

DOI:10.3724/SP.J.1140.2010.05053

南海西南海域表层沉积物 微量元素和稀土元素地球化学特征及其意义

蔡观强, 邱燕, 彭学超, 钟和贤

(广州海洋地质调查局, 广州 510760)

摘要:分析了南海西南海域表层沉积物的微量元素和稀土元素组成,结果表明,这些沉积物与大陆上地壳相比,具有相对低的 Zr、Sc、V、Nb、Hf、Th、REEs 含量,而 Co、Cu、Ni、Ta、Rb、Cs、Sr、Ba 的含量稍高;深海区表层沉积物比陆坡区具有较高的 Co、Zr、Sc、V、Nb、Hf、Ta、Th 和 REEs,陆坡区表层沉积物相对高的生物碎屑组分对这些元素起到了一定程度的稀释作用。因子分析和相关分析显示绝大部分微量元素和稀土元素主要受陆源组分的控制, Th、Cr、Co、Sc、Nb、Zr、Hf 和 REEs 等不活动元素之间的比值特征,并没有受到风化作用、海流搬运作用和海洋自生组分稀释作用的影响,较好地保存了源岩的化学组成特征。因此,南海西南海域表层沉积物的 La/Sc、Th/Sc、Th/Cr、Th/Co 比值和稀土配分曲线特征,指示这些沉积物的源岩具有陆壳成分的特点,以长英质岩石为主,缺乏深源的基性和超基性岩,火山碎屑物质成分很低,其源区主要为南海西部的印支大陆。陆架区和深海区表层沉积物具有十分相近的微量元素和稀土元素组成特征,指示它们的碎屑物质来源较为相同。

关键词:微量元素;稀土元素;物源;南海

中图分类号:P736.4 文献标识码:A 文章编号:0256-1492(2010)05-0053-10

海洋沉积物记录了大陆隆升剥蚀、气候变化和生物演化等信息,为这些作用和过程的研究提供了多种有效的指标,目前已成为“构造-气候-沉积”系统变化与全球变化研究的重要途径之一^[1-5]。南海是西太平洋最大的边缘海,对东亚季风气候有着重要的影响;同时,南海南部位于西太平洋暖池区,对全球气候变化具有敏感的响应^[6-8]。近年来,大量研究工作利用南海沉积物特征来进行南海古海洋演化和东亚季风演化分析,获得了许多具有突破性的认识^[9-10]。然而,南海独特的地理位置和复杂的构造背景决定了南海的沉积特征具有鲜明的区域性特点,其沉积物质来源具有丰富性和多样性。因此,分析南海沉积物的物质来源、迁移途径及各端元的贡献,对于正确理解南海沉积物组成特征所记录的地质和古环境信息具有重要的意义,为重建南海古海洋演化、探索东亚季风演化和全球气候变化的区域响应提供重要的理论依据。

沉积物的微量元素和稀土元素,尤其是稳定性较强的元素,是进行沉积物物源判别的有效指标。

基金项目:国家自然科学青年基金项目(41006025);中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金项目(MGE2010KG01)

作者简介:蔡观强(1981—),男,博士,主要从事海洋沉积地球化学研究,E-mail: caiguanqiang@sina.com

收稿日期:2010-01-19;改回日期:2010-06-30。文凤英编辑

研究表明,REE、Th、Sc、Co、Cr 等元素在沉积作用过程中具有较强的稳定性,很好地保存了源岩的化学组成特征^[11-14]。因此,通过对沉积物中这些元素及其比值特征的分析,能够获取沉积物来源及源区性质等信息。近年来,已在南海北部开展了大量沉积物源的元素地球化学示踪研究^[15-18],如 Wehausen 和 Brumsack(2002)根据南海北部 ODP1145 站沉积物的元素地球化学分析,揭示沉积物中的碎屑组分主要来自于珠江,从而推断该区域沉积物大部分为珠江源物质^[19]。然而,南海南部以及西南部沉积物来源的研究相对较少^[20-21]。南海西南海域地形复杂,但是,该区域是东南亚主干河流湄公河搬运物质及众多大型岛屿剥蚀物的堆积区,在南海沉积物来源、迁移和堆积科学的研究中具有重要的地位。本文通过对南海西南海域表层沉积物微量元素和稀土元素组成特征的分析,探讨这些表层沉积物化学组成的控制因素,揭示其所蕴含的地质与古环境意义。

1 材料和方法

研究区位于南海西南部海域,靠近印支半岛东南端,南部为巽他陆架和加里曼丹岛(图 1)。研究区西部为地形平坦的陆架和地形复杂的陆坡依次排

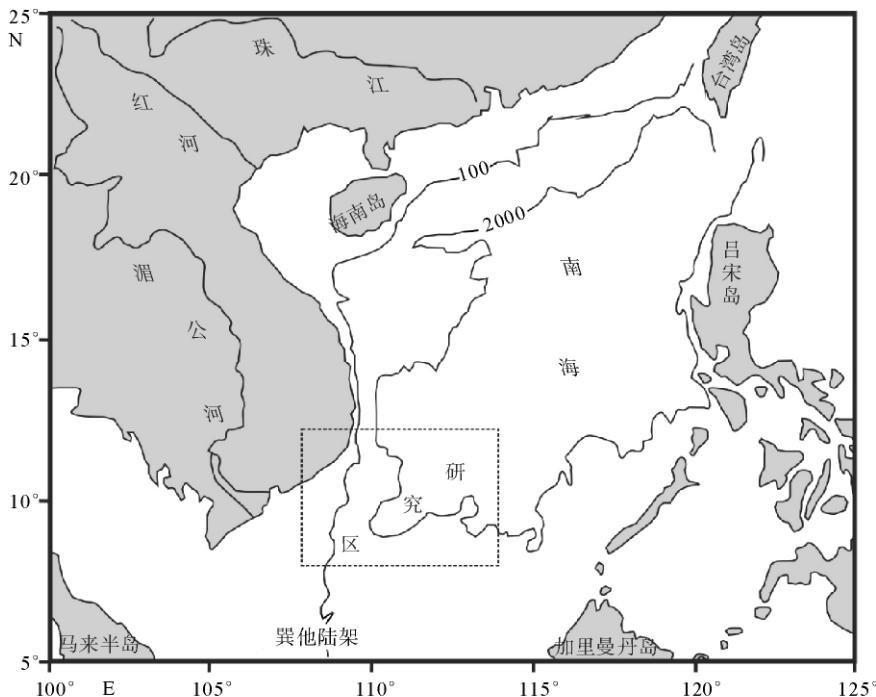


图 1 南海地理概况及研究区位置

Fig. 1 The map of the South China Sea and location of the study area

列, 构成陆架区和西部陆坡区; 东南部地形复杂, 发育有海山、海丘、洼地、盆地、岛屿和暗礁; 中部和东北部为地形平坦的南海西南海盆, 呈向北东方向增大的“V”型, 构成深海盆区。

本次研究的样品为广州海洋地质调查局 2000—2003 年在研究区开展海洋区域地质调查时采集的表层沉积物, 采样船为“海洋四号”调查船, 主要取样设备有箱式、抓斗。样品水深分布范围为 1 000~4 500 m, 其中 37 件位于陆坡区, 18 件位于深海盆地。表层沉积物名称依据粒度分析数据和涂片鉴定结果确定, 其中粒度分级采用温德华粒级标准分级, 沉积物分类按 Folk 等人确定的碎屑沉积物分类方案。西部陆架区水动力条件强, 均为陆源碎屑沉积, 有砂质砾 (sG)、砾质砂 (gS)、含砾砂 ((g) S); 西部陆坡、东南部陆坡为陆源碎屑—生物碎屑沉积, 主要有钙质生物泥 (M^{Ca})、硅质钙质生物泥 (M^{SiCa})、含硅质钙质生物泥 ($M^{(Si)Ca}$)、含钙质硅质生物泥 ($M^{(Ca)Si}$)、含硅质生物黏土 ($C^{(Si)}$)、含钙质生物黏土 ($C^{(Ca)}$)、含硅质钙质生物黏土 ($C^{(Si)Ca}$) 等; 东北部水深 $>3 000$ m 的陆坡和深水盆地地区沉积物类型包括泥 (M)、钙质生物泥 (M^{Ca})、含钙质生物含砾泥 ((g) $M^{(Ca)}$)、钙质生物泥质砂 (mS^{Ca}) 等。矿物分析结果显示, 沉积物中黏土矿物的含量较高, 碎屑矿物组分以轻矿物石英、长石为主; 重矿物含量极低, 一般以角闪石、绿帘石、黑云母、白云母和自生矿物海

绿石、微结核等较为常见。

表层沉积物在 60 °C 温度下烘干, 并研磨成 200 目粉末。微量元素和稀土元素分析采用等离子体光谱法, 取试样用盐酸、氢氟酸、高氯酸加热分解, 制成 2% 的盐酸溶液, 用 ICP-AES 进行测定。样品的处理和分析流程按海洋区域地质调查规范的要求进行, 分析测试工作在广州海洋地质调查局实验测试所完成。

2 结果

研究区表层沉积物的微量元素和稀土元素含量的统计结果见表 1。

南海西南海域表层沉积物微量元素含量的平均值与大陆上地壳平均值 (UCC) 相比具有相对低的 Zr、Sc、V、Nb、Hf、Th, 而 Co、Cu、Ni、Ta、Rb、Cs、Sr、Ba 的含量稍高于大陆上地壳, Cr 含量与之相近 (图 2)。样品 Co、Cu、Ni 含量的平均值分别为 22.72×10^{-6} 、 51.62×10^{-6} 、 76.13×10^{-6} , 明显高于南海北部珠江沉积物中这些元素的含量 (平均值分别为 18×10^{-6} 、 38×10^{-6} 、 35×10^{-6}); 但是, 低于大洋深海沉积物, 如西太平洋褐色黏土沉积物 Co、Cu、Ni 含量的平均值分别为 26×10^{-6} 、 396×10^{-6} 、 184×10^{-6} 。Zr、Sc、V、Nb、Hf、Th 含量均低于它们在珠江沉积物和深海沉积物中的含量; 与西太平洋

褐色黏土相比, 南海西南海域表层还具有明显低的 Mn、Cu、Ni。另外, 研究区表层沉积物的微量元素含量随水深变化也呈现规律性, 总体上, 上陆坡 (1 000~2 000 m 水深范围) 与下陆坡 (2 000~3 500

m 水深范围) 表层沉积物的微量元素含量较为相近, 下陆坡沉积物 Cu、Ni、Sr、Ba 含量有所增加; 深海区 (大于 3 500 m 范围) 表层沉积物比陆坡区具有较高的 Co、Zr、Sc、V、Nb、Hf、Ta、Th 含量 (图 2)。

表 1 南海西南海域表层沉积物微量和稀土元素平均值 ($\times 10^{-6}$) 及特征参数

Table 1 The trace elements, REEs average contents and characteristic parameters for surficial sediments from the southwestern SCS ($\times 10^{-6}$)

化学组成	上陆坡 (21)	下陆坡 (16)	深海区 (18)	平均值 (55)	UCC	PAAS	珠江沉积物	西太平洋褐色黏土
Co	19.94	19.58	28.92	22.72	17.3	25.7	18	26
Cu	41.07	65.68	57.21	51.62	28	50	38	396
Ni	75.03	90.83	68.06	76.13	47	58	35	184
Cr	97.82	87.83	91.19	93.27	92	124.5	86	61
Zr	64.07	52.38	100.7	73.15	193	200	270	180
Rb	77.34	65.53	123.8	89.37	84	160	93	103
Sr	589	602	185	462	320	200	100	240
Cs	5.40	5.51	8.51	6.41	4.9	15	7.4	9.5
Ba	828	1122	687	850	624	650	340	3060
Sc	9.90	8.74	14.07	10.96	14	16	16.5	26
V	77.58	70.51	114.4	87.67	97	150	105	118
Nb	8.87	7.90	15.53	10.77	12	1.9	22	18
Hf	2.40	2.38	3.51	2.75	5.3	6.3	8.4	8.2
Ta	1.09	1.19	1.75	1.33	0.9	1.12	1.7	1.1
Th	7.81	7.30	11.68	8.93	10.5	12.3	15	9
Y	16.10	15.80	16.40	16.11	21	27	30	68
Σ LREE	102.2	97.1	160.3	119.7	133.8	152.8	256.7	127.1
Σ HREE	16.41	16.21	20.40	17.61	14.34	20.11	22.53	14.98
Σ REE	118.6	113.3	180.7	137.3	148.1	173.0	279.2	142.1
L/H	6.22	6.01	7.92	6.73	9.33	7.60	11.39	8.49
$(La/Sm)_n$	4.27	3.66	3.43	3.87	4.15	3.53	4.62	2.46
$(Gd/Yb)_n$	2.47	2.37	2.69	2.52	1.62	1.36	2.31	1.69
δ Eu	0.66	0.69	0.65	0.66	0.69	0.68	0.63	0.83
δ Ce	1.04	1.07	1.64	1.24	0.97	1.05	1.02	0.93
La/Y	1.60	1.47	1.94	1.68	1.48	1.19	2.03	0.38
Nb/Ta	9.23	8.07	9.87	9.13	13.33	1.70	12.94	16.36
Zr/Hf	27.11	22.41	29.63	26.84	36.42	31.75	32.14	21.95
Th/Sc	0.80	0.84	0.84	0.82	0.75	0.77	0.91	0.35
La/Sc	2.63	2.70	2.29	2.54	2.21	2.00	3.70	1.00
Th/Cr	0.09	0.09	0.14	0.11	0.11	0.10	0.17	0.15
La/Co	1.31	1.22	1.17	1.24	1.79	1.25	3.39	1.00
Th/Co	0.39	0.37	0.41	0.39	0.61	0.48	0.83	0.35
La/Nb	2.95	3.03	2.07	2.69	2.58	16.84	2.77	1.45

注: L/H = Σ LREE / Σ HREE, n 为球粒陨石标准化, UCC 数据见文献 [22], PAAS 数据见文献 [23]。

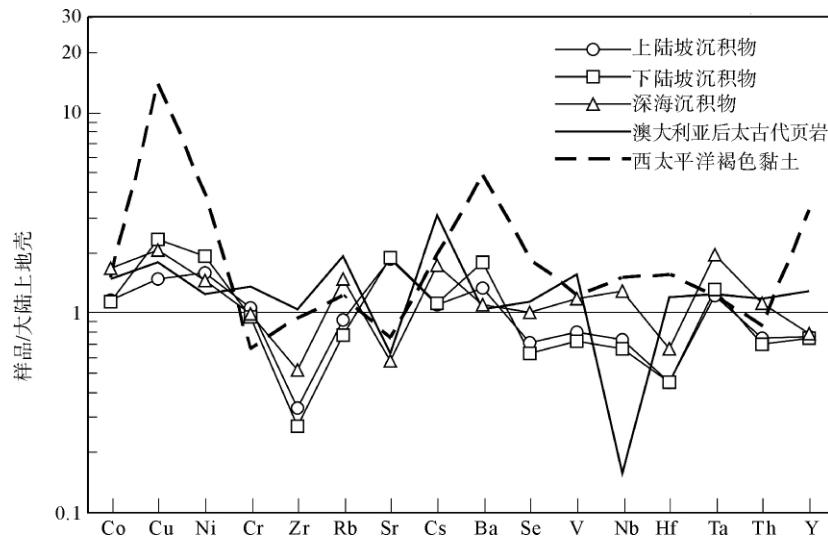


图 2 南海西南海域表层沉积物微量元素蛛网图

Fig. 2 Trace elemental spider diagram of surficial sediments from southwestern SCS

南海西南海域表层沉积物稀土元素总量
 (ΣREE) 的变化范围为 $(75.36 \sim 211.53) \times 10^{-6}$, 平均值为 137.3×10^{-6} , 呈现明显的轻稀土富集 (ΣLREE 平均值为 119.7×10^{-6}), 重稀土相对亏损 (ΣHREE 平均值为 17.61×10^{-6}), $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值为 $4.25 \sim 9.62$, 平均值为 6.73 , 以及 Eu 负异常 (δEu 为 $0.57 \sim 0.79$, 平均值为 0.66)。由陆坡区至深海区, 表层沉积物的稀土元素特征发生一定程度的分馏, 深海区表层沉积物 ΣLREE 和 ΣHREE 含量明显增加, 但是, ΣLREE 的增加幅度高于 ΣHREE , 因此, 深海区表层沉积物稀土元素还表现出 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值较陆坡区高的特点。在球粒陨石标准化配分曲线图中, 南海西南海域表层沉积物稀土元素配分曲线向右倾斜, 呈 Eu 负异常和 Ce 正异常, 另外, 重稀土元素 Dy 和 Tm 也存在一定程度的分馏; 陆坡区和深海区表层沉积物的稀土元素配分曲线具有较为一致的特点, 表明陆源碎屑物质在向深海区迁移过程中, 尽管稀土元素发生一定程度的分馏, 但这些沉积物仍继承了源岩的稀土元素组成特征(图 3)。本次研究的表层沉积物普遍具有弱的 Ce 正异常, 与南海其他海域具有相似的 Ce 异常^[21]。在海洋沉积物中, Ce 异常与海洋自生沉积有关, Ce 正异常主要是通过黏土、铁锰氧化物直接从海水中捕获吸附 Ce^{4+} 所致, 而 Ce 负异常则主要来自生物碳酸盐等自生沉积物^[24]。因此, 研究区表层沉积物的 Ce 异常一定程度上受到海洋自生沉积的影响, 在深海区则以黏土和铁锰氧化物的吸附作用为主, 使得深海区沉积物 Ce 正异常值较大。

3 讨论

3.1 元素组合及其控制因素

沉积物形成和堆积经历了风化作用、搬运作用和沉积作用, 其组成与沉积环境、物质来源有着密切的关系, 因此, 沉积物的化学组成也受到这些作用过程和因素的影响^[12, 25-26]。为了获取研究区表层沉积物化学元素的组合特征, 对样品的化学元素含量进行了 R 型因子分析和相关分析, 结果见表 2。因子 1 的元素组合为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Zr 、 Sc 、 V 、 Nb 、 Hf 、 Th 、 Co 、 Ta 、 REE , 代表沉积物中的陆源碎屑组分; 相关分析还显示不活动微量元素 Zr 、 Sc 、 V 、 Nb 、 Hf 、 Th 、 Co 、 Ta 、 REE 与 SiO_2 、 Al_2O_3 的相关性较好, 表明其他来源组分中这些元素的含量很低。因子 1 中 CaCO_3 、 Sr 具有较高的负载荷, 元素之间具有良好的正相关关系, 代表钙质生物碎屑组分, 陆源碎屑组分和钙质生物碎屑组分存在互为消长的关系, 表明钙质生物碎屑组分对沉积物中微量元素和稀土元素含量起到一定程度的稀释作用, 但是, 对这些微量元素特征比值的影响十分有限。因子 2 的元素组合为 Mn 、 Ni 、 Cr , 代表与微锰结核沉积有关的化学自生组分, 相关分析也显示 Ni 、 Cr 与 Mn 相关性较好, 相关系数分别为 0.77 和 0.68。因子 3 的元素组合为 Cu 、 Ni 、 Pb 、 Zn , 这些元素是氧化还原环境敏感元素, 代表受沉积环境控制的化学自生沉积。

稀土元素 (REE)、高场强元素 (Nb 、 Ta 、 Zr 、 Hf)、 Th 、 Sc 、 Cr 等元素在化学风化作用过程中的迁

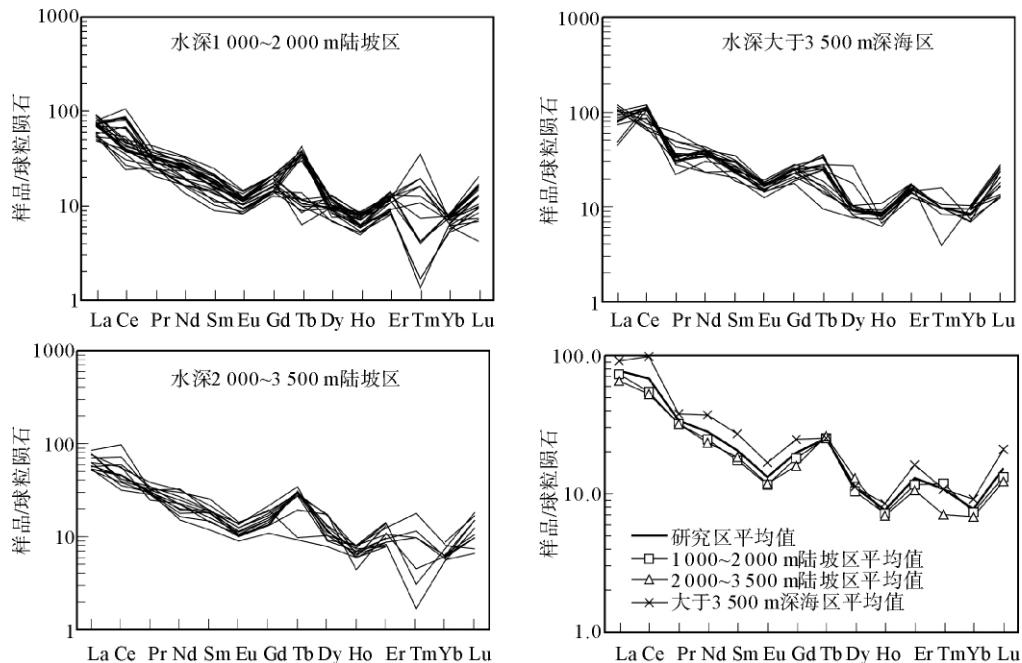


图 3 南海西南海域表层沉积物稀土元素球粒陨石标准化配分曲线

Fig. 3 Chondrite-normalized REE distribution patterns for surficial sediments from southwestern SCS

移性较弱, 它们之间的元素比值, 如 Th/Co 、 La/Co 、 La/Nb 、 Zr/Y 、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 等, 记录了母岩的化学组成, 是沉积岩物源判别的常用指标^[11,27]。然而, 近年的研究发现沉积岩的 REE 配分模式和 Eu 异常受到化学风化作用的影响, 从而改变了母岩的地球化学信息^[28-29]。因此, 在应用这些元素探讨沉积物来源时, 有必要对沉积物中的不活动元素进行评估。海洋沉积物中 Ti 元素是陆源碎屑组分的指标, 而且在化学风化过程中, Ti 从原矿物中被淋滤出来, 随后容易被沉积物所吸附, 因此, 常被认为是一个惰性元素, Ti 标准化值可以用来追踪化学风化过程和搬运过程中元素的行为, 以及判断海洋自生组分对元素的稀释作用^[5,26]。如图 4, 研究区表层沉积物的 Th/Ti 、 Cr/Ti 、 La/Ti 、 Co/Ti 、 Sc/Ti 、 Nb/Ti 比值与水深并没有呈现一定的相关性, 表明了这些沉积物中的不活动元素 Th、Cr、Co、Sc、Nb、Zr、Hf 和 REE 等, 并没有受到海流搬运作用和海洋自生组分稀释作用的影响, 较好地保存了源岩的化学组成特征, 可以运用这些元素的比值特征进行物源示踪。

3.2 元素及其比值特征的物源指示意义

前面分析已表明不活动元素 Th、Cr、Co、Sc、Nb、Zr、Hf 和 REE, 较好地保存了源岩的化学组成特征, 是进行物源示踪的有效指标。不同类型源岩的化学成分不同, 长英质岩石中 Zr、Hf、Nb、Th、REE 含量相对较高, 而镁铁质岩石 (如辉长岩、玄

武岩等) 中 Sc、Co、Cr、Ni 等过渡族元素含量较高, 导致 La/Sc 、 Th/Sc 、 Th/Cr 、 Th/Co 等比值在花岗岩、安山岩、镁铁质岩石以及地壳的不同部位都存在差异^[30-31]。研究区表层沉积物的 La/Sc 、 Th/Sc 、 Th/Cr 、 Th/Co 比值的平均值分别为 0.82、2.54、0.11、0.39, 与大陆上地壳 UCC 平均值十分接近, 表明这些沉积物主要来源于周缘大陆, 以长英质岩石为主。Zr 和 Hf 是一对亲密伴生的高场强元素, 且岩石中 Zr/Hf 比值从超基性—基性—中性—酸性逐渐减小, 研究区表层沉积物中 Zr/Hf 比值的平均值为 26.84, 明显低于南海新生代玄武岩的 44.48^[32], 说明研究区表层沉积物的源岩中基性组分很少。南海新生代的基性火山活动为沉积物贡献的火山碎屑也相对有限。因此, 在微量元素物源判别图上, 研究区表层沉积物源区物质与 UCC 具有较为接近的化学成分 (图 5)。在 $\delta\text{Eu}-\text{Th}/\text{Sc}$ 图中, 研究区表层沉积物远离安山岩、玄武岩和 TTG 岩源区, 在 $\text{Hf-La}/\text{Th}$ 图中, 大部分样品落在靠近长英质物源区, 表明了南海西南海域表层沉积物的源岩为后太古代长英质岩。

稀土元素具有相似的化学性质和低溶解度, 在搬运过程中以碎屑颗粒的形式存在, 并很快被沉淀下来, 不受沉积和成岩作用的影响而发生分馏, 因此, 稀土元素的特征参数和配分曲线模式也被广泛应用于沉积物源的判别^[33-35]。若母岩为中酸性的长英质岩石 (如花岗岩、流纹岩), 其稀土元素含量相对

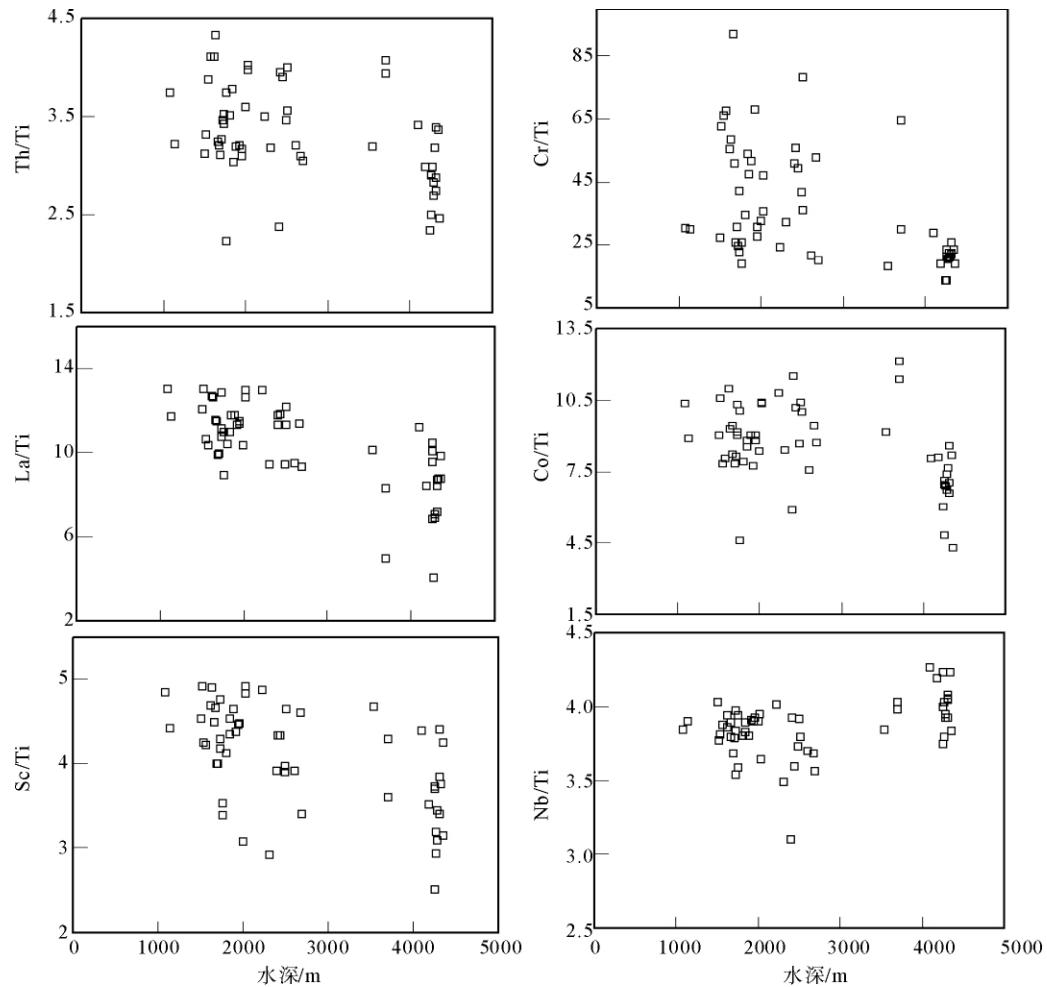


图 4 南海西南海域表层沉积物 Th/Ti、Cr/Ti、La/Ti、Co/Ti、Sc/Ti、Nb/Ti 比值与水深相关性

Fig. 4 The correlation between Th/Ti, Cr/Ti, La/Ti, Co/Ti, Sc/Ti, Nb/Ti ratios and water depth for surficial sediments from southwestern SCS

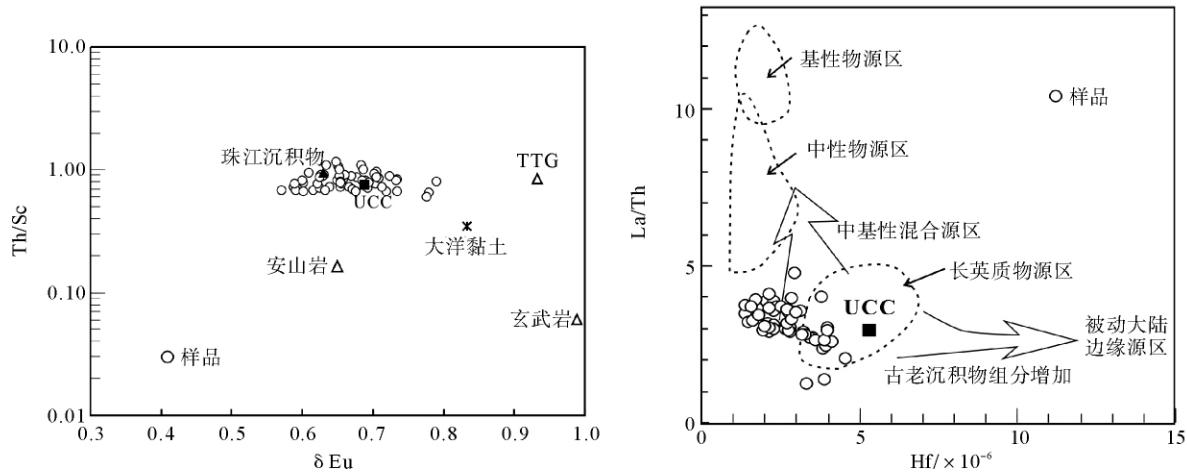


图 5 南海西南海域表层沉积物的 δ Eu-Th/Sc 和 Hf-La/Th 物源判别图

Fig. 5 The δ Eu-Th/Sc and Hf-La/Th for provenance study of surficial sediments from the southwestern SCS

较高, LREE 相对富集, Σ LREE/HREE 比值高, 具有明显的 Eu 负异常;而母岩为基性玄武质岩石, 其稀土元素含量较低, HREE 含量较高, Σ LREE/

Σ HREE 比值较低,无 Eu 异常^[11,27,34]。南海西南海域表层沉积物具有相对高的 REE 含量,显示 LREE 相对富集, Σ LREE/HREE 比值平均值为 6.73, 以

及 Eu 负异常(平均值为 0.66), 表现典型大陆上地壳的稀土参数特征。尽管深海区表层沉积物相比于陆坡区表层沉积物具有较高的 Σ HREE 含量, 但是, 深海表层沉积物 Σ LREE 含量也增加, Σ LREE/ Σ HREE 比值增大, Eu 负异常也微弱增大。因此, 深海区表层沉积物 REE 含量的增加主要与其黏土矿物含量的增加和生物组分(如碳酸盐和硅质物质)含量的减少有关。一方面, 黏土矿物的吸附作用带来了更多的 REE 元素, 另一方面, 碳酸盐和硅质矿物为贫稀土物质, 它们含量的减少, 则对沉积物中 REE 含量的稀释作用减弱。在球粒陨石标准化配分曲线上, 南海西南海域表层沉积物具有与 UCC、PAAS 相一致的稀土元素配分曲线(图 3), 显示轻稀土富集, 重稀土平坦和中等负 Eu 异常, 表明其源岩以来自大陆上地壳的长英质岩石为主, 缺乏深源的基性和超基性组分。前人研究发现, 南海部分深

海区表层沉积物出现明显的中稀土和重稀土的富集, Eu 异常变弱, 主要与深部海盆区频繁的海底火山活动有关, 火山活动为深海区表层沉积物带来了基性的火山碎屑物质^[21]。然而, 研究区深海沉积物的稀土元素特征并没有发生明显的改变, 可能表明该海域晚第四纪以来的火山活动明显减弱, 沉积物中火山碎屑物质成分很低。

南海西南海域邻近的大陆有西部印支半岛、东部加里曼丹岛和南部马来半岛、苏门答腊岛。由于加里曼丹岛分布的河流多为近源河流, 其流速大、流量小, 因此, 来自东部加里曼丹岛的陆源碎屑沉积及火山碎屑等基本停留在近岸海区; 来自南海南部马来半岛、苏门答腊岛的物质, 由于与研究区隔着广阔的巽他陆架, 大部分陆源碎屑物主要沉积于滨海和巽他陆架, 经过海流、波浪、潮流的长期作用及长距离搬运进入研究区的物质相对较少; 而南海西部地

表 2 南海西南海域表层沉积物化学元素的因子分析和相关分析结果

Table 2 The results factor and correlation analysis for surface sediments from the southwestern SCS

R 型因子分析				相关分析				
化学元素	因子 1	因子 2	因子 3	化学元素	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	CaCO ₃
SiO ₂	0.93	-0.11	0.01	SiO ₂	1.00	0.86	-0.38	-0.96
Al ₂ O ₃	0.97	-0.02	0.07	Al ₂ O ₃	0.86	1.00	-0.30	-0.95
MnO	-0.31	0.86	0.25	MnO	-0.38	-0.30	1.00	0.24
CaCO ₃	-0.97	-0.04	-0.09	CaCO ₃	-0.96	-0.95	0.24	1.00
Co	0.82	0.16	0.38	Co	0.77	0.81	-0.03	-0.85
Cu	0.04	0.37	0.81	Cu	0.08	0.07	0.43	-0.16
Ni	-0.20	0.69	0.60	Ni	-0.22	-0.17	0.77	0.10
Pb	0.29	0.02	0.73	Pb	0.28	0.27	0.21	-0.33
Cr	0.17	0.89	-0.07	Cr	0.04	0.17	0.68	-0.19
Sr	-0.94	0.05	-0.11	Sr	-0.93	-0.87	0.33	0.93
Zn	0.57	0.39	0.55	Zn	0.49	0.59	0.27	-0.62
Zr	0.90	0.02	-0.17	Zr	0.84	0.87	-0.31	-0.87
Ba	-0.57	0.31	0.53	Ba	-0.56	-0.58	0.56	0.52
Sc	0.91	0.03	0.05	Sc	0.81	0.95	-0.27	-0.90
V	0.93	0.11	0.11	V	0.82	0.96	-0.17	-0.92
Rb	0.90	-0.07	0.05	Rb	0.81	0.94	-0.29	-0.89
Nb	0.98	-0.12	-0.06	Nb	0.95	0.94	-0.42	-0.96
Cs	0.89	-0.16	0.18	Cs	0.78	0.90	-0.39	-0.85
Hf	0.84	0.37	0.00	Hf	0.68	0.78	0.05	-0.79
Ta	0.72	0.21	0.12	Ta	0.58	0.62	0.02	-0.65
Th	0.95	0.12	0.15	Th	0.84	0.92	-0.15	-0.93
La	0.69	-0.04	-0.29	La	0.69	0.74	-0.34	-0.71
方差贡献	60.90%	14.90%	6.30%					
累积方差贡献	60.90%	75.80%	82.10%					

势相对较高,发育有大型河流,年输沙量大(如湄公河的年输沙量达 160×10^6 t),而且西部陆架区总体较狭窄,因此,其输送的碎屑物质广泛堆积于南海西南海域的陆坡区和深海盆地。因此,研究区表层沉积物主要来源于西部的印支大陆,这与前人对研究区内沉积物进行黏土矿物分析获得的认识相一致^[36]。

4 结论

(1)南海西南海域表层沉积物微量元素含量的平均值与大陆上地壳平均值相比,具有相对低的 Zr、Sc、V、Nb、Hf、Th 含量,而 Co、Cu、Ni、Ta、Rb、Cs、Sr、Ba 的含量稍高于大陆上地壳, Cr 含量与之相近。稀土元素总量(Σ REE)变化范围为 $(75.36 \sim 211.53) \times 10^{-6}$,平均值为 137.3×10^{-6} ,呈现明显的轻稀土富集和重稀土相对亏损特征; Σ LREE/ Σ HREE 比值介于 $4.25 \sim 9.62$,平均值为 6.73 , δ Eu 介于 $0.57 \sim 0.79$,平均值为 0.66 。总体上,上陆坡与下陆坡表层沉积物的微量元素含量较为相近,而深海区表层沉积物比陆坡区具有相对较高的 Co、Zr、Sc、V、Nb、Hf、Ta、Th 和 REE 含量。

(2)因子分析和相关分析显示绝大部分微量元素和稀土元素主要受陆源组分的控制,不活动元素 Th、Cr、Co、Sc、Nb、Zr、Hf 和 REEs 并没有明显受到风化作用、海流搬运作用和海洋自生组分稀释作用的影响,较好地保存了源岩的化学组成特征。

(3)南海西南海域表层沉积物的 La/Sc、Th/Sc、Th/Cr、Th/Co 比值的平均值分别为 0.82 、 2.54 、 0.11 、 0.39 ,与大陆上地壳 UCC 平均值十分接近。研究区表层沉积物的微量和稀土元素地球化学特征指示这些陆源碎屑组分的源岩具有典型陆壳成分的特点,以长英质岩石为主,缺乏深源的基性和超基性岩,火山碎屑物质成分很低,其源区主要为南海西部的印支大陆。

参考文献(References)

- [1] WANG L J, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea [J]. *Marine Geology*, 1999, 156: 245-284.
- [2] 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. [QIAN Jianxing. A Study of Paleoceanography in the South China Sea During Late Quaternary [M]. Beijing: Science Press, 1999.]
- [3] 蒋知湣, 王吉良, 成鑫荣, 等. 南海北部晚新生代氧同位素地层学[J]. *中国科学 D 辑*, 2001, 31 (10): 800-807. [JIAN Zhimin, WANG Jiliang, CHENG Xinrong, et al. Oxygen isotope stratigraphy and events in the northern South China Sea during the last 6 million years [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31 (10): 800-807.]
- [4] 汪品先, 蒋知湣, 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): 2228-2239. [WANG Pinxian, JIAN Zhimin, ZHAO Quanhong, et al. Evolution of the South China Sea and monsoon history revealed in deep sea records [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(21): 2228-2239.]
- [5] Wei G J, Liu Y, Li X H, et al. High-resolution elemental records from the South China Sea and their paleoproductivity implications[J]. *Paleoceanography*, 2003a, 18: 1054-1065.
- [6] 汪品先. 十五万年来的南海[M]. 上海: 同济大学出版社, 1995. [WANG Pinxian. South China Sea Since 150 000 Years [M]. Shanghai: Publishing House of Tongji University, 1995.]
- [7] Wang P X. Response of western Pacific marginal seas to glacial cycles: Paleoceanographic and sedimentological features [J]. *Marine Geology*, 1999, 156: 5-39.
- [8] Wei, G J, Shao L, Liu Y, et al. Climatic impact on Al, K, Sc and Ti in marine sediments: Evidence from ODP Site 1144, South China Sea. *Geochemical Journal*, 2003b, 37: 593-602.
- [9] Clift P D, Sun Z. The sedimentary and tectonic evolution of the Yinggehai Song Hong Basin and the southern Hainan margin, South China Sea; implications for Tibetan uplift and monsoon intensification[J]. *Journal of Geophysical Research* 111, 2006, B06405. doi: 10.1029/2005JB004048.
- [10] 刘志飞, 赵玉龙, 李建如, 等. 南海西部越南岸外晚第四纪粘土矿物记录: 物源分析与东亚季风演化[J]. *中国科学 D 辑*, 2007, 37(9): 1176-1184. [LIU Zhifei, ZHAO Yulong, LI Jianru, et al. Late Quaternary clay minerals off Middle Vietnam in the western South China Sea: Implications for source analysis and East Asian monsoon evolution [J]. *Science in China (Series D)*, 2007, 37(9): 1176-1184.]
- [11] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes [J]. *Reviews in Mineralogy*, 1989, 21: 170-199.
- [12] Cullers R L. The controls on the major and trace element variation of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, from uplifted continental block in Colorado to platform sediment in Kansas, USA [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 55: 4955-4972.
- [13] 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. [JIN Bingfu, LIN Zhenhong. Interpretation of element geochemical records of marine sedimentary environment and provenance [J]. *Advance in Marine Science*, 2003, 21(1): 99-106.]
- [14] 刘季花, 石学法, 陈丽蓉, 等. 东太平洋沉积物中粘土组分的 REEs 和 ϵ_{Nd} ——粘土来源的证据[J]. *中国科学 D 辑*, 2004, 34(6): 552-561. [LIU Jihua, SHI Xuefa, CHEN Li-rong, et al. REEs and ϵ_{Nd} ——粘土来源的证据 [J]. *中国科学 D 辑*, 2004, 34(6): 552-561.]

- al. REE and ϵ_{Nd} of clay fractions in sediments from the eastern Pacific Ocean: Evidence for clay sources [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(6): 552-561.]
- [15] 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. [SHAO Lei, LI Xianhua, WEI Gangjian, et al. Material source of high-speed congeries in South China Sea[J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31(10): 828-833.]
- [16] 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.
- [17] Tamburini F, Adatte T, F llmi K, et al. 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 [J]. *Marine Geology*, 2003, 201: 147-168.
- [18] Boulay S, Colin C, Trentesaux A, et al. Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP Site 1144) [C]. In: Prell W L, Wang P, Blum P, et al, eds. *Proc ODP Sci Res*, 2003, 184: 1-21.
- [19] Wehausen R, Brumsack H J. Astronomical forcing of the East Asian monsoon mirrored by the composition of Pliocene South China Sea sediments[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 2002, 201: 621-636.
- [20] 乔培军, 邵磊, 杨守业. 南海西南部晚更新世以来元素地球化学特征的古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(4): 59-65. [QIAO Peijun, SHAO Lei, YANG Shouye. The paleoenvironmental significance of the character of the element geochemistry in the southwestern South China Sea since late Pleistocene[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2006, 26(4): 59-65.]
- [21] 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): 2963-2980. [ZHU Laimin, GAO Zhiyou, YIN Guan, et al. Content and spatial change of rare earth element and trace element of surficial sediment in the South China Sea [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2963-2980.]
- [22] Rudnick R L, Gao S. Composition of the Continental Crust [C]. Oxford: the Oxford Press, Treatise On Geochemistry, Vol. 3, 2003.
- [23] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its composition and Evolution [M]. Blackwell, Oxford, 1985.
- [24] Holser W T. Evaluation of the application of rare-earth elements to paleoceanography [J]. *Paleoceanography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 1997, 132: 309-323.
- [25] Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 6: 887-898.
- [26] Nesbitt H W, Markovics G. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997, 61(8): 1653-1670.
- [27] Crichton J G, Condie K C. Trace elements as source indicators in cratonic sediments: a case study from the early Proterozoic Libby Creek Group, southeastern Wyoming [J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101: 319-332.
- [28] Condie K C, Dengate J, Cullers R L. Behavior of rare earth elements in a paleoweathering profile on granodiorite in the Front Range, Colorado, USA [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59: 279-294.
- [29] Sharma A, Rajamani V. Major element, REE and other trace element behavior in amphibolite weathering under semiarid conditions in Southern India[J]. *Journal of Geology*, 2000, 108: 487-496.
- [30] McLennan S M, Taylor S R. Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trend [J]. *Journal of Geology*, 1991, 99: 1-21.
- [31] McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics [C]//In Jonhanson M J et al eds. *Processes controlling the composition of clastic sediments*. Boulder: Geological Society of America Special Paper, 1993, 284: 21-40.
- [32] 鄢全树, 石学法, 王昆山, 等. 南海新生代碱性玄武岩主量、微量元素及 Sr-Nd-Pb 同位素研究[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(1): 56-71. [YAN Quanshu, SHI Xuefa, WANG Kunshan, et al. Major element, trace element, and Sr, Nd and Pb iso-tope studies of Cenozoic basalts from the South China Sea [J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 38(1): 56-71.]
- [33] Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic controls [J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45: 97-113.
- [34] Cullers R L. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies [J]. *Lithos*, 2000, 51: 181-203.
- [35] Condie K C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales [J]. *Chemical Geology*, 1993, 104: 1-37.
- [36] 刘志飞, Colin C, Trentesaux A, 等. 青藏高原东部和泥公河盆地晚第四纪风化剥蚀与东亚季风演化在南海中的记录[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2005, 24(1): 30-38. [LIU Zhifei, Colin C, Trentesaux A, et al. Late Quaternary weathering and erosion of the eastern Tibetan plateau and the Mekong basin and east Asian monsoon evolution recorded by the sediments from the South China Sea[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2005, 24(1): 30-38.]

THE GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF TRACE ELEMENTS AND REES IN SURFICIAL SEDIMENTS OF THE SOUTHWESTERN SOUTH CHINA SEA AND THEIR IMPLICATIONS

CAI Guanqiang, QIU Yan, PENG Xuechao, ZHONG Hexian

(The Department of Offshore Marine Geological Survey, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

Abstract: This paper presents the trace elements and REEs composition of the surficial sediments from the southwestern South China Sea (SCS). The results show that the samples have relatively low Zr, Sc, V, Nb, Hf, Th, REEs contents and high Co, Cu, Ni, Ta, Rb, Cs, Sr, Ba contents, compared with the upper continental crust (UCC). The sediments from marine basins have higher Co, Zr, Sc, V, Nb, Hf, Ta, Th and REEs abundances than those from the continental slope. Factor and correlation analyses indicate that most of these elements are land-derived. The immobile elements such as Th, Cr, Co, Sc, Nb, Zr, Hf and REEs are indicators of source rocks. There shows no influences from weathering, transportation and diluting effect of biologic materials. The high La/Sc, Th/Sc, Th/Cr, Th/Co ratios and UCC-like rare earth elements distribution patterns characterized by high Σ LRREE/ Σ HRREE ratios and low δ Eu values suggest that the source of the studied sediments are mainly from continental crust with felsic rocks as the majority, but the contribution of basic/ultrabasic rocks is ignorable and the volcanic clast content in the sediments is also very low. With reference to the geography of the studied areas, the geochemistry of surficial sediments from the southwestern SCS indicates that the materials are mainly from neighbour continents, probably the Indo-China block. Both the continental slope and marine basins show a common provenance according to their similarity in trace and rare earth elements compositions.

Key words: trace elements; rare earth elements; provenance; South China Sea