

楚科奇海表层沉积物的稀土元素地球化学特征*

高爱国^{①②**} 陈志华^{①②③} 刘焱光^{①②} 孙海清^① 杨守业^④

(①国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061; ②海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 青岛 266061;

③青岛海洋大学地球科学学院, 青岛 266003; ④同济大学海洋地质教育部重点开放实验室, 上海 200092)

摘要 对楚科奇海 26 个表层沉积物样品的稀土元素分析结果表明, 稀土元素在细粒沉积物中较为富集, 在粗粒沉积物中亏损. 稀土元素的页岩标准化配分模式以平坦型为主, 少数样品为轻稀土弱富集型或重稀土弱富集型, 说明楚科奇海表层沉积物以陆源碎屑物质为主, 化学风化作用弱. 从稀土元素地球化学特征的区域变化来看, 海区东西两侧沉积物分别来源于阿拉斯加和西伯利亚地区, 海区中南部沉积物与育空河物质的向北扩散有关. 海区中部赫雷德浅滩为残留沉积, 沉积物 $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ 比值大, 铈的负异常不明显, 铈的富集可能与氧化条件下锰的早期成岩迁移有关.

关键词 楚科奇海 表层沉积物 稀土元素

稀土元素具有极其相似的化学性质和低溶解度, 在风化、剥蚀、搬运、沉积和早期成岩作用过程中不易迁移, 产生的元素分馏小, 对揭示海洋沉积物的物质来源、形成条件、物源区特征和气候变化等具有重要意义^[1-18], 是当前元素地球化学领域的研究重点之一.

楚科奇海位于楚科奇半岛、阿拉斯加半岛和弗兰格尔岛之间, 为北冰洋南部的一个陆架浅海, 对北冰洋和太平洋之间的物质和能量交换起着重要作用, 在全球气候变化中扮演着重要角色. 但是, 由于楚科奇海位于寒冷的北极圈内, 有关海洋沉积物地球化学的研究甚少^[19-21]; 在稀土元素方面, 仅见国内学者杨惟理等^[9]对阿拉斯加巴罗地区 Elson 泻湖沉积岩心进行了稀土元素和气候变化的相关性研究. 1999 年 7~9 月进行的中国首次北极科学考察为全面开展我国北极海洋地质学研究提供了条件^[19-22]. 本文从稀土元素的角度出发, 首次探讨了楚科奇海表层沉积物的稀土元素地球化学特征及其物质来源.

1 材料与方法

1999 年 7~9 月, 国家海洋局第一海洋研究所参与了我国首次北极科学综合考察, 在楚科奇海取得了 26 个表层沉积物样, 取样站位见图 1, 表层沉积物类型见图 2. 从实测资料看, 楚科奇海水深较浅, 平均水深约 50 m; 沉积物较粗, 最粗的沉积物类型为含砾石砂, 最细的沉积物类型为黏土质粉砂. 粗粒沉积物(砂和粉砂质砂)主要分布在白令海峡附近、海区中部的赫雷德浅滩(Herald Shoal)和阿拉斯加半岛的冰角(Icy Cape)附近. 细粒沉积物(黏土质粉砂)主要分布在海区北部外海、巴罗角(Pt. Barrow)北部、霍普角(Pt. Hope)以西至弗兰格尔岛东南部.

2002-07-14 收稿, 2002-10-12 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 49873015, 40176017)、中国首次北极科学考察国家专项经费与国家海洋局青年自然科学基金项目(批准号: 98406)共同资助

** E-mail: aggao@pubic.qingda.cngb.com; aggao@fio.org.cn

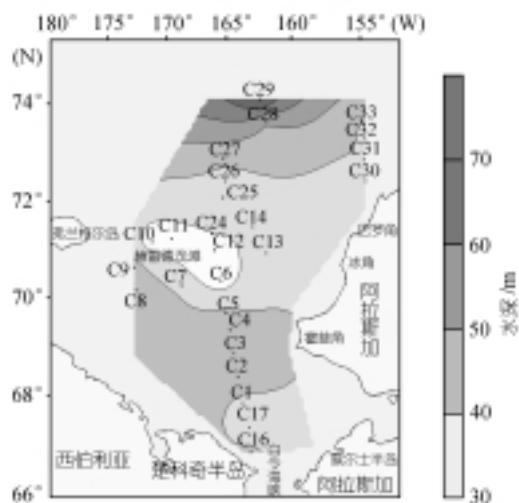


图 1 取样站位及实测水深分布图

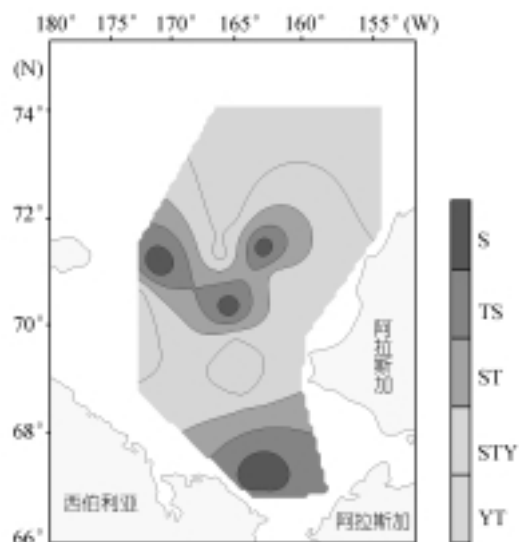


图 2 楚科奇海表层沉积物类型分布

在国土资源部物化探研究所采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)对上述样品进行了稀土元素测试. 仪器对稀土元素的检出限为 10^{-9} , 相对标准偏差 $< 5\%$. 分析元素包括 La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y, 其中前 6 个元素在本文中统称为轻稀土元素, 用 ΣCe 表示; 后 9 个元素统称为重稀土元素, 用 ΣY 表示^[1].

2 结果

2.1 稀土元素的含量及分布

不同站位、不同沉积物类型的稀土元素含量见表 1, 稀土元素含量与沉积物类型关系密切. 各类沉积物中稀土元素特别是轻稀土元素的含量变化相当大, 但总的来说, 稀土元素在砂和粉砂质砂中含量较低, 在黏土质粉砂或砂-粉砂-黏土中含量较高. 从表 1 可以看出, 楚科奇海表层沉积物中 REE 总量的分布范围为 $(78.93 \sim 151.44) \times 10^{-6}$, 平均值为 115.0×10^{-6} , 低于中国浅海沉积物^[5]和页岩的平均值^[16]. 轻重稀土元素的含量之比($\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$)为 2.50 ~ 3.86; 其中, 砂的 $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ 比值较高, 在 3.10 ~ 3.86 之间.

如图 3 所示, 表层沉积物中 ΣREE 的分布呈斑块状, 高值区出现在冰角至霍普角一带和海区北部外海, 低值区出现在巴罗角以西至弗兰格尔岛东北部海域、以及海区东南部的白令海峡附近. $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ 比值在海区中部赫雷德浅滩较高, 超过 2.9; 在巴罗角西部细粒沉积物中小于 2.5(图 4).

2.2 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^[16]对稀土元素进行标准化, 结果见图 5, 6. 从曲线的分布形态来看, 楚科奇海表层沉积物的页岩标准化稀土元素配分模式大体可分为 3 类: 一类为重稀土富集型, 见于研究区东西两侧个别站位, 如 C9 和 C30 站; 一类为轻稀土弱富集型, 见于研究区中部的赫雷德浅滩, 如 C10, C12 站; 大部分沉积物的页岩标准化模式介于上述两种类型之间, 较为平坦, 如 C4, C17 站.

表 1 楚科奇海表层沉积物的稀土元素含量^{a)}

沉积物 类 型		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	ΣCe/ ΣY	δCe	δEu
I	Min	20.72	34.85	3.92	14.88	2.90	0.81	2.74	0.43	2.44	0.45	1.25	0.21	1.32	0.20	11.83	101.51	3.10	0.82	1.21
	Max	25.12	43.58	5.70	21.74	4.06	1.12	3.73	0.61	3.51	0.66	1.83	0.30	1.96	0.30	19.79	134.02	3.86	0.96	1.24
	Av	22.10	37.59	4.83	17.92	3.40	0.94	3.18	0.51	2.92	0.55	1.54	0.26	1.66	0.25	15.56	113.19	3.33	0.89	1.23
	Cv	0.09	0.11	0.16	0.16	0.15	0.14	0.13	0.15	0.16	0.16	0.18	0.16	0.17	0.17	0.21	0.13	0.11	0.06	0.01
II	Min	17.56	29.41	4.34	16.81	3.05	0.90	2.84	0.47	2.74	0.52	1.50	0.26	1.59	0.24	15.10	97.34	2.75	0.82	1.19
	Max	21.44	36.17	5.45	21.47	4.04	1.09	3.73	0.64	3.71	0.71	2.03	0.34	2.18	0.34	18.89	122.25	2.92	0.84	1.32
	Av	19.76	33.50	4.96	19.21	3.60	1.00	3.35	0.56	3.25	0.62	1.77	0.30	1.90	0.29	16.88	110.94	2.84	0.83	1.24
	Cv	0.10	0.11	0.11	0.12	0.14	0.10	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.13	0.16	0.17	0.11	0.11	0.03	0.01	0.06
III	Min	18.70	31.77	3.98	14.56	2.69	0.71	2.40	0.39	2.11	0.39	1.10	0.19	1.18	0.18	11.56	91.90	2.67	0.83	1.19
	Max	24.16	40.09	5.76	22.10	4.08	1.14	3.95	0.64	3.57	0.68	1.89	0.34	2.15	0.33	18.84	129.52	3.72	0.90	1.21
	Av	20.70	35.41	4.87	18.53	3.48	0.95	3.28	0.53	3.04	0.58	1.62	0.28	1.79	0.27	16.10	111.43	3.14	0.87	1.20
	Cv	0.15	0.12	0.18	0.20	0.21	0.23	0.24	0.24	0.27	0.29	0.28	0.28	0.30	0.29	0.25	0.17	0.17	0.04	0.01
IV*		21.57	37.17	5.33	20.09	3.96	1.10	3.79	0.61	3.55	0.68	1.84	0.31	2.02	0.31	16.97	119.3	2.97	0.85	1.22
V	Min	11.40	21.87	3.16	13.09	2.78	0.77	2.64	0.49	2.88	0.58	1.65	0.30	1.93	0.30	14.05	78.93	2.12	0.78	1.15
	Max	28.65	50.80	6.28	24.54	4.46	1.22	4.27	0.72	4.10	0.86	2.42	0.41	2.71	0.41	21.91	151.44	3.25	0.93	1.24
	Av	19.86	35.76	5.01	19.50	3.81	1.05	3.68	0.63	3.62	0.71	2.00	0.34	2.24	0.34	18.19	116.74	2.65	0.87	1.20
	Cv	0.25	0.24	0.19	0.18	0.13	0.12	0.13	0.10	0.08	0.09	0.09	0.08	0.09	0.08	0.13	0.19	0.12	0.05	0.02
海区平均		20.36	35.80	4.97	19.13	3.69	1.02	3.52	0.59	3.40	0.66	1.85	0.32	2.05	0.31	17.35	115.0	2.84	0.87	1.21
中国浅海 ^[5]		33	67	7.37	29	5.6	1.0	5.11	0.73	3.42	0.64	1.50	0.15	2.2	0.34	22	179.1	3.96		
页岩平均 ^[16]		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		

a) 表内 I. 砂($n = 4$), II. 粉砂质砂($n = 3$), III. 砂质粉砂($n = 3$), IV. *砂-粉砂-黏土($n = 1$, C13 样品测量值), V. 黏土质粉砂($n = 15$). Min: 最小值, Max: 最大值, Av. 平均值, Cv. 变异系数. $\delta Ce = Ce/Ce^* = 2Ce_{SN}/(La_{SN} + Pr_{SN})$, $\delta Eu = Eu/Eu^* = 2Eu_{SN}/(Sm_{SN} + Gd_{SN})$, SN 为页岩标准化

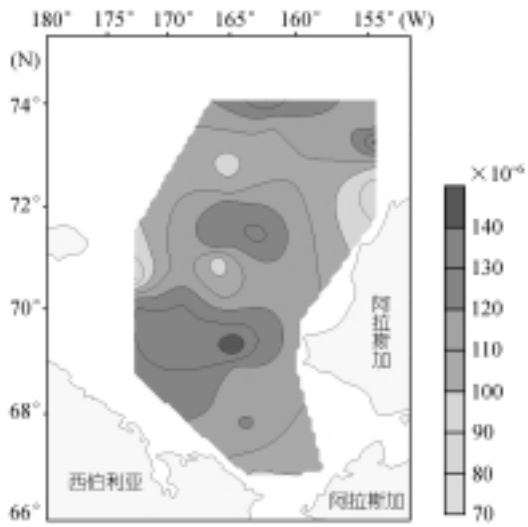


图 3 ΣREE 的分布

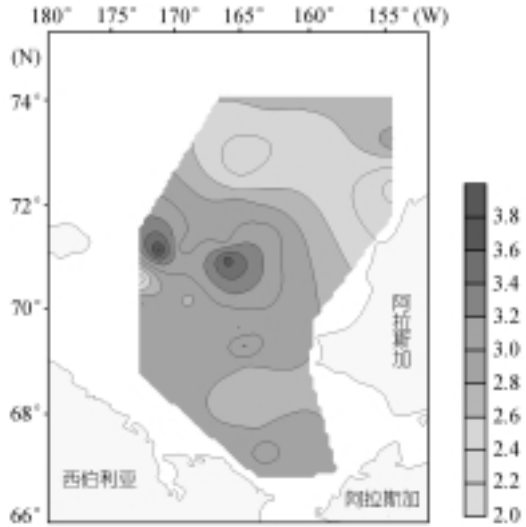


图 4 ΣCe/ΣY 比值的分布

从表 1 和图 5、6 来看, 楚科奇海表层沉积物表现出不同程度的铈负异常和铕正异常. δCe 值的变化范围为 0.78~0.96, 平均为 0.87. δEu 的变化范围为 1.15~1.32, 平均为 1.21. 如图 7、8 所示, δCe 值在白令海峡附近和海区东部靠阿拉斯加一侧低, 沉积物具有明显的铈负异常;

δCe 值在赫雷德浅滩和海区西部大于 0.88, 沉积物基本无铈异常. δEu 的高值区出现在海区南部和东部, 沉积物具有明显的铈正异常; 低值区出现在北部外海、海区中部和西南角, 铈的正异常小.

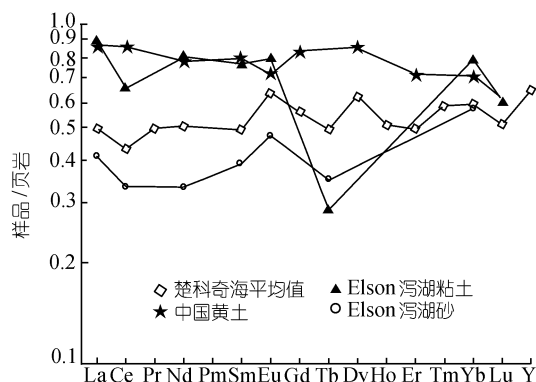
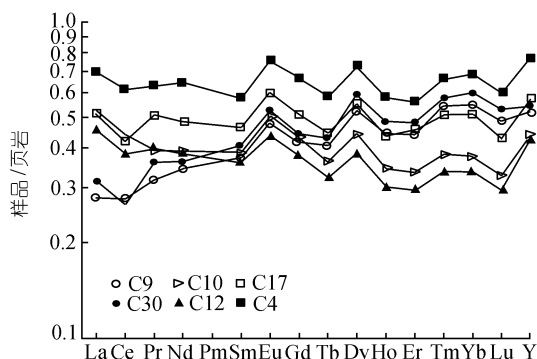


图 5 楚科奇海沉积物稀土元素的页岩标准化配分模式 图 6 楚科奇海表层沉积物与阿拉斯加 Elson 泻湖沉积物和中国黄土的 REE 标准化模式对比

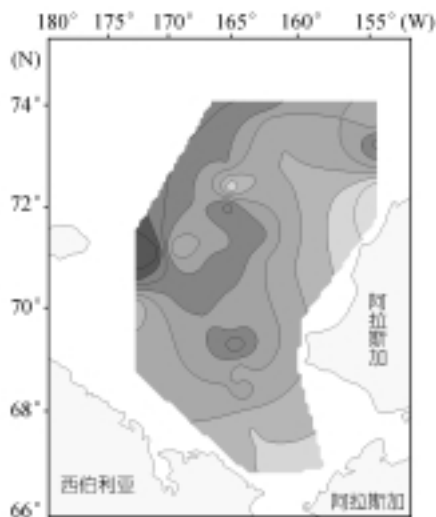


图 7 δCe 值的分布

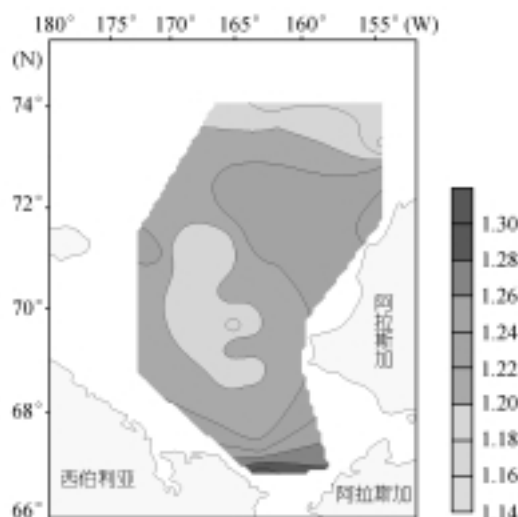


图 8 δEu 值的分布

3 讨论

3.1 稀土元素的富集及其粒度效应

从楚科奇海表层沉积物中稀土元素的含量来看, 稀土元素趋向于在细粒沉积物中富集, 在粗粒沉积物中亏损, 与中国浅海沉积物相似^[5]. 细粒沉积物中石英和长石含量低, 黏土矿物含量高, 这可能是影响楚科奇海表层沉积物中稀土元素含量分布的主要因素. 对不同粒级沉积物中稀土元素的研究表明, 稀土元素显著存在于 $< 2 \mu\text{m}$ 的黏土粒级中^[3], 稀土元素可以通过类质同象进入黏土矿物的晶格之中^[5], 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^[23]. 与中国浅海沉积物相比, 楚科奇海表层沉积物以砂和粉砂为主, 缺失黏土沉积, 其

稀土元素含量亦低于中国浅海沉积物^[5](表 1)。

除黏土组分以外,重矿物也是稀土元素的重要载体之一^[2,5]。楚科奇海表层沉积物包括砂、粉砂质砂、砂质粉砂和黏土质粉砂中稀土元素含量的变化均较大(表 1),譬如砂中 ΣREE 的分布范围为 $(101.51 \sim 134.02) \times 10^{-6}$,黏土质粉砂中 ΣREE 为 $(78.93 \sim 151.44) \times 10^{-6}$,后者的最小值小于前者的最小值,显然沉积物粒度对稀土元素含量的制约是相对的,某些砂质沉积物中稀土元素含量高,可能与富稀土重矿物组分的存在有关,某些细粒沉积物中稀土元素含量低,可能受到生物碎屑的稀释作用^[5]。

3.2 稀土元素的分馏与物源指示意义

海洋沉积物特别是陆架沉积物主要由陆源碎屑物质、海洋自生物质和生源物质组成,其稀土元素的页岩标准化配分模式应该是这 3 类物质的综合反映。

总的来说,由于稀土元素具有相似的化学性质和低溶解度,在风化和成岩作用过程中很少发生分馏,海洋沉积物中陆源碎屑组分应该具有较为平坦的稀土元素页岩标准化配分模式^[10,24,25],或者对母岩的稀土元素分布具有很大的继承性;如母岩为花岗岩,沉积物多具铈的负异常;母岩为玄武岩,沉积物多为无铈异常^[1]。但实际上,稀土元素在表生作用特别是母岩的风化作用过程中行为十分复杂,稀土元素的化学活动性既取决于赋存矿物的形态,又与风化溶液的性质以及风化产物对稀土元素接受能力的大小等因素有关。在风化作用过程中,重稀土元素往往较轻稀土元素活泼,前者易于以溶液形式发生迁移,后者则趋向于在风化残余物中富集^[6,7,14,26-28]。稀土元素在风化作用过程中的这种细小差别通常导致河流颗粒物质及其在陆架-陆坡上的沉积产物具有轻稀土富集型页岩标准化配分模式^[13,14,29]。从图 5 和图 6 来看,楚科奇海表层沉积物中稀土元素含量低,页岩标准化配分模式大部分较为平坦,少数样品呈轻稀土弱富集型或重稀土弱富集型,与阿拉斯加巴罗地区 Elson 泻湖沉积岩心的稀土元素特征^[9]相似,说明楚科奇海表层沉积物主要来源于周边大陆。与中国黄土^[12]相比,楚科奇海表层沉积物稀土元素含量低,重稀土相对富集,轻稀土元素相对亏损,说明北极地区较中国西北部干冷地区的化学风化作用更弱,以寒冻物理风化^[9]为主。楚科奇海东、西两侧个别站位出现重稀土富集或弱富集型页岩标准化模式,可能与物源区母岩类型有关;从前人研究看,楚科奇海东、西两侧的阿拉斯加和西伯利亚地区岩石类型丰富,存在某些富重稀土的基性和超基性岩^[1,30]。沉积物中铈的正异常可能与沉积物中斜长石的存在或物源区太古代富铈沉积岩的分布有关^[1,30];白令海峡附近和阿拉斯加半岛冰角西部粗粒沉积物结构成熟度低,成分成熟度相应低,斜长石含量可能较高。

海水中铈主要以 Ce^{4+} 形式存在; Ce^{4+} 易水解,极易与 Mn 共沉淀,因而海洋锰结核具有铈的正异常,其他生物和化学沉积具有与海水相似的铈负异常^[1]。从图 3 和图 7, 8 来看,楚科奇海东部靠阿拉斯加一侧和南部白令海峡附近沉积物稀土元素含量低,铈的负异常明显,说明沉积物中可能含有较多的生物碎屑;该海域受阿拉斯加流和沿岸流影响,生物生产力较高。此外,从源区母岩判断,北美地区碳酸盐岩发育^[30,31],其风化产物在海区的扩散和沉积亦可能使海区沉积物表现出铈的负异常。海区中部赫雷德浅滩为残留沉积物分布区^[32],沉积物粒度较粗,铈和铈的异常小, $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ 比值大,沉积环境明显不同于周边海区。研究表明,残留沉积区水深较浅,海底沉积物常处于明显的氧化环境,有利于深层沉积物中的锰向表层迁移并以高价软锰矿形式沉淀在表层^[5];该过程中产生的锰可能捕获海水或孔隙水中的铈,从而使表层沉

积物中铈的含量增加, 轻稀土总量增加。

从楚科奇海表层沉积物稀土元素的综合特征来看, 海区北部与东北部沉积物中稀土元素含量, $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$, δCe 和 δEu 值的梯度变化基本垂直于海岸线, 反映出波弗特海物质(以加拿大马更些河物质为主^[31,33])的向东扩散和来自阿拉斯加北部的一些小河流或海岸带物质的向海扩散。海区西部楚科奇半岛与弗兰格尔岛附近沉积物铈、铕异常小, 页岩标准化模式为平坦型或重稀土弱富集型, 可能与西伯利亚河流和海岸带物质的扩散有关。赫雷德浅滩南部, 稀土元素含量及 $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$, δCe , δEu 等参数的梯度变化呈南北向分布, 说明通过白令海峡进入楚科奇海的育空河物质对该区影响明显。稀土元素地球化学特征的区域分异大体与黏土矿物的研究结果^[33]一致; 研究表明, 楚科奇海东西两侧沉积物富伊利石, 主要来源于阿拉斯加和西伯利亚大陆, 中部沉积物富膨胀型黏土, 与育空河物质的向北扩散有关。

4 结论

楚科奇海表层沉积物粒度较粗, 稀土元素含量较低, 稀土元素趋向于在细粒沉积物中富集, 在粗粒沉积物中亏损。

稀土元素的页岩标准化配分模式大部分较为平坦, 少数样品呈轻稀土弱富集型或重稀土弱富集型, 说明楚科奇海表层沉积物主要来源于周边大陆, 且陆源碎屑物质的化学风化作用较弱。从沉积物中铈的正异常判断, 白令海峡附近和阿拉斯加半岛冰角以西粗粒沉积物中可能含有较多的富铈斜长石。楚科奇海东部靠阿拉斯加一侧和南部白令海峡附近沉积物稀土元素含量低, 铈的负异常明显, 说明沉积物中含有较多的生物碎屑。海区中部赫雷德浅滩为残留沉积区, 早期成岩过程中锰的迁移和向表层富集的现象可能导致表层沉积物中铈发生富集, 铈的负异常变小。

从稀土元素地球化学特征的区域变化来看, 楚科奇海东、西两侧沉积物分别来源于阿拉斯加和西伯利亚河流及海岸带物质的输入, 中部细粒沉积物与育空河物质的向北扩散有关, 赫雷德浅滩粗粒沉积物以残留沉积为主。

致谢 感谢国家海洋局极地考察办公室及“雪龙”号极地考察船为中国首次北极科学考察所做的协调与保障工作。

参 考 文 献

- 1 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论. 北京: 地质出版社, 1987. 57 ~ 80
- 2 王中刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1989. 1 ~ 535
- 3 王金土. 黄海表层沉积物稀土元素地球化学特征. 地球化学, 1990, (1): 44 ~ 53
- 4 余素玉. 南极长城站区燕窝湖岩芯中稀土元素特征. 南极研究, 1993, 5(3): 47 ~ 54
- 5 赵一阳, 酆明才. 中国浅海沉积物地球化学. 北京: 科学出版社, 1994. 130 ~ 150
- 6 陈 骏, 王洪涛, 鹿化煜. 陕西洛川黄土沉积物中稀土元素及其他微量元素的化学淋滤研究. 地质学报, 1996, 70(1): 61 ~ 72
- 7 马英军, 刘丛强. 化学风化作用中的微量元素地球化学. 科学通报, 1999, 44(22): 2433 ~ 2437
- 8 李双林. 东海陆架 HY126 EA1 孔沉积物稀土元素地球化学. 海洋学报, 2001, 23(3): 127 ~ 132
- 9 杨惟理, 毛雪瑛, 戴雄新, 等. 北极阿拉斯加巴罗 Elson 泻湖 96-7-1 岩芯中稀土元素的特征及其环境意义. 极地研究, 2001, 13(2): 91 ~ 106

- 10 Piper D Z. Rare earth elements in the sedimentary cycle: a summary. *Chemical Geology*, 1974, 14: 285 ~ 304
- 11 Elderfield H, Upstill-Goddard R, Sholkovitz E R. The rare earth elements in rivers, estuaries and coastal sea waters: processes affecting crustal input of elements to the ocean and their significance to the composition of sea water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 971 ~ 991
- 12 Liu C Q, Masuda A, Okada A, et al. Isotope geochemistry of Quaternary deposits from arid lands in northern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 127: 25 ~ 38
- 13 Zhang C S, Wang L, Zhang S. Geochemistry of rare earth elements in the mainstream of the Yangtze River, China. *Applied Geochemistry*, 1998, 13(4): 451 ~ 462
- 14 Sholkovitz E R, Elderfield H, Szymczak R, et al. Island weathering: river sources of rare earth elements to the Western Pacific Ocean. *Marine Chemistry*, 1999, 68: 39 ~ 57
- 15 Greaves M J, Elderfield H, Sholkovitz E R. Aeolian sources of rare earth elements to the Western Pacific Ocean. *Marine Chemistry*, 1999, 68: 31 ~ 38
- 16 Byrne R H, Sholkovitz E R. The marine chemistry and geochemistry of the lanthanides. In: Gschneidner K A, Eyring L, Eds. *The Handbook of the Physics and Chemistry of Rare Earths*, Elsevier, 1996. 497 ~ 593
- 17 刘从强, 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. *中国科学, D 辑*, 2001, 31: 873 ~ 880
- 18 赵振华. 花岗岩稀土元素四组分效应形成机理探讨. *中国科学, D 辑*, 1999, 29: 331 ~ 338
- 19 高爱国, 陈荣华, 程振波, 等. 楚科奇海及白令海海洋地质研究进展. *海洋科学*, 2001, 25(12): 41 ~ 45
- 20 陈 敏, 黄奕普, 郭劳动, 等. 北冰洋: 生物生产力的“沙漠”? *科学通报*, 2002, 47: 707 ~ 710
- 21 高爱国, 刘焱光, 张道建, 等. 楚科奇海与白令海沉积物中碘的纬向分布. *中国科学, D 辑*, 2003, 33(2): 155~162
- 22 邢 娜, 陈 敏, 黄奕普, 等. 北冰洋、白令海 ^{226}Ra 的分布及其水文学意义. *中国科学, D 辑*, 2002, 32: 430 ~ 440
- 23 Caggianelli A, Fiore S, Mongelli G, et al. REE distribution in the clay fraction of pelites from the southern Apennines, Italy. *Chemical Geology*, 1992, 99: 253 ~ 263
- 24 Sholkovitz E R. Rare earth elements in the sediments of the North Atlantic Ocean, Amazon delta and East China Sea: reinterpretation of terrigenous input patterns to the oceans. *American Journal of Science*, 1988, 288: 236 ~ 281
- 25 Sholkovitz E R. Rare earth elements in marine sediments and chemical standards. *Chemical Geology*, 1990, 88: 333 ~ 347
- 26 Braun J J, Pagel M, Herbillon A, et al. Mobilization and redistribution of REEs and thorium in a syenitic lateritic profile: A mass balance study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57: 4419 ~ 4434
- 27 Sholkovitz E R, Landing W M, Lewis B L. Ocean particle chemistry: the fractionation of rare earth elements between suspended particles and seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 1567 ~ 1579
- 28 Johannesson K H, Zhou X. Origin of middle rare earth element enrichments in acid waters of a Canadian High Arctic lake. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(1): 153 ~ 165
- 29 Goldstein S J, Jacobsen S B. Nd and Sr isotope systematics of river water suspended material. Implications for crustal evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 87: 249 ~ 265
- 30 Kos'ko M K, Usenko S V, Ganelin V G. Major geological features of the islands of the East Siberian and Chukchi seas and the coast of Chukotka: in Arctic geoscience. *Marine Geology*, 1990, 93(1~4): 349 ~ 367
- 31 Phillips R L, Grantz A. Regional variations in provenance and abundance of ice-rafted clasts in Arctic Ocean sediments: implications for the configuration of late Quaternary oceanic and atmospheric circulation in the Arctic. *Marine Geology*, 2001, 172: 91 ~ 115
- 32 Grantz A, Eittreim S, Whitney O T. Geology and physiography of the continental margin north of Alaska and implications for the origin of the Canada basin. In: Nairn A E M, Churkin M, Stehli F G, eds. *The Ocean Basins and Margins*. New York and London: Plenum Press, 1981. 439 ~ 489
- 33 Naidu A S, Creager J S, Mowatt T C. Clay mineral dispersal patterns in the north Bering and Chukchi seas. *Marine Geology*, 1982, 47: 1 ~ 15