

文章编号:1009-2722(2013)11-0014-08

南海西北部表层沉积物常量元素地球化学特征

蔡观强,陈泓君,钟和贤,崔兆国,李 顺

(国土资源部广州海洋地质调查局,广州 510075;国土资源部海底矿产资源重点实验室,广州 510075)

摘 要:分析了南海西北部 198 个表层沉积物的常量元素地球化学特征,研究了沉积物常量元素的含量分布特征、富集程度和粒度效应。结果显示,沉积物的常量元素以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 含量较高,平均值分别为 45.9%、8.53%、16.7%,其中 SiO_2 、 Al_2O_3 代表了陆源碎屑组分, CaO 代表了生物碎屑组分。陆架区具有较高的 SiO_2 含量,陆坡区具有较高的 Al_2O_3 、 CaO 含量,但是, Al_2O_3 的高含量在深水下陆坡区,而 CaO 的高含量在上陆坡岛礁区。总体上,常量元素 Fe_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 Na_2O 、 TiO_2 与 Al_2O_3 具有相似的含量分布特征,指示细粒组分的吸附作用;而 SiO_2 、 CaO 与 Al_2O_3 呈相反的分布特征以及负相关关系,反映了沉积物的常量元素受到石英矿物和碳酸盐矿物的稀释作用。大部分元素的富集因子介于 1~2 之间,富集特征不明显,表明碎屑物质主要为地壳来源,仅 CaO 、 MnO 出现较高的富集因子,指示陆坡区生物富集作用和深水陆坡区化学沉积作用的贡献。

关键词:表层沉积物;地球化学;常量元素;南海

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

南海作为西太平洋最大的边缘海,具有独特的地理位置和复杂的构造环境,其陆架和陆坡广泛分布的沉积盆地接受了周缘大陆和岛屿供应的大量碎屑物质,形成了快速的沉积物堆积,记录了南海形成与演化过程中的重要信息^[1-3]。近年来,关于南海现代沉积过程的探讨已成为南海地质研究的热点之一,这些工作主要集中在南海的北部和东北部,并且较为深入的分析了现今和晚新生代以来南海东北部沉积物来源的演化过程^[4-8]。但是,对于南海西北部沉积物的研究相对缺乏,制约了对整个南海北部沉积物来源、输送和沉积过程的认识。通过对南海西北部表层沉积物的常量

元素化学组成分析,探讨了沉积物的常量元素地球化学特征,进而分析了沉积作用和沉积环境对沉积物化学组成的影响。

1 样品采集与分析方法

研究区位于南海西北部(图 1),包括海南岛周缘主要陆架区、西沙海槽和西沙群岛邻近海域。本次研究的样品为广州海洋地质调查局 2007—2008 年在南海开展 1:100 万海南岛幅海洋区域地质调查时获取的表层沉积物,主要取样设备为箱式和抓斗。样品水深分布范围为 24~3 455 m,其中 103 件位于陆架区,95 件位于陆坡区。依据 Folk 沉积物分类法,主要沉积物类型为粉砂、砂质粉砂、含砾泥质砂和含砾泥,而砂、粉砂和泥的分布面积较小。

收稿日期:2013-08-01

基金项目:中国地质调查局项目(1212010611302);国家自然科学基金青年项目(41006025)

作者简介:蔡观强(1981—),男,博士,高级工程师,主要从事海洋沉积与地球化学研究工作。E-mail:caiguanqiang@sina.com

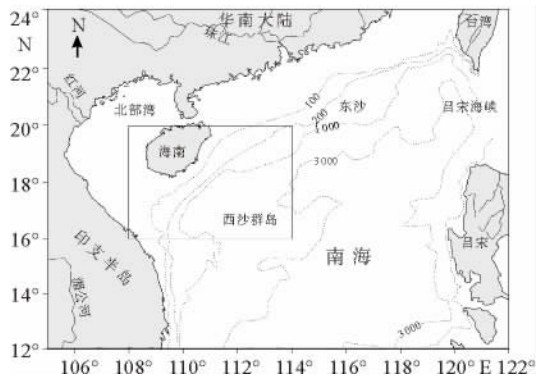


图 1 研究区地理位置

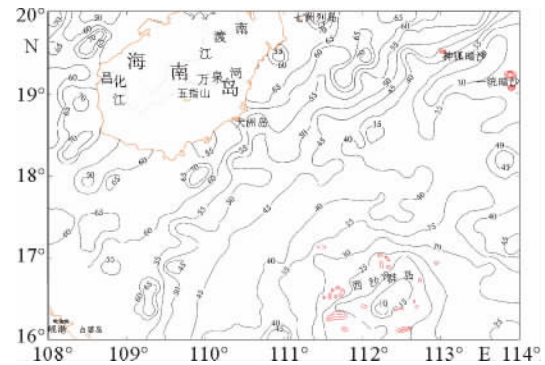
Fig. 1 Location map of the study area

沉积物样品经 110 °C 烘干后,研磨至粉末状,以备常量元素分析。SiO₂ 采用重量法,样品用 Na₂CO₃ 熔融, HCl 浸取,再经 HF、H₂SO₄ 处理,使 Si 以 SiF₄ 形式除去,再灼烧称重,处理前后重量之差为沉淀中的 SiO₂ 量。Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、K₂O、Na₂O、MnO、P₂O₅、TiO₂ 等氧化物以 HNO₃、HClO₄、HF 3 酸溶解,最后以 HCl 提取,制成酸度 10% 的试液,采用美国 PE 公司 optima 4300DV 全谱直读等离子体原子发射光谱仪进行测试。烧失量采用重量法,取试样在 1 000 °C 灼烧至恒重,灼烧减少的量为烧失量;碳酸钙分析,用 EDTA 标准溶液滴定;有机碳分析,采用 K₂Cr₂O₇ 法,在加热条件下将样品中有机碳氧化成 CO₂,剩余的 K₂Cr₂O₇ 用 Fe₂SO₄ 标准溶液回滴,按照 K₂Cr₂O₇ 的消耗量,计算样品中有机碳的含量。

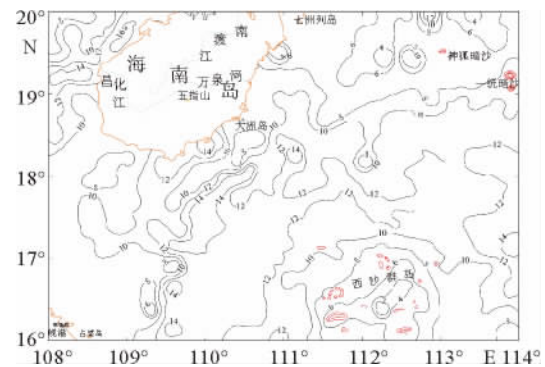
2 结果与讨论

2.1 常量元素含量分布特征

沉积物常量元素的主要组分为 SiO₂、Al₂O₃、CaO,三者的平均含量占常量元素总量的 70% 以上。SiO₂ 含量变化范围为 6.59%~84.1%,平均 45.9%,陆架区、陆坡区 SiO₂ 含量的平均值分别为 59.5%、31.1%,从陆架到陆坡其含量有逐渐变小的趋势,西沙群岛邻近海域含量最低(图 2)。Al₂O₃ 含量变化范围为 1.54%~17.2%,平均 8.53%,陆架区、陆坡区 Al₂O₃ 含量平均值分别为 8.75%、8.31%,总体上由陆架向陆坡 Al₂O₃

图 2 表层沉积物 SiO₂ 含量分布特征(%)Fig. 2 Distribution of SiO₂ in surface sediments

含量呈逐渐增加的趋势,最高值区位于调查区西北部的近岸陆架区,为泥质沉积物堆积区,低值区位于西沙群岛海域。另外,海南岛东、西两侧陆架表层沉积物的 Al₂O₃ 含量明显不同,东部陆架区 Al₂O₃ 含量明显较西部低,东部陆架的大部分区域表层沉积物的 Al₂O₃ 含量介于 6%~10%,西部陆架的大部分区域表层沉积物的 Al₂O₃ 含量介于 10%~14%(图 3)。CaO 含量变化范围为 1.49%~46.8%,平均值为 16.7%,陆架区、陆坡区 CaCO₃ 含量平均值分别为 16.8%、42.3%。CaO 含量的高值区位于西沙海台区,中心区域的 CaO 含量高于 35%;而低值区位于海南岛沿岸的浅水陆架区,从陆架区到陆坡区 CaO 含量均有逐渐增大的趋势,东南部深水下陆坡沉积物的 CaO 含量又降低(图 4)。CaO 绝大部分以碳酸盐形式构成了钙质生物碎屑的主体,因此,作为碳酸盐主要成分的 CaCO₃,其含量分布情况与 CaO 分布特征相一致。

图 3 表层沉积物 Al₂O₃ 含量分布特征(%)Fig. 3 Distribution of Al₂O₃ in surface sediments

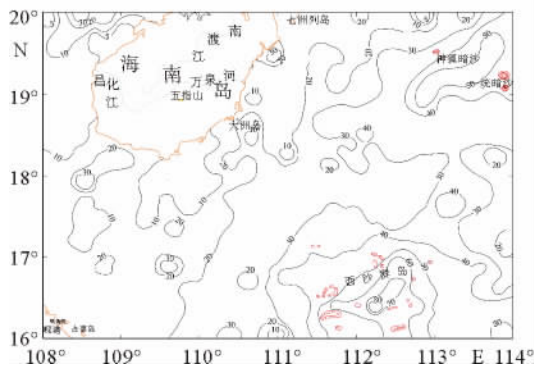


图4 表层沉积物 CaCO_3 含量等值线(%)

Fig. 4 Distribution of CaCO_3 in surface sediments

Fe_2O_3 含量变化范围为 0.58%~7.71%，平均 4.26%； TiO_2 含量变化范围为 0.07%~0.88%，平均 0.43%。 Fe_2O_3 、 TiO_2 含量分布特征与 Al_2O_3 十分相似，即由陆架向陆坡含量呈逐渐增加，高值区位于调查区西北部的近岸陆架区，低值区位于西沙群岛海域(图 5a、b)。

沉积物中 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 的含量较低，平均值分别为 1.81%、1.90%、1.81%，总体分布特征也相似，由陆架向陆坡含量逐渐增高，西部陆架较东部陆架高，最高值位于调查区西北部的近岸陆架区，低值区位于西沙群岛海域(图 5c、d、e)。

MnO 含量变化范围为 0.01%~2.12%，平均值为 0.26%，陆架区、陆坡区 MnO 含量平均值分别为 0.06%、0.47%；陆架区 MnO 含量明显低于陆坡区，从陆架区到陆坡区含量增大趋势明显，陆架区 MnO 含量基本上小于 0.1%，西沙群岛海域沉积物 MnO 含量也较低，多数介于 0.1%~0.2%，而东南部深水区 MnO 含量大于 0.8%，富集特征明显(图 5f)。

P_2O_5 含量变化范围为 0.03%~0.18%，平均值为 0.11%，陆架区、陆坡区 P_2O_5 含量平均值分别为 0.10%、0.11%。总体上，从陆架区到陆坡区 P_2O_5 含量没有发生明显的变化(图 5g)。

有机碳 (Org. C) 变化范围为 0.11%~1.55%，平均值为 0.54%，陆架区、陆坡区平均值分别为 0.45%、0.64%，从陆架区到陆坡区其含量略微增大(图 5h)。陆架区有机碳含量总体上介于 0.4%~0.8% 之间，且近岸陆架区域由于水浅和水动力条件较强，不利于有机质的保存，其有

机碳含量更低。烧失量变化范围为 4.34%~41.8%，平均值为 18.3%，陆架区、陆坡区平均值分别为 11.7%、25.4%，从陆架到陆坡其含量有逐渐增大的趋势。

2.2 元素富集特征及粒度效应

沉积物中某一元素相对于地壳元素丰度的富集因子 (EF) 定义为： $EF = (E/Al)_{\text{沉积物}} / (E/Al)_{\text{地壳}}$ ，如果 EF 值接近于 1，则该元素为地壳来源；如果 $EF > 10$ ，则该元素为非地壳来源。研究区沉积物的常量元素富集因子平均值分别为 SiO_2 (1.39)、 CaO (11.2)、 Fe_2O_3 (1.79)、 MgO (1.52)、 K_2O (1.31)、 Na_2O (1.08)、 MnO (4.13)、 P_2O_5 (1.42)、 TiO_2 (1.24)，大部分元素的富集因子介于 1~2 之间，富集特征不明显，表明碎屑物质主要为地壳来源。 CaO 、 MnO 2 个元素的富集因子相对较高，而且它们在陆架区和陆坡区差别明显，陆架区 CaO 、 MnO 的富集因子平均值分别为 5.95、1.16，而在陆坡区它们分别为 11.2、7.39，陆坡区沉积物中 CaO 、 MnO 富集程度更高。在陆架和陆坡的不同水深区域，沉积物的常量元素富集程度同样存在差异。由图 6 可见， CaO 、 MnO 含量在不同水深区域差异比较明显，外陆架 (水深介于 100~200 m) 沉积物中 CaO 含量较高，平均值达到了 12.8%，远高于 0~50 m 和 50~100 m 区域的内陆架，它们的 CaO 含量平均值分别为 7.6% 和 7.0%，而沉积物的 SiO_2 、 Al_2O_3 含量则在内陆架区较高。陆坡区 CaO 含量最高的水深范围为 200~500 m 区域，随着水深增加， CaO 含量逐渐减小，说明钙质生物最活跃的区域为上陆坡，尤其研究区的西沙群岛岛礁区，生物勃发，沉积物具有非常高的 CaO 含量。另外，陆坡区 MnO 含量随着水深增加其富集程度快速的升高，在水深 2 000~3 000 m 区域沉积物 MnO 平均值是上地壳的 10 倍，而水深 500~1 000 m 区域沉积物 MnO 平均值是上地壳的 2.3 倍。

元素的粒度效应指的是沉积物中化学元素含量随粒度变化而变化的特征，基本上存在 3 种模式：①绝大部分元素的含量随沉积物粒度变细而升高；②部分元素的含量随沉积物粒度变细而降低；③个别元素的含量随沉积物粒度变细先升后降，在中等粒度的粉砂中出现含量的极大值^[10]。

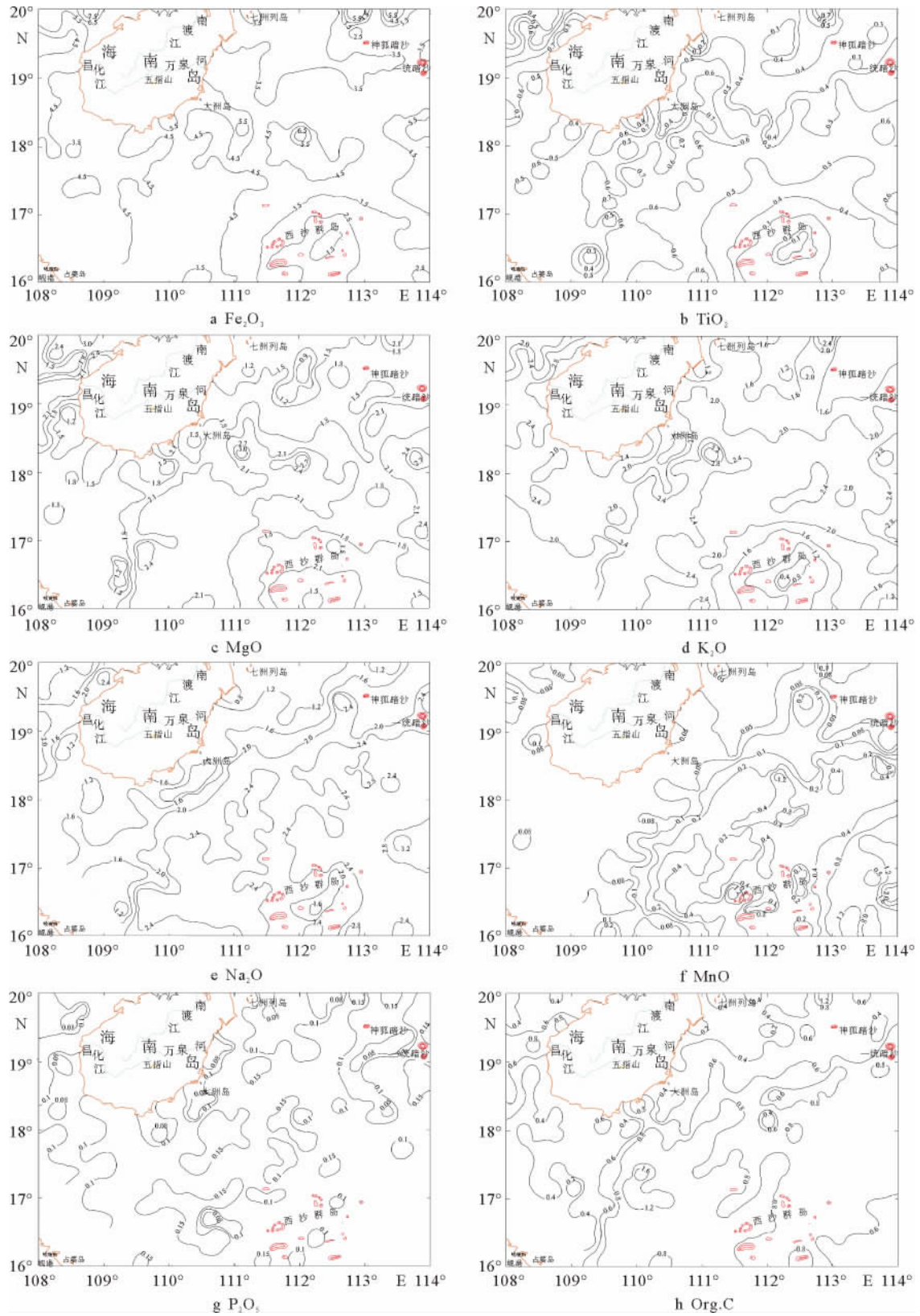


图 5 表层沉积物常量元素含量分布特征(%)

Fig. 5 The distributions of major elements in surface sediments

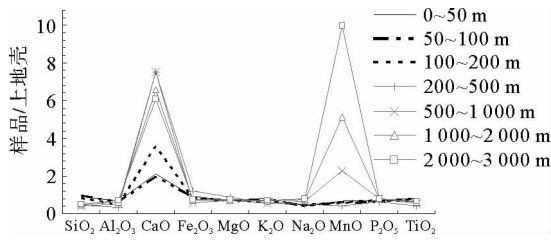


图6 不同水深区域表层沉积物常量元素含量的上地壳标准化(上地壳数据来源于文献[9])

Fig. 6 UCC-normalized major elements in surface sediments at different water depth

图7展示了研究区沉积物常量元素含量随粒度变化的二元图。沉积物的 Al_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 Na_2O 、 P_2O_5 、 TiO_2 含量随平均粒径 Φ 值的增大而增加,即含量随沉积物粒度变细而升高,表现出粒度效应的第1种模式;沉积物的 SiO_2 、 CaO 含量随平均粒径 Φ 值的增大而减小,即随沉积物粒度变细而降低,表现出粒度效应的第2种模式。

元素之所以受粒度控制,与沉积物粒度组成的端元组分有关。细的黏土粒级除其本身富含一定的元素外,还因黏土具有较强的吸附作用,常吸附部分元素一起沉淀,表现为被吸附元素与 Al_2O_3 具有十分相似的分布特征,如调查区的 Fe_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 Na_2O 、 TiO_2 。而沉积物粗粒组分,以抗风化能力强的石英居多,化学成分以 SiO_2 占有绝对的比重,其他元素的含量就低,故 Si 是许多元素的“稀释剂”。另外,在近海或浅海环境,生物贝壳或者有孔虫砂等也是沉积物粗粒的重要构成,这些生物碎屑的化学成分为 $CaCO_3$,其他成分含量很低,也是一种“稀释剂”。而常量元素 MnO 不表现随沉积物粒度变化的趋势。因此,南海西北部表层沉积物常量元素含量与粒度之间的变化关系,基本反映了黏土矿物的吸附作用、石英矿物和碳酸钙的稀释作用。

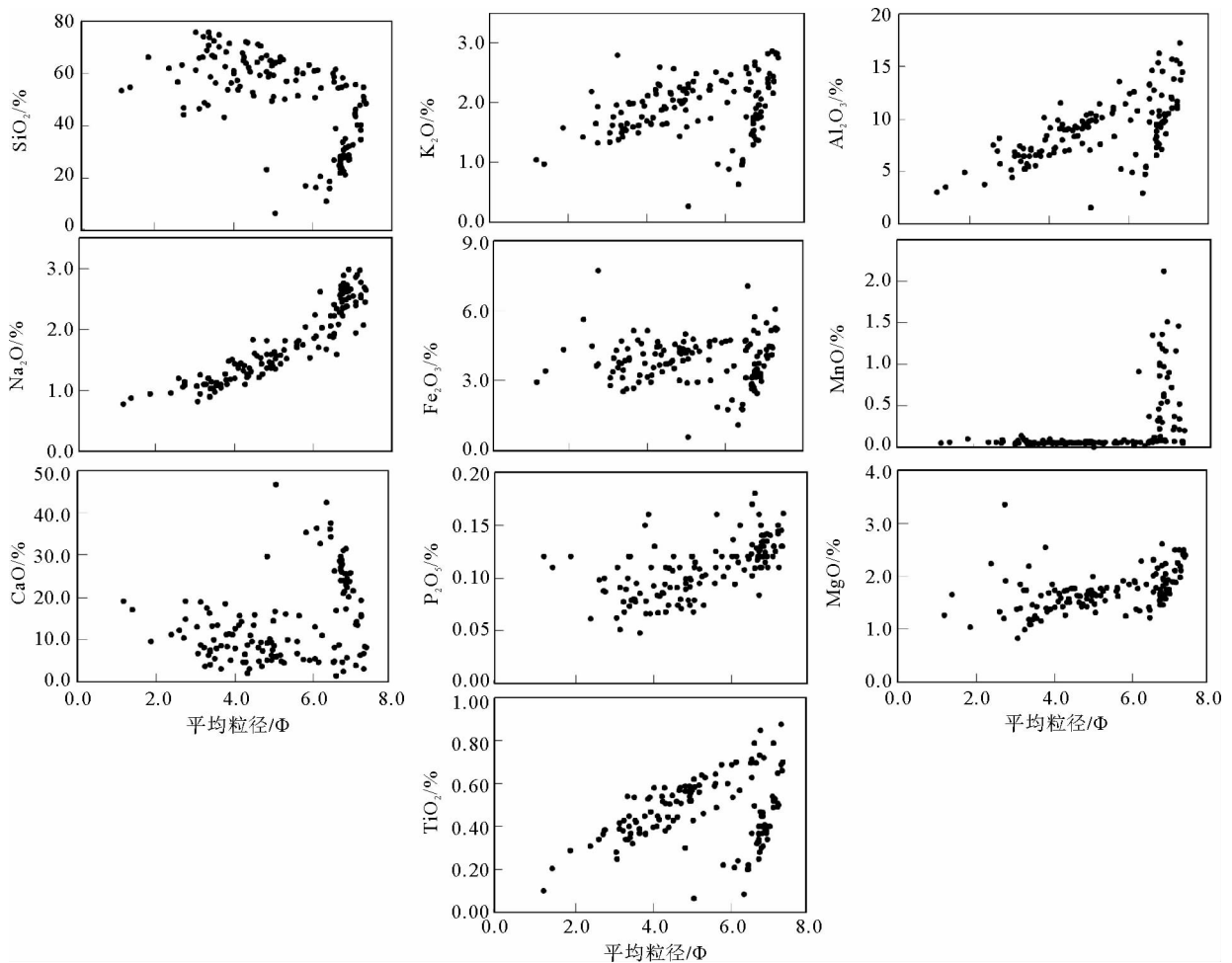


图7 沉积物常量元素含量与平均粒径相关图

Fig. 7 Correlations between major elemental abundances and mean grain size of sediments

2.3 相关分析与沉积环境分区

沉积物的元素地球化学组成受物质来源、粒度、沉积作用、沉积环境和成岩作用等多种因素

控制^[11-14]。通过对表层沉积物常量元素的相关分析,结合其分布特征,探讨南海西北部表层沉积物常量元素地球化学组成的控制因素。沉积物常量元素相关分析结果见表 1。

表 1 表层沉积物常量元素含量相关分析结果

Table 1 The results of correlation analysis for major elements in surface sediments

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	CaCO ₃
SiO ₂	1.00										
Al ₂ O ₃	0.23	1.00									
CaO	-0.94	-0.52	1.00								
Fe ₂ O ₃	-0.05	0.65	-0.17	1.00							
MgO	-0.23	0.25	0.02	0.76	1.00						
K ₂ O	0.44	0.83	-0.69	0.42	0.40	1.00					
Na ₂ O	-0.56	0.55	0.31	-0.15	0.22	0.27	1.00				
MnO	-0.39	0.33	0.23	-0.16	0.05	0.12	0.69	1.00			
P ₂ O ₅	-0.22	0.49	0.02	-0.03	0.24	0.25	0.53	0.30	1.00		
TiO ₂	0.53	0.89	-0.74	0.09	0.15	0.82	0.21	0.02	0.35	1.00	
Org. C	-0.37	0.54	0.15	-0.14	0.16	0.25	0.73	0.35	0.51	0.31	
CaCO ₃	-0.94	-0.53	1.00	-0.17	0.03	-0.70	0.30	0.21	0.02	-0.75	1.00
烧失量	-0.98	-0.36	0.98	-0.16	0.10	-0.58	0.47	0.33	0.14	-0.65	0.98

相关分析显示, SiO₂ 与 Fe₂O₃、MgO、Na₂O、TiO₂、MnO、P₂O₅、CaO、CaCO₃、Org. C 均呈负相关关系,说明 SiO₂ 的主要赋存矿物相基本不含这些元素组分,以石英矿物为主。沉积物的 Al₂O₃ 与 Fe₂O₃、K₂O、Na₂O、TiO₂ 呈现良好的正相关关系,而 Al₂O₃ 是化学风化产物富铝硅酸盐的主要成分,风化过程中淋漓出来的 Fe³⁺、K⁺、Na⁺、Ti⁴⁺ 非常容易被吸附到细粒的富铝黏土矿物中,一起迁移和沉淀。因此,Fe₂O₃、K₂O、Na₂O、TiO₂ 含量分布特征与 Al₂O₃ 十分相似,由陆架相陆坡,水深的增加有利于细粒组分的沉淀,沉积物中的这些常量组分含量也逐渐增加。因此,沉积物中的 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O、Na₂O、TiO₂ 代表的是陆源碎屑组分。

沉积物的 CaO、CaCO₃ 与陆源碎屑组分的 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 呈现明显的负相关关系,代表了生源钙质沉积,陆源碎屑组分和生源组分存在互为消长的关系,所以,在平面分布特征上表现出与陆源碎屑组分相反的变化趋势,即陆架区到陆坡区含量增加,而到深水下陆坡, CaO、CaCO₃ 含

量又开始减少。

综合研究区表层沉积物常量元素的空间分布特征以及它们的富集特征和控制因素发现,常量元素含量与沉积物类型密切相关,不同沉积区域地形地貌、水动力条件和物源的差异,决定了沉积物中陆源碎屑组分、钙质生物组分和化学沉积组分之间的相对含量。

陆架区:由于靠近陆缘,陆源碎屑供应充足,且波浪、潮流、海流等水动力条件相对较强,沉积物粒度较大,砾质泥质砂、含砾泥质砂、含砾砂、粉砂质砂等粗粒组分广泛分布于陆架区。这些粗粒沉积物其碎屑矿物以石英和长石为主,如含砾泥质砂的碎屑矿物中长石最高可达 10.2%,石英最高达 86.1%,因此,与粗粒碎屑矿物密切相关的常量元素 SiO₂ 含量在陆架区明显较高,并对其他元素起到明显的稀释作用。由近岸陆架向远岸陆架,随着水深和搬运距离的增加,远岸陆架区沉积物中的粗粒组分减小,而细粒组分增加,因此,以吸附形式存在于细粒黏土矿物中的 Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、K₂O、TiO₂ 等常量元素的含量逐渐

增加。

陆坡区:碎屑物质由陆架区向陆坡区的迁移,随着离海岸越来越远,波浪、潮流、海流等搬运介质的能量越来越小,水动力条件变弱,对沉积物的搬运、改造和分选能力变弱。沉积物的粒度变小,沉积物以粉砂、砂质粉砂、泥质粉砂等细粒沉积物为主,因此,碎屑矿物中黏土矿物含量较陆架区有所增加,并对许多元素起到明显的吸附作用,如MgO、K₂O、TiO₂等相对富集于陆坡沉积物中。另外,陆坡区由于生物活动频繁,有大量的浮游生物繁殖,如浮游有孔虫、硅藻等,因此,陆坡区表层沉积物中有孔虫壳体 and 生物贝壳及其碎片等生源物质的含量较高,从而控制了沉积物中CaO、CaCO₃、烧失量等与生物作用密切相关的元素在沉积物的含量。尤其在西沙群岛岛礁区,生源物质贡献最为明显,造成了该海域表层沉积物的陆源组分含量很低。

3 结论

南海西北部表层沉积物常量元素的主要组分为SiO₂、Al₂O₃、CaO,三者的平均含量占常量元素总量的70%以上。总体上,SiO₂含量从陆架到陆坡有逐渐变小的趋势,而Al₂O₃、CaO由陆架向陆坡呈逐渐增加的趋势。Fe₂O₃、TiO₂、MgO、K₂O、Na₂O含量分布特征与Al₂O₃十分相似,由陆架向陆坡含量逐渐增高,西部陆架较东部陆架高,最高值位于调查区西北部的近岸陆架区,低值区位于西沙群岛海域。

大部分元素的富集因子介于1~2之间,富集特征不明显,表明碎屑物质主要为地壳来源。CaO、MnO₂ 2个元素的富集因子相对较高,尤其在陆坡区它们的富集程度非常明显,指示钙质生物堆积作用和化学沉积作用对沉积物常量组分含量的影响。

沉积物常量元素含量与粒度之间的变化关系以及相关分析结果,显示了沉积物的常量元素含量受黏土矿物的吸附作用、石英矿物和碳酸钙的

稀释作用等的共同影响。而陆架区和陆坡区不同的沉积环境和水动力条件控制了上述作用的影响程度,决定了沉积物中陆源碎屑组分和生物碎屑组分之间的相对含量。

参考文献:

- [1] 钱建兴. 晚第四纪以来南海古海洋学研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1-167.
- [2] 汪品先, 等. 十五万年来的南海[M]. 上海: 同济大学出版社, 1995: 1-184.
- [3] 汪品先, 翦知湑, 赵泉鸿, 等. 南海演变与季风历史的深海证据[J]. 科学通报, 2003, 48(21): 2 228-2 239.
- [4] 邵磊, 李献华, 韦刚健, 等. 南海陆坡高速堆积体的物质来源[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(10): 828-833.
- [5] 邵磊, 乔培军, 庞雄, 等. 南海北部近代沉积物钕同位素分布及意义[J]. 科学通报, 2009, 54(1): 98-103.
- [6] Li X H, Wei G J, Liu Y, et al. Geochemical and Nd isotopic variations in sediments of the South China Sea: a response to Cenozoic tectonism in SE Asia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 211: 207-220.
- [7] Liu Z, Tuo S, Colin C, et al. Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation[J]. Marine Geology, 2008, 255: 149-155.
- [8] 高水土, 张德玉, 陈荣华, 等. 南海北部表层沉积物中黏土和碎屑矿物组成及其地质意义[J]. 海洋学报, 2008, 30(1): 86-92.
- [9] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [C] // Treatise on Geochemistry, Oxford: the Oxford Press, 2003, 3.
- [10] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [11] 朱赖民, 高志友, 尹观, 等. 南海表层沉积物的稀土和微量元素的丰度及其空间变化[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2 963-2 980.
- [12] 韦刚健, 刘颖, 邵磊, 等. 南海碎屑沉积物化学组成的气候记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(3): 1-4.
- [13] 中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛海区晚第四纪古海洋学研究(一)[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [14] 金秉福, 林振宏. 海洋沉积环境和物源的元素地球化学记录释读[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(1): 99-106.

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF MAJOR ELEMENTS IN SURFACE SEDIMENTS OF THE NORTHWESTERN SOUTH CHINA SEA

CAI Guanqiang, CHEN Hongjun, ZHONG Hexian, CUI Zhaoguo, LI Shun

(Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510075, China;
Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510075, China)

Abstract: 198 samples of surface sediments collected from the northwestern South China Sea were analyzed for major elements, in order to investigate their distribution pattern, enrichment mechanism and grain size effect. The sediments in the study area have relatively high contents of SiO_2 , Al_2O_3 and CaO , 45.9%, 8.53% and 16.7% respectively on average. The SiO_2 and Al_2O_3 abundance represents detrital materials, and CaO abundance is an indicator of the bioclast component. The samples taken from the continental slope are usually high in SiO_2 compared to those from continental shelf, but low in Al_2O_3 and CaO . The distribution patterns of Fe_2O_3 , K_2O , MgO , Na_2O and TiO_2 are similar to that of Al_2O_3 , indicating that they are absorbed by fine-grained clay minerals. The correlation indicates that the dilution effect caused by quartz and carbonate also can be founded. The enrichment index for most of the major elements ranges from 1 to 2, suggesting that they mainly derived from the continental crust. However, the relatively high abundance of CaO , MnO may indicate the significant contribution of biogenesis and chemical process on the continental slope.

Key words: surface sediments; geochemistry; major elements; South China Sea