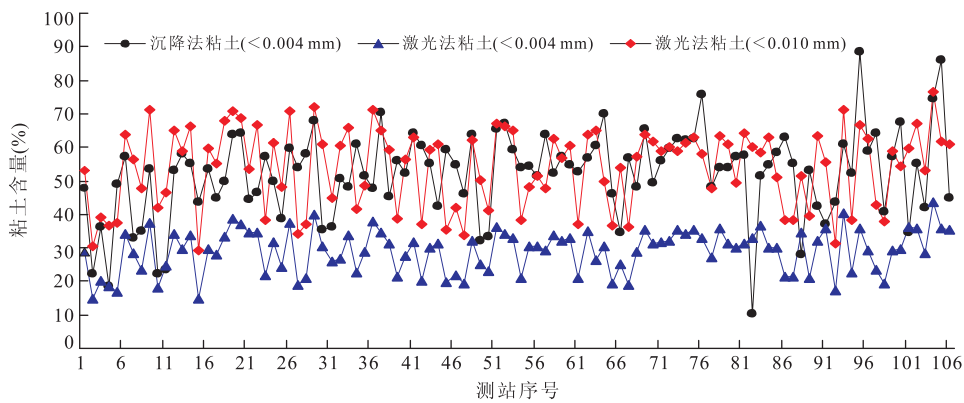


图 2 南海东部海域表层沉积物激光法(粘土粒径校正前后)粘土含量与沉降法对比

Fig. 2 Comparison of clay percentages by laser (clay diameter before and post calibration) with pipette grain size analysis of surface sediments from eastern South China Sea

25%~50%,在其组分名称后冠“质”字,如粘土质(clayey)、硅质、钙质;(3)组分含量 50%~75%,视图区位而定,I区:冠“XX 粘土”(如I₂ 含钙质硅质粘土),II区:冠“XX 硅质软泥”(如II₂ 含粘土钙质硅质软泥),III区:冠“XX 钙质软泥”(如III₂ 含硅质粘土质钙质软泥);(3)组分含量 75%~100%,直接以该组分名称命名(如I₁ 深海粘土、II₁ 硅质软泥、III₁ 钙质软泥);(4)组分之间用连接符号“—”连结,表示为混合沉积物,不细分(如IV₂ 含粘土—硅质—钙质软泥);(5)三组分含量相等(简分法:粘土 0~50%,硅质生物 0~50%,钙质生物 0~50%;细分法:粘土 25%~50%,硅质生物 25%~50%,钙质生物 25%~50%)时命名为粘土—硅质—钙质软泥;(6)水深>2 000 m的深海沉积物中

非生物组分的粘土级物质($\leq 4\text{ }\mu\text{m}$)含量<50%、而粒径>4 μm 的物质(浊积物、铁锰微粒、火山灰、冰碛物、陨石等)含量>50%,沉积物命名需特别处理.因这些沉积物具有特殊成因指示意义,在深海沉积物名称前加“含 XX”、“XX 质”或直接命名为“XX”(如含火山灰硅质粘土、火山灰质硅质粘土、火山灰),冠字、冠名法同上.

3 深海沉积物分类与命名方案

3.1 深海沉积物类型简分法(4 类)

深海沉积物类型简分法分为 I 深海粘土、II 钙

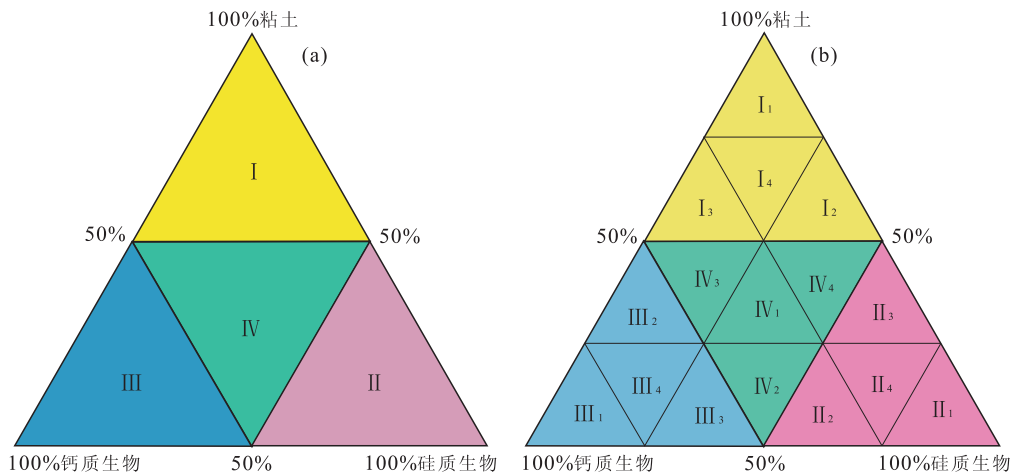


图 3 深海沉积物分类与命名简分法(a)和细分法(b)

Fig. 3 Simplified (a) and detailed (b) scheme of classification and nomenclature for deep-sea sediments

I. 深海粘土; II. 硅质软泥; III. 钙质软泥; IV. 粘土—硅质—钙质软泥; I₁. 深海粘土; I₂. 含钙质硅质粘土; I₃. 含硅质钙质粘土; I₄. 含钙质含硅质粘土; II₁. 硅质软泥; II₂. 含粘土钙质硅质软泥; II₃. 含钙质粘土质硅质软泥; II₄. 含粘土含钙质硅质软泥; III₁. 钙质软泥; III₂. 含硅质粘土质钙质软泥; III₃. 含粘土硅质钙质软泥; III₄. 含粘土含硅质钙质软泥; IV₁. 粘土—硅质—钙质软泥; IV₂. 含粘土—硅质—钙质软泥; IV₃. 含硅质—粘土质—钙质软泥; IV₄. 含钙质—粘土质—硅质软泥

表 4 深海沉积物的类型、名称和参数指标

Table 4 Types, names and parameter indices of deep-sea sediments

沉积物类型 型代号	沉积物类型的 参数指标(%)	沉积物类型 名称	沉积物类型 英文名称	沉积物类型名称 (张富元等,2006)
I	硅质生物 0~50,钙质生物 0~50,粘土 50~100	深海粘土	deep-sea clay	深海粘土类
II	粘土 0~50,钙质生物 0~50,硅质生物 50~100	硅质软泥	siliceous ooze	硅质软泥类
III	粘土 0~50,硅质生物 0~50,钙质生物 50~100	钙质软泥	calcareous ooze	钙质软泥类
IV	粘土 0~50,硅质生物 0~50,钙质生物 0~50	粘土—硅质—钙质软泥	clay siliceous calcareous ooze	粘土—硅质—钙质混合软泥类
I ₁	硅质生物 0~25,钙质生物 0~25,粘土 75~100	深海粘土	deep-sea clay	深海粘土
I ₂	钙质生物 0~25,硅质生物 25~50,粘土 50~75	含钙质硅质粘土	calcareous-bearing siliceous clay	硅质粘土
I ₃	硅质生物 0~25,钙质生物 25~50,粘土 50~75	含硅质钙质粘土	siliceous-bearing calcareous clay	钙质粘土
I ₄	硅质生物 0~25,钙质生物 0~25,粘土 50~75	含钙质含硅质粘土	siliceous-bearing calcareous-bearing clay	硅钙质粘土
II ₁	粘土 0~25,钙质生物 0~25,硅质生物 75~100	硅质软泥	siliceous ooze	硅质软泥
II ₂	粘土 0~25,钙质生物 25~50,硅质生物 50~75	含粘土钙质硅质软泥	clay-bearing calcareous siliceous clay	钙质硅质软泥
II ₃	钙质生物 0~25,粘土 25~50,硅质生物 50~75	含钙质粘土质硅质软泥	calcareous-bearing clayey siliceous clay	粘土质硅质软泥
II ₄	粘土 0~25,钙质生物 0~25,硅质生物 50~75	含粘土含钙质硅质软泥	clay-bearing calcareous-bearing siliceous ooze	粘土质—钙质硅质软泥
III ₁	粘土 0~25,硅质生物 0~25,钙质生物 75~100	钙质软泥	calcareous ooze	钙质软泥
III ₂	硅质生物 0~25,粘土 25~50,钙质生物 50~75	含硅质粘土质钙质软泥	siliceous-bearing clayey calcareous ooze	粘土质钙质软泥
III ₃	粘土 0~25,硅质生物 25~50,钙质生物 50~75	含粘土硅质钙质软泥	clay-bearing siliceous calcareous ooze	硅质钙质软泥
III ₄	粘土 0~25,硅质生物 0~25,钙质生物 50~75	含粘土含硅质钙质软泥	clay-bearing siliceous-bearing calcareous ooze	粘土质—硅质钙质软泥
IV ₁	粘土 25~50,硅质生物 25~50,钙质生物 25~50	粘土—硅质—钙质软泥	clay siliceous calcareous ooze	粘土—硅质—钙质混合软泥
IV ₂	粘土 0~25,硅质生物 25~50,钙质生物 25~50	含粘土—硅质—钙质软泥	clay-bearing siliceous calcareous ooze	粘土质硅质—钙质混合软泥
IV ₃	硅质生物 0~25,粘土 25~50,钙质生物 25~50	含硅质—粘土质—钙质软泥	siliceous-bearing clayey calcareous ooze	硅质—钙质粘土混合软泥
IV ₄	钙质生物 0~25,粘土 25~50,硅质生物 25~50	含钙质—粘土质—硅质软泥	calcareous-bearing clayey siliceous ooze	钙质硅质—粘土混合软泥

注:张富元等(2006)因当时未建立冠词冠名法,沉积物类型命名不够严谨,沉积物名称中出现“类”、“混合”定义不够明确的字。

质软泥、Ⅲ硅质软泥、Ⅳ硅质—钙质—粘土 4 类,除明确区分前 3 类沉积物外,还考虑到它们的混合沉积物(硅质—钙质—粘土). 深海沉积物类型简分法能够满足一般性海洋地质调查要求且能达到基本了解深海沉积物类型与分布的目的. 依据简分法对 4 类深海沉积物进行分类与命名,结果见图 3a,表 4.

3.2 深海沉积物类型细分法(16 种)

深海沉积物是多成因的,区域分布变化大,随着

调查研究不断深入,深海沉积物类型简分法不足以区分沉积物之间的局部和细微差别,为深刻认识深海沉积物的形成和时空分布规律,需要详细区分沉积物类型,在兼容简分法 4 类沉积物基础上,把深海沉积物细分为 16 种是非常必要的. 细分法分类形成的 16 种沉积物的类型、名称和参数指标见图 3b,表 4.

4 深海沉积物分类与命名的兼容性和可比性分析

4.1 与现代世界海洋沉积物类型与分布的兼容性分析

增加分辨率无疑能提高资料质量,值得商榷的是其地质意义有多少. 沉积物分类越细沉积特征评价越困难. 现代世界海洋沉积物类型与分布把海洋沉积物划分为深海粘土(deep-sea clay)、钙质沉积物(calcareous sediments)、硅质沉积物(siliceous sediments)、陆源沉积物(terrigenous sediments)、冰川沉积物(glacial sediments)和大洋边缘沉积物(ocean margin sediments) 6 类(李学伦, 1997; Chester, 2000). 前 3 类沉积物属于水深大、远离大陆的深海沉积物,基本上根据粘土、硅质生物、钙质生物的含量进行分类与命名;后 3 类沉积物水深小、受陆源沉积影响大,这些沉积物主要根据成因确定类型. 表 5 反映了海洋沉积物主要类型分布,但是未考虑深海粘土、钙质软泥、硅质软泥这三者相互混合的沉积物,实际上混合沉积物所占比例不少,深海沉积物分类与命名应客观反映混合沉积物的存在. 国内对深海沉积物的分类与命名,基本上强调沉积物粒度、地貌和成因 3 个因素,其分类原则不统一,缺乏量化指标(张富元等,2006). 目前我国使用的海洋调查规范把深海沉积物分为 26 种沉积物(Dean *et al.*, 1985;中国国家标准化管理委员会,2007),其种类繁多,混合沉积物分类不明确,每种沉积物的图形和量变指标不相同,可操作性差,实际使用非常困难.

笔者提出的深海沉积物类型简分法与现代世界海洋沉积物类型与分布具有良好的兼容性,在编制世界海洋沉积物类型与分布图时能充分利用已有基础资料,同时也充分考虑到混合类沉积物的存在. 深海沉积物类型细分法包含着 4 类 16 种沉积物,使深海沉积物分类与命名更加详细和全面. 今后可据不同的调查研究程度和目的选择简分法或细分法,满足不同要求和需求.

4.2 与浅海沉积物分类与命名的可比性分析

浅海沉积物分类由 Shepard(1954)提出以来,一直被大家认可和接受,1992 年被引入我国海洋地质调查规范. 该分类法的主要优点是:(1)参数简单,由砂、粉砂、粘土 3 个参数(或 3 个组分)组成;(2)定量统一,每隔 25%分类,分为 0~25%、25%~50%、

表 5 世界海洋沉积物的主要类型和分布面积(%) (王琦和朱而勤,1989)

Table 5 Major types and its distribution areas of sediments in world-wide oceans

沉积物类型		大西洋面积	太平洋面积	印度洋面积	总计
钙质软泥	有孔虫软泥	65.1	36.2	54.3	47.1
	翼足类软泥	2.4	0.1		0.6
硅质软泥	硅藻软泥	6.7	10.1	19.9	11.6
	放射虫软泥		4.6	0.5	2.6
深海粘土		25.8	49.1	25.3	38.1
大洋面积		23.0	53.4	23.6	100.0

50%~75%、75%~100%这 4 个等级;(3)冠名简便,0~25%组分不参与命名,25%~50%组分冠以质(粘土质砂),75%~100%组分单独命名(粘土);(4)3 个组分含量变化区间相等时,称为混合沉积物,由连接号“—”连接(砂—粉砂—粘土),3 组分排名不分先后,未进一步细分;(5)种类有限,共分 10 种沉积物. 从浅海到深海是一个逐渐过渡的过程,浅海、深海沉积既有共性又有特性,深海沉积物分类应秉承浅海沉积物分类的优点,与浅海沉积物分类相比,在图形(三角形)、类变指标(每类递增 25%)、种类数量(浅海 10 种、深海 16 种)、冠字冠名法、混合沉积物参与分类、可操作性方面两者具有可比性,使浅海、深海沉积物分类与命名呈渐变过程和有机联系.

5 结论

深海沉积物的必要条件、深海沉积物分类与命名的关键技术和方案归纳总结如下.

(1)深海沉积物的必要条件是水深 $>2\,000\text{ m}$,平均粒径(M_z):沉降法中 $M_z\leq 4\,\mu\text{m}$ 、激光法中 $M_z\leq 10\,\mu\text{m}$,粘土(沉降法中 $M_z\leq 4\,\mu\text{m}$,激光法中 $M_z\leq 10\,\mu\text{m}$)平均含量 $>50\%$;(2)深海沉积物分类与命名的 3 个基本参数是粘土、钙质生物、硅质生物;(3)沉降法与激光法粒度分析结果的主要差异是粘土含量和粘土粒径,沉积物分类与命名的粒度数据以沉降法粒度分析为准,用其他方法获得的粒度分析数据需与沉降法结果进行科学合理的对比和校正. 南海东部海域表层沉积物的激光法粘土粒径校正为 $<0.010\text{ mm}$ (粉砂粒径为 $0.063\sim 0.010\text{ mm}$),使粘土、粉砂含量和沉降法具有可比性;(4)利用沉积物涂片半定量鉴定分析沉积物中粘土、钙质生物、硅质生物及其含量;也可利用粒度和化学定量分析数据获得粘土、钙质生物、硅质生物含量;(5)按照深海沉

积物分类与命名的冠字冠名法,使深海沉积物类型命名严格量化、严谨和科学合理;(6)深海沉积物类型简分法划分出深海粘土、钙质软泥、硅质软泥、硅质—钙质—粘土 4 类,满足一般性海洋地质调查要求,达到基本了解深海沉积物类型的目的,在兼容世界深海沉积物类型现状的同时充分考虑到了混合沉积物的存在;(7)深海沉积物类型细分法划分出 16 种沉积物,在简分法基础上使深海沉积物分类更加详细和全面,满足海洋地质详细调查的要求,达到深入研究深海沉积物类型与分布的目的;(8)深海沉积物与浅海沉积物的分类与命名相比,在图形、类变指标、种类数量、冠字冠名法、混合沉积物表示法、可操作性等方面具有可比性,使浅海到深海的沉积物分类与命名呈渐变和有机联系。

致谢:衷心感谢海洋地质调查人员的辛勤工作和英国马尔文公司秦和义对粒度分析工作的帮助,感谢国家科技部的经费资助。

References

- Agrawal, Y. C. , Riley, J. B. , 1984. Optical particle sizing for hydrodynamics based on near forward scattering. *Society Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 20 (4): 68—76.
- Bischoff, J. L. , Piper, D. Z. , 1979. Marine geology and oceanography of the Pacific manganese Nodule Province. Plenum Press, New York and London, 397—436.
- Boström, K. , Joensuu, O. , Valdés, S. , 1972. Geochemical history of South Atlantic Ocean sediments since Late Cretaceous. *Marine Geology*, 12: 85 — 121. doi: 10. 1016/0025—3227(72)90023—0
- Chen, S. T. , Wang, J. , Zhu, Z. K. , et al. , 2004. Comparison of the grain size measured by the laser diffract instrument with that by the hydrometer; a case study of beach silts. *Journal of Sediment Research*, 3: 64—68 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. F. , Feng, X. L. , Liu, D. Y. , 2002. Correlation comparison between laser method and pipette-sieve method of grain size. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 32 (4): 608—614 (in Chinese with English abstract).
- Chester, R. , 2000. Marine geochemistry (second edition). Blackwell Science Ltd. , Oxford, 341—356.
- Cornillault, J. , 1972. Particle size analyzer. *Applied Optics*, 11: 265—265. doi: 10. 1364/AO. 11. 000265.
- Dean, W. E. , Leinen, M. , Stow, D. A. V. , 1985. Classification of deep sea fine grained sediments. *Journal of Sedimentary research*, 55: 250 — 256. doi: 10. 1306/212F868E-2B24-11D7-8648000102C1865D
- Demaster, D. J. , 1981. The supply and accumulation of silica in the marine environment. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45: 1715—1732.
- Ellis, D. B. , 1972. Holocene sediments of the South Atlantic Ocean; the calcite compensation depth and concentration of calcite, opal and quartz (Dissertation). Oregon State University, Corvallis, 1—77.
- He, G. W. , Liang, D. H. , Song, C. B. , et al. , 2005. Determining the distribution boundary of cobalt-rich crusts of guyot by synchronous application of sub-bottom profiling and deep-sea video recording. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30 (4): 509—512 (in Chinese with English abstract).
- Honjo, S. , Emery, K. O. , Yamamoto, S. , 1974. Non-combustible suspended matter in surface waters off eastern Asia. *Sedimentology*, 21: 555 — 575. doi: 10. 1111/j. 1365—3091. 1974. tb01790. x
- Hyeong, K. , Yoo, C. M. , Kim, J. , et al. , 2006. Flux and grain size variation of eolian dust as a proxy tool for the paleo-position of the intertropical convergence zone in the Northeast Pacific. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 241: 214 — 223. doi: 10. 1016/j. palaeo. 2006. 03. 011
- Jin, X. L. , 1997. Marine geology and deposit features for mineral belt of polymetallic Nodules in eastern Pacific Ocean. Ocean Press China, Beijing, 84—172 (in Chinese).
- Konert, M. , Vandenberghe, J. , 1997. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis; a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology*, 44: 523 — 535. doi: 10. 1046/j. 1365—3091. 1997. d01—38. x
- Kyte, F. T. , Leinen, M. , Heath, G. R. , et al. , 1993. Cenozoic sedimentation history of the central North Pacific: inferences from the elemental geochemistry of core LL44-GPC3. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 1719—1740. doi: 10. 1016/0016—7037(93)90109—A
- Lan, X. H. , Zhang, Z. X. , Li, R. H. , et al. , 2006. Comparison of different grain size analysis for sediments in the South Yellow Sea. *Marine Geology Letters*, 22(10): 5—7 (in Chinese with English abstract).
- Leinen, M. , 1977. A normative calculation technique for determining opal in deep-sea sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41: 671—676. doi: 10. 1016/0016—7037(77)90304—0
- Li, C. Z. , 1987. Sediment types and sedimentation of the central South China Sea basin. *Donghai Marine Science*, 5 (1—2): 10—18 (in Chinese with English abstract).

- Li, X. L., 1997. Marine Geology. Ocean University of Qingdao Press, Qingdao, 251—252 (in Chinese).
- Mazzullo, J. M., Meyer, A., Kidd, R. B., 1988. New sediment classification scheme for the ocean drilling program. In: Mazzullo, J. M., Graham, A. G., eds., Handbook for shipboard sedimentologists. ODP Technical Notes, Texas A&M University Press, Texas, 8: 45—67. doi: 10. 2973/odp. tn. 8. 1988
- McCave, I. N., Bryant, R. J., Cook, H. F., et al., 1986. Evaluation of a laser-diffraction-size analyzer for use with natural sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 56: 561—564.
- Meng, Y., Yan, S. Z., Chen, R. H., et al., 2001. Composition analysis of the biogenic and mineral clastics in the surface sediment of the northeastern South China Sea and its paleoenvironmental significance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(3): 17—22 (in Chinese with English abstract).
- Pan, J. H., Liu, S. Q., DeCarlo, E., 2002. The effects of marine phosphorization on element concentration of cobalt-rich crusts. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(5): 403—408 (in Chinese with English abstract).
- Rea, D. K., Leinen, M., Janecek, T. R., 1985. Geologic approach to the long-term history of atmospheric circulation. *Science*, 227(4688): 721—725. doi: 10. 1126/science. 227. 4688. 721
- Rotwell, R. G., 1989. Minerals and mineraloids in marine sediments; an optical identification guide. Elsevier Science Publishers Ltd., London and New York.
- Shepard, F. P., 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Research*, 24(3): 151—158. doi: 10. 1306/D4269774-2B26-11D7-8648000102C1865D
- Standardization Administration of the People's Republic of China, 2007. Specifications for oceanographic survey—Part 8 (marine geology and geophysics survey, GB/T12763. 8—2007). Standards Press of China, Beijing (in Chinese).
- Standardization Administration of the People's Republic of China, 2008. Particle size analysis-laser diffraction methods, Part I: General principles (GB/T 19077. 1—2008). Standards Press of China, Beijing (in Chinese).
- State Oceanic Administration, 1975. Specifications for oceanographic survey—part 4 (marine geology survey). Ocean Press China, Beijing, 16—29.
- Terry, R. D., Chilingar, G. V., 1955. Summary of “concerning some additional aids in studying sedimentary formations” by M. S. Shvetsov. *Journal of Sedimentary Petrology*, 25(3): 229—234.
- Tong, C. L., Gao, S., 2008. Comparison between grain size data by laser and pipette-sieve methods for tidal flat sediments on Jiangsu coast. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(1): 46—53 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zhu, E. Q., 1989. Marine sedimentology. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Weaver, C. E., Pollard, L. D., 1973. The chemistry of clay minerals. Elsevier, New York.
- Weiner, B. B., 1979. Particle and spray sizing using laser diffraction. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 170: 53—56.
- Weiss, E. L., Frock, H. N., 1976. Rapid analysis of particle size distributions by laser light scattering. *Powder Technology*, 14: 287—293. doi: 10. 1016/0032—5910(76)80077—0
- Zender, C. S., Miller, R. L., Tegen, I., 2004. Quantifying mineral dust mass budgets: terminology, constraints and current estimates. *EOS*, 85(48): 509—512.
- Zhang, F. Y., Feng, X. L., Zhang, W. Y., et al., 2011. 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. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(4): 767—775 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. Y., Li, A. C., Lin, Z. H., et al., 2006. Classification and denomination of deep sea sediments. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 37(6): 517—523 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. Y., Zhang, W. Y., Yang, Q. H., 2003. Characteristics of grain size distributions of surface sediments in the eastern South China Sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(3): 452—460 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. Y., Zhang, W. Y., Zhang, X. Y., et al., 2010. Indices of classification and nomenclature for deep sea sediment and principal component analysis. *Acta Oceanologica Sinica*, 32(6): 118—129 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. Y., Zhang, W. Y., Zhu, K. C., et al., 2008. Distribution characteristics of cobalt-rich ferromanganese crust resources on submarine seamounts in the western Pacific. *Acta Geologica Sinica*, 82: 796—803. doi: 10. 1111/j. 1755—6724. 2008. tb00633. x
- Zhang, F. Y., Zhang, W. Y., Zhu, K. C., et al., 2011. Resources estimation of Co-rich crust of seamounts in the Pacific. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(1): 1—11 (in Chinese with English abstract).

- Zhang, H. S., Zhao, P. D., Chen, S. Y., et al., 2001. Mineralizing characters of cobalt-rich ferromanganese nodule and crust in central Pacific Ocean seamount. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(2): 205—209 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. Y., Jin, H. Y., Zhang, F. Y., et al., 2009. Organic carbon distribution in the Yangtze River Estuary-Hangzhou bay and its adjacent sea area. *Advances in Earth Science*, 24(11): 1202—1209 (in Chinese with English abstract).
- Ziegler, C. L., Murray, R. W., Hovan, S. A., et al., 2007. Resolving eolian, volcanogenic, and authigenic components in pelagic sediment from the Pacific Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 254: 416—432. doi: 10.1016/j.epsl.2006.11.049
- ### 附中文参考文献
- 陈仕涛, 王建, 朱正坤, 等, 2004. 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. 泥沙研究, 3: 64—68.
- 陈秀法, 冯秀丽, 刘冬雁, 等, 2002. 激光粒度分析与传统粒度分析方法相关对比. 青岛海洋大学学报, 32(4): 608—614.
- 国家海洋局, 1975. 海洋调查规范(第四分册)海洋地质调查. 北京: 海洋出版社, 16—29.
- 何高文, 梁东红, 宋成兵, 等, 2005. 浅地层剖面测量和海底摄像联合应用确定平顶海山富钴结壳分布界线. 地球科学——中国地质大学学报, 30(4): 509—512.
- 金翔龙, 1997. 东太平洋多金属结核矿带海洋地质与矿床特征. 北京: 海洋出版社.
- 蓝先洪, 张志珣, 李日辉, 等, 2006. 南黄海沉积物不同粒度分析结果的对比研究. 海洋地质动态, 22(10): 5—7.
- 李粹中, 1987. 南海中部沉积物类型和沉积作用特征. 东海海洋, 5(1—2): 10—18.
- 李学伦, 1997. 海洋地质学. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 251—252.
- 孟翊, 严肃庄, 陈荣华, 等, 2001. 南海东北部表层沉积中生源和矿物碎屑组分分析及其古环境意义. 海洋地质与第四纪地质, 21(3): 17—22.
- 潘家华, 刘淑琴, DeCarlo, E., 2002. 大洋磷酸盐化作用对富钴结壳元素富集的影响. 地球学报, 23(5): 403—408.
- 全长亮, 高抒, 2008. 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. 沉积学报, 26(1): 46—53.
- 王琦, 朱而勤, 1989. 海洋沉积学. 北京: 科学出版社.
- 张富元, 冯秀丽, 章伟艳, 等, 2011. 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. 沉积学报, 29(4): 767—775.
- 张富元, 李安春, 林振宏, 等, 2006. 深海沉积物分类与命名. 海洋与湖沼, 37(6): 517—523.
- 张富元, 章伟艳, 杨群慧, 2003. 南海东部海域沉积物粒度分布特征. 沉积学报, 21(3): 452—460.
- 张富元, 章伟艳, 张霄宇, 等, 2010. 深海沉积物分类与命名的参数指标和主成分分析. 海洋学报, 32(6): 118—129.
- 张富元, 章伟艳, 朱克超, 等, 2011. 太平洋海山钴结壳资源量估算. 地球科学——中国地质大学学报, 36(1): 1—11.
- 张海生, 赵鹏大, 陈守余, 等, 2001. 中太平洋海山多金属结壳的成矿特征. 地球科学——中国地质大学学报, 26(2): 205—209.
- 章伟艳, 金海燕, 张富元, 等, 2009. 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. 地球科学进展, 24(11): 1202—1209.
- 中国国家标准化管理委员会, 2007. 海洋调查规范: 第 8 部分(海洋地质地球物理调查, GB/T 12763. 8—2007). 北京: 中国标准出版社.
- 中国国家标准化管理委员会, 2008. 粒度分析—激光衍射法: 第 1 部分: 通测(GB/T 19077. 1—2008). 北京: 中国标准出版社.