

红珊瑚的稀土元素特征及其生态环境意义

刘昱坤¹, 唐 宾^{1,2}, 严建国³, 薛进庄¹

(1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 北大宝石鉴定中心, 北京 100871;
3. 台北市内湖社区大学, 台湾 20448)

摘 要: 红珊瑚是珍稀的有机宝石。对 35 个不同产地不同属种的红珊瑚样品中的稀土元素组成特征及红珊瑚生态环境进行了研究。结果表明, 红珊瑚的稀土元素富集主要受生物作用影响, 其 Σ REE 较低, 轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对亏损, δ Ce 负异常为主, 部分红珊瑚样品 δ Eu 正异常; 红珊瑚的稀土元素组成特征具有产地鉴定意义, 也指示出红珊瑚的生态环境与海底火山热液活动密切相关, 后者影响红珊瑚的生长物源供应; 红珊瑚的生态环境的稀有性导致了红珊瑚的稀有性。

关键词: 红珊瑚; 稀土元素; 生态环境; 产地鉴定

中图分类号: P578.98

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)S1-0119-08

REE characteristics of red corals and their implications for ecological environments

LIU Yu-kun¹, TANG Bin^{1,2}, YAN Jian-guo³ and XUE Jin-zhuang¹

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Gem Appraisal Center of Peking University, Beijing 100871, China; 3. Community College Taipei City, Taiwan 20448, China)

Abstract: Red corals are precious corals. Rare earth elements (REE) in red corals of different species harvested from different seas were investigated in this paper. REE accumulation is mainly affected by biological growth; Σ REE are low, and light rare earth elements are relatively enriched while heavy earth elements are relatively depleted; δ Ce values exhibit mainly negative anomalies, whereas δ Eu values show positive anomalies in some samples; REE characteristics of different red corals somewhat indicate the sea where they are harvested, and also show that the living environment of red corals is closely related to volcanic hydrothermal activities, which influence the source input of red coral growth. The ecological environment rareness contributes to the rareness of red corals.

Key words: red coral; REE; ecological environment; identification of origin

红珊瑚是珍稀的有机宝石。红珊瑚在生物学分类上的位置是: 腔肠动物门-珊瑚虫纲-八放珊瑚亚纲-柳珊瑚目-硬轴珊瑚亚目-红珊瑚科-红珊瑚属和侧红珊瑚属, 包括红珊瑚(*Corallium rubrum*)、日本红珊瑚(*Corallium japonicum*)、瘦长红珊瑚(*Corallium elatius*)、巧红珊瑚(*Corallium secundum*)、皮滑

红珊瑚(*Corallium konojoi*)等(Bayer and Cairn, 2003)。有机宝石所称红珊瑚对应于生物学位置中红珊瑚科属种生物的骨骼。目前红珊瑚产地主要分布在地中海西部海域、太平洋西部日本、台湾至菲律宾海域以及夏威夷至中途岛海域等(表 1)(Grigg, 1988; Bayer and Cairn, 2003; Aurelle *et al.*, 2011;

收稿日期: 2016-11-01; 修订日期: 2016-11-15

作者简介: 刘昱坤(1999-), 女, 矿物学、岩石学、矿床学专业珠宝学方向硕士, E-mail: 1756738728@qq.com; 通讯作者: 唐 宾, E-mail: tangbin@pku.edu.cn。

表 1 红珊瑚属种名称、商业名称及产地分布
Table 1 Species, business name and the growth distribution of the red coral

属种名称	商业名称	主要产出海域
红珊瑚(<i>Corallium rubrum</i>)	萨丁(地中海)红珊瑚	地中海西部撒丁尼亚岛、西西里岛以及法国、西班牙、摩洛哥海岸
日本红珊瑚(<i>Paracorallium japonicum</i>)	阿卡红珊瑚	日本土佐湾、伊豆诸岛、小笠原群岛至硫磺岛和中国钓鱼岛
瘦长红珊瑚(<i>Corallium elatius</i>)	MoMo 红珊瑚	日本琉球群岛、中国台湾和钓鱼岛
皮滑红珊瑚(<i>Corallium konojoi</i>)	Miss 珊瑚	中国台湾、东沙群岛至海南岛
<i>Corallium lauense</i>	南枝(浅)珊瑚	夏威夷至中途岛, 350~400 m 水深
巧红珊瑚(<i>Corallium secundum</i>)	美都红珊瑚	中途岛, 500~550 m 水深
<i>Corallium</i> sp. nov	深海珊瑚	夏威夷至中途岛, 1 000 m 左右水深

Iwasaki *et al.*, 2012)。地中海西部海域、太平洋西部日本、台湾至菲律宾海域正处于全球最大的两条地震带阿尔卑斯-喜马拉雅地震带和太平洋地震带中(何国琦等, 1995), 而地震是板块运动的结果, 海底火山活动和地震扰动影响海底热液排放(Johnson *et al.*, 2001)。

红珊瑚是非常优异的生物钟生物, 其年轮式生长结构高分辨率地记录了生长的海洋生态环境信息(谢露华等, 2008), 因此红珊瑚也是良好的海洋生态环境的研究材料。目前对红珊瑚的研究主要从 3 个方面开展: 一是从常规宝石学特征和谱学特征开展宝石鉴定(范陆薇, 2007; 谢露华等, 2008; 陈启东等, 2015); 二是从生物学角度研究生物属种及其地理分布、生态适应等(Haguenauer *et al.*, 2013); 三是从结构和成分特征上研究影响红珊瑚的生物性及成因等(范陆薇等, 2009; 崔福斋, 2012; Vielzeuf *et al.*, 2013; Luan *et al.*, 2014)。

稀土元素的分布模式在搬运、成岩、生物富集等过程中相对稳定, 已被广泛应用于地球演化和成岩成矿作用(王中刚等, 1989)、沉积物源追踪(唐宾等, 2007; 吴盾等, 2013)、生物生长支持(王夔等, 1996; 计亮年等, 2014)等, 成为地质学、生物研究的有力工具。

红珊瑚全球产地非常少, 温度、盐度、食物、污染等生态制约因素很重要, 已有较多研究(Haguenauer *et al.*, 2013; Vielzeuf *et al.*, 2013; Luan *et al.*, 2014), 但对与红珊瑚产出海域的地质背景的相关性还没有深入的研究, 为此笔者从红珊瑚的稀土元素角度开展其地质背景和生态环境研究。

1 研究样品

选取了 3 个产地的 35 个红珊瑚样品(图 1、表 2), 清洗干净去除杂质分别磨成 200 目粉末做稀土元素测试分析, 其中日本红珊瑚(*Corallium japonicum*)12 个样品, 红珊瑚(*Corallium rubrum*)8 个样

品, 中途岛巧红珊瑚(*Corallium secundum*)8 个样品, 台湾瘦长红珊瑚(*Corallium elatius*)7 个样品。

2 稀土元素测试条件

所有样品的 14 个稀土元素(包括 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 等)的含量(质量分数)都在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成测试, 测试人为黄宝玲老师, 实验仪器为电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS), 产品型号为 7500-ICPMS; 数据重复性测试误差小于 5%。35 个红珊瑚样品稀土元素测试结果见表 3。

3 结果及讨论

3.1 稀土元素分布模式

将 35 个样品的稀土元素含量球粒陨石标准化后做稀土元素分布模式图(图 2), 发现均呈右倾斜的轻稀土元素富集型。

3.2 稀土元素组成特征

将数据归类后计算其稀土元素组成特征, 计算均采用球粒陨石进行标准化(王中刚等, 1989), 结果列于表 3 中。球粒陨石标准化数据采用艾文森等(1978)标准值(王中刚等, 1989)。

3.2.1 Σ REE(稀土元素总量)

由表 4 可知, 不同属种的红珊瑚样品的 Σ REE 不同(表 5), 总量较低。35 个样品中, Σ REE 变化范围为 $0.24 \times 10^{-6} \sim 8.29 \times 10^{-6}$, 平均值为 1.547×10^{-6} 。 Σ REE 平均值从大到小: 巧红珊瑚 > 日本红珊瑚 > 红珊瑚 > 瘦长红珊瑚。红珊瑚样品的 Σ REE 远低于凝灰岩、碳酸盐岩、泥质岩的 Σ REE ($16 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$)(唐宾等, 2007)。

3.2.2 LREE/HREE 和 (La/Yb)_N

LREE/HREE 和 (La/Yb)_N 两个数据指标都表

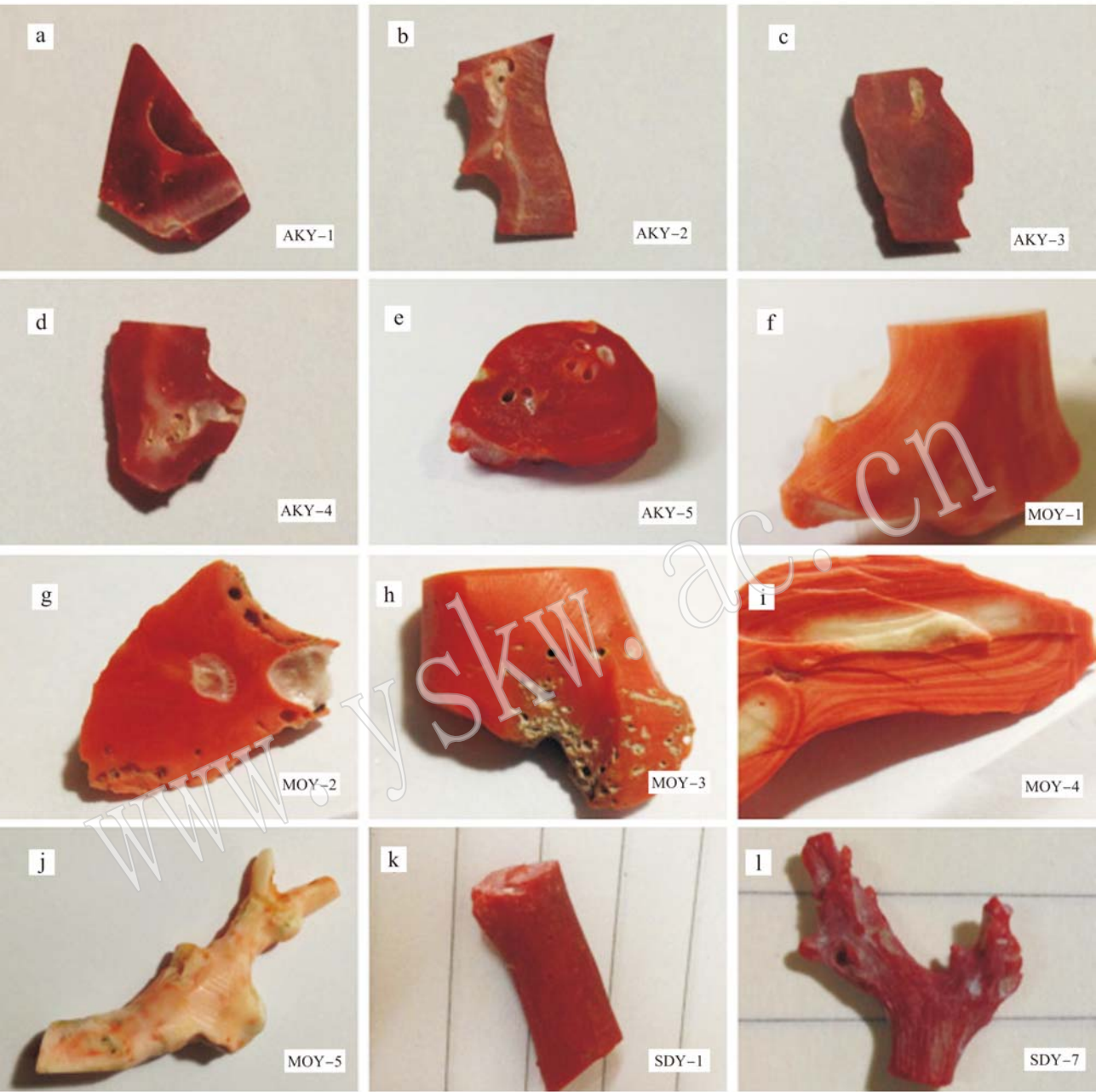


图 1 红珊瑚部分研究样品实物图
Fig. 1 Part of the red coral samples

表 2 红珊瑚研究样品描述
Table 2 Description of the red coral samples

样品	生物属种	颜色	形态	产地	来源
FY1~8	巧红珊瑚(<i>Corallium secundum</i>)	浅橘红色	未抛光短枝条	中途岛	台湾珊瑚厂商提供
AKY-1~9, AKR-01, AKW-02, AKF-05	日本红珊瑚 <i>Corallium japonicum</i>)	深红色	珊瑚厚片, 未抛光	琉球群岛海域	台湾珊瑚厂商提供
MOY-1~4	瘦长红珊瑚(<i>Corallium elatius</i>)	深橘红色	厚块状, 未抛光	台湾海域	台湾珊瑚厂商提供
MOY-5	瘦长红珊瑚(<i>Corallium elatius</i>)	粉橘红色	粗枝条, 未抛光	台湾海域	台湾珊瑚厂商提供
SDY-1~8	红珊瑚(<i>Corallium rubrum</i>)	深红色	粗枝条, 未抛光	地中海	台湾珊瑚厂商提供

表 3 红珊瑚研究样品的稀土元素含量

$w_B/10^{-6}$

Table 3 REE content of the red coral samples

样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
SDY-1	0.141	0.279	0.032	0.112	0.026	0.009	0.023	0.003	0.02	0.004	0.012	0.002	0.012	0.002
SDY-2	0.17	0.339	0.043	0.155	0.036	0.01	0.032	0.005	0.03	0.006	0.017	0.003	0.017	0.003
SDY-3	0.188	0.37	0.043	0.152	0.036	0.009	0.031	0.005	0.03	0.006	0.017	0.002	0.016	0.002
SDY-4	0.319	0.621	0.072	0.248	0.056	0.013	0.051	0.008	0.047	0.01	0.03	0.005	0.028	0.004
SDY-5	0.077	0.151	0.016	0.053	0.013	0.004	0.009	0.001	0.008	0.002	0.005	0.001	0.004	0.001
SDY-6	0.075 6	0.140 3	0.014 9	0.048 4	0.010 3	0.003 8	0.008 9	0.001 2	0.006 2	0.001 2	0.003 3	0.000 5	0.003 4	0.000 5
SDY-7	0.180	0.360	0.044	0.16	0.037	0.01	0.036	0.006	0.034	0.007	0.017	0.002	0.014	0.002
SDY-8	0.136	0.272	0.03	0.11	0.027	0.009	0.025	0.004	0.02	0.004	0.01	0.001	0.009	0.001
AKY-1	0.436	0.822	0.095	0.355	0.08	0.02	0.074	0.011	0.062	0.013	0.036	0.005	0.035	0.006
AKY-2	0.847	1.615	0.197	0.685	0.144	0.03	0.136	0.023	0.132	0.028	0.083	0.013	0.089	0.013
AKY-3	0.456	0.91	0.113	0.404	0.085	0.02	0.078	0.012	0.069	0.014	0.041	0.006	0.04	0.006
AKY-4	0.762	1.5	0.185	0.689	0.156	0.034	0.136	0.02	0.116	0.024	0.068	0.01	0.065	0.009
AKY-5	0.165	0.34	0.041	0.148	0.034	0.008	0.028	0.004	0.025	0.005	0.015	0.002	0.013	0.002
AKY-6	0.135	0.261	0.031	0.105	0.024	0.007	0.023	0.004	0.021	0.004	0.012	0.002	0.01	0.002
AKY-7	0.261	0.496	0.063	0.225	0.047	0.011	0.045	0.007	0.043	0.009	0.024	0.003	0.022	0.003
AKY-8	0.196	0.391	0.047	0.16	0.036	0.01	0.031	0.005	0.026	0.005	0.015	0.002	0.014	0.002
AKY-9	0.158	0.3	0.035	0.117	0.025	0.009	0.025	0.004	0.022	0.005	0.013	0.002	0.012	0.002
AKR-01	0.477	0.901	0.109	0.428	0.11	0.043	0.121	0.019	0.107	0.022	0.06	0.009	0.052	0.008
AKW-02	0.094	0.18	0.021	0.082	0.019	0.007	0.019	0.003	0.017	0.003	0.01	0.001	0.009	0.001
AKF-05	0.08	0.161	0.018	0.069	0.019	0.006	0.015	0.002	0.014	0.003	0.008	0.001	0.007	0.001
MOY-1R	0.142	0.279	0.028	0.08	0.017	0.005	0.012	0.002	0.01	0.002	0.006	0.001	0.006	0.001
MOY-1W	0.065	0.121	0.014	0.049	0.011	0.003	0.008	0.001	0.006	0.001	0.003	0.001	0.004	0.001
MOY-2	0.172	0.37	0.047	0.19	0.049	0.027	0.05	0.007	0.043	0.008	0.022	0.003	0.019	0.003
MOY-3	0.235	0.493	0.059	0.22	0.054	0.028	0.056	0.008	0.046	0.009	0.024	0.003	0.021	0.003
MOY-4W	0.099	0.18	0.02	0.07	0.017	0.004	0.012	0.002	0.008	0.002	0.004	0.001	0.004	0.001
MOY-4R	0.059	0.105	0.011	0.041	0.009	0.003	0.005	0.001	0.004	0.001	0.002	0	0.002	0
MOY-5	0.154	0.332	0.042	0.17	0.044	0.03	0.047	0.007	0.043	0.009	0.022	0.003	0.019	0.003
FY-1	0.647	1.496	0.218	0.958	0.269	0.144	0.289	0.042	0.24	0.048	0.127	0.017	0.1	0.014
FY-2	0.296	0.65	0.087	0.363	0.101	0.048	0.103	0.016	0.098	0.021	0.056	0.008	0.057	0.01
FY-3	1.438	3.006	0.368	1.48	0.369	0.349	0.378	0.056	0.322	0.066	0.178	0.027	0.213	0.041
FY-4	0.301	0.678	0.092	0.391	0.11	0.055	0.118	0.018	0.11	0.023	0.06	0.008	0.047	0.007
FY-5	0.295	0.65	0.087	0.376	0.105	0.059	0.109	0.016	0.092	0.019	0.052	0.008	0.05	0.008
FY-6	0.351	0.7	0.088	0.351	0.086	0.083	0.093	0.013	0.078	0.016	0.042	0.006	0.036	0.005
FY-7	0.328	0.749	0.103	0.417	0.115	0.065	0.122	0.018	0.11	0.022	0.056	0.008	0.048	0.007
FY-8	0.104	0.198	0.022	0.079	0.02	0.007	0.016	0.003	0.015	0.003	0.008	0.001	0.008	0.001

征轻稀土元素和重稀土元素富集程度。35 个红珊瑚研究样品的数据(表 6)表明,红珊瑚轻稀土元素相对富集,而重稀土元素相对亏损;巧红珊瑚、日本红珊瑚、红珊瑚和瘦长红珊瑚的(La/Yb)_N 平均值分别为 5.49、8.48、10.22、13.01。

3.2.3 δCe(Ce 异常)

δCe 表示样品中 Ce 相对于其他的 REE 元素的分离程度。在氧化条件下 Ce 呈现为 Ce⁴⁺,其电位与 REE 差异较大而被分离。在海水条件中,Ce 停留时间最短为 50 年,而其他 REE 元素为 200~400 年,所以海相沉积物中亏损 Ce,δCe 负异常的存在是海相环境的一个重要指标(王中刚等,1989; 吴盾

等,2013)。

表 4 中,31 个红珊瑚研究样品的 δCe 小于 1,SDY-8、AKF-05、MOY-3 这 3 个样品 δCe 为 1,只有样品 MOY-1R 红色部分的 δCe 为 1.02,平均值为 0.967。绝大部分红珊瑚研究样品的 δCe 表现为负异常,这也指示出其海相生长环境特点。

3.2.4 δEu(Eu 异常)

δEu 反映 Eu 的异常程度。Eu 属于变价金属,在一般情况下属于 Eu³⁺,如果环境为还原条件,则一部分 Eu³⁺ 将被还原为 Eu²⁺,而 Eu²⁺ 在与 REE 整体差异较大而被分离出来,造成 Eu 的正异常,或者负异常;正异常或者负异常曲线形成的峰或者谷反

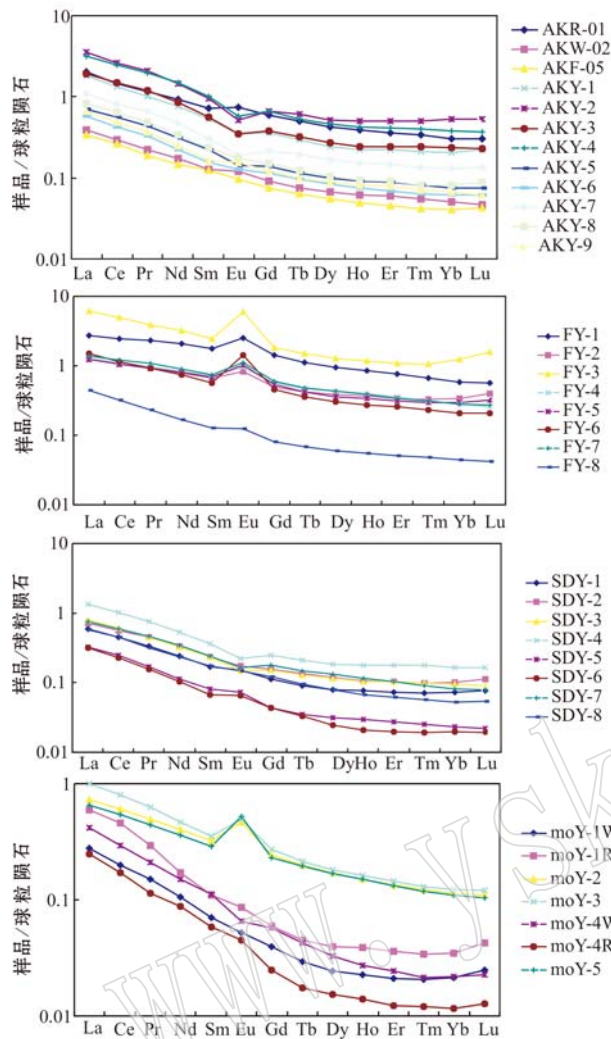


图 2 红珊瑚样品稀土元素分布模式图

Fig. 2 REE distribution of the red coral samples

映了异常的强度。

从表 3 和球粒陨石标准化稀土元素分布模式图(图 2)中可以总结出 35 个样品的 δEu 情况(表 7), 从表 7 中可看到共有 19 个样品 δEu 为正异常, 占研究样品的 54.3%; 日本红珊瑚和红珊瑚的 δEu 正异常样品数占比分别为 25% 和 37.5%, 大多为 δEu 负异常; 瘦长红珊瑚和巧红珊瑚的 δEu 正异常为主, 样品数占比分别为 62.5% 和 100%。

3.2.5 稀土元素的物源及富集方式探讨

稀土元素的分布模式相对较稳定, 且不同的稀土元素模式类型的样品的物源是不同的(王中刚等, 1989)。各类样品中 Eu 异常特征主要继承了其物源的 Eu 异常特征, 也受到后期生物富集、沉积环境的部分影响(王中刚等, 1989; 吴盾等, 2013)。

不同产地不同属种的红珊瑚 δEu 特征差别较大

(表 7), 对应于其赖以生存的生态环境也有较大的不同。根据 δEu , 可以追踪红珊瑚样品中稀土元素的物源。

Ce 在海水的一般条件下, 就会发生价态的变化, 而 Eu 从 Eu^{3+} 还原为 Eu^{2+} 的变化需要大于 200°C 的高温条件, 因此大部分的 Eu 异常都是由于海水之外的成分输入造成的, 比如海底热液输入等; 正的 Eu 异常在海水中很少见, 一般归因于海底火山热液活动造成的影响(Klinkhammer *et al.*, 1983), 由此推测红珊瑚的生长环境均处于火山地震活跃区域, 则其 δEu 应受到影响多呈正异常。红珊瑚研究样品的 δEu 较多呈正异常(表 7), 测试结果验证上述推测。红珊瑚的生态环境可能受到海底火山热液活动的较大影响, 由此推测红珊瑚赖以生存的生态环境的形成需要特定的地质构造背景条件, 三大产地海域的海底火山热液活动影响红珊瑚的生长物源供应。

将红珊瑚样品投到 $(\text{La}/\text{Yb})_N - \sum\text{REE}$ 图(图 3)中, 可以看到所有样品分布在左侧 1~4 号区块中, 与海水中的稀土元素组成特征(王中刚等, 1989)接近; 其中日本红珊瑚样品分布在 1 号区块(蓝色线区块), 红珊瑚样品分布在 2 号区块(红色线区域), 瘦长红珊瑚样品分布在 3 号区块(绿色线区块), 巧红珊瑚样品分布在 4 号区块(紫色线区块), 红珊瑚和瘦长红珊瑚样品分布区块大部分重叠在一起, 4 个区块有共同重叠区 $[\sum\text{REE} = 0.49 \times 10^{-6} \sim 1.26 \times 10^{-6}, (\text{La}/\text{Yb})_N = 6.59 \sim 9.93]$, 但仍有各自分布特征, 据 $(\text{La}/\text{Yb})_N - \sum\text{REE}$ 分布特征可以初步区分开部分红珊瑚样品。

图 3 中, 红珊瑚研究样品的分布区域与沉积成因、火成成因的各类岩石的分布区域没有重叠分布, 表明稀土元素富集方式上红珊瑚样品与沉积成因、火成成因的各类岩石不同。

生物界都处于地球表面的岩石圈、水圈、大气圈所构成的环境中, 以自身特有的生物方式与环境进行物质交换, 以维持生命活动, 生物的很多生命过程与“没有生命”的元素密切相关(计亮年等, 2013)。红珊瑚中稀土元素的富集还是受生物富集作用影响为主。

3.2.6 红珊瑚稀土元素组成特征的产地鉴定意义

对红珊瑚研究样品稀土元素组成特征数据(表 4)综合分析, 可以得到不同产地不同属种的红珊瑚样品的稀土元素组成特征各自有其典型特征组合

表 4 红珊瑚研究样品的稀土元素组成特征

$w_B/10^{-6}$

Table 4 Composing characteristic of REE of the red coral samples

样品	LREE	HREE	∑REE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	δEu	δCe
SDY-1	0.60	0.08	0.68	7.62	8.20	3.48	1.06	0.98
SDY-2	0.75	0.11	0.87	6.66	7.02	3.04	0.88	0.95
SDY-3	0.80	0.11	0.91	7.27	8.33	3.34	0.76	0.97
SDY-4	1.33	0.18	1.51	7.29	8.07	3.69	0.72	0.96
SDY-5	0.31	0.03	0.34	10.61	13.88	3.98	1.16	0.99
SDY-6	0.29	0.03	0.32	11.63	16.17	4.72	1.18	0.96
SDY-7	0.79	0.12	0.91	6.70	9.24	3.11	0.78	0.96
SDY-8	0.58	0.07	0.66	7.81	10.88	3.27	1.00	1.00
AKR-01	2.07	0.40	2.46	5.20	6.59	2.80	1.12	0.93
AKW-02	0.40	0.06	0.47	6.41	7.89	3.11	1.11	0.95
AKF-05	0.35	0.05	0.40	6.90	8.31	2.73	0.98	1.00
AKY-1	1.81	0.24	2.05	7.47	8.87	3.51	0.78	0.95
AKY-2	3.52	0.52	4.04	6.80	6.82	3.79	0.64	0.94
AKY-3	1.99	0.27	2.25	7.48	8.15	3.46	0.75	0.96
AKY-4	3.33	0.45	3.78	7.41	8.37	3.15	0.69	0.95
AKY-5	0.74	0.09	0.83	7.78	9.19	3.15	0.78	0.98
AKY-6	0.56	0.08	0.64	7.28	9.28	3.65	0.95	0.95
AKY-7	1.10	0.16	1.26	7.04	8.39	3.59	0.73	0.92
AKY-8	0.84	0.10	0.94	8.38	10.08	3.55	0.91	0.97
AKY-9	0.64	0.08	0.73	7.73	9.84	4.06	1.10	0.95
MOY-1R	0.55	0.04	0.59	13.80	17.26	5.44	1.02	1.02
MOY-1W	0.26	0.02	0.29	10.55	12.85	3.92	0.95	0.93
MOY-2	0.85	0.16	1.01	5.45	6.44	2.27	1.65	0.99
MOY-3	1.09	0.17	1.26	6.40	8.14	2.81	1.57	1.00
MOY-4W	0.39	0.03	0.42	12.09	19.27	3.72	0.77	0.94
MOY-4R	0.23	0.02	0.24	15.09	21.19	4.25	1.09	0.95
MOY-5	0.77	0.15	0.92	5.09	5.95	2.24	2.01	0.99
FY-1	3.73	0.88	4.61	4.26	4.66	1.55	1.57	0.97
FY-2	1.55	0.37	1.91	4.20	3.73	1.90	1.42	0.98
FY-3	7.01	1.28	8.29	5.47	4.85	2.51	2.83	0.99
FY-4	1.63	0.39	2.02	4.18	4.57	1.76	1.48	0.99
FY-5	1.57	0.35	1.93	4.45	4.22	1.81	1.68	0.98
FY-6	1.66	0.29	1.95	5.74	7.07	2.62	2.80	0.95
FY-7	1.78	0.39	2.17	4.54	4.91	1.84	1.66	0.99
FY-8	0.43	0.06	0.49	7.75	9.93	3.40	1.19	0.97

表 5 红珊瑚研究样品的稀土元素总量

$w_B/10^{-6}$

Table 5 ∑REE of the red coral samples

∑REE	红珊瑚	日本红珊瑚	瘦长红珊瑚	巧红珊瑚
最大值	1.51	4.04	1.26	8.29
最小值	0.32	0.40	0.24	1.91
平均值	0.79	1.65	0.68	3.27

表 6 研究样品轻稀土元素与重轻土元素组成特征

$w_B/10^{-6}$

Table 6 Composing characteristic of LREE and HREE of the red coral samples

REE 组成特征	最大值	最小值	平均值
LREE	7.01	0.227	1.323
HREE	1.28	0.015	0.224
LREE/HREE	15.087	4.181	7.443
(La/Yb) _N	21.19	3.725	9.102

(表 8)。

不同产地不同属种红珊瑚的稀土元素组成特征组合为日本红珊瑚的特征组合为 ∑REE 大、(La/Yb)_N 小、δCe 负异常、δEu 负异常,红珊瑚的特征组合为 ∑REE 小、(La/Yb)_N 大、δCe 负异常、δEu 负异常,瘦长红珊瑚的特征组合为 ∑REE 小、(La/Yb)_N 极大、δCe 负异常、δEu 正异常,巧红珊瑚的特征组合为 ∑REE 极大、(La/Yb)_N 极小、δCe 负异常、δEu 全正异常。根据红珊瑚的稀土元素组成特征组合可以初步区分出红珊瑚的产地和的属种,因此红珊瑚的稀土元素组成特征具有产地鉴定意义。

表 7 红珊瑚研究样品的 δEu 值
Table 7 δEu of the red coral samples

红珊瑚属种	最大值	最小值	平均值	正异常样品数/个	负异常样品数/个	正异常占比/%
日本红珊瑚	1.12	0.64	0.878	3	9	25
红珊瑚	1.18	0.72	0.942	3	4	37.5
瘦长红珊瑚	2.01	0.77	1.294	5	3	62.5
巧红珊瑚	2.83	1.19	1.829	8	0	100

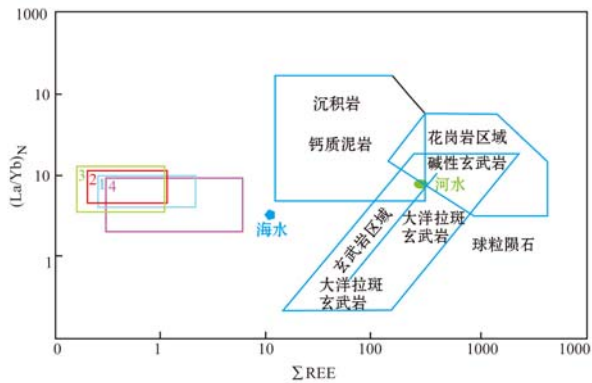


图 3 红珊瑚研究样品在 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}-\Sigma\text{REE}$ 图解中的分布(据 Allegre and Minster, 1978;唐宾等,2007)
Fig.3 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}-\Sigma\text{REE}$ plotting of the red coral samples

表 8 红珊瑚研究样品的稀土元素组成特征组合
Table 8 Composing characteristic combination of REE of the red coral samples

红珊瑚属种	ΣREE 平均值	$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 平均值	δCe	δEu
日本红珊瑚	>1, 大	<10, 小	-	-
红珊瑚	<1, 小	>10, 大	-	-
瘦长红珊瑚	<1, 小	>10, 极大	-	+
巧红珊瑚	>1, 极大	<10, 极小	-	+

3.2.7 红珊瑚的生态环境

红珊瑚非常稀有,可能由于红珊瑚对其生态环境有非常特殊的要求,如特定范围的温度和盐度,再加上由海底火山热液活动营造形成的局部特别营养源区供给红珊瑚生长所需的“特需营养物质”,而全球符合此苛刻条件的生态环境非常稀有,红珊瑚的生态环境的稀有性导致了红珊瑚的稀有性。

4 结论

- (1) 红珊瑚研究样品 ΣREE 较低,不同属种红珊瑚的 ΣREE 呈现巧红珊瑚>日本红珊瑚>地中海红珊瑚>瘦长红珊瑚特点;
- (2) 红珊瑚研究样品轻稀土元素相对富集,重

- 稀土元素相对亏损;
- (3) 红珊瑚研究样品的 δCe 负异常为主,与红珊瑚的海相生长环境相符;
 - (4) 部分红珊瑚研究样品的 δEu 正异常,表明海底火山热液活动与红珊瑚生态环境密切相关,并影响红珊瑚的生长物源供应;
 - (5) 红珊瑚的稀土元素富集主要受生物作用影响;
 - (6) 红珊瑚的稀土元素组成特征具有产地鉴定意义;
 - (7) 红珊瑚生态环境的稀有性导致了红珊瑚的稀有性。

References

Allegre C J and Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behaviour in magmatic processes[J]. Earth Planet Sci. Lett., 38: 1~25.

Aurelle D, Ledoux J B, Rocher C, et al. 2011. Phylogeography of the red coral (*Corallium rubrum*) inferences on the evolutionary history of a temperate gorgonian[J]. An International Journal of Genetic and Evolution, 139(7): 855~869.

Bayer F M and Cairns S D. 2003. A new genus of the scleraxonian family Coralliidae[J]. Proceedings of the Biological Society of Washington, 116(1): 222~228.

Chen Qidong, Qin Yan, Xiong Longhai, et al. 2015. Analysis of spectral characteristics of coral under different growth patterns[J]. Acta Ecologica Sinica, 35(10): 3 394~3 402(in Chinese).

Fan Luwei. 2007. Laser raman spectroscopic characteristics of gem-quality red coral[J]. Journal of Gems and Gemology, 9(3): 1~3(in Chinese).

Fan Luwei and Yang Mingxing. 2009. Research progress on structure characteristics of coralliidae family[J]. Journal of Gems and Gemology, 11(4): 15~21(in Chinese).

Grigg R W. 1988. Recruitment limitation of a deep benthic hard-bottom

- octocoral population in the Hawaiian Islands[J]. *Marine Ecology Progress*, 45: 121~126.
- Haguenaer A, Zuberer F, Ledoux J B, *et al.* 2013. Adaptive abilities of the Mediterranean red coral *Corallium rubrum* in a heterogeneous and changing environment: from population to functional genetics [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 449(1): 349~357.
- Iwasaki N, Fujita T, Bavestrello G, *et al.* 2012. Morphometry and population structure of non-harvested and harvested populations of the Japanese red coral off Amami Island, southern Japan[J]. *Marine and Freshwater Research*, 63: 468~474.
- Klinkhammer G, Elderfield H and Hudson A. 1983. Rare earths in seawater near hydrothermal vents[J]. *Nature*, 297: 185~188.
- Luan T N, Rahman M A, Maki T, *et al.* 2014. Distribution of trace element in Japanese red coral *Paracorallium japonicum* by μ -XRF and sulfur speciation by XANES: Linkage between trace element distribution and growth ring formation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 127: 1~9.
- Tang Bin, Liu Chuxiong and Hao Weicheng. 2007. REE characteristics and their geological implications of the strata bearing Panxian fauna of the middle Triassic of Guizhou Province[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 43(2): 190~197(in Chinese).
- Wang Kui, Tang Renhuan, Xu Huibi, *et al.* 1996. The Trace Elements of the Life Sciences[M]. Beijing: China Metrology Publishing House (in Chinese).
- Wu Dun, Sun R and Liu G J. 2013. Characterization of REE geochemistry of the permian coals from the Zhuji coal mine, Huainan coalfield and its geological implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(8): 1 158~1 166(in Chinese).
- Vielzeuf D, Garrabou J, Gagnon A, *et al.* 2013. Distribution of sulphur and magnesium in the red coral[J]. *Chemical Geology*, 355(5): 13~27.
- Xie Luhua and Wei Gangjian. 2008. SEM studies on the microstructure of porites coral from the northern south china sea: implications for paleoclimate record reconstruction[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 28(3): 1~8(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈启东, 秦 雁, 熊龙海, 等. 2015. 不同生长状态珊瑚光谱分析特征[J]. *生态学报*, 35(10): 3 394~3 402.
- 崔福斋. 2012. 生物矿化[M]. 北京: 清华大学出版社, 13.
- 范陆薇. 2007. 宝石级红珊瑚的激光拉曼光谱特征[J]. *宝石和宝石学杂志*, 9(3): 1~3.
- 范陆薇, 杨明星. 2009. 红珊瑚的结构特征研究进展[J]. *宝石和宝石学杂志*, 11(4): 15~21.
- 何国琦. 1995. 普通地质学[M]. 北京: 北京大学出版社, 177~179.
- 计亮年, 毛宗万, 黄锦汪, 等. 2014. 生物无机化学导论[M]. 北京: 科学出版社.
- Johnson H P, 周立君译. 2001. 胡安·德富卡洋中脊热液体系中地震引起的变化[J]. *海洋地质动态*, 17(3): 17~19.
- 唐 宾, 刘楚雄, 郝维城. 2007. 贵州中三叠世盘县动物群产出地层的稀土元素特征及其地质意义[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 43(2): 190~197.
- 王 夔, 唐仁寰, 徐辉碧, 等. 1996. 生命科学中的微量元素[M]. 北京: 中国计量出版社, 454~500.
- 王中刚, 于学元, 赵振华. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1~495.
- 吴 盾, 孙若愚, 刘桂建. 2013. 淮南朱集井田二叠纪煤中稀土元素地球化学特征及其地质解释[J]. *地质学报*, 87(8): 1 158~1 166.
- 谢露华, 韦刚健. 2008. 南海北部滨珊瑚微结构的 SEMF 分析及其对气候记录重建的意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 28(3): 1~8.