

东海内陆架陆源物质矿物组成对 粒度和地球化学成分的制约

徐方建^{1,2}, 李安春^{1*}, 万世明^{1,3}, 刘建国¹, 徐兆凯¹, 肖尚斌¹, 王金丽⁴

1. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

4. 中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037

摘要: 通过对东海内陆架 EC2005 孔柱状沉积物陆源矿物、粒度及地球化学成分分析, 尝试探讨三者之间的制约关系。该孔柱状沉积物主要矿物成分为粘土矿物、石英以及长石。石英和长石含量控制着平均粒径的大小。矿物含量与化学成分含量表现出较好的相关性, 体现了矿物对地球化学成分的控制。沉积物中各种矿物颗粒的大小差别造成了沉积物粒度的差异, 矿物间化学组分的不同是影响沉积物化学成分含量的主要因素, 其往往通过粒度组成间接地表现出来, 这就造成了“元素的粒度控制”表面现象, 实质上是矿物的种类和含量对粒度和地球化学成分起控制作用。

关键词: 矿物; 粒度; 地球化学成分; EC2005 孔; 东海内陆架; 沉积学。

中图分类号: P588.2

文章编号: 1000-2383(2009)04-0613-10

收稿日期: 2008-06-18

Terrigenous Mineral Constrains on the Grain-Size Distribution and Geochemical Composition of Sediments in the Inner Shelf of the East China Sea

XU Fang-jian^{1,2}, LI An-chun^{1*}, WAN Shi-ming^{1,3}, LIU Jian-guo¹, XU Zhao-kai¹, XIAO Shang-bin¹, WANG Jin-li⁴

1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

4. Key Laboratory for Continental Dynamics of the Ministry of Land and Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: The grain-size distribution, geochemical compositions and terrigenous mineral components of sediments of Core EC2005 in the inner shelf of the East China Sea (ECS) are analyzed to probe into their possible inherent relationships. Terrigenous components in Core EC2005 are dominated by clay minerals, quartz and feldspar. The variation of mean grain size of the downhole is mainly controlled by the quartz and feldspar content. The mineral components show good correlation to geochemical compositions, suggesting the mineral constrains on the chemical elements in the sediments. Our study shows that the grain-size and the geochemical composition of terrigenous mineral particles are the main factors that control the grain-size parameters and geochemical composition of sediments. The mineral constrains on the grain-size distribution and geochemical composition are crucial, whereas the grain-size distribution can only affect the geochemical composition via changes in mineral components.

Key words: mineral; grain-size; geochemical composition; Core EC2005; inner shelf of the East China Sea; sedimentology.

矿物是沉积物的主要成分, 是物源区母岩性质、
风化剥蚀、沉积物搬运过程以及盆地内部生物活动

与沉积后生作用等综合环境效应的结果。在重建沉
积时期的古环境条件时, 区分不同来源的各种矿物

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 40576032, 40776030, 40706025)。

作者简介: 徐方建 (1982—), 男, 博士研究生, 海洋沉积与矿物学专业。* 通讯作者: 李安春, E-mail: acli@ms.qdio.ac.cn

成分是必不可少的,这就需要对近代沉积物中的矿物成分进行有效的研究(Boulay *et al.*, 2003; Tamburini *et al.*, 2003; 刘志飞等, 2005; Gràcia *et al.*, 2006). 沉积物粒度受搬运介质、搬运方式、距离源区的远近以及沉积环境等因素控制,可以用于物质运动方式的判定和沉积环境类型的识别,其作为古气候、古环境变化研究的良好载体已经得到了广泛的应用. 近年来,对黄土(鹿化煜和安芷生, 1997; Sun *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2006)、湖泊沉积物(Shen *et al.*, 2005; 韩志勇和李徐生, 2006; Wünnemann *et al.*, 2006; 罗超等, 2008)、陆架沉积物(石学法等, 2002; 向荣等, 2006; Liu *et al.*, 2007a, 2007c)和深海沉积物(Boulay *et al.*, 2003; Tamburini *et al.*, 2003; Wan *et al.*, 2007a)等粒度资料的研究取得了丰硕的成果. 沉积物粒度与地球化学成分之间的关系也已经得到了广泛的研究(赵一阳和鄢明才, 1994; Ding *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2003; 肖尚斌等, 2005; Kiminami and Fujii, 2007; 刘建国等, 2007), 陈木宏等(2005)则讨论了深海沉积物的主要粒级指标及其与微体古生物化石壳体组成和陆源输入的关系,对于海洋沉积物陆源物质矿物组成与粒度、地球化学成分之间关系的系统研究却鲜见报道.

陆架沉积物记录了海陆变迁、海平面变化、河流入海和气候变化等地质信息,近年来陆架沉积尤其是内陆架泥质沉积研究倍受关注,并得到了较大发展(Díaz *et al.*, 1996; Allison *et al.*, 2000; Niedoroda *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2006, 2007d). 东海陆架是最宽广、平坦的大陆架之一,在全球变化研究中占有重要的地位. 对长江口和东海内陆架区域的地质研究表明,长江来源泥质沉积的相当部分沉积在东海内陆架(秦蕴珊等, 1987; Chen *et al.*, 2000; Hori *et al.*, 2002). 因此,东海内陆架区是物质的“汇”,本文利用取自该沉积区的 EC2005 孔柱状样,尝试对海洋沉积物陆源物质矿物组成与粒度、地球化学成分之间的关系进行初步探讨.

1 区域背景

在第四纪时期,东海海平面发生了数次大幅度的升降变化,在晚更新世的玉木冰期最盛期,东海海面大约低于现代平均海面 130 m,现代长江三角洲地区仍维持着稳定的湖相沉积(秦蕴珊等, 1987;

李乃胜等, 2000). 随着全球气候的回暖,海平面重新上升,东海陆架区逐渐发生了海侵. 东海内陆架浙闽沿岸泥质带,形成起始于全新世海侵初期,一直持续至今,稳定的泥质沉积则开始形成于 7.6~7.0 ka BP(Xiao *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2007d),精准的 AMS ^{14}C 测年数据将其定位于 7.3 ka BP(徐方建等, 2007).

2 材料与方法

研究所用沉积物岩心样品为上海海洋石油局第一海洋地质调查大队勘 407 轮于 2005 年 11 月在东海内陆架浙闽沿岸泥质带钻探获取,钻孔编号为 EC2005(121°20.0036'E, 27°25.0036'N, 水深 36 m, 见图 1),钻探深度 60.20 m,平均取心率 94.4%,其沉积历史可至末次冰消期,经历了湖相和海相沉积(徐方建等, 2009).

沉积物全样衍射样品低温烘干后研磨至 63 μm 以下,在中国科学院海洋研究所采用德国产 D8 Advance 衍射仪完成测试,分析选用参数: CuK α 辐射,管压 40 kV,管流 40 mA. 样品扫描角度 3°~45°2 θ ,步长 0.02°,仪器分析误差为 5%,分析样品数量为 256 个. 为便于对比,对 3 个长江样品和 2 个瓯江河口样品也进行了衍射分析,取样点分布见图 1.

地球化学分析样品低温烘干后研磨至 63 μm

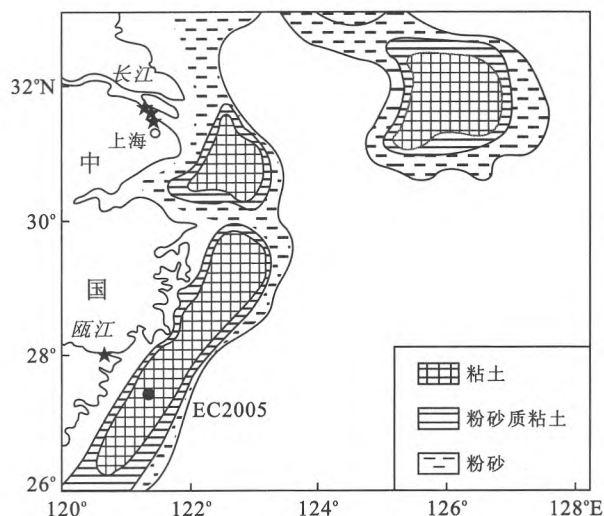


图1 研究区 EC2005 孔、河口样品站位和沉积物分布(重绘自秦蕴珊等, 1987)

Fig. 1 Locations of Core EC2005, estuarine samples and sediment distribution in the study area

图中黑圆圈代表 EC2005 孔站位,黑五角星代表长江和瓯江样品站位,瓯江 2 个站位基本重合

表 1 EC2005 孔地球化学分析质量报告

Table 1 Detection limit of geochemical compositions in Core EC2005

分析项目	检出限	分析项目	检出限
Ba,Cr,Sr	5 μg/g	Ni,Pb,Rb,Zn,Zr	2 μg/g
Cu	1 μg/g	SiO ₂ ,Al ₂ O ₃ ,Fe ₂ O ₃	0.1%
Ti,Mn,P	10 μg/g	MgO,CaO,Na ₂ O,K ₂ O	0.05%

以下,送至中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,采用全自动 X 射线荧光光谱仪压片法分析,仪器型号为 PW2440,由荷兰飞利浦公司生产.分析项目以及技术指标见质量报告(表 1);为了监控测试精度和准确度,分别进行了若干样品的重复分析与标样分析,标样类型为国家一级标准物质 GSD-9 和 GSD-10,重复样与一级标准物质合格率均为 100%,分析样品数量为 230 个.

粒度分析样品间隔 2 cm,其中 42.36~46.0 m,间隔 1 cm.样品采用 10% H₂O₂ 于 60℃ 水浴反应去除有机质后,在中国科学院海洋研究所用法国产 Cilas 940L 激光粒度分析仪完成粒度分析,仪器测量范围为 0.5~2 000 μm,重复测量的相对误差小于 2%.本研究涉及到的分析样品数量为 438 个.

3 结果与讨论

EC2005 孔地球化学成分、粘土矿物以及石英

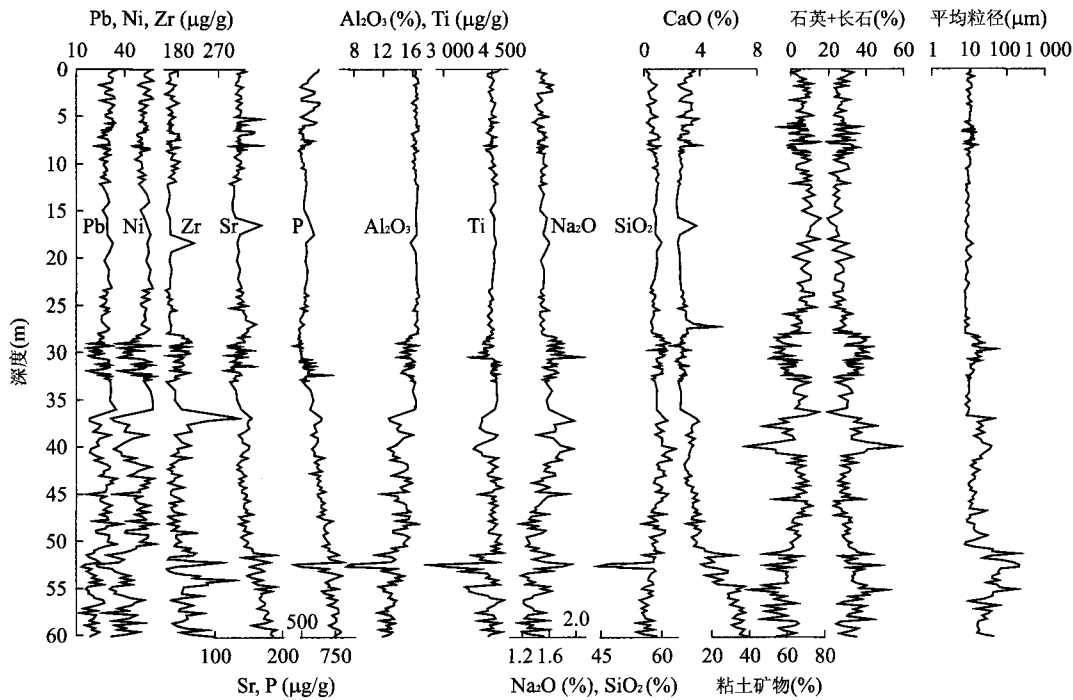


图 2 EC2005 孔沉积物地球化学成分、矿物含量以及平均粒径垂直分布

Fig. 2 Depth profiles of some geochemical compositions, mineral components and mean grain-size of Core EC2005

+长石百分含量、平均粒径垂直变化如图 2 所示.由于大部分地球化学成分如 Ba、Cr、Mn、Rb、Cu、Ti、Ni、Zn、Pb、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、K₂O 等具有相似的变化趋势,因此在图 2 中仅选择性地列出 Pb、Ni、Ti、Al₂O₃ 等, SiO₂ 也具有一定的相似性,但是在部分层位表现出相反的趋势.总体上,随沉积物粒度变细而增加;P、Sr、Zr、CaO 等含量则随沉积物粒度变细而呈现减少的趋势;Na₂O 随着沉积物粒度的总体减小表现出先增大后减小的趋势,与其他成分表现出明显的不同.

根据 Udden-Wentworth 标准将粒度类型分为砂(>63 μm)、粉砂(4~63 μm)和粘土(<4 μm)3 类,结合平均粒径以及化学成分作了相关性分析,结果见表 2.可见,平均粒径与多数化学成分(如 Ba、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Rb、Ti、Zn、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、K₂O 等)的相关系数为负值,与 P、Sr、Zr、CaO 则为正值.即 EC2005 孔绝大多数地球化学成分变化符合“元素的粒度控制律”:大多数元素的含量随粒度变细(砂→粉砂→粘土)而升高,少数元素的含量随粒度变细而降低,个别元素的含量随粒度变细先升后降,而在中等粒度粉砂中达到最大值(秦蕴珊等, 1987; 赵一阳和鄢明才, 1994),仅有 SiO₂、P、Zr、Na₂O 不符合该规律.对于 Na₂O,可能与原始样品没有洗盐有关. SiO₂ 与粉砂含量呈较好的正相

表 2 东海内陆架 EC2005 孔沉积物化学成分与粒度相关性

Table 2 Correlation between geochemical compositions and grain-size of Core EC2005

成分	Ba	Cr	Cu	Mn	Ni	P	Pb	Rb	Sr	Ti	Zn
平均粒径	-0.41	-0.37	-0.40	-0.22	-0.60	0.30	-0.51	-0.59	0.47	-0.60	-0.64
粘土	0.37	0.54	0.27	0.17	0.79	-0.58	0.71	0.87	-0.63	0.51	0.85
粉砂	0.21	0.12	0.34	0.15	0.22		0.14	0.14	-0.21	0.46	0.24
砂	-0.36	-0.39	-0.38	-0.20	-0.60	0.32	-0.50	-0.59	0.50	-0.60	-0.64
成分	Zr	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	平均粒径	粘土	粉砂
平均粒径	0.20	-0.42	-0.62	-0.61	-0.51	0.48		-0.55			
粘土	-0.48	0.14	0.85	0.79	0.78	-0.69		0.85	-0.72		
粉砂		0.54	0.20	0.25	0.11	-0.18			-0.78	0.27	
砂	0.22	-0.45	-0.62	-0.62	-0.52	0.51		-0.55	0.94	-0.75	-0.84

注:相关系数绝对值小于 0.10 的未在表中列出。

关,与砂含量却呈负相关,P 和 Zr 则与砂略呈正相关,与粉砂相关性很低。

对于同样未经过任何化学处理的样品,肖尚斌等(2005)通过对东海内陆架 DD2 孔泥质沉积物研究认为,CaO、Na₂O、Zr 和 Ti 等含量与平均粒径相关性很差。刘建国等(2007)对渤海泥质区柱状沉积物研究则认为,Mn 和 CaO 等与沉积物粒度粗细无明显正或负的相关性。对于这些不符合粒度控制律的异常现象,前人认为该情况往往不具备普遍性,只有局部的意义,多半是由于其他因素干扰而造成的(秦蕴珊等,1987;赵一阳和鄢明才,1994)。那么,究竟是有其他控制因素,还是仅仅是“干扰因素”所造成的?

EC2005 孔矿物衍射分析结果显示,粘土矿物[伊利石(云母)+高岭石+绿泥石]含量平均可达 64%,石英、长石矿物次之,占大约 30%,其他矿物含量总和很少,大约为 6%,考虑到仪器分析误差,仅对主要矿物进行说明。如图 2 所示,粘土矿物以及石英+长石含量与平均粒径有着非常好的对应关系,粘土矿物含量与平均粒径变化趋势相反,而石英+长石矿物含量则相同,而且其变化趋势与平均粒径的相似性较地球化学成分的变化更为明显。因此,可以认为平均粒径的变化与矿物含量变化二者之间存在密切联系。

在对东海内陆架 EC2005 孔沉积物分样过程中未见火山物质,很少能够发现贝壳,在岩心底部至 41 m 层位,显微镜下观察未能发现有孔虫,41 m 以上层位出现有孔虫但含量非常低,CaO 含量在 41 m 以上层位的平均值也仅为 2.8%,其中陆源方解石、白云石和长石等矿物中还包含有一定量的 CaO,因此可以认为贝壳、有孔虫等生物壳体除了对 CaO 以及 Sr 等含量会有一定的影响外,对该岩心其他地球

化学成分以及平均粒径的影响比较小;另外,岩心平均粒径和完全陆源的 Ti 元素(Wei *et al.*, 2004)(富存于较细粒级中,见表 2)表现为几乎完全相反的趋势(图 2),这也说明用于测试分析的 EC2005 孔沉积物样品基本可以视为陆源物质。

从本质上讲,陆源物质粒度实际上是矿物颗粒的大小,即粒度只是矿物颗粒尺寸的一个表征。经过表生地质作用的改造,沉积物中陆地来源的各种矿物通常颗粒大小差别较大,粘土矿物通常粒径较小(Gibbs, 1977; Wan *et al.*, 2007a),而石英、长石等矿物则粒径较大(Guo *et al.*, 2002; Boulay *et al.*, 2003; Wan *et al.*, 2007a),粒度的差别实际上是矿物组成差异的外在表现。如图 3a 所示,粘土矿物含量与较细粒级含量、石英+长石含量与较粗粒级含量均表现为非常好的正相关,说明细粒组分主要由粘土矿物组成,粗粒组分主要由石英、长石矿物组成。石英+长石含量与平均粒径同样表现出正相关,因此可以认为,东海内陆架 EC2005 孔沉积物陆源组份的平均粒径受控于较粗粒级的含量,而通常这一较粗粒级基本由石英和长石矿物组成。对东海大陆架沉积物碎屑矿物(63~250 μm)的研究也表明,轻矿物平均含量为 93.2%,而研究区则大于 95%,相应的重矿物含量极低,而轻矿物中石英长石平均含量为 87%(秦蕴珊等,1987),即沉积物粗粒级以石英、长石矿物为主,这与我们的结果是一致的。因此,东海内陆架 EC2005 孔陆源沉积物中石英、长石含量控制了平均粒径的大小,相应的粘土矿物含量与平均粒径表现出相反的变化趋势。

既然矿物含量控制了陆源物质平均粒径的大小,而前人研究认为,粒度又控制了元素含量的变化,那么是否可以认为矿物含量控制了化学元素(成分)的变化? 矿物是具有一定化学成分的单质或是

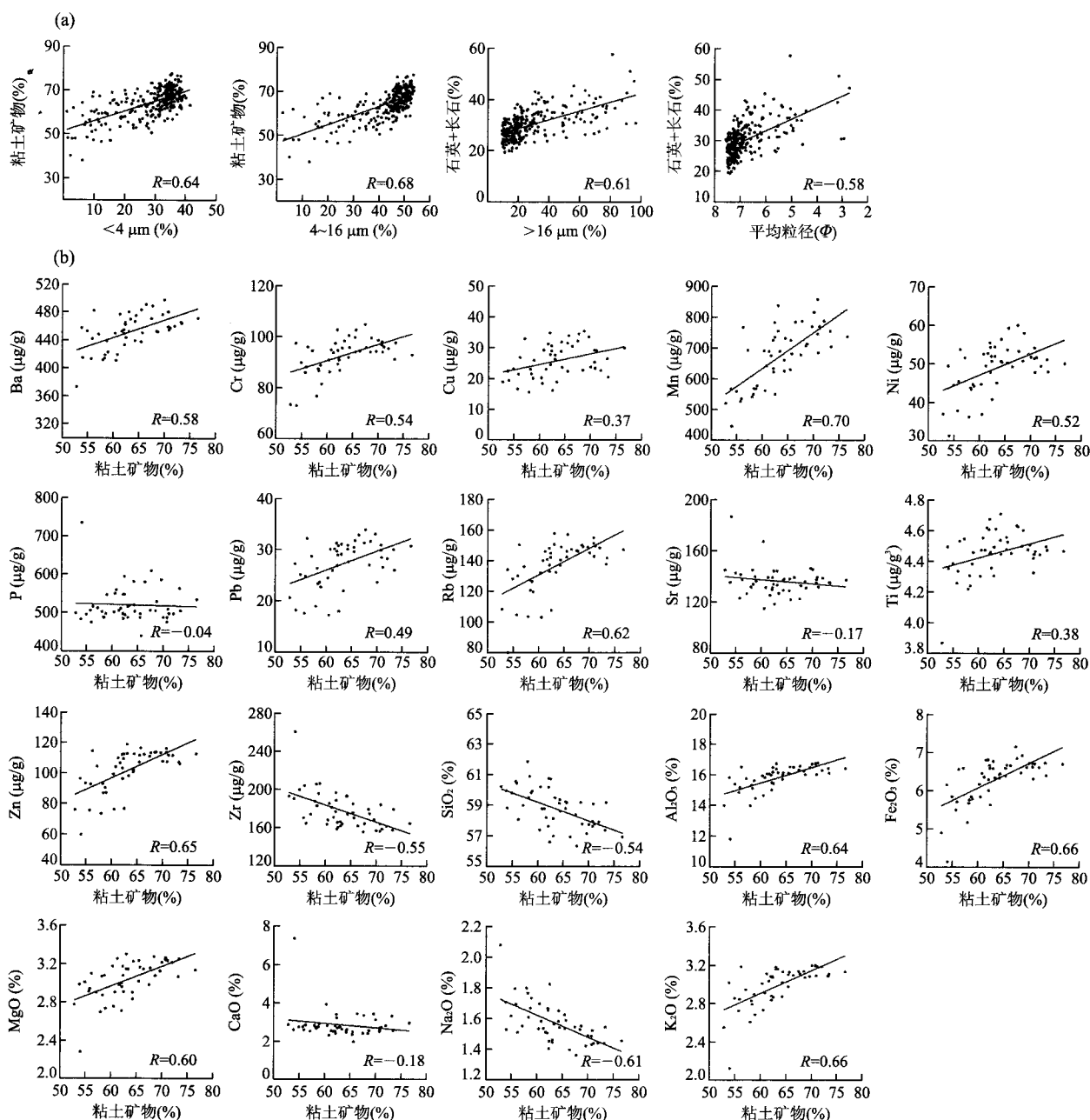


图3 EC2005孔沉积物矿物含量、粒度与地球化学成分的关系

Fig. 3 Relationship with mineral components, grain-size and geochemical compositions of Core EC2005

a. 粒度与矿物含量的关系; b. 地球化学成分与粘土矿物含量的关系

化合物,不同的矿物可能会含有一种或几种相同的成分,因此某种化学成分的分析结果实际上是含有该成分的一种或多种矿物的综合反映,从根本上说,受控于各种矿物含量,但是体现的是多种矿物的复合信号.将粘土矿物含量与各化学成分进行了相关性分析(图3b),可以发现,多数化学成分(如Ba、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Rb、Ti、Zn、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、MgO、 K_2O 等)与粘土矿物含量具有正相关关系,而Sr、Zr、 SiO_2 和CaO则为负相关关系,这同化学成分

与平均粒径表现出的相关性较为一致,而P则未表现出较好的相关性,这与该元素与平均粒径相关系数较低较为一致,比较特殊的是 Na_2O ,其与粘土矿物含量表现出明显的负相关,相关系数为-0.61,不同于与平均粒径表现出非常低的相关系数(小于0.10).

选取粘土矿物、石英、长石及其主要化学成分进行了相关性分析,如图4所示.可以看出,3种粘土矿物(伊利石、绿泥石、高岭石)与 SiO_2 含量均表现

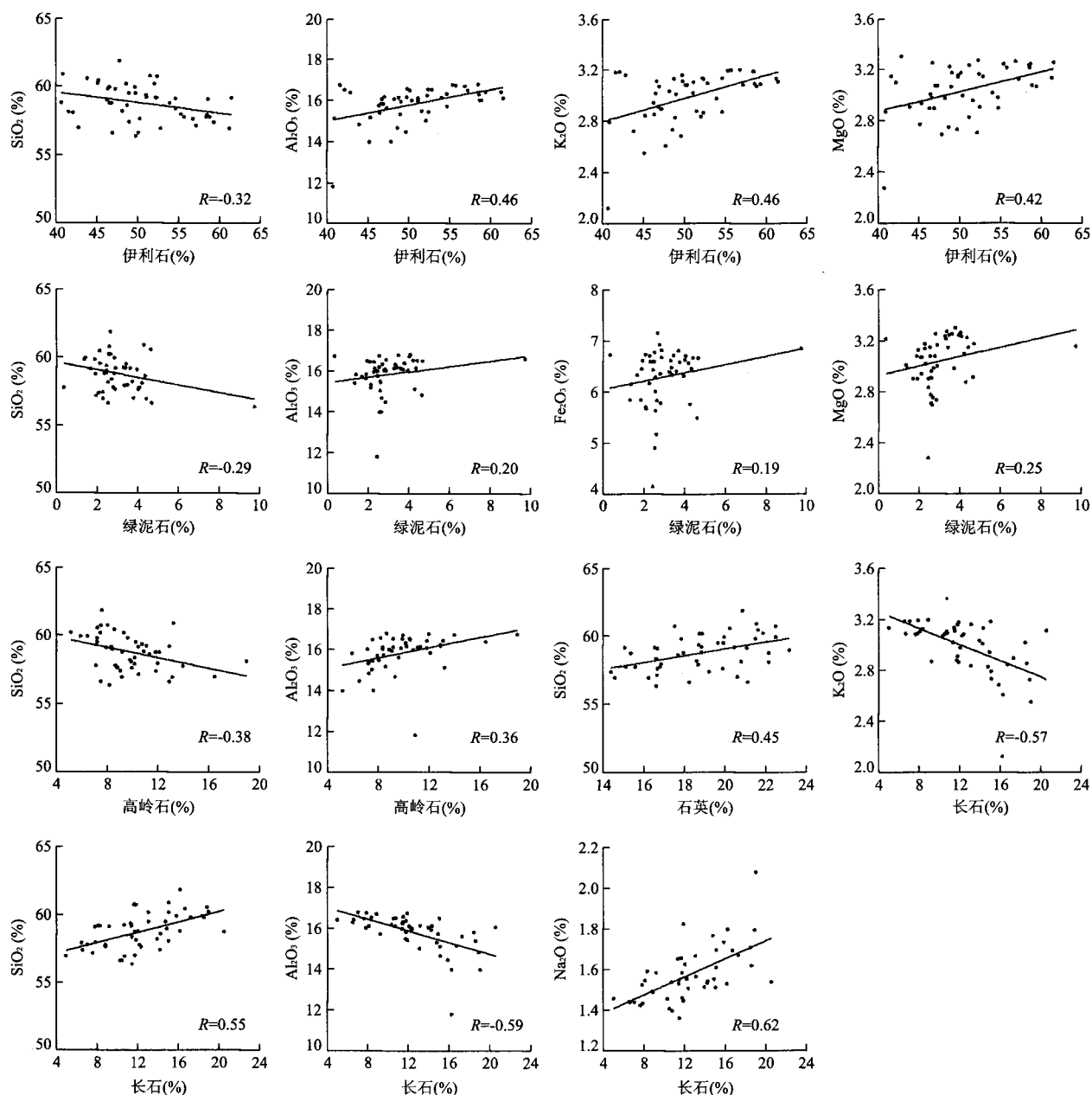


图 4 EC2005 孔沉积物单矿物与地球化学成分的关系

Fig. 4 Relationships between geochemical compositions and sediment single mineral of Core EC2005

为负相关,与 Al_2O_3 均表现为正相关,伊利石与 K_2O 和 MgO ,绿泥石与 Fe_2O_3 和 MgO 均表现为正相关.石英与 SiO_2 含量表现为正相关,长石则与 SiO_2 、 Na_2O 表现为正相关,与 Al_2O_3 、 K_2O 表现为负相关.因此可以认为,化学成分含量的变化受控于矿物含量的变化,石英、长石矿物主要控制了 SiO_2 、 Na_2O ,而各种粘土矿物主要控制了 Al_2O_3 、 K_2O 、 Fe_2O_3 和 MgO 等含量,这与前文粘土矿物和地球化学成分相关性分析结果一致,进一步证实了矿物对化学成分的控制作用.万世明(2006)对中国南海

ODP1146 站常量元素与陆源矿物组分的研究也表明,长石含量与 Na_2O 呈正相关,伊利石与 SiO_2 呈负相关、与 K_2O 和 MgO 则呈正相关;绿泥石与 SiO_2 呈负相关、与 Fe_2O_3 和 MgO 则呈正相关.

前人研究认为,元素之所以受到粒度控制,其原因之一为细的粘土粒级除其本身富含一定的元素外,还因粘土具有较强的吸附作用,常常吸附一些元素一起沉淀,而在海底陆源碎屑沉积物中, SiO_2 (主要是石英)占举足轻重的地位,通常在粗粒沉积物中抗风化力强的石英居多, SiO_2 在某种意义上是许多

元素的“稀释剂”(秦蕴珊等, 1987; 赵一阳和鄢明才, 1994)。然而, (1)“元素 SiO_2 主要是石英”的结论是需要重新考虑的, EC2005 孔石英含量平均为 17%, 而 SiO_2 含量平均为 58%, 考虑到不同矿物比重的差别, 另外, 长石以及粘土矿物中所含的 SiO_2 被忽视也是一重要的原因。对中国南海 ODP1146 站陆源矿物组分的研究表明, 粘土矿物和长石贡献了 63% 的 SiO_2 (万世明, 2006), 中国黄土以及南海 ODP1146 站(万世明, 2006)、黄河和长江(何良彪和刘秦玉, 1997)、东海气溶胶(李安春, 1997)粘土矿物化学成分分析表明, 伊利石中 SiO_2 含量均超过 45%, 绿泥石中 SiO_2 含量则为 20%~55%。因此, “元素 SiO_2 主要是石英”的阐述至少在中国临近区域内或者是对含粘土矿物较多的细粒沉积物是不适合的。(2)“在粗粒沉积物中抗风化力强的石英居多”也是需要探讨的, EC2005 孔石英含量平均为 17% 而长石含量则为 13%, 3 个长江样品石英和长石平均含量分别为 20% 和 16%, 2 个瓯江河口样品则分别为 24% 和 15%, 秦蕴珊等(1987)对长江和东海大陆架碎屑矿物分析时也曾指出, 长江物质石英和长石含量分别为 42.3% 和 45.6%, 而东海大陆架则分别为 42.1% 和 44.3%, 因此对粗粒沉积物在考虑石英对化学成分含量影响的同时还应考虑长石矿物的影响。(3)“ SiO_2 (主要是石英) 占举足轻重的地位, ……在某种意义上是许多元素的稀释剂”, 是考虑了石英矿物中的 SiO_2 , 而长石等矿物中所含 SiO_2 被忽视, 另外, 似乎也可以理解为石英矿物对化学成分形成了影响, 这同我们研究认为矿物控制了化学成分结论是相似的。

因此可以认为, 地球化学成分主要反映的是矿物信息, 而粒度只不过是矿物颗粒大小的一个统计数据, 粒度对元素的“控制”实际上只是一个表面现象, 实质上对元素起决定作用的是矿物种类和含量,

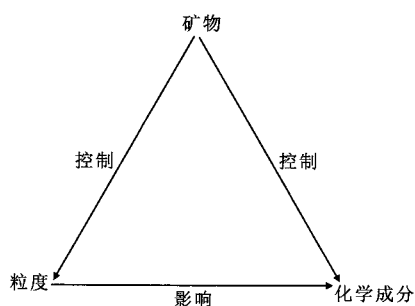


图5 陆源矿物、粒度与化学成分的相互关系

Fig. 5 Correlations among mineral components, grain-size and geochemical compositions of terrigenous sediment

特别是主要矿物的含量。Kiminami and Fujii(2007)通过对日本浊流岩研究也认为, 粒度对砂岩化学成分的影响是与砂岩自身的矿物组成相关的。由此, 我们提出矿物、粒度和地球化学成分三者之间的相互制约关系, 如图5所示, 对于东海内陆架 EC2005 孔沉积物来讲则具体为粘土矿物、石英和长石矿物, 矿物组成的含量变化控制了陆源物质平均粒径和地球化学成分的变化, 而粒度也间接通过矿物组成的变化对化学成分的变化产生影响, 这一矿物组成对粒度和地球化学成分的制约关系还有待于今后在其他海区进一步检验。

4 结论

(1) 东海内陆架 EC2005 孔柱状沉积物主要矿物成分为粘土矿物、石英以及长石, 其中粘土矿物平均含量大约为 64%, 石英、长石平均含量大约为 30%, 粘土矿物含量与较细粒级含量呈正相关, 而石英、长石含量与较粗粒级含量呈正相关, 说明沉积物的细粒组分主要为粘土矿物, 而粗粒级组分则主要由石英、长石组成。东海内陆架陆源沉积物平均粒径与石英+长石矿物含量呈良好的正相关, 体现了矿物对粒度的控制。

(2) 东海内陆架 EC2005 孔柱状沉积物中粘土矿物与多数化学成分表现为正相关, 与部分化学成分表现为负相关, 化学成分与其所赋存单种矿物的相关性分析也表明, 石英、长石矿物主要控制了 SiO_2 、 Na_2O , 而各种粘土矿物则主要控制了 Al_2O_3 、 K_2O 、 Fe_2O_3 和 MgO 等的含量, 体现了矿物对地球化学成分的控制。

(3) 东海内陆架 EC2005 孔柱状沉积物陆源矿物种类和含量特别是主要矿物含量控制了平均粒径的大小, 也控制了地球化学成分及其含量, 而粒度通过矿物组成变化对化学成分变化也会产生间接影响, 矿物种类和含量对地球化学成分的控制是决定性的, 而粒度对元素(化学成分)的“控制”实际上是粒度对地球化学成分的影响。

致谢: 感谢上海海洋石油局第一海洋地质调查大队勘 407 轮全体船员在 EC2005 钻探中的大力支持; 感谢中国科学院海洋研究所黄朋博士、李传顺博士在海上采样中的帮助; 感谢董太禄研究员、李静女士等参与 EC2005 孔分样的全体人员; 王红莉女士在粒度分析中给予了大力帮助; 中国地质科学院地

球物理地球化学勘查研究所帮助进行了地球化学测试;几位审稿专家提供的宝贵意见和建议使本文得以很大提高,谨致谢忱。

References

- Allison, M. A., Lee, M. T., Ogston, A. S., et al., 2000. Origin of Amazon mudbanks along the northeastern coast of South America. *Mar. Geol.*, 163(1–4): 241–256.
- Boulay, S., Colin, C., Trentesaux, A., et al., 2003. Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP Site 1144). In: Prell, W. L., Wang, P., Blum, P., eds., *Proc. ODP, Sci. Res.*, 184: 1–21. http://www-odp.tamu.edu/publications/184_SR/VOLUME/CHAPTERS/211.PDF.
- Chen, M. H., Zheng, F., Lu, J., et al., 2005. Original component of grain size index in core sediment from southwestern slope of the South China Sea and its paleoenvironmental implication. *Chin. Sci. Bull.*, 50(9): 896–902.
- Chen, Z. Y., Song, B. P., Wang, Z. H., et al., 2000. Late Quaternary evolution of the sub-aqueous Yangtze delta, China: Sedimentation, stratigraphy, palynology, and deformation. *Mar. Geol.*, 162(2–4): 423–441.
- Díaz, J., Palanques, A., Nelson, C. H., et al., 1996. Morphostructure and sedimentology of the Holocene Ebro prodelta mud belt (northwestern Mediterranean Sea). *Cont. Shelf. Res.*, 16(4): 435–456.
- Ding, Z. L., Yang, S. L., Sun, J. M., et al., 2001. Iron geochemistry of loess and red clay deposits in the Chinese Loess plateau and implications for long-term Asian monsoon evolution in the last 7.0 Ma. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 185(1–2): 99–109.
- Gibbs, R. J., 1977. Clay mineral segregation in the marine environment. *J. Sediment. Petrol.*, 47(1): 237–243.
- Gràcia, E., Martínez-Ruiz, F., Piñero, E., et al., 2006. Grain size and bulk and clay mineralogy of sediments from the summit and flanks of Southern Hydrate Ridge, Sites 1244–1250, ODP Leg 204. In: Tréhu, A. M., Bohrmann, G., Torres, M. E., et al., eds., *Proc. ODP, Sci. Res.*, 204: 1–19. http://www-odp.tamu.edu/publications/204_SR/VOLUME/CHAPTERS/110.PDF.
- Guo, Z. T., Ruddiman, W. F., Hao, Q. Z., et al., 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 416(6877): 159–163.
- Han, Z. Y., Li, X. S., 2006. Orbitally tuned time scale based on climate proxy indicator of grain size distribution in Nihewan basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(6): 773–779 (in Chinese with English abstract).
- He, L. B., Liu, Q. Y., 1997. Chemical characteristics of clay minerals in the sediments from the Yellow River and the Changjiang River. *Chin. Sci. Bull.*, 42(6): 488–492.
- Hori, K., Saito, Y., Zhao, Q. H., et al., 2002. Architecture and evolution of the tide-dominated Changjiang (Yangtze) River delta, China. *Sediment. Geol.*, 146(3–4): 249–264.
- Kiminami, K., Fujii, K., 2007. The relationship between major element concentration and grain size within sandstones from four turbidite sequences in Japan. *Sediment. Geol.*, 195(3–4): 203–215.
- Li, A. C., 1997. A study on fluxes and composition characteristics mineral aerosols from the low atmosphere of the eastern China seas (Dissertation). Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao (in Chinese).
- Li, N. S., Zhao, S. L., Wasiliev, B., 2000. Geology of marginal sea in the Northwest Pacific. Heilongjiang Educational Press, Harbin (in Chinese).
- Liu, J. G., Saito, Y., Wang, H., et al., 2007a. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinoform off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea. *Mar. Geol.*, 236(3–4): 165–187.
- Liu, J. G., Li, A. C., Chen, M. H., et al., 2007b. Geochemical characteristics of sediments in the Bohai Sea mud area during Holocene. *Geochimica*, 36(6): 559–568 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. G., Li, A. C., Xu, Z. K., et al., 2007c. Manganese abnormality in Holocene sediments of the Bohai Sea. *J. China Univ. Geosci.*, 18(2): 135–141.
- Liu, J. P., Xu, K. H., Li, A. C., et al., 2007d. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea. *Geomorphology*, 85(3–4): 208–224.
- Liu, J. P., Li, A. C., Xu, K. H., et al., 2006. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea. *Cont. Shelf. Res.*, 26(17–18): 2141–2156.
- Liu, Z. F., Colin, C., Trentesaux, A., 2005. Application of Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy in quantitative mineralogy of the South China Sea: Example of Core MD01-2393. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 25–29 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. Y., An, Z. S., 1997. The paleoclimate significance of grain size of Luochuan loess. *Chin. Sci. Bull.*, 42(1):

- 66—69 (in Chinese).
- Luo, C., Peng, Z. C., Liu, W. G., et al., 2008. Evidence from the lacustrine sediments of Lop-Nur Lake, Northwest China for the Younger Dryas Event. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(2): 190—196 (in Chinese with English abstract).
- Niedoroda, A. W., Reed, C. W., Das, H., et al., 2005. Analyses of a large-scale depositional clinoformal wedge along the Italian Adriatic coast. *Mar. Geol.*, 222—223: 179—192.
- Qin, R. S., Zhao, Y. Y., Chen, L. R., et al., 1987. Geology of the East China Sea. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Shen, J., Liu, X. Q., Wang, S. M., et al., 2005. Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18 000 years. *Quatern. Int.*, 136(1): 131—140.
- Shi, X. F., Chen, C. F., Liu, Y. G., et al., 2002. Trend analysis of sediment grain size and sedimentary process in the central South Yellow Sea. *Chin. Sci. Bull.*, 47(14): 1202—1207.
- Sun, D., Bloemendal, J., Rea, D. K., et al., 2002. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and Aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components. *Sediment. Geol.*, 152(3—4): 263—277.
- Sun, Y. B., Lu, H. Y., An, Z. S., 2006. Grain size of loess, palaeosol and red clay deposits on the Chinese Loess Plateau; Significance for understanding pedogenic alteration and palaeomonsoon evolution. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 241(1): 129—138.
- Tamburini, F., Adatte, T., Föllmi, K., et al., 2003. Investigating the history of East Asian monsoon and climate during the last glacial-interglacial period (0—140 000 years): Mineralogy and geochemistry of ODP Sites 1143 and 1144, South China Sea. *Mar. Geol.*, 201(1—3): 147—168.
- Wan, S. M., 2006. Evolution of the East Asian monsoon: Mineralogical and sedimentologic records in the South China Sea since 20 Ma (Dissertation). Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao (in Chinese).
- Wan, S. M., Li, A. C., Clift, P. D., et al., 2007a. Development of the East Asian monsoon: Mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 254(3—4): 561—582.
- Wan, S. M., Li, A. C., Stuut, J. B. W., et al., 2007b. Grain-size records at ODP Site 1146 from the northern South China Sea; Implications on the East Asian monsoon evolution since 20 Ma. *Sci. China (Ser. D)*, 50(10): 1536—1547.
- Wei, G. J., Liu, Y., Li, X. H., et al., 2004. Major and trace element variations of the sediments at ODP Site 1144, South China Sea, during the last 230 ka and their paleoclimate implications. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 212(3—4): 331—342.
- Wünnemann, B., Mischke, S., Chen, F., 2006. A Holocene sedimentary record from Bosten Lake, China. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 234(2—4): 223—238.
- Xiang, R., Yang, Z. S., Saito, Y., et al., 2006. East Asia winter monsoon changes inferred from environmentally sensitive grain-size component records during the last 2 300 years in mud area southwest off Cheju Island, ECS. *Sci. China(Ser. D)*, 49(6): 604—614.
- Xiao, S. B., Li, A. C., Liu, J. P., et al., 2006. Coherence between solar activity and the East Asian winter monsoon variability in the past 8 000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 237(2—4): 293—304.
- Xiao, S. B., Li, A. C., Jiang, F. Q., et al., 2005. Geochemical characteristics of recent 2 ka mud on the inner shelf of the East China Sea. *Geochimica*, 34(6): 595—604 (in Chinese with English abstract).
- Xu, F. J., Li, A. C., Liu, J. G., et al., 2007. Environmentally sensitive grain-size population at deposit centre on the inner shelf of the East China Sea. *Mar. Geol. Quat. Geol.*, 27(Suppl.): 16—20 (in Chinese).
- Xu, F. J., Li, A. C., Xiao, S. B., et al., 2009. Paleoenvironment evolution in the inner shelf of the East China Sea since the last deglaciation. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(1): 118—127 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Y., Jung, H. S., Lim, D. I., et al., 2003. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea. *Earth-Sci. Rev.*, 63(1—2): 93—120.
- Zhao, Y. Y., Yan, M. C., 1994. Geochemistry of sediments in Chinese shallow seas. Science Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈木宏, 郑范, 陆钧, 等, 2005. 南海西南陆坡区沉积物粒级指标的物源特征及古环境意义. *科学通报*, 50(7): 684—690.
- 韩志勇, 李徐生, 2006. 泥河湾盆地基于粒度气候指标的轨道调谐时间标尺. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(6): 773—779.
- 何良彪, 刘秦玉, 1997. 黄河与长江沉积物中粘土矿物的化学

- 特征. 科学通报, 42(7): 730—734.
- 李安春, 1997. 中国东部海域矿物气溶胶通量及物质组成特征的研究(博士学位论文). 青岛: 中国科学院海洋研究所.
- 李乃胜, 赵松龄, 鲍·瓦西里耶夫, 2000. 西北太平洋边缘海地质. 哈尔滨: 黑龙江教育出版社.
- 刘建国, 李安春, 陈木宏, 等, 2007b. 全新世渤海泥质沉积物地球化学特征. 地球化学, 36(6): 559—568.
- 刘志飞, Colin, C., Trentesaux, A., 2005. 傅里叶变换红外光谱(FTIR)方法在南海定量矿物学研究中的应用: 以 MD01-2393 孔为例. 地球科学——中国地质大学学报, 30(1): 25—29.
- 鹿化煜, 安芷生, 1997. 洛川黄土粒度组成的古气候意义. 科学通报, 42(1): 66—69.
- 罗超, 彭子成, 刘卫国, 等, 2008. 新仙女木事件在罗布泊湖相沉积物中的记录. 地球科学——中国地质大学学报, 33(2): 190—196.
- 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等, 1987. 东海地质. 北京: 科学出版社.
- 石学法, 陈春峰, 刘焱光, 等, 2002. 南黄海中部沉积物粒径趋势分析及搬运作用. 科学通报, 47(6): 452—456.
- 万世明, 2006. 近 2 千万年以来东亚季风演化的南海沉积矿物学记录(博士学位论文). 青岛: 中国科学院海洋研究所.
- 万世明, 李安春, Stuut, J. B. W., 等, 2007. 南海北部 ODP1146 站粒度揭示的近 20 Ma 以来东亚季风变化. 中国科学(D 辑), 37(6): 761—770.
- 向荣, 杨作升, Saito, Y., 等, 2006. 济州岛西南泥质区近 2 300 a 来环境敏感粒度组分记录的东亚冬季风变化. 中国科学(D 辑), 36(7): 654—662.
- 肖尚斌, 李安春, 蒋富清, 等, 2005. 近 2 ka 来东海内陆架泥质沉积物地球化学特征. 地球化学, 34(6): 595—604.
- 徐方建, 李安春, 刘建国, 等, 2007. 东海内陆架泥质沉积中心的环境敏感粒度组分. 海洋地质与第四纪地质, 27(增刊): 16—20.
- 徐方建, 李安春, 肖尚斌, 等, 2009. 末次冰消期以来东海内陆架古环境演化. 沉积学报, 27(1): 118—127.
- 赵一阳, 鄯明才, 1994. 中国浅海沉积物地球化学. 北京: 科学出版社.