

皖北奥陶系稀土元素地化特征及其古岩溶环境标志*

李定龙 吴观茂 (淮南工业学院资源与环境工程系 淮南 232001)

摘要 用等离子光谱仪(ICP)方法,对安徽北部肖县下奥陶统顶部14个岩溶岩样品的稀土元素(15个项目)含量进行了测定分析。在阐明REE总量和配分模式及LREE和HREE WEu和WCe特征及相互关系的基础上,讨论了稀土地球化学特征与古岩溶发育环境的关系,并初步探讨了岩溶岩溶蚀程度和岩溶岩形成环境的定量识别标准。

关键词 岩溶岩 稀土元素 古环境 奥陶系 安徽北部

中国图书资料分类法分类号 P618.7

作者简介 李定龙 男 36岁 博士 副教授 水文工程地质、岩溶地质及环境保护

1 引言

华北地区奥陶系灰岩(以下简称奥灰)是一个历经了约500 Ma的古老碳酸盐地层。此间奥灰岩溶发育经历了反复更迭过程。研究表明,奥灰古岩溶发育演化至少可分为沉积岩溶、风化壳岩溶及埋藏岩溶等作用期次^[1~4]。由于各期次构造运动性质不同,岩溶发育环境差异很大,且岩溶作用历时长短不一,因而各阶段岩溶发育程度、规模和特征不一,各种现象相互叠加导致层内岩溶特征纷繁复杂,这给人们判识和追溯其成因过程带来了困难性和多解性。能否定量或半定量地建立奥灰古岩溶发育环境或分期、分类的识别标志,在古岩溶研究中一直是一个困难棘手的问题。

岩溶岩是指因岩溶作用,或因岩溶改造而形成的岩石^[3]。稀土元素(REE)作为一个群体,它们既具有化学行为的稳定一致性,同时又存在相互分馏的特点,从而成为当代地球化学、地质学用以研究有关地质作用(特别是探索岩浆成因、地球演化、地球化学分异作用及沉积环境变化等方面)的一种重要手段,成为地质过程的“示踪剂”和地球化学环境的“指示剂”。岩溶作用破坏、改造原岩,形成新的岩石。在这一过程中稀土元素发生迁移,并以新的产出或赋

存状态聚集于岩石中。因此通过岩溶稀土元素含量的变化规律及有关特性研究,利用其“示踪”和“指示”作用,即可研究其迁移聚集规律,从而查明岩溶作用的某些特点,并利用其作为岩溶环境的判别标志。

本文依据这一思路,在对安徽北部肖县奥陶系露头碳酸盐岩(下奥陶统顶部)剖面14个岩溶岩样品的稀土元素含量进行测定分析的基础上,对岩溶岩稀土元素与古岩溶环境关系等问题进行了探讨,并在两者间初步建立了定量识别标准。

2 岩溶岩稀土元素地球化学特征

2.1 稀土元素及配分模式

稀土元素含量测定采用等离子光谱仪(ICP)分析方法,共分析了14个样品,15个项目。测试结果及部分稀土特征参数见表1表2。

由表1知,REE总量由 $n \times 10^{-6}$ 到 20×10^{-6} 变化,相差近3倍;最大值 20.173×10^{-6} ,最小值 7.4808×10^{-6} ,平均 12.41×10^{-6} ;从岩性看灰岩类高于白云岩类。这表明岩溶岩间稀土元素分馏较为明显,有可能存在某种与岩溶作用环境相关的判识关系。

为了增强元素间含量等方面的差异性,通常以样品的稀土元素含量除以球粒陨石或页岩中对应元素的含量,进行标准化或归一化(normalization)处

* 煤炭科学基金资助项目(96地区性 10708)

表1 肖县剖面岩溶岩稀土元素含量

 $w / 10^{-6}$

分析元素	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dr	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
1 NO. 1	1. 154	2. 314	2. 264	2. 839	0. 5330	0. 1018	0. 5298	0. 0835	0. 4765	0. 0753	0. 2613	0. 0312	0. 1579	0. 0106	2. 393
2 NO. 5	1. 817	4. 456	2. 566	3. 378	0. 4088	0. 0681	0. 3230	0. 0500	0. 2788	0. 0490	0. 1990	0. 0257	0. 1337	0. 0073	1. 572
3 NO. 6	1. 034	2. 262	2. 431	2. 142	0. 2244	0. 0342	0. 1361	0. 0203	0. 1061	0. 0199	0. 0993	0. 0107	0. 0394	0. 0039	0. 5594
4 NO. 7	3. 619	6. 982	2. 669	4. 141	0. 5300	0. 0848	0. 3659	0. 0502	0. 2274	0. 0432	0. 1508	0. 0164	0. 0618	0. 0015	1. 230
5 NO. 8	1. 157	2. 758	2. 121	2. 366	0. 2626	0. 0375	0. 1653	0. 0250	0. 1349	0. 0240	0. 1083	0. 0122	0. 0504	0. 0028	0. 6875
6 NO. 13	1. 071	2. 642	2. 481	2. 239	0. 2826	0. 0359	0. 1559	0. 0217	0. 1015	0. 0290	0. 1069	0. 0103	0. 0276	0. 0044	0. 5228
7 NO. 14	1. 147	2. 698	2. 835	2. 654	0. 3440	0. 0489	0. 2223	0. 0324	0. 1646	0. 0460	0. 1590	0. 0163	0. 0525	0. 0020	0. 9245
8 NO. 16	1. 926	4. 595	2. 942	3. 743	0. 5420	0. 0834	0. 3686	0. 0546	0. 2831	0. 0534	0. 1983	0. 0224	0. 0917	0. 0030	12. 53
9 NO. 17	1. 504	3. 260	2. 080	2. 481	0. 3275	0. 0452	0. 2153	0. 0322	0. 1701	0. 0423	0. 1466	0. 0158	0. 0579	0. 0020	0. 8260
10 Y9	0. 8282	1. 916	2. 200	2. 018	0. 3286	0. 0342	0. 1950	0. 0265	0. 1175	0. 0554	0. 1537	0. 0142	0. 0473	0. 0108	0. 5600
11 Y10	0. 6865	1. 810	3. 262	2. 209	0. 3177	0. 0377	0. 1543	0. 0211	0. 0952	0. 0578	0. 1695	0. 0146	0. 0200	0. 0038	0. 3360
12 NO. 26	0. 8709	1. 765	1. 953	1. 830	0. 2214	0. 0276	0. 1205	0. 0175	0. 0879	0. 0299	0. 1046	0. 0099	0. 0242	0. 0037	0. 4147
13 NO. 28	0. 8747	2. 123	2. 798	2. 173	0. 2932	0. 0363	0. 1543	0. 0218	0. 1048	0. 0429	0. 1354	0. 0130	0. 0323	0. 0018	0. 4750
14 NO. 29	1. 364	3. 165	2. 561	2. 701	0. 3764	0. 0547	0. 2443	0. 0359	0. 1848	0. 0539	0. 1756	0. 0190	0. 0700	0. 0022	0. 8603

注:①表中序号1~3为泥晶白云岩;2~9~10为粉晶白云岩;4~6~8~11为泥晶或微晶灰岩;5~7~12~13为白云质灰岩;14为灰质白云岩。

②由南京大学地质系中心实验室分析。

表2 肖县剖面岩溶岩稀土元素特征参数

 $w / 10^{-6}$

项 目	$\sum LREE$	$\sum HREE$	$\sum REE$	$\sum L$	H^*	Weu	Wce	$(Ce/Yb)_n$	Eu/Sm
1 NO. 1	9. 2058	4. 019	13. 224	2. 2905	0. 8184	0. 2243	0. 6233	0. 19101	
2 NO. 5	12. 694	2. 638	15. 332	4. 8110	0. 8028	0. 3599	1. 4174	0. 1666	
3 NO. 6	8. 1676	0. 9951	9. 1227	8. 1676	0. 8273	0. 2000	2. 4417	0. 1524	
4 NO. 7	18. 026	2. 147	20. 173	8. 395	0. 8211	0. 4772	4. 8049	0. 1600	
5 NO. 8	8. 7201	1. 210	9. 9306	7. 2043	0. 7631	0. 2785	2. 3273	0. 1428	
6 NO. 13	8. 7515	0. 9801	9. 7316	8. 9292	0. 7166	0. 2343	4. 0712	0. 1270	
7 NO. 14	9. 7269	1. 619	11. 346	6. 0057	0. 7511	0. 2106	2. 1856	0. 1422	
8 NO. 16	13. 831	13. 60	27. 436	1. 0166	0. 7950	0. 3273	2. 1311	0. 1538	
9 NO. 17	9. 6977	1. 508	11. 205	6. 4300	0. 7238	0. 3238	2. 3946	0. 1380	
10 Y9	7. 325	1. 180	8. 5054	6. 2055	0. 7070	0. 1982	1. 7228	0. 1041	
11 Y10	8. 3229	0. 8723	9. 1952	9. 5413	0. 6931	0. 2705	3. 8495	0. 1186	
12 NO. 26	6. 6679	0. 8129	7. 4808	8. 2026	0. 7113	0. 1715	3. 1019	0. 1246	
13 NO. 28	8. 2982	0. 9813	9. 2795	8. 4563	0. 7664	0. 2659	2. 7954	0. 1238	
14 NO. 29	10. 222	1. 646	11. 868	6. 2103	0. 7873	0. 2368	1. 9229	0. 1453	

* $\sum L / \sum H$ 为 $\sum LREE / \sum HREE$ 的比值。

表3 页岩稀土元素标准值

 $w / 10^{-6}$

La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
① 41	83	10. 1	38	7. 5	1. 61	6. 35	1. 23	5. 5	1. 34	3. 75	0. 63	3. 53	0. 06	
② 42	12	81. 08	9. 42	35. 34	7. 08	1. 2	6. 45	1. 01	5. 65	1. 21	3. 24	0. 53	3. 16	0. 53 28. 8

注:①据 Anders et al., 1982; ②据胡云中等, 1985, 中国桂北地区。

理后作图。由于球粒陨石的稀土丰度一般代表地球原始组成的 REE 含量, 页岩平均稀土元素则反映上部地壳的稀土元素组成, 而沉积岩的 REE 配分形式与页岩相似, 较轻微的差异都可在图上有明显反映^[5, 6], 故本次采用页岩标准来比较岩溶岩间的 REE 分馏情况。页岩标准值见表3(除 Y 外, 其它均采用 Piper 的数据)。

为讨论方便, 将样品按岩性分为 4类: A—白

云岩、B—灰岩、C—灰云岩或云灰岩、D—对比样(斑状白云岩与围岩)。研究表明^[3, 4], A类白云岩样品大都经历了较强的溶蚀改造,(原生或准同生白云岩除外)可称为强溶蚀岩; B类灰岩大都为泥质微晶灰岩, 孔隙性差, 溶蚀改造微弱,(角砾灰岩除外)为未或微溶蚀岩; C类灰云岩或云灰岩大都经历了沉积岩溶改造, 为弱—强溶蚀岩。据以上分类, 分别作出岩溶岩样品稀土元素配分模式(图1), 分类

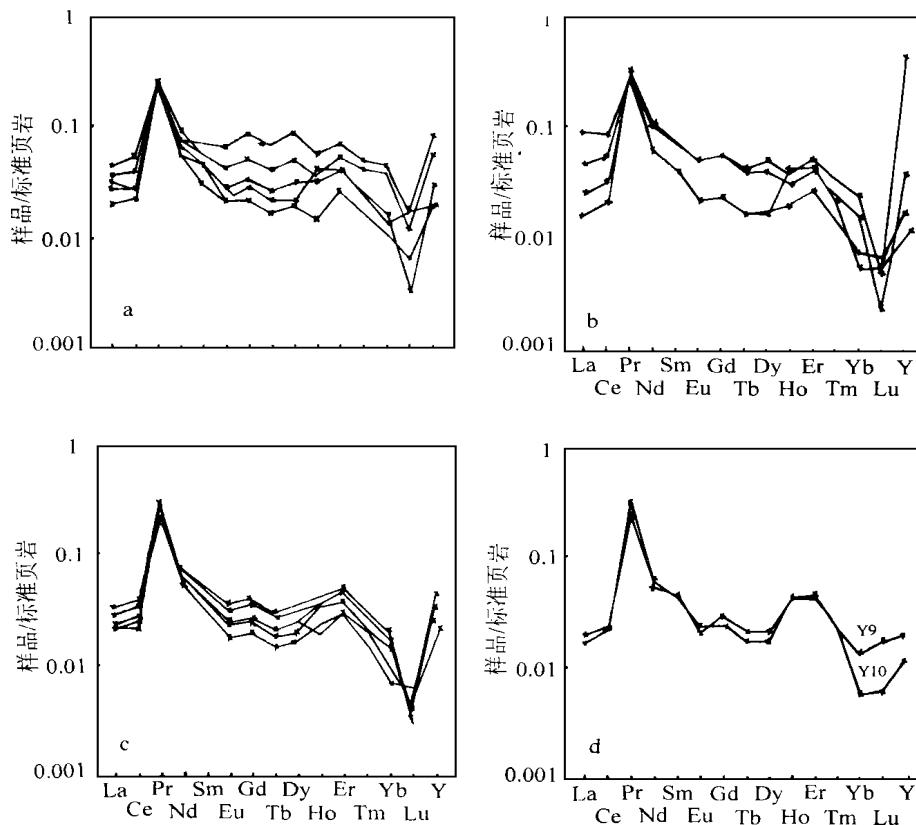


图 1 肖县剖面岩溶岩样品分类的 REE 配分模式

a—白云岩; b—灰岩; c—灰云岩或云灰岩; d—云斑与围岩

比较大体可得出以下几点认识:

a. 岩溶岩的稀土配分模式均呈“Z”字型,若去除最后一个 Y 元素,则均为右倾型。由于该剖面奥灰岩溶岩后期经历了较长时间的淡水淋滤作用,各样品稀土元素分异渐趋一致,分布曲线较为集中;重稀土元素分布线收缩明显,前半段 ($\text{Er} > \text{Gd}$) 具有反向富集 分馏趋势。

b. 微溶蚀岩—灰岩(图 1b)的分布线较为集中,且分布线间的变化趋势极为相似。这表明灰岩具有相同的沉积物源和后生改造经历。REE 含量分布特征的相似性,反映出灰岩大都没有经受强溶蚀改造。

c. 弱—强溶蚀岩—白云岩(图 1a)和灰云岩或云灰岩(图 1c)的分布线较为分散(无相互重叠),变化幅度较大。其变化范围几乎包容了灰岩的变化范围,表明在台地碳酸盐岩沉积之后,经准同生云化及各期古岩溶作用,使稀土元素产生了较强的分馏效应。

d. 豹皮灰岩样品 (Y_9 和 Y_{10}) 的稀土配分模式

(图 1d)曲线总体具有相似性,反映出云斑 (Y_9) 和围岩灰岩 (Y_{10}) 间的亲缘性。但重稀土元素 Yb 、 Lu 和 Y 却强烈分异,云斑远高于围岩,反映了云斑具有富重稀土效应;同时云斑的 REE 含量大都高于围岩,表明孔渗性较好的云斑具有相对的稀土富集性。

2.2 轻稀土 (LREE) 和重稀土 (HREE)

稀土元素有多种分组方法^[7,8]。通常采用的是将 La 到 Eu 划归轻稀土组 (LREE), 将 Gd 到 Lu 和 Y 划归重稀土组 (HREE) 的二分法。分析它们之间的关系可看出以下特点。

由可溶岩—重稀土关系(图 2)可见: 轻—重稀土含量基本呈线性关系。强溶蚀岩(白云岩、灰云岩)的 LREE 变化在 6×10^{-6} ~ 21×10^{-6} , HREE 在 0.8×10^{-6} ~ 4×10^{-6} ; 弱溶蚀岩(灰岩)的 LREE 变化(除一个特殊点)在 8×10^{-6} ~ 18×10^{-6} , HREE 在 0.9×10^{-6} ~ 3×10^{-6} , 被包容于强溶蚀岩范围。这是强溶蚀岩形成及其经历了反复岩溶作用的结果。

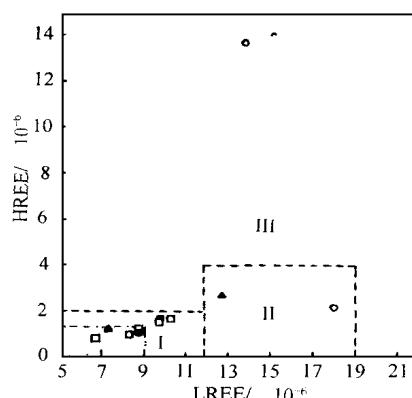


图 2 肖县剖面岩溶岩的 LREE—HREE 关系
 \triangle —白云岩;○—灰岩;□—灰云岩或云灰岩;
 \blacktriangle —豹斑(白云岩);●—方解石斑或脉

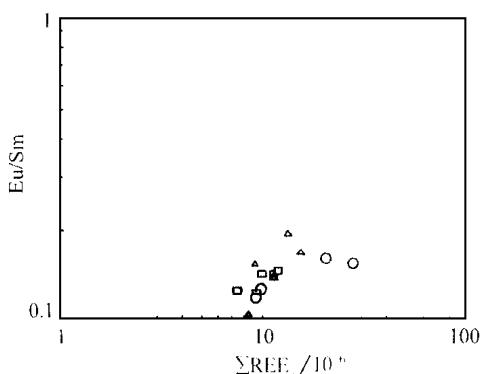


图 3 岩溶岩的 Eu/Sr— \sum REE 关系
 (图中符号意义同图 2)

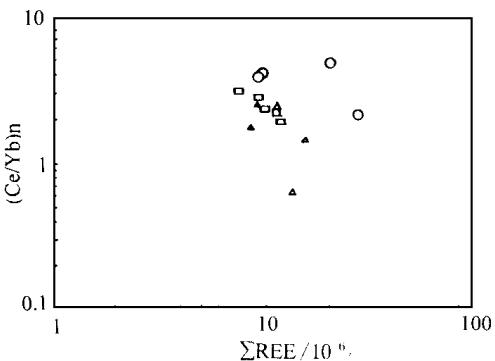


图 4 岩溶岩的 Ce/Yb— \sum REE 关系
 (图中符号意义同图 2)

2.3 δ Eu δ Ce及 \sum REE 的关系

稀土元素属于过渡类元素,紧靠金属元素类,有很强的金属性。研究表明 Ce 和 Eu 的变价现象最为突出^[7]。在强碱性氧化环境中,Ce³⁺将不断氧化为 Ce⁴⁺而迁移;在强酸性还原环境中,Eu³⁺将被还原而迁移。这就决定了 Ce 和 Eu 随着环境变迁,易于

与 3 价稀土元素相分离,成为稀土元素地球化学的重要研究对象。如 LREE 组中紧挨着的 Eu 和 Sm,就具有明显的分馏特征。随着可溶岩中稀土含量的变化,Eu / Sm 比值也发生了变化,见表 2,且随着岩类及 REE 总量的不同而呈现一定的变化规律(图 3)。白云岩的变化范围大,几乎包容了其它岩类的变化范围;准同生白云岩(泥晶白云岩)的 Eu / Sm 的变化范围窄(上部 2 个点),而经浅深成岩溶改造的岩石变化幅度大。同样反映 REE 分馏程度的重要参数(Ce / Yb)n(La 系第一个与最后一偶数元素之比)比值也随 REE 总量和岩类变化,呈现出与 Eu / Sm 的类似变化规律,(图 4)总体呈现出随 REE 总量增加而降低的特点。

衡量 Ce 和 Eu 在稀土元素中的分馏程度,一般使用 WEu 和 WCe 两个参数,称为异常系数。它能很灵敏地反映某岩体内的地球化学状态,在 REE 地球化学参数中占有重要地位。利用 WEu 和 WCe 可以编制各种相关图件来反映稀土分馏变化特点。其计算方法是:

$$WCe = (Ce)_n / (Ce^*)_n = 2(Ce)_n / (La^+ Pr)_n,$$

$$WEu = (Eu)_n / (Eu^*)_n = 2(Eu)_n / (Sm^+ Gd)_n,$$

式中 $(Ce)_n$ 、 $(Eu)_n$ —样品中 Ce、Eu 的标准化值;

$(Ce^*)_n$ 、 $(Eu^*)_n$ —该元素相邻两边元素标准化值间的直线内插值

2.3.1 WEu 与 \sum REE 关系

如图 5 所示,有以下几个特点:

a. $WEu < 1$,表明各类岩石均呈负 Eu 异常,分异明显。若排除物源因素,则只能解释为岩溶作用环境影响所致。研究认为 Eu³⁺ 在强还原条件下可转化

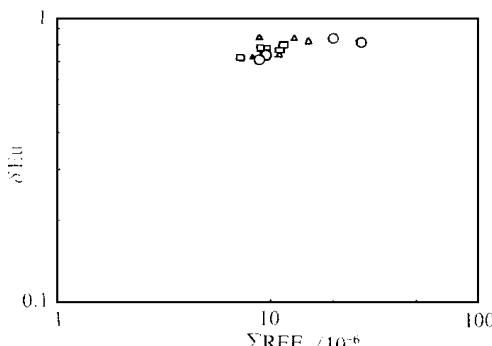


图 5 岩溶岩的 WEu — \sum REE 关系
 (图中符号意义同图 2)

成 Eu^3+ 而分离出来^[5]。奥灰沉积期间的炎热干旱气候及硬石膏水化以及深埋藏条件下,均可导致还原环境产生,故奥灰可溶岩的负 Eu 异常不难理解。

b. 各类岩溶岩的 W_{Eu} 较为稳定,均在 0.7~0.8 之间,表明分异较弱且程度相当;其中准同生白云岩和泥微晶灰岩的 W_{Eu} 极为稳定,为 0.8 左右,表明其后期溶蚀改造很弱。由于 Eu 在近地表或地表的氧化环境下难以分馏,因此造成各类岩溶岩分馏强弱差异的原因,可能主要是深埋藏期的成烃、细菌等作用引发的偏酸性还原环境造成的。

2.3.2 W_{Ce} 与 $\sum \text{REE}$ 的关系

如图 6 所示,基本有以下特点:

a. $W_{\text{Ce}} < 1$, 大都小于 0.5, Ce 亏损明显。Ce 负异常与其特殊的地球化学性质有关:从 Ce 的 Eh-pH 图解^[5]可以清楚看出,在海水条件和强氧化碱性下, Ce^{3+} 很易氧化成 Ce^{4+} : $\text{Ce}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ce}(\text{OH})_2^{2+} + 2\text{H}^+ + \text{e}^-$, $\text{Ce}(\text{OH})_2^{2+} = \text{CeO}_2 + 2\text{H}^+$;以难溶的 CeO_2 析出而与其它三价稀土离子分离,造成 Ce 的亏损。可见 Ce 亏损与风化壳岩溶有关。

b. 与 W_{Eu} 相比, 岩溶岩的 W_{Ce} 变化幅度大, 在 0.1~0.52 间, 分馏差异明显。这可能与埋藏环境下局部的氧化还原条件变化(如 SO_4^{2-} 或 CO_2 出现)造成 Ce 的活化迁移或富集沉积有关。

c. W_{Ce} 与 $\sum \text{REE}$ 具有线性正相关性, 即 $\sum \text{REE}$ 越小, W_{Ce} 异常越小, 分馏越明显, 表明岩溶作用越强, 岩石的 REE 分异越明显。

2.3.3 W_{Eu} 和 W_{Ce} 关系

由表 2 和图 6 分析 W_{Eu} 和 W_{Ce} 的关系, 可以更全面地了解岩溶岩形成的地球化学环境。根据已知

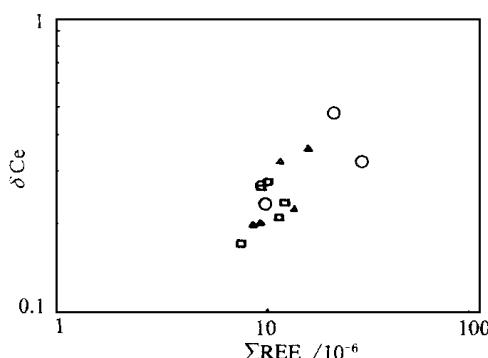


图 6 岩溶岩的 W_{Ce} - $\sum \text{REE}$ 关系
(图中符号意义同图 2)

各类岩溶岩在图中的实际分布位置及这些岩溶岩形成的地球化学环境与 Eu 和 Ce 的迁移聚集规律, 可以将各类岩石的溶蚀情况按 W_{Eu} 和 W_{Ce} 的变化划分:

- a. 非可溶岩: $0.3 < W_{\text{Eu}} < 0.8$, $0.75 < W_{\text{Ce}} < 1$;
- b. 未或微溶蚀岩: $0.75 < W_{\text{Eu}} < 0.8$, $0.35 < W_{\text{Ce}} < 0.5$; 或 $W_{\text{Eu}} < 0.8$, $W_{\text{Ce}} < 0.3$;
- c. 弱溶蚀岩: $0.6 < W_{\text{Eu}} < 0.75$, $0.25 < W_{\text{Ce}} < 0.35$;
- d. 强溶蚀岩: $0.6 < W_{\text{Eu}} < 0.75$, $0.1 < W_{\text{Ce}} < 0.25$;

3 稀土元素的古岩溶环境标志

据岩溶岩轻、重稀土关系(图 2)大体可将样品分为 3 个区:I 区点重叠集中, 相关密切, 为贫稀土区, 主要为泥微晶灰岩、云灰岩, 估计它保持较好的原生面貌, 溶蚀改造微弱; II 区点相对集中, 相关性较 I 区差, 主要为泥微晶灰岩、灰云岩, 为中等溶蚀改造岩; III 区点较为分散, ($\text{LREE} > 12$, $\text{HREE} > 2$) 主要为白云岩、角砾灰岩及灰云岩, 是强溶蚀改造形成的。于是可以以它们作为参照, 比较各种岩性的溶蚀改造程度。

上述可溶岩轻、重稀土分布的良好相关性和明显分区性, 表明了岩溶演化作用对稀土分馏具有重要影响。如是则经历沉积岩溶的样品应与贫稀土区(I)相对应; 埋藏岩溶样品应与相对富稀土区(II)对应; 同时 I 区样品的后半段与风化壳岩溶相一致; 3 个孤立点表示了未经受岩溶作用或微溶蚀。于是三种类型岩溶的轻、重稀土含量便有了一定的区间范围对照: 沉积岩溶 $5 < \text{LREE} < 9$, $0 < \text{HREE} < 1$; 风化壳岩溶 $9 < \text{LREE} < 12$, $1 < \text{HREE} < 2$; 埋藏岩溶 $12 < \text{LREE} < 19$, $2 < \text{HREE} < 4$; 未溶蚀岩或微溶蚀岩 $\text{LREE} > 20$ 或 $\text{HREE} > 4$ 。

同时, 各类岩溶岩的形成环境, 按 W_{Eu} W_{Ce} 变化规律大体分出: 沉积岩溶岩区(A)、风化壳岩溶岩区(B)和埋藏岩溶岩区(C), 见图 7。这样就可以此作为识别岩溶岩形成环境的判据。即对于本区任一岩溶岩样品, 一旦测知 W_{Eu} 和 W_{Ce} , 按上述划分即可判断其岩溶程度或在何种岩溶环境作用下形成。

本文利用稀土元素地球化学特征来判识岩

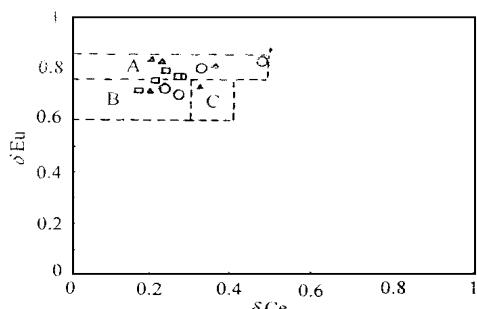


图 7 岩溶岩的 δ_{Eu} - δ_{Ce} 关系
(图中符号意义同图 2)

溶发育环境得出了一些有益的认识。应该指出,上述分区或范围划分只是初步的,还只是一种有益的尝试,还有待于今后在其它地区或更多测试样品以及结合微量元素、同位素等地球化学资料来检验、补充、修正与完善。此外在所有岩溶岩样品中,镨(Pr)的测值稳定且高于地壳灰岩平均值^[10];在各样品REE配分模式中,Pr处于峰值正异常。这是否是本区奥灰岩溶岩REE的一大特点,有待深入研究。

论文工作过程中得到淮南工业学院周治安教授、中国矿业大学王桂梁教授的帮助指导,深表谢意。

REE GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND ITS PALEOKARST ENVIRONMENTAL MARKS OF ORDOVICIAN IN NORTHERN ANHUI

Li Dinglong Wu Guanmao (Dept. of Resources and Environment Engineering, Huainan Industrial Institute)

Abstract The REE contents of 14 samples selected from Ordovician carbonate sections in Xiao County, North Anhui have been investigated using ICP. Based on describing REE, the distributed model of REE characteristics and relations between LREE and HREE δ_{Eu} and δ_{Ce} , it is discussed in detail that the relation between REE geochemical characteristics and paleokarst development. The quantitative identification standards of karstic erosion degree and karstification environment are also preliminarily discussed.

Keywords karst rock; Rare earth elements; Paleoenvironment; Ordovician system; northern Anhui

煤科总院西安分院首次涉外地勘项目顺利实施

1999年3月,中国机械进出口公司和江苏矿业集团(双甲方)通过公开招标,选定煤科总院西安分院(乙方)承担“孟加拉国巴拉普库利亚煤矿(简称孟巴矿)水文地质综合补充勘探工程”项目,并同意西安分院提出的“采用水文地质补充钻探和综合物探(地震和电法)相结合的方法对该矿水文地质条件进行针对性的补充勘探”的总体技术方案。

孟巴矿是我国在外国承建的第一个煤矿建设项目,设计年产煤100万吨。本次补勘包括地震、电法、钻探和抽水试验,并在综合分析以往地质资料的基础上编制综合补勘报告。西安分院负责整个项目的组织实施、电法勘探和编制补勘报告。

参考文献

- 李定龙,周治安,王桂梁.马家沟灰岩(古)岩溶研究中的若干问题探讨.地质科技情报,1997; 17(1): 45~49
- 廖资生.试论北方岩溶作用的分期问题.中国北方岩溶和岩溶水.北京:地质出版社,1982 8~16
- 李定龙,杨为民,汪才会等.皖北奥陶系古岩溶分期、分类及岩溶岩特征.淮南工业学院学报,1998; 18(4): 1~10
- 李定龙,杨为民,汪才会等.皖北奥陶系古岩溶特征及岩溶相模式.淮南工业学院学报,1999; 19(1): 1~7
- 成都地质学院沉积所.沉积作用过程中稀土元素地球化学(1).岩相古地理,1989; (1): 58~66
- 成都地质学院沉积所.沉积作用过程中稀土元素地球化学(2).岩相古地理,1989; (2): 44~51
- 陈德潜,陈刚.实用稀土元素地球化学.北京:冶金工业出版社,1990
- 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
- Fridman G M. Deep-burial diagenesis its implications for vertical movements of the crust uplift of the lithosphere and isostatic unroofing. Sedimentary Geology, 1987, 54(3): 342~353
- Piper D Z. Rare earth elements in the sedimentary cycle: A summary. Chem. Geol. 1974; 14(4): 285~304

(收稿日期 1999-03-02)

西安分院实施的瞬变电磁法勘探,共完成物理点2132个,超出合同132个,其中甲级点1815个,占87.7%。在现场组织有关专家对野外数据采集进行验收,一致认为这次电法施工质量高,能严格按照施工设计和甲方管理程序工作,提交的报表及时准确,资料齐全,以优秀工程予以验收。水文地质人员收集了大量第一手资料,并积极配合甲方参与矿井防治水工程的设计和实施。

此项目的顺利实施,为西安分院今后拓展国际地勘市场打下了良好的基础。

(煤科总院西安分院 张天敏)