

南海海底稀土元素研究进展

Research progress of rare earth elements of the seafloor in the South China Sea

吴绍渊

(中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266100)

中图分类号: P618.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)03-0116-06

doi: 10.11759/hyxx20130918004

稀土作为以新工艺、新技术研发为代表的高新科技产业发展所必需的基础性材料具有重要的经济价值和战略意义。鉴于陆上稀土资源的特殊分布的特点, 海洋势必将成为未来该资源探索和开发的新区域。南海作为我国所辖最大面积的海域, 其稀土资源丰富。因此, 对于该海域稀土元素的研究具有重要的科研意义和现实价值。本文主要对近几十年来相关研究所取得研究成果和进展情况进行综述, 并给出了未来研究的展望。

1 海底稀土研究的经济意义和战略价值

稀土广泛分布于地壳之中, 然而由于其丰度不均, 地域分布较为分散, 使得全球范围内真正具备可开采价值的稀土矿并不多^[1]。

美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS) 2013 年最新公布的数据显示, 目前世界稀土保有量为 1.1 亿 t, 我国稀土保有量为 5 500 万 t, 约占其中的 48.34%^[1]。然而, 经过半个多世纪的超强度开采, 我国稀土资源保有储量及保障年限不断下降, 主要矿区资源加速衰减, 原有矿山资源大多枯竭^[2]。另一方面, 目前我国许多矿产企业依然综合利用意识淡薄, 缺乏回收或进行充分回收的相关工艺, 在稀土资源的开发与利用过程中造成了大量的浪费。如: 江西宜春 414 钽铌锂铍矿, 钽铌回收率甚至始终没有超过 45.5%, 而尾矿中的品位仍然超过边界品位^[3]。近年来, 出于环境保护和资源合理开发的考虑, 我国政府加强了稀土资源保护措施的执行力度, 对稀土的无序生产和出口进行了限制, 使得 2011 年国际稀土市场曾一度出现价格飙升、供不应

求的局面^[4]。

有鉴于稀土元素在当前材料化学、生物医药、纳米技术、电子信息、航空航天、环境保护、新能源汽车、风力发电等高新领域的重要应用价值与广泛前景^[5-10], 为保障这一战略资源的安全供应, 西方的矿业公司正在加大稀土资源的勘查和开发力度, 并取得了显著的成果。这也导致了国际稀土市场格局的变化, 构成了对我国稀土产业的严峻挑战^[5]。据 2013 年美国地质调查局的统计, 我国稀土年产量占当年世界稀土总产量份额的比例从 2011 年的 95.0% 下降到了 2012 年的 86.8%^[11]。而其中, 海底稀土的开发正逐渐得到世界各国的关注和重视。为摆脱对我国稀土的依赖, 2009 年, 日本政府制定了《海洋能源矿物质开发和计划》, 并预期 2018 年展开实验性探采^[11]。2011 年, 日本加藤泰浩^[12-13]在英国《自然·地学》杂志刊登报告称, 发现包括夏威夷岛在内的太平洋中部约 880 万 km² 海域及东南部塔西提岛附近约 240 万 km² 海域淤泥中, 含有高浓度稀土, 整个可开采量约是陆地的 1 000 倍。科学家预计, 太平洋海底淤泥中的稀土储量可达到 1 000 亿 t。2013 年, 日本研究人员宣布其在印度洋东部的海底发现了含有高浓度稀土的海底泥。这也是在太平洋之外的海域首次发现含有稀土的海底泥, 证明稀土有可能在全球的海洋广泛分布^[14]。

自 20 世纪 80 年代起, 我国科学家即已展开了对南海海底沉积物中稀土元素的地球化学研究, 在陆

收稿日期: 2013-09-18; 修回日期: 2014-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(60578060)

作者简介: 吴绍渊(1984-), 山东青岛人, 博士, 主要从事海洋资源、国际海洋法和海洋化学、生态学研究, E-mail: sywuqd@hotmail.com

地和海洋古气候、古环境变化研究领域取得了一定的成果^[15-16]。近年来,随着科学技术的进步,相关国家项目与国际合作项目,如:大洋钻探计划(Ocean Drilling Program, ODP)的陆续开展,对于南海海底沉积物中稀土元素的调查无论是在范围还是在规模上都在不断扩大,研究内容也逐渐深入,并获得了一系列的新发现。

2 南海沉积物稀土的研究现状

随着近年来深海勘探技术的发展、国家投入的加大,国际合作力度的增强,南海沉积物稀土元素的研究区域不断得到扩大,使得相关区域的数据资料得到了丰富与完善。研究表明南海沉积物中稀土元素的来源与分布均随着地理单元的不同而有所差异。

2.1 南海沉积物稀土元素的研究区域

我国对于南海表层沉积物稀土元素地球化学的研究可追溯至 20 世纪 60 年代;期间,中国科学院南海海洋研究所对南海北部大陆架、中西沙及海盆南部海区进行了调查研究^[17]。进入 80 年代,相关研究领域逐渐扩大至 12°N,区域覆盖了中央海盆、中沙和西沙附近^[18-21]。至 90 年代,研究区域进一步拓展到了南沙群岛海区^[22]。目前,累积的历史研究资料显示,对于南海海底沉积物中稀土元素的研究区域已几乎覆盖了整个南海。

随着深海钻探技术日臻成熟,越来越多的国家项目与国际间合作正逐步得到开展,不断有新的南海海底沉积物样品资料被获得、数据与资料也不断得到更新和完善,如,1994 年中德合作的 Sonne 95 航次(S017940)、1999 年 ODP184 航次(1144 站)以及 2005 年中法合作 Marco-Polo 航次(MD05-2905/6)对南海北部陆坡发育的堆积体进行了研究^[23],付淑清

等^[24]对于 HY126-2001-02 航次在南海西南部永暑礁岛北部区所采集的 86GC 柱样的稀土元素(REE)含量进行了测量,并对其地球化学特征进行了系统分析;吴梦霜等^[25]通过对南海北部白云深水区沉积物稀土元素的研究,发现渐新世至中新世的物源发生较大变化;郑凯清等^[26]对南海西沙海槽 HX132 柱状沉积物开展了稀土元素化学分析,并对其基本分布特征及沉积环境意义进行了探讨,填补了该海域稀土元素资料的空白。

然而,当前南海沉积物稀土元素的研究区域依然主要集中在南海北部,尤其是珠江口盆地、伶仃洋、莺歌海、北部湾等海域^[27-32],仍需要更大规模、更具系统性和连续性的海洋地质调查与研究。

2.2 南海沉积物中稀土元素的分布与来源

南海是西太平洋最大的边缘海,位于欧亚板块、菲律宾板块及印度洋板块三大板块的交汇处,主要有北部陆架、北部陆坡、西部陆架、西部陆坡、东部岛架、巽他陆架、西北次海盆、西南次海盆及中央海盆等地理单元^[27]。

由于南海地质构造复杂,南海表层沉积物稀土元素的分布与元素也存在较大差异(见表 1)。刘建国等^[33]研究表明,南海表层沉积物中稀土元素分布主要与陆源物质输入、生物活动和火山物质补给密切相关;南海细粒组分的配分模式与中国黄土的接近,与周边的珠江、湄公河等河流输入物质也有相似性,而与南海碱性玄武岩存在显著差异,表明南海沉积物主要来自于周边大陆;从分布上来看,珠江口往外至海南岛南部海域中沉积物朝东南方向向陆坡输送;台西南至珠江口往外海域沉积物大多向南输运;吕宋岛西部海域包括黄岩岛附近海域的火山物质主要向西北方向输送,向西可达 113°E、向北可至 20°N

表 1 南海不同区域表层沉积物稀土元素平均质量比

研究区域	$\sum m(\text{REE})(\mu\text{g/g})$	$\sum m(\text{LREE})(\mu\text{g/g})$	$\sum m(\text{HREE})(\mu\text{g/g})$	数据来源
南海大陆架	120.46	110.00	10.46	文献[34]
南海大陆坡	105.59	93.97	11.63	文献[34]
南海海盆区	132.86	117.8	15.07	文献[34]
南海北部深水区白云凹陷及周边	152.5	116.37*	36.13*	文献[25]
南海北部西沙海槽	136.32	119.8	16.52	文献[26]
珠江口伶仃洋海区	272.02*	251.75*	22.43*	文献[28]
南海南沙永暑礁	124.53*	113.64*	8.14*	文献[24]
平均值	149.18	131.90	17.20	

注: *为文献数据中的算术平均值; $\sum m(\text{REE})$, $\sum m(\text{LREE})$, $\sum m(\text{HREE})$ 分别表示稀土元素、轻稀土元素、重稀土元素的平均质量比

附近;南海南部沉积物整体上向南沙海槽西北部附近海域输送。

南海沉积物稀土元素在大陆架区具有沿陆分带分布的特点,元素含量自陆向海递减;北部陆架区、中南半岛中东部和加里曼丹岛西北部沿大陆区域稀土元素富集,西南部巽他陆架和东南部岛礁区以及中、西沙附近区域 $m(\sum\text{REE})$ 较低^[34]。

在南海陆架区,河流所带来的大量碎屑物质与黏土矿物的直接沉积与该区域稀土元素富集、形成高值分布区有关^[34]。赵一阳和鄢明才^[35]认为:南海陆架区沉积物是大陆物质向海搬运的直接产物,陆架区出现稀土高含量和次高含量带,与该区海流的分选作用,造成某些富古稀土的重砂矿如独居石、磷钇矿、钛铁矿、锆石、榍石等矿物的富集有关。

在南海东南部岛礁区和中央海盆东部海域,发现了较大量的稀土含量较低的幔源火山物质,海底火山的喷发造成的黏土矿物相对减少使得该区域沉积物中稀土元素处于中低含量^[28, 36-38]。

在中、西沙附近海域和东南部生物岛礁区,沉积物中有大量生物碳酸盐外壳发现成为了该区域沉积物中稀土元素处于中低含量的原因^[34, 39-40]。

在南海北部深水区白云凹陷及周边区域,深水区北部沉积物主要来自古珠江物源区,深水区东、西部沉积物中含有较多中基性火山物质,南部则主要包含基性火山物质^[31]。

南海北部西沙海槽南部斜坡海区,稀土元素总量不高,变化范围较大,含量与分布特征与中国大陆架沉积物、南海细粒沉积物较为接近,主要以陆源沉积为主,有部分生源物质成分的加入,而火山源物质成分较少^[26]。

在珠江口伶仃洋海区,稀土分布模式与我国陆架海具有相似性,但高于我国陆架海,与南海沉积物的稀土分布具有相似性又有差别,反映两者具有同源性,说明珠江口入海沉积物是南海陆架区主要物质来源之一^[28]。

在南海西南部永暑礁岛北部海区,86GC 柱样显示了中稀土相对亏损,沉积物与平均上陆壳以及南海北部陆坡沉积物的稀土元素分布模式基本一致,而与大洋玄武岩完全不同,指示了研究区域沉积物的陆壳来源属性^[24]。

在南海北部西沙海槽区域,由于南沙群岛海域地处极为复杂的地质构造环境,因此其物质来源也极其复杂,而沉积物中稀土元素的物质来源包括:自生沉积、生源沉积和下陆壳幔源物质的输入^[41]。

2.3 南海沉积物稀土与我国其他海区的比较研究

我国的渤海、黄海、东海和南海的沉积物中均有稀土元素分布^[33, 42]。渤海和南海陆架区沉积物中稀土元素含量较高,平均质量比为 156 $\mu\text{g/g}$;具有陆壳稀土元素的典型特征,即:中轻稀土均明显高于重稀土;在特点和分布方面,南海海域具有 Ce 负异常,而无 Eu 负异常^[43](见表 2)。马荣林等^[44]在海南岛南渡江近岸河口区发现:该海区沉积物稀土元素质量比为 45.99 ~ 225.80 $\mu\text{g/g}$,均值为 124.94 $\mu\text{g/g}$ 。沉积物中稀土元素富集于 < 2 μm 黏土中且轻稀土元素富集。颜彬等^[45]研究了广东沿岸 10 个典型海湾,稀土元素质量比介于 251.77 ~ 133.58 $\mu\text{g/g}$ 之间,其物质来源主要来自陆地。在南海北部湾表层沉积物中稀土元素表现出:粒度细,其含量高,而粒度粗,其含量低的特点^[30]。

总之,基于当前已获研究数据,南海沉积物稀土元素相较于其他海域在丰度、含量和典型特征等方面存在一定差异。

3 南海海底多金属结核/结壳中的稀土元素研究

多金属结核/结壳主要有以下 3 种富集途径:(1)通过吸附海水和沉积物中稀土元素及陆源风化物质从而成为稀土元素富集体^[46-47];(2)通过赋存区海底火山

表 2 中国海大陆架沉积物中稀土元素质量比^[26]

海域	样品数	$m(\mu\text{g/g})$															$\sum m(\text{REE})$
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	
渤海	3	43.98	73.51	11.91	43.80	7.18	1.82	7.41	0.79	4.40	9.84	2.39	0.26	2.13	0.27	28.54	229.29
黄海	6	26.41	53.05	6.25	20.45	4.61	1.00	4.55	0.53	2.89	0.44	1.03	0.08	1.74	0.13	11.05	134.03
东海	11	22.73	51.18	5.84	22.00	4.60	0.90	4.59	0.64	3.49	0.77	1.40	0.16	1.70	0.13	20.18	140.34
南海	3	40.51	57.65	10.17	36.77	5.69	1.35	5.81	0.83	3.21	0.34	1.95	0.13	1.59	0.26	21.63	187.58
平均	23	28.78	55.43	7.37	26.38	5.08	1.10	5.11	0.62	3.42	0.64	1.50	0.15	1.75	0.16	19.08	156.46

活动富集^[48-49]。(3)多金属结核/结壳中有机质对稀土元素的富集^[50]。

多金属结核主要赋存于水深 4 000~6 000 m 大洋盆地底部,但又多存在于水深 1 000~3 000 m 洋底海山顶部。多金属结核/结壳稀土元素含量丰富,通常比深海沉积物和海水中稀土元素含量高 10~100 倍^[51]。而由于南海海底地质结构复杂,使得其不同区域内多金属结核/结壳无论在富集途径还是在稀土元素丰度上都存在一定差异。

孟妍等^[50]对全球海洋 25 个多金属结核/结壳样品进行了分析,发现其稀土元素质量比为 341.43~2 082.41 $\mu\text{g/g}$,平均值为 1265.57 $\mu\text{g/g}$,其中结核质量比为 1096.96 $\mu\text{g/g}$,结壳平均质量比为 1623.88 $\mu\text{g/g}$ 。

吴长航^[52]对南海北部陆缘大型多金属结核的生长及元素地球化学特征进行了研究,发现该海区多金属结核稀土元素含量较高,且轻稀土元素富集、中稀土元素亏损,Ce 含量占稀土元素总量的 70%以上,Ce 正异常,表明结核中稀土元素主要来自海水。

张振国等^[53]对南海北部多金属结核/结壳中稀土元素的富集特点进行了研究,指出在多金属结核/结壳中,稀土元素分布特征为结壳高于结核,海山结核高于海盆结核,边缘海高于远洋盆地;南海铁锰结核稀土元素质量比为 1 880.2~2 263 $\mu\text{g/g}$,结壳稀土元素质量比为 1 583.5~2 566.5 $\mu\text{g/g}$ 。稀土元素总量比太平洋北部铁锰结核高 1 倍以上,比太平洋北部沉积物高 3 倍以上,比南海沉积物则高 10 多倍;(见表 3)。

表 3 多金属结核/结壳稀土元素含量对比^[53]

海区	稀土元素平均质量比($\mu\text{g/g}$)
南海北部结核	1417.01
南海北部结壳	1900.60

4 展望

资源是国家发展的基础,是大国间博弈的筹码。历史上,由资源所引发的争端与冲突层见叠出。进入 21 世纪,国家间由资源所导致的摩擦依然屡见不鲜。尽管我国是稀土资源大国,目前在国际稀土市场仍保有重要地位,但是鉴于陆上稀土资源开发的种种弊端,以及某些国家对国际市场的操控,我国同样需要加大海底稀土资源的勘探与研究的力度,从而为当前“十二五”规划和远海、大洋海洋战略的顺利实施保驾护航,并为我国未来的繁荣进步与可持续发展

提供必要的资源保障。

南海资源丰富、地理位置重要,是我国未来发展的重要“资源宝库”。就南海表层沉积物稀土元素分布和丰度而言,从珠江口往外至海南岛南部海域中沉积物朝东南方向向陆坡输送;台湾西南至珠江口往外海域沉积物大多向南输送;吕宋岛西部海域包括黄岩岛附近海域的火山物质主要向西北方向输送;南海南部沉积物整体上向南沙海槽西北部附近海域输送。南海陆架区沉积物中稀土元素含量较高,平均质量比为 177.62 $\mu\text{g/g}$,轻稀土均明显大于重稀土,是陆壳稀土元素的典型特征。就南海结核/结壳稀土丰度而言,南海结核/结壳稀土元素含量甚至要高于全球多金属结核/结壳平均值,并具有赋存深度小的优势,因此,有必要对此开展相关专项资源调查工作,并进行实验性开采,为未来实现深海矿产的开发利用做必要的经验积累和技术储备。

此外,由于南海地缘政治因素特殊,目前我国仍与邻国存有“断续国界线”勘界等争议。而我国此时在该海域积极开展各项海洋勘探、海洋资源调查等科学研究,则正可成为我国宣示主权的一种有效方式。而所获得的相关海洋调查数据、成果也可成为未来我国应对邻国无端发难的必要事实依据,具有十分重要的科学和现实意义。

综上所述,鉴于目前南海海底稀土资源的研究现状,相关领域研究仍需在以下几个方面得以加强:(1)相较南海广袤的面积而言,现有的研究结果与数据资料仍显不足,依旧无法准确反映整个南海海底稀土资源的分布与丰度情况。因此有必要开展全海域海底的海洋稀土资源勘探研究。(2)需要加强在不同海洋环境条件下稀土矿床形成机制的研究。尤其在多金属结核/结壳研究方面,加强稀土元素富集位置的预测和鉴定标准研究。(3)设法解决当前研究手段单一,依靠走航拖网打钻的传统研究方式,尝试开发并应用更新的无人深潜技术,从而使未来全海域实时监测和现场分析成为可能。(4)需要破除当前投融资体制机制,强化国家、企业和个人在海洋高技术领域特别在海底稀土开发方面投融资的积极性,加大投入,以实现技术上的研发突破,为未来实验性和商业性开采利用海底稀土资源奠定技术基础。(5)加强海底资源开发与生态系统保护的研究,为日后多资源可持续开发与保育提供必要的理论依据和技术支持。(6)超前意识的培育与规划,提前筹划并确立“南海国家战略”,从政策和法规角度确保

未来我国经济社会等领域的繁荣进步与可持续发展得到切实的保证和国家战略的实施。

参考文献:

- [1] United States Geological Survey. Rare earths statistics and information mineral commodity summaries of rare earth [EB/OL]. [2013-09-16] http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2013-raree.-pdf.
- [2] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的稀土状况与政策 [EB/OL]. [2013-09-16]. <http://www.fmccprc.gov.hk/chn/xwdt/zt/zgzhfbps/t951276.html>.
- [3] 王登红, 王瑞江, 李建康, 等. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 361-370.
- [4] 李建武, 侯甦予. 全球稀土资源分布及开发概况[J]. 中国国土资源经济, 2012, 25(5): 25-27.
- [5] 陈占恒. 稀土新材料及其在高新技术领域的应用[J]. 稀土, 2000, 21(1): 53-57.
- [6] 杨启山, 翁国庆, 孙晋伟, 等. 日本稀土纳米技术与市场[J]. 稀土, 2005, 26(5): 33-36.
- [7] Liu Yongsheng, Tu Datao, Zhu Haomiao, et al. Lanthanide-doped luminescent nanoprobes: controlled synthesis, optical spectroscopy, and bioapplications[J]. Chemical Society Reviews, 2013, 42(16): 6924-6958.
- [8] 张建, 朱兆顺. 稀土在钢中的应用[J]. 金属材料与冶金工程, 2008, 36(5): 56-60.
- [9] 郭旭涛, 李培杰, 熊玉华, 等. 稀土在铝、镁合金中的应用[J]. 材料工程, 2004, (8): 60-64.
- [10] 郑德, 陈宇, 冯嘉春, 等. 高分子材料稀土助剂的研究进展及应用[J]. 功能材料, 2004, 35(1): 2130-2135.
- [11] 内閣官房総合海洋政策本部事務局. 海洋の開発・利用構想の推進に関する調査報告書 [EB/OL]. [2013-09-16]. http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kaiyou/chousa/h20_houkokusho.pdf.
- [12] 顾锦龙. 日本欲开发海底稀土制衡中国[J]. 世界环境, 2011, 6: 60-61.
- [13] 春笋. 海底稀土开采没那么简单[J]. 稀土信息, 2011, 9: 28-29.
- [14] 《低碳世界》编辑部. 印度洋海底首次发现高浓度稀土[J]. 低碳世界, 2013, 10: 14.
- [15] 陈绍谋, 古森昌, 路秀云, 等. 南海北部沉积物元素分布的统计分析[J]. 热带海洋, 1983, 2: 85-91.
- [16] 古森昌, 陈绍谋, 吴必豪, 等. 南海表层沉积物稀土元素的地球化学[J]. 热带海洋, 1989, 2: 93-101.
- [17] 陈绍谋, 梁美桃, 吴必豪, 等. 南海表层沉积物的地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1988, 1: 17-19.
- [18] 吴明清. 我国台湾浅滩海底沉积物稀土元素地球化学[J]. 地球化学, 1983, 3: 303-313.
- [19] 古森昌, 陈绍谋, 吴必豪, 等. 南海表层沉积物稀土元素地球化学[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1988, 1: 16.
- [20] 王贤觉, 陈绍谋, 古森昌. 南沙海域沉积物稀土元素地球化学[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1988, 1: 20-22.
- [21] 古森昌, 陈绍谋, 吴必豪, 等. 南海表层沉积物稀土元素的地球化学[J]. 热带海洋, 1989, 8(2): 93-101.
- [22] 苏广庆, 王有强, 王晓彬, 等. 南沙群岛海区晚第四纪碳酸盐沉积[J]. 台湾海峡, 1994, 13(3): 263-274.
- [23] 杨文光, 谢昕, 郑洪波, 等. 南海北部陆坡高速堆积体沉积物稀土元素特征及其物源意义[J]. 矿物岩石, 2012, 32(1): 74-81.
- [24] 付淑清, 朱照宇, 欧阳婷萍, 等. 南海南部陆坡晚第四纪沉积物稀土元素及环境意义[J]. 热带地理, 2010, 30(1): 24-25.
- [25] 吴梦霜, 邵磊, 庞雄, 等. 南海北部深水区沉积物稀土元素特征及其物源指示意义[J]. 沉积学报, 2012, 30(4): 672-678.
- [26] 郑凯清. 南海 HX132 柱状沉积物稀土元素特征及其沉积环境意义[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- [27] 谢锦龙, 余和中, 唐良民, 等. 南海新生代沉积基底性质和盆地类型[J]. 海相油气地质, 2010, 15(4): 35-47.
- [28] 刘岩, 张祖麟, 洪华生. 珠江口伶仃洋海区表层沉积物稀土元素分布特征及配分模式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(10): 103-108.
- [29] 邵磊, 董百万, 刘志伟, 等. 南海沉积物稀土微量元素分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1999, 27(D): 55-60.
- [30] 奚衍光, 李军, 李炎. 北部湾东部海域表层沉积物稀土元素组成及物源指示意义[J]. 地球化学, 2012, 2: 147-157.
- [31] 刘宝林, 王亚平, 王吉中, 等. 南海北部陆坡海洋沉积物稀土元素及物源和成岩环境[J]. 海洋地质与第

- 四纪地质, 2004, 24(4): 17-23.
- [32] 苗卫良, 邵磊, 庞雄, 等. 南海北部渐新世以来的稀土元素地球化学特征及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(2): 71-78.
- [33] 刘建国, 陈忠, 颜文, 等. 南海表层沉积物中细粒组分的稀土元素地球化学特征[J]. 中国地质大学学报, 2010, 35(4): 563-572.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 陈忠, 夏斌, 颜文, 等. 南海火山玻璃的分布特征、化学成分及源区探讨[J]. 海洋学报, 2005, 27(5): 73-81.
- [37] 季福武, 林振宏, 杨群慧等. 南海东部表层沉积物中轻矿物分布与来源[J]. 海洋科学, 2004, 28(2): 32-35.
- [38] 杨群慧, 林振宏, 张富元, 等. 南海中东部表层沉积物矿物组合分区及其地质意义[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(6): 591-599.
- [39] 刘昭蜀, 赵焕庭, 范时清, 等. 南海地质[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [40] 陈忠, 古森昌, 颜文, 等. 南沙海槽南部及邻近海区表层沉积物中的碎屑矿物特征[J]. 热带海洋学报, 2002, 21(2): 84-90.
- [41] 田正隆, 戴英, 龙爱民, 等. 南沙群岛海域沉积物稀土元素地球化学研究[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(1): 8-14.
- [42] 蓝先洪. 中国海区海底沉积物稀土元素地球化学[J]. 海洋地质动态, 2000, 16(10): 4-6.
- [43] 赵一阳, 王金土, 秦朝阳, 等. 中国大陆架海底沉积物中的稀土元素[J]. 沉积学报, 1990, 8(1): 37-43.
- [44] 马荣林, 杨奕, 何玉生. 海南岛南渡江近岸河口沉积物稀土元素地球化学[J]. 中国稀土学报, 2010, 28(1): 111-114.
- [45] 颜彬, 苗莉, 黄蔚霞, 等. 广东近岸海湾表层沉积物的稀土元素特征及其物源示踪[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(2): 67-79.
- [46] Geng A C, Zhang S, Harald H. Adsorption of rare earth elements in the system of $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and humic acid [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1997, 5(4): 379.
- [47] 刘丛强, 吴佳红, 于文辉. 氢氧化铁胶体/水界面作用与地表水中稀土元素的分异——pH 控制机理的实验研究[J]. 中国科学, 2001, 31(10): 873-880.
- [48] Zhang Y, Lacan F, Jeandel C. Dissolved rare earth elements tracing lithogenic inputs over the Kerguelen Plateau (Southern Ocean)[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2008, 55(5-7): 638-652 .
- [49] Mascarenhas P M, Nath B N. Selective leaching studies of sediments from a seamount flank in the Central Indian Basin: Resolving hydrothermal, volcanogenic and terrigenous sources using major, trace and rare-earth elements [J]. Marine Chemistry, 2010, 121(1-4): 49-66 .
- [50] 孟妍, 伏美燕. 去除有机质前后海底沉积物对稀土元素吸附能力的变化研究[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(4): 20-24 .
- [51] 郭旭涛, 李培杰, 熊玉华, 等. 稀土在铝、镁合金中的应用[J]. 材料工程, 2004, 8: 60-64.
- [52] 吴长航. 南海北部陆缘大型多金属结核的生长及元素地球化学特征研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2009.
- [53] 张振国, 高莲凤, 李昌存, 等. 多金属结核/结壳中稀土元素的富集特征及其资源效应[J]. 中国稀土学报, 2011, 29(5): 630-636.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)