

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2015.03145

# 南极半岛东北部海域表层沉积物稀土元素特征及物源指示意义

陈志华<sup>1</sup>, 黄元辉<sup>1</sup>, 唐正<sup>1</sup>, 王豪壮<sup>1</sup>, 葛淑兰<sup>1</sup>, 方习生<sup>1</sup>,  
韩喜彬<sup>2</sup>, 王爱军<sup>3</sup>, 武力<sup>4</sup>, 朱志敏<sup>2</sup>

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 青岛 266061;  
2. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012; 3. 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005;  
4. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**通过对南极半岛东北部海域 36 个表层沉积物样品的稀土元素分析发现:(1)研究区表层沉积物中稀土元素总量(REE)的分布范围为(45.47~183.60)×10<sup>-6</sup>,平均值为 91.36×10<sup>-6</sup>;稀土元素含量的高低与铝硅酸盐黏土成正比,与生物硅含量成反比;(2)大致以象岛至南极半岛北部的茹安维尔岛为界,研究区西部的布兰斯菲尔德海峡及南设得兰群岛北部岛架-岛坡沉积物稀土含量较低,稀土元素页岩标准化模式与长城站周边土壤/湖泊沉积物、火山岩相一致,表现为重稀土相对富集,铈正异常明显,Sm/Nd 分子比值大,推断该区沉积物主要来源于南设得兰群岛中-新生代火山岩分布区与现代火山活动区;(3)研究区东部鲍威尔海盆、南奥克尼群岛岛架和南斯科舍海脊区沉积物稀土元素的页岩标准化配分模式表现为平坦型,轻稀土明显抬升,铈正异常不显著,Sm/Nd 分子比值小,稀土元素含量受沉积物中黏土组分含量、硅质生物组分等制约,推断沉积物陆源碎屑主要来源于威德尔海西部和南部,局部受南奥克尼群岛、南斯科舍海脊和南设得兰群岛物质的影响,沉积物的搬运主要受冰筏和海流制约。

**关键词:**稀土元素;表层沉积物;物源示踪;南极半岛;东北部海域

中图分类号: P736.4 文献标识码: A 文章编号: 0256-1492(2015)03-0145-11

南极半岛、南设得兰群岛及周边海域纬度较低,气候相对温暖,亦是近半个世纪以来南极乃至全球增温最快的地区之一<sup>[1-2]</sup>;随着该地区气温和海水温度的升高,冰架出现了大规模的崩解和退缩,大陆和海洋无冰区面积扩大,海洋生物力增加,这些变化不仅左右着本地区海洋沉积环境的变化,同时对全球大洋循环、气候变化和生物地球化学循环等有着深远的影响<sup>[3-4]</sup>。

海洋沉积物,特别是南极大陆边缘沉积物,是了解现代和过去南极变化的重要载体和直接证据。近 30 年来,国内外一些学者从沉积学、矿物学、地球化学、微体古生物等角度探讨了该地区沉积物的组成及其与环境、气候的关系,但多数研究集中在乔治王岛和南极半岛各考察站周边地区<sup>[5-8]</sup>,以及两者之间的布兰斯菲尔德海峡区<sup>[9-14]</sup>,而在南极半岛东北部

等海域的考察和研究甚少<sup>[15-16]</sup>。

稀土元素因物理和化学性质相似,溶解度低,在风化、剥蚀、搬运、沉积和早期成岩作用过程中不易迁移,产生的元素分异小,且表现出一定的系统性,因而对揭示海洋沉积物来源、形成条件、物源区特征和气候变化等具有重要意义<sup>[17-18]</sup>。在南极半岛地区,国内外学者先后应用稀土元素来研究岩石<sup>[19]</sup>、湖泊与岛坡沉积<sup>[20]</sup>、近岸海湾沉积<sup>[6,8]</sup>、布兰斯菲尔德海峡沉积<sup>[21-22]</sup>等特征、成因及环境气候记录,但基本未涉及南极半岛东北部海域。本文综合利用新近获取的中国第 28 次和第 30 次南极考察样品,结合前人在邻近地区开展的一些工作,力图探讨南极半岛东北部海域表层沉积物稀土元素的分布特点、制约因素及环境指示意义。

## 1 区域概况

南极半岛位于西南极洲,是南极大陆最大、向北伸入海洋最远(南纬 63°)的大半岛,有“海洋性南极”之称。它东濒威德尔海,西濒别林斯高晋海,北隔德雷克海峡与南美洲相望,南接埃尔斯沃斯高地。该半岛属中-新生代褶皱带,通过海底山脉与南奥克

基金项目:南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE2014-01-02, CHINARE2015-01-02, CHINARE2014-04-01, CHINARE2015-04-01);国家自然科学基金项目(40176136,41106166)

作者简介:陈志华(1970—),男,博士,研究员,主要从事海洋地质学研究,Email: chenizia@fio.org.cn

收稿日期:2015-04-10;改回日期:2015-04-24. 周立君编辑

尼群岛—南桑德韦奇群岛—南乔治亚岛—南美洲的安第斯山脉连成一蟠龙式的山系,发育火山岛弧和沉积岩<sup>[23]</sup>。南极半岛地区多山,多岛屿,山地冰川发育;海岸曲折呈峡湾形,东侧沿岸发育有菲尔希纳冰架和拉森等冰架。如图1所示,研究区位于南极半岛的东北部,介于南极半岛及附属岛屿——南设得兰群岛和南奥克尼群岛之间,主要地理地貌单元包括布兰斯菲尔德海峡、鲍威尔海盆、南奥克尼岛架和南斯科舍海脊等。研究区水团和流系见图1,大体由威德尔海底层水(WSBW)、威德尔海深层水(WSDW)、南极半岛陆架-岛架水和来自别林斯高晋海的表层暖水等组成,北部的南斯科舍海脊一带受南极绕极流(ACC)和绕极深层水影响明显,地形、海流和冰山等对该地区海底沉积物的发育起着重要作用<sup>[24-29]</sup>。

## 2 材料和方法

本文的研究材料主要来源于2011—2012年执行的中国第28次科学考察和2013—2014年执行的第30次南极科学考察航次,样品多为箱式取样器获取的表层沉积物样品(0~5 cm),个别为柱状样或多管样的顶部样品(0~2 cm)。

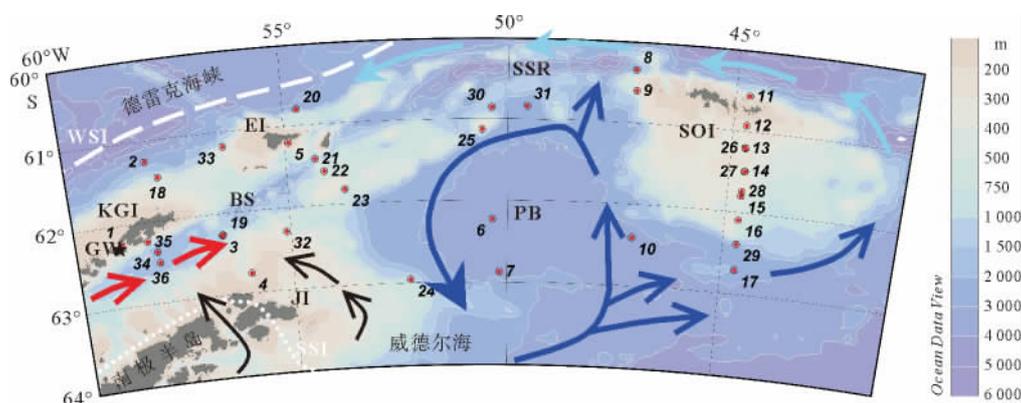
样品的稀土元素及相关测试在国家海洋局第一海洋研究所海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实

验室完成。稀土元素的分析测试采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, X-series II)。仪器对稀土元素的检出限为 $10^{-9}$ ,相对标准偏差 $<5\%$ 。稀土元素(REE)的分组采用两分法,前6个元素(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu)统称为轻稀土,用LREE表示;后8个元素(Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu)统称为重稀土,用HREE表示;稀土元素的铈异常 $\delta Ce = Ce_{SN} / (La_{SN} \times Pr_{SN})^{0.5}$ ,铕异常 $\delta Eu = Eu_{SN} / (Sm_{SN} \times Gd_{SN})^{0.5}$ ,其中SN代表页岩标准化<sup>[17]</sup>。

## 3 结果

### 3.1 稀土元素的含量及分布

研究区表层沉积物稀土元素含量及相关参数见表1。表层沉积物REE含量范围为 $(45.47 \sim 183.60) \times 10^{-6}$ ,平均值为 $91.36 \times 10^{-6}$ ,变异系数为0.35;LREE/HREE比值的变化范围为3.94~11.43,平均值为6.55。如图2a所示,REE的高值区主要分布在研究区中南部靠威德尔海一侧(鲍威尔海盆),低值区主要分布在南奥克尼群岛南部岛架区和西部的布兰斯菲尔德海峡及南设得兰群岛北部岛架-岛坡区。LREE/HREE比值的分布与总稀土含量分布大体相似,体现出轻稀土占优势;但研究区西部的布兰斯菲尔德海峡及南设得兰群岛北部岛



图中KGI为乔治王岛,EI为象岛,SOI为南奥克尼群岛,JI为茹安维尔岛,GW为长城站;BS为布兰斯菲尔德海峡,PB为鲍威尔海盆,SSR为南斯科舍海脊;研究区流系主要由威德尔海底层水(蓝色)、威德尔海深层水(蓝灰色)、沿岸流(黑色)、别林斯高晋海表层暖流(红色)等组成<sup>[24-27]</sup>;WSI和SSI分别为南半球冬、夏季海冰边界<sup>[33]</sup>。

KGI, King George Island; EI, Elephant Island; SOI, the South Orkney Islands; JI, Joinville Island; GW and black star denote Chinese Great Wall Station. The circulation in the area is composed mainly of the Weddell Sea Bottom Water (WSBW, blue), the Weddell Sea Deep Water (WSDW, gray blue), coastal current (black), and Bellinghshausen Sea warm surface current (red)<sup>[24-27]</sup>. WSI and SSI are austral winter and summer sea ice limits<sup>[33]</sup>.

图1 南极半岛东北部海域稀土元素分析站位与地形和流系及海冰分布

Fig. 1 Geographic map showing sampling sites, topography, current and circulation system, and seasonal sea ice limits of the study area

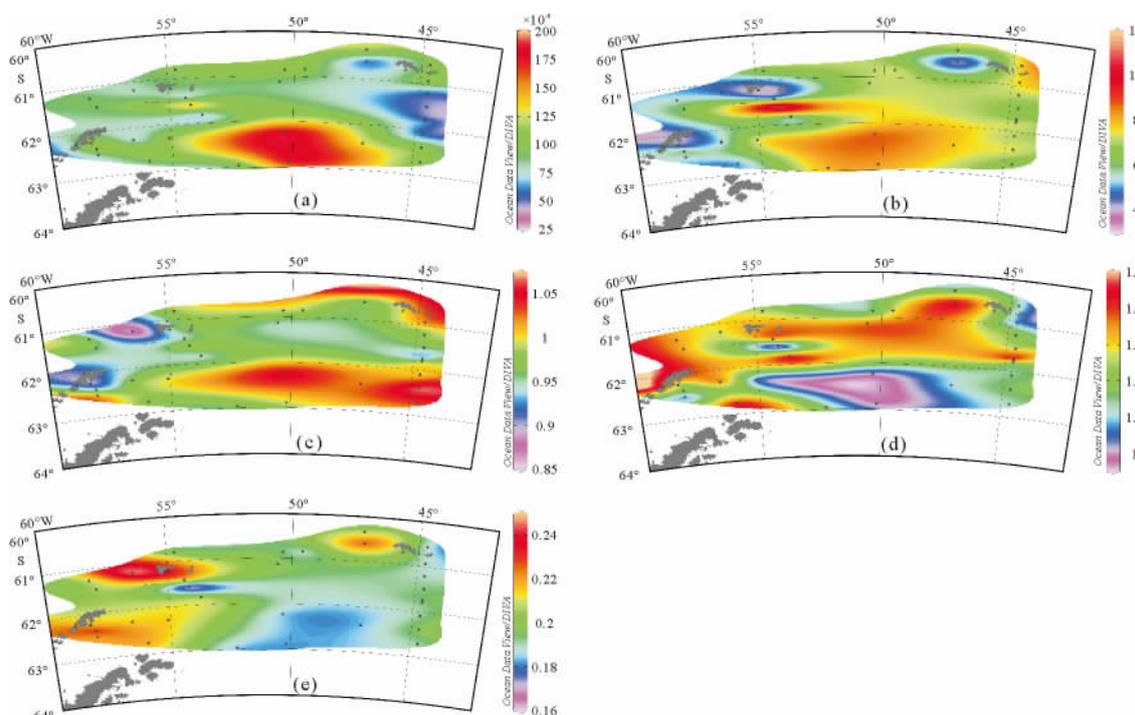


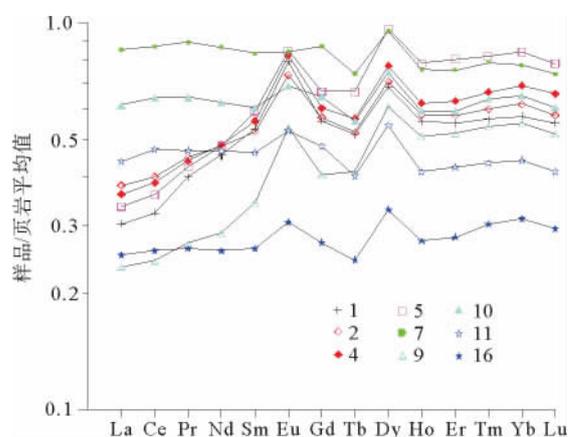
图 2 研究区表层沉积物 REE 含量(a)、LREE/HREE 比值(b)、 $\delta\text{Ce}$  (c)、 $\delta\text{Eu}$ (d)、Sm/Nd 分子比值(e)的分布  
 Fig. 2 (a) REE concentrations, (b) LREE/HREE ratios, (c)  $\delta\text{Ce}$ , (d)  $\delta\text{Eu}$ , (e) Sm-Nd molecular ratios of surface sediments in the study area

架-岛坡沉积物 LREE/HREE 比值明显偏低, 而南奥尼克群岛南部岛架区沉积物 LREE/HREE 比值较大(图 2b)。

### 3.2 稀土元素的页岩标准化配分模式

采用北美、欧洲和俄罗斯页岩的平均值<sup>[30]</sup>对稀土元素进行标准化, 典型样品的结果见图 3。从曲线的倾向来看, 研究区表层沉积物的页岩标准化稀土元素配分模式大体可分为两类: 一类为重稀土富集型, 沉积物的铈正异常明显, 见于研究区西部靠南设得兰群岛和南极半岛一侧, 如 1 号(ANT24-N08-1)、2 号(ANT28-D1-03)、4 号(ANT28-D1-09)、5 号(ANT28-D2-04)样品; 另一类为重稀土弱富集型或平缓型, 沉积物的铈正异常不明显, 见于研究区中部的鲍威尔海盆和东南部, 如 7 号(ANT28-D3-07)、10 号(ANT28-D4-09)样品等。南奥尼克群岛附近上述两种类型均有, 如群岛西侧的 9 号(ANT28-D4-03)样品重稀土富集, 铈正异常明显; 群岛南侧的 11 号(ANT28-D5-02)和 16 号(ANT28-D5-07)样品稀土标准化曲线较平缓, 铈正异常不明显。如表 1 和图 3 所示, 研究区表层沉积物的铈异常值不明显,  $\delta\text{Ce}$  值的变化范围为 0.85~1.06, 平均值为 0.98; 研究区东南部靠威德尔海一侧和东北部的南奥尼克群岛-南斯科舍海脊一带沉积物略显正异常, 乔治王

岛和象岛附近海域沉积物略显负异常(图 2c)。如表 1 和图 3 所示, 研究区沉积物多表现为铈正异常,  $\delta\text{Eu}$  的变化范围为 0.96~1.46, 平均为 1.23; 铈正异常在研究区西部的乔治王岛附近和研究区中部最为明显, 在中南部海域较小或不明显(图 2d)。如图 3 所示, 研究区沉积物除铈正异常外, 镝(Dy)相对于页岩富集, 显示出一定的地域性。



图中样品代号同表 1

Sample codes in the figure are the same as in table 1

图 3 南极半岛东北部海域典型表层沉积物样品的稀土元素页岩标准化配分模式

Fig. 3 Typical shale-normalized REE patterns of surface sediments in the study area

表1 南极半岛东北部海域表层沉积物稀土元素含量及相关参数值(含量单位: $\times 10^{-6}$ )Table 1 REE concentrations of surface sediments in the study area and associated reference data(concentration unit: $\times 10^{-6}$ )

代号	站号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	REE	LREE/ HREE	$\delta\text{Ce}^*$	$\delta\text{Eu}^*$
1	ANT24-N08-1	12.41	26.84	4.00	17.34	4.02	1.28	3.55	0.62	3.76	0.73	2.07	0.31	2.01	0.34	79.28	4.92	0.93	1.46
2	ANT28-D1-03	15.60	33.28	4.49	18.23	3.94	1.18	3.63	0.63	3.88	0.76	2.17	0.33	2.17	0.35	90.64	5.52	0.97	1.34
3	ANT28-D1-07	13.90	30.39	3.99	16.26	3.64	1.04	3.20	0.58	3.58	0.68	1.97	0.30	2.02	0.33	81.88	5.46	1.00	1.30
4	ANT28-D1-09	14.83	32.16	4.40	18.41	4.19	1.33	3.83	0.68	4.26	0.81	2.36	0.37	2.42	0.40	90.45	4.98	0.97	1.42
5	ANT28-D2-04	13.76	29.89	4.26	18.29	4.45	1.37	4.23	0.80	5.30	1.03	3.03	0.45	2.96	0.48	90.28	3.94	0.95	1.35
6	ANT28-D3-05	36.17	77.81	9.01	33.85	6.50	1.40	5.50	0.88	5.10	0.95	2.79	0.43	2.75	0.44	183.60	8.74	1.05	1.00
7	ANT28-D3-07	35.06	72.13	8.93	32.97	6.27	1.36	5.53	0.89	5.25	0.99	2.84	0.44	2.73	0.45	175.84	8.20	0.99	0.99
8	ANT28-D4-02	20.74	45.95	5.48	21.23	4.58	1.19	4.05	0.69	4.02	0.79	2.34	0.36	2.34	0.38	114.14	6.62	1.05	1.18
9	ANT28-D4-03	9.63	20.15	2.70	10.89	2.58	0.86	2.57	0.50	3.34	0.66	1.94	0.30	1.94	0.32	58.37	4.05	0.96	1.44
10	ANT28-D4-09	25.19	53.35	6.43	23.75	4.54	1.11	4.09	0.67	4.09	0.77	2.22	0.35	2.28	0.37	129.22	7.70	1.02	1.10
11	ANT28-D5-02	17.99	39.15	4.69	17.77	3.47	0.85	3.04	0.48	2.99	0.54	1.59	0.24	1.55	0.25	94.60	7.85	1.04	1.12
12	ANT28-D5-03	19.74	41.81	5.04	18.81	3.71	0.87	3.30	0.54	3.26	0.61	1.79	0.28	1.76	0.29	101.82	7.61	1.02	1.07
13	ANT28-D5-04	11.24	23.79	2.95	11.19	2.24	0.58	2.04	0.35	2.05	0.39	1.14	0.17	1.15	0.19	59.47	6.94	1.01	1.16
14	ANT28-D5-05	9.38	19.42	2.46	9.45	1.89	0.51	1.71	0.30	1.83	0.35	1.03	0.16	1.03	0.17	49.67	6.55	0.99	1.20
15	ANT28-D5-06	12.55	26.18	3.23	12.28	2.46	0.63	2.14	0.35	2.15	0.40	1.17	0.18	1.19	0.19	65.11	7.37	1.00	1.18
16	ANT28-D5-07	10.30	21.38	2.62	9.81	1.96	0.49	1.72	0.29	1.81	0.36	1.05	0.17	1.09	0.18	53.23	6.99	1.00	1.15
17	ANT28-D5-09	19.25	40.45	4.73	18.32	3.65	0.92	3.37	0.60	3.86	0.76	2.19	0.36	2.24	0.36	101.05	6.35	1.03	1.13
18	ANT30-D1-04	17.18	33.46	4.22	18.30	3.93	1.12	3.32	0.56	3.38	0.70	2.12	0.30	1.89	0.33	90.81	6.21	0.96	1.33
19	ANT30-D1-07	12.03	23.91	3.14	14.04	3.14	0.96	2.72	0.48	2.95	0.62	1.86	0.26	1.73	0.29	68.13	5.24	0.95	1.41
20	ANT30-D2-03	18.49	36.40	4.42	18.66	3.85	1.06	3.38	0.57	3.37	0.70	2.12	0.30	1.96	0.33	95.61	6.51	0.98	1.26
21	ANT30-D2-04	13.35	25.82	3.33	14.72	3.34	1.01	3.01	0.54	3.36	0.71	2.14	0.30	1.93	0.34	73.90	4.99	0.94	1.36
22	ANT30-D2-05	34.13	62.44	7.00	26.11	4.57	0.93	3.81	0.55	2.98	0.60	1.81	0.25	1.57	0.26	147.01	11.43	0.98	0.96
23	ANT30-D2-06	12.20	23.88	3.13	13.70	2.95	0.92	2.53	0.43	2.64	0.54	1.59	0.23	1.51	0.25	66.50	5.84	0.94	1.44
24	ANT30-D2-10	19.29	36.47	4.42	17.86	3.43	0.86	2.96	0.46	2.69	0.54	1.63	0.24	1.55	0.26	92.66	7.97	0.96	1.16
25	ANT30-D3-03	17.92	32.95	4.00	16.62	3.43	1.02	3.00	0.50	2.89	0.59	1.73	0.24	1.53	0.26	86.68	7.07	0.95	1.36
26	ANT30-D5-04	10.29	19.32	2.39	9.96	1.94	0.53	1.64	0.27	1.60	0.33	0.98	0.14	0.92	0.16	50.47	7.36	0.95	1.27
27	ANT30-D5-05	9.29	17.06	2.16	8.80	1.77	0.51	1.54	0.26	1.54	0.32	0.99	0.14	0.93	0.16	45.47	6.73	0.93	1.32
28	ANT30-D5-06	9.93	17.88	2.24	9.11	1.85	0.58	1.61	0.28	1.62	0.34	1.04	0.15	1.02	0.17	47.82	6.68	0.92	1.44
29	ANT30-D5-08	20.88	42.92	4.62	19.15	3.93	1.00	3.41	0.56	3.29	0.67	2.01	0.29	1.85	0.31	104.89	7.47	1.06	1.17
30	ANT30-DA-01	21.33	41.84	4.97	20.09	4.09	1.01	3.52	0.58	3.51	0.71	2.20	0.31	2.09	0.35	106.60	7.03	0.99	1.14
31	ANT30-DA-02	20.68	40.51	4.82	19.92	3.88	1.07	3.30	0.53	3.18	0.66	1.98	0.29	1.83	0.32	102.97	7.52	0.99	1.28
32	S3 <sup>[31]</sup>	20.88	45.41	5.89	20.38	4.56	0.98	3.57	0.60	3.37	0.71	2.07	0.32	2.15	0.35	111.24	7.47	1.00	1.04
33	S5 <sup>[31]</sup>	13.33	25.80	4.03	15.24	3.92	1.11	3.54	0.59	3.58	0.77	2.18	0.34	2.08	0.34	76.85	4.73	0.86	1.28
34	S23 <sup>[31]</sup>	19.67	40.59	5.64	20.82	4.99	1.29	4.21	0.68	4.07	0.86	2.43	0.38	2.40	0.39	108.42	6.03	0.94	1.21
35	S3* <sup>[22]</sup>	17.80	35.80	5.36	25.90	5.89	1.70	6.35	0.88	5.62	1.16	3.39	0.50	3.19	0.50	114.04	4.28	0.89	1.19
36	S4* <sup>[22]</sup>	13.50	30.00	3.84	15.90	3.65	0.88	3.49	0.54	3.13	0.76	1.87	0.28	2.11	0.26	80.21	5.45	1.02	1.06
	Min	9.29	17.06	2.16	8.80	1.77	0.49	1.54	0.26	1.54	0.32	0.98	0.14	0.92	0.16	45.47	3.94	0.85	0.96
	Max	36.17	77.81	9.01	33.85	6.50	1.70	6.35	0.89	5.62	1.16	3.39	0.50	3.19	0.50	183.60	11.43	1.06	1.46
	Av	17.22	35.18	4.42	17.61	3.70	0.99	3.29	0.55	3.31	0.66	1.94	0.29	1.89	0.31	91.36	6.55	0.98	1.23
	Cv	0.40	0.40	0.37	0.34	0.32	0.29	0.33	0.30	0.31	0.31	0.30	0.31	0.30	0.29	0.35	0.23	0.05	0.11

续表 1

代号	站号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	REE	LREE/ HREE	$\delta\text{Ce}^*$	$\delta\text{Eu}^*$
长城站土壤/湖泊沉积物** ( $n=10$ , 本文)		8.74	21.24	2.95	13.40	3.31	1.12	2.82	0.52	3.25	0.63	1.80	0.28	1.78	0.29	62.13	4.48	1.01	1.62
菲尔德斯半岛 凝灰岩 <sup>[19]</sup> ( $n=8$ )		16.19	37.30	4.10	20.90	5.39	2.16	6.58	0.98	5.47	1.12	2.89	0.40	2.53	0.40	106.39	4.28	1.13	1.53
菲尔德斯半岛 玄武岩 <sup>[19]</sup> ( $n=16$ )		6.53	14.68	2.03	9.75	2.45	0.90	2.51	0.37	2.18	0.46	1.05	0.15	1.10	0.17	44.34	4.62	0.98	1.54
菲尔德斯半岛 安山岩 <sup>[19]</sup> ( $n=10$ )		10.93	24.61	3.21	15.30	3.67	1.26	3.69	0.53	3.10	0.65	1.43	0.22	1.60	0.25	70.44	5.20	1.00	1.47
菲尔德斯半岛 安山岩 <sup>[19]</sup> ( $n=4$ )		19.53	43.22	5.46	25.56	6.12	1.72	5.85	0.82	5.07	1.07	2.73	0.39	2.68	0.43	120.64	5.31	1.01	1.25
页岩平均 <sup>[30]</sup>		41	83	10	38	7.5	1.61	6.35	1.2	5.49	1.3	3.75	0.55	3.51	0.61	27	230.9	3.64	
南大西洋有孔虫 <sup>[17]</sup> ( $n=4$ )		3.8	5.5		3.5	0.65	0.15		0.11					0.28	0.042	14.03	31.48		
印度洋硅藻 <sup>[17]</sup>		5.78	8.21		6.71	1.56	0.404	1.78		1.69		0.998		0.859		27.99	4.25		1.04
东威德尔海 CDW( $\times 10^{-12}$ ) <sup>[32]</sup>		4.03	0.92		2.45	0.47	0.13	0.83		1.07	0.00	1.12		1.25	0.19				0.13
东威德尔海 AABW( $\times 10^{-12}$ ) <sup>[32]</sup>		7.50	1.68		5.48	1.07	0.27	1.38		1.58	0.00	1.41		1.47	0.25				0.12

备注: Min:最小值, Max:最大值, Av:平均值, Cv:变异系数。代码 1 为第 24 次南极考察样品, 取样地点为长城站附近的长城湾; 代码 2—17 为第 28 次南极考察样品, 18—31 为第 30 次南极考察样品。\* 柱状样顶部样品。\* \* 长城站土壤/湖泊沉积物样品由王能飞博士提供。

## 4 讨论

### 4.1 稀土元素的富集及其环境制约

研究区位于南极夏季和冬季海冰边界线之间, 大部分地区季节性海冰发育<sup>[33]</sup>, 南翼威德尔海西侧至南奥克尼群岛南侧为威德尔海冰山向外输运的主要通道<sup>[28,34]</sup>。受冰筏碎屑影响, 该地区海底沉积物相对较粗, 属极地冰-海成因沉积物, 因陆架、陆坡、深海等海底地形地貌的变化可分为砾质、砂质、粉砂质和泥质沉积物等类型, 但均含有数量不等的砂砾质冰筏碎屑组分<sup>[15]</sup>。从图 4a 来看, 研究区表层沉积物中黏土组分的含量变化较大, 为 0~42% 不等, 多数样品小于 30%; 尽管黏土组分含量相近的沉积物其稀土元素含量变化幅度较大, 但稀土元素含量随黏土组分含量增加的趋势明显, 反映出稀土元素趋向于在细粒沉积物中富集, 因为它们可以通过类质同象进入黏土矿物的晶格之中<sup>[18]</sup>, 或以钛的氧化物、磷灰石等富稀土矿物形式出现在黏土相中<sup>[35]</sup>。

极区海水温度低, 钙质生物的生长与钙质壳体

的保存受到很大限制, 但硅藻等硅质生物较为发育, 特别是海冰边缘区因营养盐的大量释放, 海洋生产力往往很高。从图 4b 来看, 研究区表层沉积物中生源蛋白石含量大约为 0~40%, 显示出硅质生物遗壳在部分沉积物中占较大的比重; 沉积物中生源蛋白石含量越高, 稀土元素含量就越低, 前者对后者具有明显的稀释效应。稀土元素含量最低(图 2a)与生源蛋白石含量最高的区域位于南奥尼克群岛南侧岛架区。据研究, 硅藻中总稀土含量不足  $30 \times 10^{-6}$ , 不到研究区沉积物平均稀土含量的  $1/3$ <sup>[17]</sup>。南奥尼克群岛南侧浅水岛架位处威德尔海西侧冰山输运通道上, 春、夏季属海冰边缘区<sup>[28,34]</sup>, 冰山和海冰融化释放的大量营养盐使该海区海洋生产力高, 而浅水岛架环境则有利于硅质生物壳体快速沉降到海底并得以在沉积物中保存。

从图 4a 和 4b 来看, 尽管稀土元素偏向于在黏土沉积物中富集、在富硅质沉积物中亏损, 但两者对研究区沉积物稀土元素的制约还是有限。如果用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量来表征黏土组分含量, 从图 5a 可以看出, 研究区稀土元素最为富集的样品为鲍威尔海盆区的深海富铝硅酸盐黏土(6—7 号样品), 最为亏损

的沉积物来自南奥尼克群岛南侧岛架(如:13—16号样品、26—28号样品),而其他稀土元素含量中等的样品则分化为两类:一类  $Al_2O_3$  含量偏低,介于深海黏土和富生源硅沉积物之间,它们多为正常的岛架或岛坡沉积(如:10—12号样品,17、22、29号样品);另一类  $Al_2O_3$  含量偏高,相应沉积物的 Sm-Nd 分子比值偏大( $>0.2$ ),它们多集中分布在布兰斯菲尔德海峡或南设德兰群岛(乔治王岛、象岛等)附近海域,具有明显的地域性。钐的同位素 $^{143}Nd$ 是长周期放射性核素 $^{147}Sm$ 的子体( $t_{1/2} = 106 Ga$ ),因而沉积物的 Sm-Nd 比值越大,意味着该沉积物相对于亏损地幔的模式年龄越小,指示它们来源于相对较为年轻的地质体<sup>[36]</sup>。南极半岛和南设德兰群岛同属中-新生代褶皱带,前者多发育中生代火山岩,后者发育中-新生代火山岩<sup>[23,37]</sup>,且以高铝的玄武岩、玄

武安山岩为主,安山岩、英安岩、沉凝灰岩等次之<sup>[19,37-38]</sup>。来自布兰斯菲尔德海峡东部的岩心沉积物记录表明该地区全新世沉积有多层火山灰,海峡西部的欺骗岛是该地区晚第四纪以来最为重要的火山来源<sup>[39]</sup>。如图 2e 所示,Sm-Nd 分子比值在乔治王岛、象岛附近海域沉积物中较大,说明该地区沉积物受现代火山活动或年轻的火山岩风化剥蚀产物影响。从图 5a 来看,象岛以东位于南斯科舍海脊上的 4 个沉积物样品(20、25、30、31号样品)  $Al_2O_3$  含量大于 11%,但 Sm-Nd 分子比值小于 0.2,说明该海脊区可能发育相对较老的高铝火山岩;此外,南奥尼克群岛西侧的 9 号站位沉积物 Sm-Nd 分子比值较大(图 2e),说明该海脊局部可能发育较为年轻的火山岩,或受南设德兰群岛等物源影响。

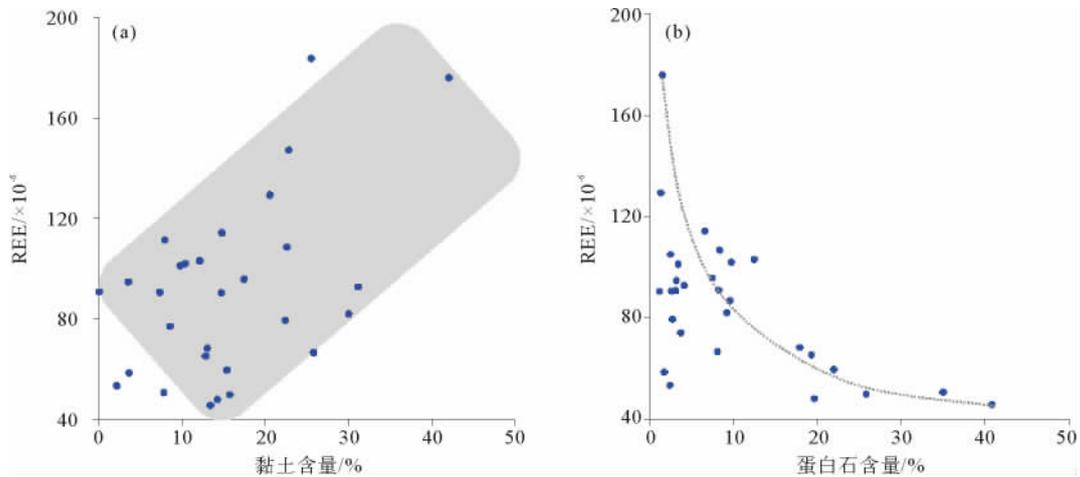


图 4 研究区表层沉积物 REE 含量与黏土组分含量、蛋白石含量的制约关系

Fig. 4 Correlations between REE and clay fraction and biogenic opal of surface sediments in the study area

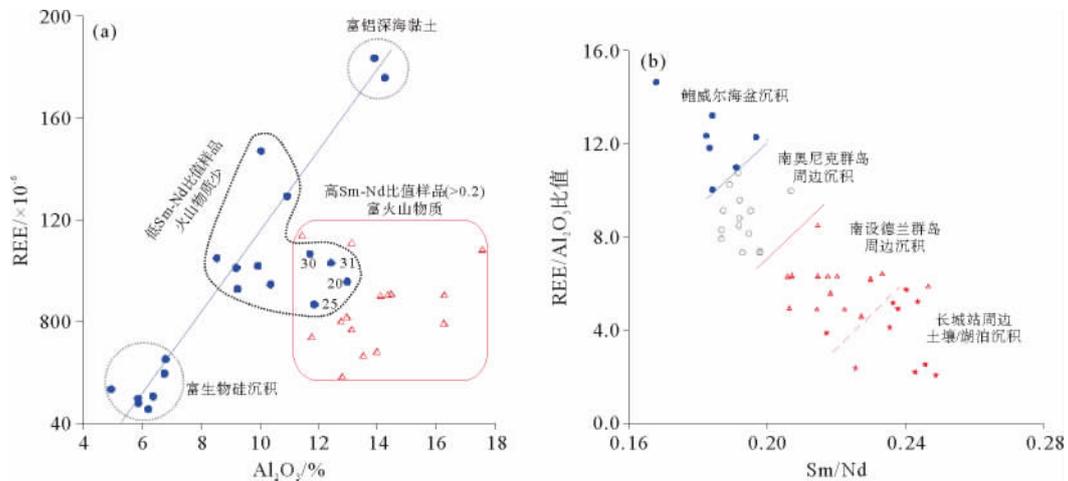


图 5a 中样品代号同表 1

Sample codes in fig. 5a are the same as in table 1

图 5 研究区表层沉积物 REE— $Al_2O_3$ 、 $REE/Al_2O_3$ —Sm/Nd 分子比值之间的制约关系

Fig. 5 Correlations between REE and  $Al_2O_3$ , between  $REE/Al_2O_3$  and Sm-Nd molecular ratios of surface sediments

如图 6a 所示,从研究区表层沉积物与其他相关端元组分稀土配分模式的对比来看,研究区表层沉积物稀土元素的平均值介于远洋黏土<sup>[17]</sup>与(印度洋)硅藻<sup>[17]</sup>、(南大西洋)有孔虫<sup>[17]</sup>等生源组分之间,其页岩标准化曲线逼近南极长城站周边土壤/湖泊沉积物的平均值,只是其轻稀土略微富集。与 Dome C 冰心粉尘<sup>[40]</sup>和南美洲黄土<sup>[41]</sup>相比(图 6a),研究区表层沉积物页岩配分模式与后者更为接近,反映出研究区沉积物与南美洲黄土发育的构造背景大体一致,中-新生代火山岩发育,且不排除研究区部分细粒沉积物来源于南美洲的风尘物质。

#### 4.2 稀土元素分区与物源指示意义

从上述对比和讨论来看,研究区表层沉积物稀土元素的区域分异特点明显。如图 5b 所示,对研究区沉积物和南极长城站周边土壤/湖泊沉积物综合作图,发现随着沉积物 REE/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值的变小和 Sm/Nd 分子比值的逐渐变大,大体可将研究区表层沉积物划分为 3 组,表现出明显的地域分布特点,分别对应于鲍威尔海盆沉积、南奥克尼群岛周边沉积(包括南侧的岛架沉积和西侧的南斯科舍海脊沉积)和南设德兰群岛周边沉积(包括布兰斯菲尔德海峡沉积、乔治王岛和象岛西侧岛架-岛坡沉积),且后者与南极长城站周边土壤/湖泊沉积物没有明显的分界。如图 6b 所示,对上述 3 组沉积物稀土元素的平均值作图,发现鲍威尔海盆沉积和南奥克尼群岛周边海域沉积物的稀土元素配分模式基本一致,均为平坦型,只是稀土元素含量相差近 1 倍,说明它们的物质来源基本相似,以正常深海-半深海沉积和正常岛架-陆架沉积为主。南设德兰群岛周边沉积,包括布兰斯菲尔德海峡沉积及乔治王岛、象岛西侧岛架-岛坡沉积,其稀土页岩标准化模式为重稀土富集型,铕正异常明显,逼近长城站周边土壤与湖泊沉积物

的平均值,只是含量略高一点,且大体落在乔治王岛南部菲尔士半岛系列火山岩(包括玄武岩、玄武安山岩、安山岩、沉凝灰岩)的页岩标准化模式区间内,充分说明该海域沉积物主要来源于邻近的南设德兰群岛。

依据图 5b 给出的沉积物分组,结合前面对南斯科舍海脊沉积物的成因探讨,大体可将研究区沉积物分为东、西 2 个大区,而东部沉积物区又进一步细分为鲍威尔海盆、南奥克尼群岛岛架、南斯科舍海脊 3 个沉积小区(图 7)。大致以象岛东侧至南极半岛北部的茹安维尔岛为界,西部沉积区包括布兰斯菲尔德海峡沉积、乔治王岛和象岛西侧岛架-岛坡沉积,沉积物主要来源于南设德兰群岛地区,包括乔治王岛、象岛等岛屿;该地区普遍发育中-新生代高铝火山岩,全新世及现代火山活动频繁,火山岩或火山灰经冰川、冰山、海冰、海流等创蚀与搬运,在布兰斯菲尔德海峡及乔治王岛、象岛西侧岛架-岛坡等地沉积下来;在西风带驱动的自西向东的海流(如别林斯高晋海表层暖水)及风力(冬半年以东南东风为主)等作用下,布兰斯菲尔德海峡西部欺骗岛等地火山喷发产生的火山灰亦被带往海峡东部沉积<sup>[39]</sup>。研究区东部沉积区包括鲍威尔海盆、南奥克尼群岛岛架、南斯科舍海脊 3 个小区,沉积物稀土元素页岩标准化配分模式总体表现为平坦型,轻稀土明显抬升,铕正异常不显著,Sm/Nd 分子比值小,沉积物主要来源于相对较老的地层和岩石。Diekmann 和 Kuhn<sup>[29]</sup>通过对威德尔海及邻近海域表层沉积物的重矿物研究揭示,威德尔海东南部近海以挪威角铁镁质岩浆岩组合和东南极混合组合为主,南部近海以南威德尔海沉积岩组合、南威德尔海沉积岩-铁镁质岩浆岩混合组合、东南极混合组合为主,中央海盆以东南极混合组合和东南极变质岩组合为主;靠近南极半岛北端的威德尔海西部以东南极混合组合、

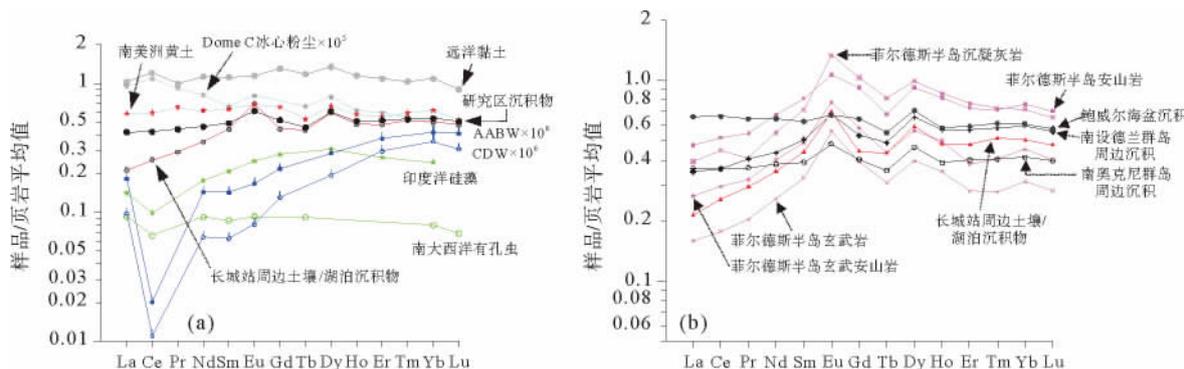


图 6 研究区沉积物与相关沉积端元的稀土元素页岩标准化模式对比

Fig. 6 Comparisons of shale-normalized REE patterns between the studied surface sediments and other associated components

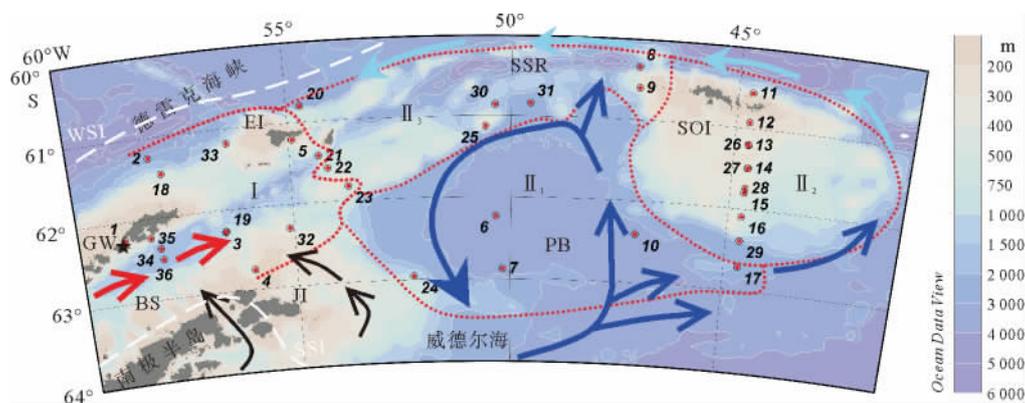


图7 南极半岛东北部海域沉积物稀土元素分区

(图中红色虚线为稀土元素分区界线,其他标示同图1)

Fig. 7 REE-based provenance divisions of the study area

(The division boundaries are denoted as red dashed lines; other signals and notes are the same as in Fig. 1)

南威德尔海沉积岩-铁镁质岩岩浆岩混合组合、南威德尔海沉积岩组合和西威德尔海混合组合为主;南奥尼克群岛周边海域以西威德尔海混合组合为主,其次为南奥尼克变质岩组合、东南极混合组合和南威德尔海沉积岩-铁镁质岩岩浆岩混合组合;南极半岛北端与南设德兰群岛之间为南设德兰火山岩组合。刘忠诚等<sup>[16]</sup>依据碎屑矿物的组合特征将研究区划分为2个区,西区(I区)为辉石-磁铁矿-火山玻璃型,主要来源于南设得兰群岛及南极半岛北段;东区(II区)为石榴子石-绿帘石-角闪石-石英型,南奥尼克群岛物质、南极绕极环流搬运、南极半岛及附近岛屿物质对该区沉积物均有贡献。综合稀土元素分区与前人的有关矿物组合分区,推断研究区东部包括鲍威尔海盆、南奥尼克群岛岛架、南斯科舍海脊沉积物主要来源于威德尔海西部和南部,局部受南设德兰群岛和南斯科舍海脊物质的影响。在威德尔海西部和西北部,表层流、冰山、海冰的搬运方向大体与威德尔海底层水、深层水的搬运方向一致,前者对冰筏碎屑等粗组分的贡献较大,后者对细粒沉积物的影响比较大,较强的底层流、等深流和阵发性浊流等对粉砂沉积的影响比较大<sup>[24-25,28]</sup>;在其共同作用下,来自威德尔海西部、南部和东南极内陆的部分沉积物被带到南奥尼克群岛附近和鲍威尔海盆等地沉积下来<sup>[29]</sup>。

如图1所示,威德尔海底层水(WSBW)随着流涡沿南极半岛东侧的陆坡向北流,在鲍威尔海盆南部分成两支,一支向西进入鲍威尔海盆,然后向西北绕鲍威尔海盆一圈,又转向海盆东南部进入威德尔海;另一支沿着珍海盆南部向东演变成威德尔海深层水(WSDW),然后再分为两支,其中一支向东绕

过南奥尼克台地沿南斯科舍海脊向东南进入南极半岛西部的别林斯高晋海<sup>[25]</sup>。进入鲍威尔海盆的威德尔海底层水在海盆的北缘又分出一支强烈的底层流,沿南奥尼克微地块的西北边缘向北,对海底沉积物有明显的冲刷作用<sup>[15]</sup>。南奥尼克群岛南侧浅水岛架位于威德尔海西侧冰山输运通道上,水深的变浅使部分冰山在该台地滞留,春、夏季海冰和冰山的融化不仅释放大量的沉积物,同时释放大量的营养盐,促使该地区硅质生物生产力高,形成富硅藻快速堆积;从矿物和稀土元素配分模式来看,岛架区陆源碎屑沉积主要来源于威德尔海西部,南奥尼克群岛附近海域受岛上变质岩的影响。象岛与南奥尼克群岛之间的南斯科舍海脊沉积物 $Al_2O_3$ 含量相对其他半深海沉积(正常陆坡或岛坡)偏高,个别站位Sm-Nd分子比值较大,其元素地球化学特征介于南奥尼克群岛南侧岛架、鲍威尔海盆沉积物与南设德兰群岛周边海域沉积物之间,总体以混合成因为主,同时不排除海底火山岩的蚀变、侵蚀和再沉积。从环流特征来看,南斯科舍海脊区地貌复杂,台地与沟槽发育,沿海脊北部向西流动的威德尔海深层水会带来一部分威德尔海沉积物,从北部进出鲍威尔海盆的一些海流会促进鲍威尔海盆和斯科舍海之间的物质交换,受西风带驱动的自西向东的海流和冰山等也可将来自南设德兰群岛地区的沉积物带到海脊区沉积。

## 5 结论

(1)研究区表层沉积物中稀土元素总量的分布范围为 $(45.47 \sim 183.60) \times 10^{-6}$ ,平均值为 $91.36 \times$

$10^{-6}$ ; 稀土元素含量的高低与铝硅酸盐黏土成正比, 与硅质生物屑含量成反比;

(2) 大致以象岛至南极半岛北部的茹安维尔岛为界, 研究区西部的布兰斯菲尔德海峡及南设得兰群岛北部岛架-岛坡沉积物稀土含量较低, 稀土元素页岩标准化模式与长城站周边土壤/湖泊沉积物、火山岩相一致, 表现为重稀土相对富集, 钕正异常明显, Sm/Nd 分子比值大, 推断该区沉积物主要来源于南设得兰群岛中-新生代火山岩分布区与现代火山活动区。

(3) 研究区东部鲍威尔海盆、南奥克尼群岛岛架和南斯科舍海脊区沉积物稀土元素的页岩标准化配分模式表现为平坦型, 轻稀土明显抬升, 钕正异常不显著, Sm/Nd 分子比值小, 稀土元素含量受沉积物中黏土组分含量、硅质生物组分等制约, 推断沉积物陆源碎屑主要来源于威德尔海西部和南部, 局部受南奥尼克群岛、南斯科舍海脊和南设得兰群岛物质的影响, 沉积物的搬运主要受冰筏和海流制约。

致谢: 感谢中国第 28 次(2011—2012 年)和第 30 次(2013—2014 年)南极科学考察队, 特别是后甲板工作组为样品的取得付出了艰辛的劳动, 感谢国家海洋局第一海洋研究所王能飞博士提供长城站周边土壤与湖泊样品, 感谢极地沉积物样品库和国家海洋局极地考察办公室给予的一贯支持。感谢同济大学王汝建老师和肖文申博士为本文所付出的心血。

### 参考文献 (References)

- [1] Vaughan D, Marshall G, Connolley W, et al. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula [J]. *Climate Change*, 2003, 60: 243-274.
- [2] Steig E, Schneider D, Rutherford S, et al. Warming of the Antarctic Ice-Sheet surface since the 1957 International Geophysical Year [J]. *Nature*, 2009, 457: 459-462.
- [3] Mayewski P, Meredith M, Summerhayes C, et al. State of the Antarctic and Southern Ocean climate system [J]. *Reviews of Geophysics*, 2009, 47: 1-38.
- [4] Cofaigh C ó, Davies B J, Livingstone S J, et al. Reconstruction of ice-sheet changes in the Antarctic Peninsula since the Last Glacial Maximum [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 100: 87-110.
- [5] 王先兰. 南极长城湾沉积物中稀土元素的初步研究 [J]. *南极研究*, 1991, 3(3): 39-44. [WANG Xianlan. A preliminary study on REE in the sediments of the Great Wall Bay, Antarctica [J]. *Antarctic Research*, 1991, 3(3): 39-44.]
- [6] 王先兰. 南极长城湾沉积物的地球化学特征与分区 [J]. *南极研究*, 1993, 5(1): 24-30. [WANG Xianlan. Geochemical characteristics and divisions of the sediments in the Great Wall Bay, Antarctica [J]. *Antarctic Research*, 1993, 5(1): 24-30.]
- [7] Kim D, Park B K, Yoon H I, et al. Geochemical evidence for Holocene paleoclimatic changes in Maxwell Bay of South Shetland Islands, West Antarctica [J]. *Geosciences Journal*, 1999, 3(1): 55-62.
- [8] Santos I R, Fávoro D I T, Schaefer C E G R, et al. Sediment geochemistry in coastal maritime Antarctica (Admiralty Bay, King George Island): Evidence from rare earths and other elements [J]. *Marine Chemistry*, 2007, 107: 464-474.
- [9] 李芝君, 王大锐, 陈永武. 南极半岛西部海域表层沉积中有孔虫的初步研究 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1987, 7(4): 67-79. [LI Zhijun, WANG Darui, CHEN Yongwu. A preliminary study on foraminifera in surface sediments the Great Wall Bay, Antarctica [J]. *Antarctic Research*, 1991, 3(3): 39-44.]
- [10] 詹玉芬. 南极半岛西北海域表层沉积物中硅藻的初步研究 [J]. *南极研究*, 1988, 1(2): 37-43. [ZHAN Yufen. A preliminary study on diatom in surface sediments in the area to west of Antarctica Peninsula [J]. *Antarctic Research*, 1988, 1(2): 37-43.]
- [11] 吴能友, 段威武, 蔡秋蓉, 2002. 南极布兰斯菲尔德海峡冰海沉积环境与沉积模式初探 [J]. *南海地质研究*, 13(1): 1-8. [WU Nengyou, DUAN Weiwu, CAI Qiurong. Preliminary discussion the sedimentary environment and sedimentation model of the Bransfield Strait, Antarctica [J]. *South China Sea Research*, 2002, 13(1): 1-8.]
- [12] 卢冰, 唐运千, 眭良仁. 南极布兰斯菲尔德海峡表层沉积物生物标志化合物 [J]. *极地研究*, 1997, 9(3): 198-206. [LU Bing, TANG Yunqian, SUI Liangren. The biomarker compounds in surficial sediments from the Bransfield Strait, Antarctica [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 1997, 9(3): 198-206.]
- [13] 潘建明, 张海生, 程先豪, 等, 1998. 西南极海沉积硒的地球化学状态 [J]. *海洋与湖沼*, 29(4): 424-430. [PAN Jianming, ZHANG Haisheng, CENG Xianhao, et al. Geochemical state of sedimentary selenium in western Antarctic ocean [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1998, 29(4): 424-430.]
- [14] Duan Weiwu, Zhong Hexian, Li Yang. Late Quaternary glacial-marine sedimentation in the Bransfield Strait off northeast Antarctic Peninsula [J]. *Antarctic Research*, 1996, 7(1): 19-33.
- [15] 王春娟, 陈志华, 李全顺, 等. 南极半岛周边海域表层沉积物粒度分布特征及其环境指示意义 [J]. *极地研究*, 2014, 26(1): 128-138. [WANG Chunjuan, CEN Zhihua, LI Quanshun, et al. Distributions of surface sediments surrounding the Antarctic Peninsula and its environmental significance [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2014, 26(1): 128-138.]
- [16] 刘忠诚, 陈志华, 金秉福, 等. 南极半岛东北部海域碎屑矿物特征与物源分析 [J]. *极地研究*, 2014, 26(1): 139-150. [LIU Zhongcheng, CHEN Zhihua, JIN Bingfu, et al. Char-

- acteristics and provenance of clastic minerals in surface sediments in the waters northeast of the Antarctic Peninsula [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2014, 26(1):128-138.]
- [17] 王中刚,于学元,赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京:科学出版社,1989. [WANG Zhonggang, YU Xueyuan, ZHAO Zhenhua. Geochemistry of Rare Earth Elements [M]. Beijing, Science Press, 1989.]
- [18] 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,1994,130-150. [ZHAO Yiyang, YAN Mincai. Sediment Geochemistry of Chinese Epicontinental Seas [M]. Beijing, Science Press, 1994, 130-150.]
- [19] 王银喜,沈炎彬. 南极乔治王岛晚白垩世火山岩 Rb-Sr 同位素定年及微量元素、稀土元素地球化学特征[C]//南极乔治王岛菲尔德斯半岛地层及古生物研究. 北京,科学出版社,1994:109-131. [WANG Yinbin, SHEN Yanbi. Rb-Sr isotopic dating and trace element, REE geochemistry of Late Cretaceous volcanic rocks from King George Island, Antarctica [C]//SHEN Yanbin, ed. Stratigraphy and Paleontology of Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica. Beijing: Science Press, 1994: 109-131.]
- [20] Liu Xiaodong, Liguang Sun, Dan Li, et al. Rare earth elements in the ornithogenic sediments from the Maritime Antarctic: A potential new palaeoecology proxy [J]. Geochemical Journal, 2011, 45: 15-26.
- [21] 王先兰,赵云龙. 南极半岛西北部海区重矿物及其中稀土、微量元素的统计分析[J]. 南极研究, 1989, 1(3): 34-43. [WANG Xianlan, ZHAO Yunlong. Mathematical statistics of heavy minerals and their REE and trace elements in the northwestern sea area of Antarctic Peninsula [J]. Antarctic Research, 1989, 1(3): 34-43.]
- [22] Lee J I, Park B K, Jwa Y J, et al. Geochemical characteristics and the provenance of sediments in the Bransfield Strait, West Antarctica [J]. Marine Geology, 2005, 219: 81-98.
- [23] Eaglesa G, Livermore R A. Opening history of Powell Basin, Antarctic Peninsula [J]. Marine Geology, 2002, 185: 195-205.
- [24] Jiang M, Charette M A, Measures C I, et al. Seasonal cycle of circulation in the Antarctic Peninsula and the off-shelf transport of shelf waters into southern Drake Passage and Scotia Sea[J]. Deep-Sea Research II, 2013, 90: 15-30.
- [25] Maldonado A, Barnolas A, Bohoyo F, et al. Contourite deposits in the central Scotia Sea; the importance of the Antarctic Circumpolar Current and the Weddell Gyre flows [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2003, 198(1-2): 187-221.
- [26] Howe J A, Livermore R A, Maldonado A. Mudwave activity and current-controlled sedimentation in Powell Basin, northern Weddell Sea, Antarctica [J]. Marine Geology, 1998, 149: 229-241.
- [27] Sangra P, Gordo C, Hernandez-Arencibia M. The Bransfield current system [J]. Deep-Sea Research I, 2011, 58: 390-402.
- [28] Schodlok M P, Hellmer H H, Rohardt G, et al. Weddell Sea iceberg drift: five years of observations [J]. J. Geophys. Res., 2006, 111: C06018. doi:10.1029/2004JC002661.
- [29] Diekmann B, Kuhn G. Provenance and dispersal of glacial-marine surface sediments in the Weddell Sea and adjoining areas, Antarctica: ice-rafting versus current transport [J]. Marine Geology, 1999, 158: 209-231.
- [30] Byrne R H, Sholkovitz E R. The marine chemistry and geochemistry of the lanthanides [M]//The Handbook of the Physics and Chemistry of Rare Earths. Elsevier, 1996: 497-593.
- [31] 中国南极考察队. 南大洋考察报告(南极半岛西北部海区), 1984—1985[R]. 北京:海洋出版社, 1987: 289-293. [Chinese National Antarctic Research Expedition. Observational Report on the Southern Ocean Research (the Sea Area Northwest of the Antarctic Peninsula), 1984—1985[R]. Beijing: Ocean Publications, 1987: 289-293.]
- [32] German C R, Masuzawa T, Greaves M J, et al. Dissolved rare earth elements in the Southern Ocean: Cerium oxidation and the influence of hydrography[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(8): 1551-1558.
- [33] Comiso J C, Cavalieri D J, Markus T. Sea ice concentration, ice temperature, and snow depth using AMSR-E data [J]. Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(2): 243-252.
- [34] Anderson J B. Antarctic Marine Geology [M]. Cambridge University Press, 1999.
- [35] Caggianelli A, Fiore S, Mongelli G, et al. REE distribution in the clay fraction of pelites from the southern Apennines, Italy[J]. Chem. Geol., 1992, 99:253-263.
- [36] 杨杰东,徐士进. 同位素与全球环境变化[M]. 北京:地质出版社, 2007: 141-147. [YANG Jiedong, XU Shijin. Isotopes and Global Environmental Changes [M]. Beijing: Geological Publications, 2007: 141-147.]
- [37] 刘嘉麒,张雯华,郭正府. 南极南设得兰群岛中-新生代火山作用与地质环境[J]. 极地研究, 2002, 14(1): 1-11. [LIU Jiaqi, ZHANG Wenhua, GUO Zhengfu, et al. Mesozoic-Cenozoic volcanism and geological environment in the South Shetland Islands, Antarctica [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2002, 14(1):1-11.]
- [38] 匡福祥,金庆民. 乔治王岛菲尔德斯半岛火山岩地球化学及生成与演化[J]. 中国地质科学院南京地质矿产所所刊, 1989, 10(1): 1-11. [KUANG Fuxiang, JIN Qingmin. Geochemistry, origin and evolution of the volcanic rocks in Fildes Peninsula, King George Island [J]. Bull. Nanjing Inst. Geol. M. R., Chinese Acad. Geol. Sci., 1989, 10(1): 1-11.]
- [39] 聂森艳,王汝建,肖文申. 南极半岛 Bransfield 海峡约 6 000 年以来的陆源组分记录及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 2014, 34(3): 590-599. [NIE Sunyan, WANG Ruijian, XIAO Wenshen et al. A 6000 year record of terrigenous compositions from the Bransfield Strait, Antarctic Peninsula: responses to climate change [J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(3): 590-599.]
- [40] Gabrielli P, Wegner A, Petit J R. A major glacial-interglacial change in aeolian dust composition inferred from Rare Earth

Elements in Antarctic ice [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29: 265-273.

[41] Gallet S, Jahn B, Lanoe B V V, et al. Loess geochemistry

and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 156: 157-172.

## RARE EARTH ELEMENTS IN THE OFFSHORE SURFACE SEDIMENTS OF THE NORTHEASTERN ANTARCTIC PENINSULA AND THEIR IMPLICATIONS FOR PROVENANCE

CHEN Zhihua<sup>1</sup>, HUANG Yuanhui<sup>1</sup>, TANG Zheng<sup>1</sup>, WANG Haozhuang<sup>1</sup>, GE Shulan<sup>1</sup>,  
FANG Xisheng<sup>1</sup>, HAN Xibin<sup>2</sup>, WANG Aijun<sup>3</sup>, WU Li<sup>4</sup>, ZHU Zhimin<sup>2</sup>

(1. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration; Key Laboratory of Marine Sedimentology & Environmental Geology, State Oceanic Administration, Qingdao 266061; 2. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012; 3. Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005; 4. Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract:** Chemical analyses for rare earth elements have been carried out for a total of 36 samples taken from the surface sediments off the northeastern Antarctic Peninsula in order to study the the sources of sediments. Data show that the REE concentrations of surface sediments, which ranges within  $45.47 \sim 183.60 \times 10^{-6}$  and is  $91.36 \times 10^{-6}$  on average, increase with fine-grained materials dominated by clay and decrease with biogenic silica. In the areas to the west of the line from the Joinville Island to the Elephant Island, including the Bransfield Strait and the shelf/slope of the South Shetland Islands, surface sediments are characterized by low REE concentrations, HREE enrichments, positive europium anomalies ( $\delta\text{Eu}$ ) relative to global shale average, and larger Sm/Nd molecular ratios, indicating that they were mainly derived from the South Shetland Islands where the Mesozoic/Cenozoic, in particular the Holocene volcanisms were active. In the eastern area, including the Powell Basin, the South Orkney Islands shelf and the South Scotia Ridge, the sediments have similar flat shale-normalized REE patterns, elevated LREE, weak positive europium anomalies ( $\delta\text{Eu}$ ) and smaller Sm/Nd molecular ratios while REE concentrations are controlled by clay and biogenic silica as well. It is inferred that the terrigenous components are derived mainly from the western and southern Weddell Sea, and secondarily from the South Orkney Islands, the South Scotia Ridge and the South Shetland Islands by ice-rafting and current transport.

**Key words:** rare earth elements; surface sediments; sediment provenances; Antarctic Peninsula