

微量元素在华南武陵统沉积环境和物源分析中的应用

裴羽, 何幼斌, 曾艳涛, 文沾, 王宁

(长江大学地球科学学院)

摘要 华南寒武系武陵统的沉积分布,由西北往东南,依次为碳酸盐台地、碳酸盐台地边缘、上斜坡、下斜坡、盆地,水体逐渐变深,沉积相带近于北东—南西向展布。研究样品来自华南的鄂西、湘中和湘南—赣南三个区域。岩样中微量元素和稀土元素的地球化学特征分析表明,华南武陵世整体为海相贫氧—厌氧环境,鄂西地区局部为氧化环境。湘南—赣南地区水体深度可能局部变浅,反映了华南地区东南侧可能存在古陆。研究区武陵统的物源相对稳定,主要来自西北方,为上地壳物质,物源区构造背景可能为大陆岛弧或活动大陆边缘。

关键词 寒武纪; 武陵世; 微量元素; 沉积环境; 物源; 华南

中图分类号: TE135⁺.1

文献标识码: A

元素地球化学已发展成为地球化学研究中不可缺少的一部分^[1]。地壳中元素的迁移富集规律受元素自身的物理化学性质以及古气候、古环境等外界条件两方面的影响^[2]。因此,沉积岩中元素的含量变化和含量的组合,在一定程度上能反映古环境的变化。又由于部分微量元素具有特殊性质,它们与沉积环境密切相关,而受成岩作用、后生作用影响较小,因此可作为判别沉积环境的标志之一^[3-4]。在沉积环境研究中,主要运用 B、Sc、V、Cr、Co、Ni、Sr、Ba、Ga 等微量元素以及相关的比值来分析古盐度、古气候、古氧化-还原条件和古水深等。稀土元素性质的微弱差异、元素的富集与亏损、显示出的不同配分特点,能较好地反映沉积环境的氧化-还原条件、水深变化等特征,以及沉积物源和大地构造背景。

关于华南武陵统沉积环境的研究,前人多依据岩性标志和古生物标志^[5-14],而应用微量元素来分析识别的几乎没有。本文运用研究区 8 个采样点 13 个样品中 B、Sc、V、Cr、Co、Ni、Sr、Ba、Ga 等微量元素及其相关的比值,以及稀土元素随沉积环境的变化规律,结合前人关于各微量元素与沉积环境的对应关

系,来分析平面上华南武陵统的沉积环境变化,并前人关于华南武陵世沉积环境的研究成果进行对比分析和讨论,旨在为更全面深入地分析华南武陵统的沉积环境特征、物源特征及构造背景提供地球化学方面的依据。

1 区域地质背景

华南(包括扬子块体和华夏块体)的北面为华北块体,西面与特提斯构造域相连,西南侧为东南亚块体,东南侧为西太平洋构造区^[10]。华南的结晶基底为近万米厚的前南华纪泥砂质岩和火成岩,后多经历变质作用^[10]。通过沉积历史分析法的研究^[5]表明,在晚前震旦纪—志留纪漫长的构造—沉积演化历史中,华南古陆主要经历了被动大陆边缘阶段(Z_2 — O_1)和闭合造山阶段(O_2 — S)。在被动大陆边缘阶段,西北侧扬子区基本上为浅水环境,为台地相或陆棚相;东南侧江南区则为深水区,为深水斜坡和盆地沉积环境。江南区的东南边界,即萍乡—上饶断裂带,为板块俯冲带^[11]或缝合带^[12],一般认为是古扬子板块(块体)与华夏板块(块体)的边界。

收稿日期: 2014-09-18; 改回日期: 2014-10-26

本文受中国地质科学院项目“主要地质单元区域地质调查与片区总结”(编号: 1212011120115)资助

裴羽: 女, 1992 年生。现为长江大学在读硕士研究生。研究方向: 沉积学和地球化学。通讯地址: 430100 湖北省武汉市蔡甸区大学路 111 号; E-mail: peiyu920621@163.com

华南寒武系自下而上划分为滇东统、黔东统、武陵统和芙蓉统(滇东统和黔东统大致相当于下寒武统,武陵统相当于中寒武统,芙蓉统相当于上寒武统)。在滇东世—黔东世,华南发生海侵,水体缺氧。地层为一套黑色岩系(主要为黑色碳质页岩夹少量粉砂质页岩),上部黄绿色页岩增多,逐步过渡为石灰岩。武陵世—芙蓉世,为华南被动大陆边缘阶段的成熟期,也是碳酸盐岩楔状体发育的鼎盛时期。这一时期,华南西北侧为台地相,与之毗邻的斜坡区重力流沉积发育;东南侧为盆地区,发育一套纹层状泥晶灰岩、泥质条带灰岩及页岩、硅岩^[5]。

马永生等^[6-7]采用构造—层序岩相古地理的方法,将中国南方早古生代划分为7个超层序。其中,

武陵世沉积属于第四个超层序,由西北至东南,沉积环境由碳酸盐台地向碳酸盐台地边缘、浅海陆棚、陆坡、盆地依次过渡。冯增昭等^[8]采用单因素分析多因素综合作图法,编绘了中国南方沉积相平面图,得出华南武陵世“两陆”(康滇陆和华夏陆)、“三台”(扬子台地、滇西台地和东南台地)、“一坡”(扬子台地和江南盆地之间的斜坡)和“一盆”(江南盆地)的古地理特征。郑和荣等^[9]结合前人研究成果,综合研究后认为:中国南方从西北至东南,沉积环境依次为碳酸盐台地(OP—RP)、碳酸盐台地边缘(PE和PFS)、上斜坡(Slu)、下斜坡(SII)和盆地(Ba)(图1)。因而,华南从西北向东南总体上水体逐渐变深。

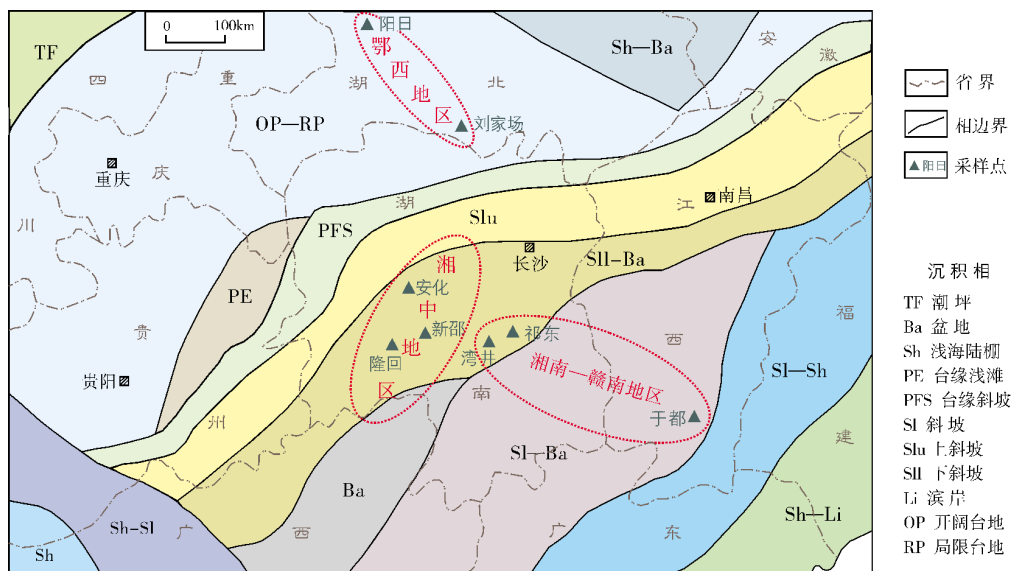


图1 华南武陵世沉积相平面图(据文献[9]修改)

2 研究方法

为使分析样品的数据具有一定的代表性和准确性,本研究在8个采样点采集了13件样品(采样点位置见图1)。所采样品均匀地分布于研究区各沉积相带,以利于分析平面上环境的变化。根据采样点的分布位置,由西北至东南,可大致划分为三个地区,即鄂西地区(包含阳日、刘家场采样点)、湘中地区(包含安化、新邵、隆回采样点)和湘南—赣南地区(包含祁东、湾井、于都采样点)(图1)。在有选择性地采样过程中,为了尽可能使样品的岩性保持一致,并减少风化强度的影响,样品均采自武陵统,且采取

没有发生后期蚀变的新鲜岩石。

对样品中Sc、V、Cr、Co、Ni、Ga、Sr、Ba、Cu、Th、U、Zr、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu等元素在内的44种元素进行了分析。微量元素的含量测定由核工业北京地质研究院分析测试研究中心(采用ELEMENT XR等离子体质谱分析仪)完成。分析结果见表1。

3 分析结果

3.1 微量元素特征分析

研究区(鄂西和湘中地区)的样品中,B含量平

表 1 华南寒武系武陵统样品部分微量元素和稀土元素含量测试结果表

位置	层位	样品号	岩石类型	微 量 元 素										稀 土 元 素														单位: μg/g		
				B	Sc	V	Cr	Co	Ni	Ga	Sr	Ba	Cu	Th	U	Zr	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er		Tm	Yb
鄂西	Є _{4q}	附-1	泥晶白云岩	23.2	3.07	20.90	21.40	5.70	7.31	4.18	61.8	108.0	42.1	3.13	1.01	30.0	7.70	15.30	1.76	6.05	1.27	0.23	1.16	0.18	1.06	0.22	0.62	0.10	0.59	0.09
		附-2	粉砂质白云岩	37.3	6.03	43.10	34.40	7.76	14.30	8.93	76.0	287.0	16.3	9.14	1.87	125.0	22.80	43.40	5.09	17.70	3.48	0.60	3.04	0.47	2.58	0.52	1.50	0.24	1.41	0.21
		附-3	钙质砂岩	—	0.88	7.68	5.30	2.78	6.01	1.14	65.1	42.7	45.9	1.11	0.40	11.9	3.46	6.53	0.75	2.71	0.58	0.11	0.53	0.08	0.45	0.09	0.26	0.05	0.34	0.07
	刘-1	白云岩	189.0	9.35	57.00	45.00	8.61	13.10	11.70	98.1	252.0	20.2	9.49	4.41	88.3	9.54	21.70	2.50	9.44	2.07	0.40	1.83	0.30	1.82	0.38	1.11	0.19	1.16	0.17	
	刘-2	长石英砂岩	—	0.46	6.59	9.96	2.04	4.46	1.83	86.4	98.0	10.8	1.60	0.91	43.5	9.24	13.60	1.61	5.76	1.08	0.22	0.98	0.15	0.79	0.16	0.51	0.09	0.53	0.08	
湘中	Є _{3w}	安-1	碳质泥灰岩	86.8	8.89	91.8	53.00	11.20	29.20	13.40	262.0	2093.0	41.2	12.30	3.52	96.5	21.30	43.60	5.02	17.70	3.53	0.93	3.03	0.48	2.51	0.50	1.47	0.22	1.40	0.22
		安-2	含碳板岩	—	9.41	97.10	66.80	11.60	26.40	14.90	30.6	1842.0	55.2	14.60	4.34	109.0	28.30	56.00	6.37	22.20	3.92	0.88	3.24	0.46	2.20	0.43	1.36	0.21	1.28	0.19
		新-1	碳质板岩	—	12.20	237.00	77.40	9.91	34.00	19.40	12.8	3084.0	52.4	16.10	2.97	130.0	38.10	65.70	8.98	33.90	7.56	1.96	6.50	1.11	6.31	1.23	3.50	0.54	3.24	0.47
	隆-1	含碳钙质板岩	—	14.10	272.00	86.00	2.04	58.00	20.40	13.6	1164.0	23.9	15.80	13.60	189.0	47.90	78.30	8.83	29.10	4.96	1.01	4.53	0.69	3.76	0.80	2.53	0.41	2.53	0.39	
	祁-1	碳质板岩,钙质板岩	—	9.85	125.00	80.60	5.85	24.70	15.00	23.4	2190.0	75.6	13.00	5.35	95.3	34.60	62.60	6.50	21.10	3.98	1.05	3.36	0.50	2.56	0.49	1.52	0.24	1.53	0.24	
湘西— 湖南	Є _{3c}	湾-1	砂 岩	—	8.05	52.30	47.80	9.41	21.70	13.60	82.4	536.0	36.0	20.20	3.50	250.0	45.20	87.70	9.70	34.40	6.52	1.11	5.50	0.85	4.29	0.84	2.51	0.38	2.33	0.35
		湾-2	砂 岩	—	10.10	71.50	65.30	13.00	33.40	18.80	88.6	596.0	26.3	16.00	2.09	188.0	43.90	78.60	9.41	33.30	6.56	1.35	5.88	0.93	4.85	0.96	2.81	0.41	2.42	0.37
	Є _{3g}	于-1	中—细砂岩	—	11.20	68.40	72.50	10.50	38.00	17.20	27.6	650.0	20.3	17.30	2.90	232.0	51.90	89.70	11.10	37.10	8.33	1.63	7.50	1.21	6.38	1.29	3.87	0.58	3.60	0.53

Є_{3g} 高滩组; Є_{3c} 茶头头组; Є_{3w} 沅泥塘组; Є_{4q} 覃家加组

表 2 华南寒武系武陵统样品微量元素分析数据表

位置	样 品 数	B(μg/g)*		B/Ca		V(μg/g)		V/(V+Ni)		Sr(μg/g)		Ba(μg/g)		Sr/Cu		δU**		U/Th		V/Cr		Ni/Co	
		范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	范围	平均	范围	平均	范围	范围	平均	范围	范围	平均	范围	平均	
鄂西	5	23.2-189.0	83.17	4.20-16.20	8.63	6.59-57.00	27.05	0.56-0.81	0.69	61.80-98.10	77.48	42.7-287.0	157.54	1.41-8.00	4.08	0.76-1.26	1.04	0.20-0.57	0.38	0.66-1.45	1.12	1.28-2.19	1.80
湘中	4	86.8	86.80	6.48	6.48	91.80-272.00	164.58	0.76-0.87	0.81	12.80-262.00	79.75	1164.0-3084.0	2045.75	0.24-6.36	1.61	0.71-1.44	1.01	0.18-0.86	0.41	1.45-3.16	2.35	2.28-28.43	9.19
湘西— 黔南	4	—	—	—	—	52.30-71.50	64.07	0.64-0.84	0.72	23.40-88.60	55.50	536.0-2190.0	993.00	1.36-3.37	2.34	0.56-1.10	0.76	0.13-0.41	0.22	0.94-1.55	1.17	2.31-4.22	3.18
由西北往东南 的变化趋势		增 加		降 低		先增加后降低		先增加后降低		先增加后降低		先增加后降低		先降低后增加		降 低		先增加后降低		先增加后降低		先增加后降低	

* 鄂西的 B 样品数为 3, 湘中的 B 样品数为 1(见表 1)。** δU 定义为 2U/(U+Th/3)

均值均大于 $80 \mu\text{g/g}$ (其中, 湘中地区的值稍大), B/Ga 平均值均大于 5 (表 2)。前人研究表明: 水体中的 B 含量与水体盐度存在线性关系, 即水体盐度越高, B 含量越大^[15], 而沉积物中 B 含量与水介质中 B 含量有关, 正常情况下海相沉积物中 B 含量高于淡水沉积物。一般情况下, 海相样品中 B 含量为 $80 \sim 125 \mu\text{g/g}$ ^[16]。Ga 在淡水沉积物中常见, 海相沉积物中 B/Ga 的值高于淡水沉积物。陆相沉积环境 B/Ga 值一般小于 $3 \sim 3.3$, 正常海相 B/Ga 值则常大于 $4.5 \sim 5$, 介于它们之间的为过渡相^[17]。

V 含量, 由西北往东南方向, 在鄂西地区平均值最低; 过渡到湘中地区, V 含量增加; 至湘南—赣南地区, V 含量又降低了 (表 2)。黏土矿物对 V 有吸附作用, V 在泥岩或黏土岩中质量分数最高, 从浅水到深水环境总体呈增加趋势^[3]。

研究区样品中的 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 平均值均大于 0.56 (表 2)。其中, 在鄂西地区值最低, 湘中地区值最高, 而湘南—赣南地区的值介于两者之间。Hatch 等^[18]对美国堪萨斯州上宾西法尼亚系黑色页岩的研究表明: 高 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值 ($0.84 \sim 0.89$) 时, 水体分层, 底层水体中出现 H_2S 的厌氧环境; 低 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值 ($0.46 \sim 0.60$) 时, 显示分层弱的贫氧环境; 中等比值 ($0.54 \sim 0.82$) 时, 为水体分层不强弱的厌氧环境。

华南武陵统, Sr 含量平均值先增加后降低, Ba 含量平均值具有相同的变化规律 (表 2), 但值得注意的是在湘中地区 Ba 含量急剧增加至 2045.75。前人的研究^[19-24]表明: 当淡水与海水混合时, 一方面, 淡水中的 Ba^{2+} 可与海水中的 SO_4^{2-} 结合形成 BaSO_4 , 而 BaSO_4 的溶解度比 SrSO_4 小, SrSO_4 可向海方向迁移更远的距离; 另一方面, 由于离子半径 $r_{\text{Ba}^{2+}} < r_{\text{Sr}^{2+}}$, 且 Ba^{2+} 具有比 Sr^{2+} 更小的电离电位, 易于被黏土矿物、胶体以及有机质等吸附, 因此 Ba^{2+} 在进入海洋时, 易被近岸黏土吸附沉淀。由此可知, 从陆向海, 从浅水到深水, Sr 的绝对含量有增加趋势, Ba 的含量则逐渐降低。此外, Veizer 等^[22, 25]在研究西喀尔巴阡山中部的中生代沉积时, 曾得出 Sr 在不同的沉积相中具有双峰分布的特征, 具体表现为由浅滩相到深海相或超咸水湖相, Sr 含量都增加。胡明毅等^[4]通过对中扬子台地北缘上震旦统微量元素的研究发现, Sr 含量以浅滩相为中心, 向局限海湾和深水斜坡—盆地方向明显增加, 呈现双峰分布的特点。

Sr/Cu 平均值, 在鄂西地区最大 (且存在个别样

品的值大于 5 的情况), 在湘中地区和湘南—赣南地区, Sr/Cu 平均值小 (湘中地区更是低于湘南—赣南地区) (表 2)。通常, Sr/Cu 值在 $1.3 \sim 5.0$ 之间指示潮湿气候, 大于 5 则指示干旱气候^[23]。

δU 的平均值, 在研究区由西北往东南方向呈逐渐降低的变化 (表 2)。 δU 的定义为 $\delta\text{U} = 2\text{U}/(\text{U}+\text{Th}/3)$ ^[26], 它可表示氧化-还原条件; 若 $\delta\text{U} > 1$, 表示缺氧环境; 若 $\delta\text{U} < 1$, 说明为正常的海水环境^[26-27]。

研究区样品的微量元素 U/Th 、 V/Cr 和 Ni/Co 平均值, 由西北往东南方向均表现为先增加后降低 (表 2)。这三组比值在判别古氧化-还原环境时是较可靠的指数^[28]: 在亚氧环境或缺氧 (还原) 环境下, U/Th 、 V/Cr 、 Ni/Co 值分别大于 1.13、4.13 和 7.00; 在氧化环境下, 分别小于 0.18、2.00 和 5.00; 贫氧环境下, 分别处在 $0.18 \sim 1.13$ 、 $2.10 \sim 4.13$ 和 $5.00 \sim 7.00$ 之间。

总体来说, 结合前人关于地化指标与沉积环境的相互关系讨论, 研究区样品的 B 含量大于 $80 \mu\text{g/g}$, B/Ga 值大于 5, $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值大于 0.56, Sr/Cu 值基本处于 $1.30 \sim 5.00$ 之间; 鄂西和湘中地区 δU 平均值 > 1 , U/Th 值基本大于 0.18。由此可以认为, 华南武陵世整体为海相环境, 水体主要处于还原条件下。由西北往东南方向, 华南武陵世 B 含量逐渐增加, B/Ga 值和 δU 值降低, V 和 Sr 的含量以及 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 、 U/Th 、 V/Cr 、 Ni/Co 值先增加后降低, Sr/Cu 值先降低后增加, 这些变化可能大致反映了水深增加的变化过程, 且在湘南—赣南地区水体局部变浅。

3.2 稀土元素特征值

研究区的样品, 由西北往东南方向, Ce/La 值逐渐降低 (表 3)。当 $\text{Ce/La} > 2.0$ 时为厌氧环境, 位于 $1.5 \sim 1.8$ 之间时为贫氧环境, $\text{Ce/La} < 1.5$ 时为富氧环境^[29]。

研究区武陵统中稀土元素的铈异常 (Ce_{anom}) 平均值均大于 -0.10 (表 3)。在鄂西地区武陵统样品中发现, 偶然存在 Ce_{anom} 值约为 -0.13 (实际 -0.129, 表 3) 的情况。

Ce 的富集和亏损情况, 既可以反映沉积环境的氧化-还原条件, 而且还可以反映水深的变化。Elderfield 等^[30]用 Ce 异常指标 (Ce_{anom}) 来反映稀土元素中的 Ce 与邻近的 La 和 Nd 元素的相关变化, 其定义为: $\text{Ce}_{\text{anom}} = \log_{10} [3\text{Ce}_n / (2\text{La}_n + \text{Nd}_n)]$ ^[30] (元素的下角 n 指采用北美页岩标准化)。当 $\text{Ce}_{\text{anom}} > -0.1$ 时, 表示 Ce 富集,

表3 华南寒武系武陵统样品稀土元素分析数据表

位置	样品数	Ce/La		Ce _{anom}		(Eu/Eu [*]) _s		(La/Yb) _n		(Ce/Ce [*]) _n	
		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
鄂西	5	1.47~2.27	1.90	-0.129~-0.005	-0.047	0.55~0.65	0.60	0.80~1.69	1.26	0.76~0.97	0.88
湘中	4	1.63~2.05	1.85	-0.101~-0.018	-0.056	0.64~0.84	0.76	1.14~2.14	1.65	0.77~0.92	0.85
湘南—赣南	4	1.73~1.94	1.82	-0.074~-0.031	-0.052	0.55~0.86	0.67	1.40~2.19	1.81	0.81~0.91	0.87
由西北往东南的变化趋势		降低		先降低后增加		先增加后降低		增加		先降低后增加	

注: $Ce_{anom} = \log_{10}[3Ce_n/(2La_n + Nd_n)]$;“(Eu/Eu^{*})_s”中的下角 s,指采用球粒陨石标准化;“(La/Yb)_n”、“(Ce/Ce^{*})_n”中的下角 n,指采用北美页岩标准化

反映水体为还原环境;当 $Ce_{anom} < -0.1$ 时,表示Ce负异常,反映水体为氧化环境。

铈离子 Ce^{3+} 是海水及沉积物中Ce元素的主要存在形式。若水体为氧化环境, Ce^{3+} 易被氧化为 Ce^{4+} ,产生沉淀^[31],出现Ce负异常。但在浅海区,或被陆地封闭的海中,Ce浓度基本正常;而在开阔海域,Ce则会出现严重亏损。

综上所述,研究区武陵统Ce/La平均值均大于1.8, Ce_{anom} 平均值均大于-0.1。结合前人关于这些元素与沉积环境间关系的研究,上述值反映了华南武陵世整体为贫氧—厌氧环境,鄂西地区局部出现氧化环境。

3.3 物源特征

采用Boynton^[32]球粒陨石标准值对华南武陵统样品进行标准化,三个地区的稀土元素配分模式(图2)相类似;轻稀土元素均富集,重稀土元素均亏损;曲线在轻稀土元素(La→Eu)处斜率较大,分馏程度较高,而在重稀土元素(Gd→Lu)处曲线平坦,分馏程度较低。不同之处在于,鄂西地区各样品的稀土元素含量较湘中地区和湘南—赣南地区存在明显区别。

图2中,三个地区的曲线在Eu处均呈现明显的“V”形,说明存在Eu负异常。

元素的分异作用使上地壳Eu元素缺失而下地壳Eu元素富集,说明沉积物的物源较为一致且相对稳定,指示为上地壳^[33-34]。中酸性侵入岩、火山岩、长英质变质岩以及来自大陆源区的沉积岩均显示Eu负异常^[35]。Eu/Eu^{*}值则是表示Eu异常程度的参数^[31],研究区(Eu/Eu^{*})_s(下角的s,指采用球粒陨石标准化)值介于0.55~0.86之间,均小于1(表3)。

稀土元素分异程度可作为指示剂来反映沉积物

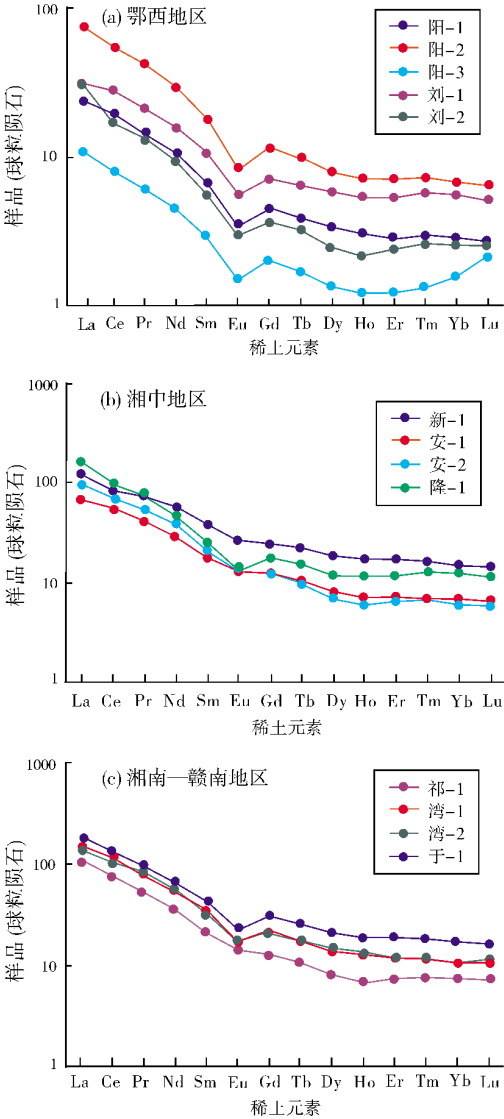


图2 华南寒武系武陵统稀土元素配分模式

的沉积速率^[36]。分异程度用指标(La/Yb)_n(下角的n指采用北美页岩标准化)表示,它表现为标准化稀土

元素配分模式中分布曲线的斜率(倾斜程度)。从鄂西地区到湘中地区再到湘南—赣南地区, $(La/Yb)_n$ 值逐渐增大(表 3), 沉积物沉积速率有减小趋势, 表明物源主要来自西北方向。

总体来说, 研究区 $(Eu/Eu^*)_n$ 值均小于 1, $(La/Yb)_n$ 值由西北向东南逐渐增加, 反映了物源相对稳定, 为陆地壳, 且物源来自西北方向。

3.4 大地构造背景

Murray^[37]的研究表明, Ce 异常与沉积盆地的构造背景和环境氧化-还原条件有关。他还用另一指标 $(Ce/Ce^*)_n$ 来表示 Ce 异常。在扩张洋中脊区(400 km 以内), 具明显的 Ce 负异常, 为 0.29; 在大洋盆地为中等 Ce 负异常, 为 0.55; 而在大陆边缘环境, Ce 负

异常消失或为正异常, 在 0.90~1.30 之间。研究区武陵统的 $(Ce/Ce^*)_n$ 平均值变化不明显, 介于 0.85~0.88 之间(表 3)。

Bhatia^[38]认为, 沉积岩中的 La、Ce、Y、Th、Zr、Hf、Ti、Sc 等微量元素在沉积、成岩过程中具有较低的活动性, 如果在海水中停留时间较短, 元素能定量地转移到碎屑沉积物中, 因此通过一些经验判别参数和图解^[37-40], 能良好地反映母岩性质和沉积盆地的构造背景。Bhatia 等^[34]提出的 La—Th—Sc、Th—Sc—Zr/10 和 Th—Co—Zr/10 三角形判别图, 能较好地地从地球化学角度区分出大陆岛弧、大洋岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘四种构造背景。将本次研究的三个地区样品点投射在这类三角形判别图中, 结果如图 3。

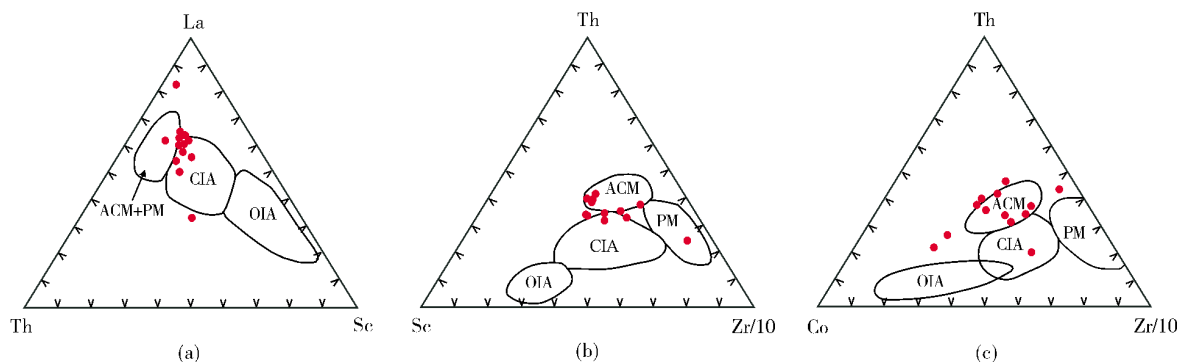


图 3 华南寒武系武陵统地球化学构造背景判别图

构造背景: CIA 大陆岛弧; OIA 大洋岛弧; ACM 活动大陆边缘; PM 被动大陆边缘

综上所述, 华南武陵统的 $(Ce/Ce^*)_n$ 在 0.90 左右, 反映了沉积盆地构造背景为大陆边缘环境。在 La—Th—Sc 三角形构造环境判别图解(图 3a)中, 样品点落入活动大陆边缘、被动大陆边缘和大陆岛弧边界; 在 Th—Sc—Zr/10 三角形图解(图 3b)中, 样品点落入活动大陆边缘和大陆岛弧边界; 在 Th—Co—Zr/10 三角形图解(图 3c)中, 样品点落入活动大陆边缘和大陆岛弧。据此认为, 华南武陵统物源区的构造背景可能为大陆岛弧或活动大陆边缘。

4 讨论

湘南—赣南地区的 V 和 Sr 含量, 以及 $V/(V+Ni)$ 、 U/Th 、 V/Cr 和 Ni/Co 值, 均较湘中地区为低(表 2); δU 值和 Ce/La 值在研究区内自西北至东南方向依次降低(表 2 和表 3); Ba 含量在鄂西地区小于湘中地区(表 2), 这可能与采样的岩石类型、成岩环境和成岩时间有关。

为讨论 Sr 和 Ba 元素的含量受岩石类型的影响程度, 笔者对不同的岩性做了 Sr—Ba 含量交会图(图 4)。

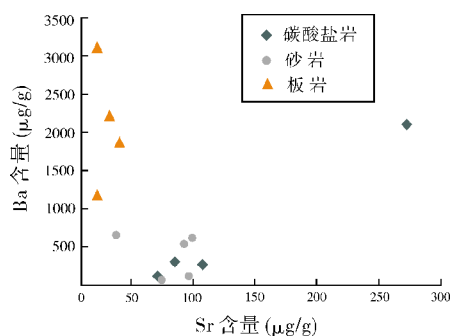


图 4 华南寒武系武陵统岩样 Sr—Ba 含量交会图

从图 4 中可以看出, 板岩中的 Sr 含量明显低于砂岩和碳酸盐岩, Ba 含量则高于砂岩和碳酸盐岩。砂岩和碳酸盐岩中的 Sr 和 Ba 含量区分不明显。湘中地

区所采岩样为灰黑色板岩(表1),黏土矿物含量高,含碳质,Sr含量低,Ba含量显著增加,这不仅因为黏土矿物易于吸附Ba²⁺,而且还可能因为Ba含量与有机质存在成因上的联系^[40]。同时,由于研究区在较浅水条件下处于大气淡水和混合水成岩环境,而在较深水条件下仅受到了海水成岩环境的影响,并且淡水中的Sr含量明显低于海水,因此导致研究区较深水环境中的Sr含量高。此外,板岩已发生轻微变质,在一定程度上也会影响到Sr和Ba元素的含量。

上述的变化也可能反映在湘南—赣南地区,泥质含量相对减小,水体还原性相对减弱,水体深度在一定程度上变浅,可能反映了在华南的东南侧存在着古陆。

研究区武陵统球粒陨石标准化稀土元素的配分模式相似程度高(图2)。个别样品的配分模式曲线不太协调,可能与岩石类型不一致相关。另外,鄂西地区稀土元素配分模式中各样品的曲线较湘中、湘南—赣南地区的分散(图2),可能与采样点间的距离较大有关。

整体上来说,有限的样品的微量元素含量数据在一定程度上反映了与沉积环境的内在相关性,它为分析沉积环境的特征提供了一定的地球化学依据。然而,在从陆相环境过渡到海相环境的过程中,水体深度虽有逐渐增加的趋势,但不一定是所有地区的水深都会增加,台地上局部浅水环境如膏盐湖、浅滩的存在,在一定程度上也会影响微量元素含量的变化。微量元素含量除与沉积环境有关外,还与采样的岩石类型、采样点间距、成岩环境及成岩时间等因素有关。

5 结 论

结合多种微量元素的含量及其在研究区的变化规律认为,华南武陵统的沉积环境特征可归纳为以下三点。

(1)华南武陵世整体为海相环境,水体处于还原状态,鄂西地区局部为氧化环境。

(2)华南武陵世水体具有一定的深度且从西北向东南方向水体逐渐加深,在湘南—赣南地区水体可能局部变浅。在华南的东南侧可能存在古陆,这与前人的研究存在些许差异。

(3)武陵统的物源主要来自西北方,物源区处于大陆岛弧或活动大陆边缘的构造环境。

参 考 文 献

- [1] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 125-129.
- [2] 纪友亮, 胡光明, 张善文, 等. 沉积层序界面研究中的矿物及地球化学方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(4): 455-460.
- [3] 汪凯明, 罗顺社. 碳酸盐岩地球化学特征与沉积环境判别意义——以冀北拗陷长城系高于庄组为例[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 343-349.
- [4] 胡明毅. 利用地球化学标志识别沉积环境——以中扬子台地北缘上震旦统为例[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(6): 39-41.
- [5] 段太忠, 曾允孚, 高振中. 根据沉积历史分析华南古大陆边缘的构造演化[J]. 石油与天然气地质, 1988, 9(4): 410-420.
- [6] 马永生, 陈洪德, 王国力. 中国南方层序地层与古地理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [7] 马永生, 陈洪德, 王国力. 中国南方构造—层序岩相古地理图集[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 等. 中国南方寒武纪岩相古地理[J]. 古地理学报, 2001, 3(1): 1-18.
- [9] 郑和荣, 胡宗全. 中国前中生代构造—岩相古地理图集[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 71-74.
- [10] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1035-1053.
- [11] 郭令智, 施央申, 马瑞士. 华南大地构造格架和地壳演化[C]//第26届国际地质大会. 第26届国际交流地质学术论文集(一). 北京: 地质出版社, 1980: 106-116.
- [12] 水涛. 中国东南大陆基底构造格局[J]. 中国科学: B辑, 1987, (4): 414-422.
- [13] 党皓文, 刘建波, 袁鑫鹏. 湖北兴山中寒武统覃家庙群微生物岩及其古环境意义[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(2): 289-298.
- [14] 董熙平. 华南寒武纪牙形石序列[J]. 中国科学: D辑, 1999, 29(4): 339-346.
- [15] Couch E L. Calculation of paleosalinities from boron and clay mineral data[J]. AAPG Bulletin, 1971, 55(10): 1829-1837.
- [16] 王正海, 焦养泉. 吐哈盆地西南缘水西沟群沉积地球化学特征[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(4): 1-4.
- [17] 王益友, 郭文莹, 张国栋. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J]. 同济大学学报, 1979, (2): 51-60.
- [18] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA [J]. Chemical Geology, 1992, 99(1/3): 65-82.
- [19] 黄思静, 吴素娟, 孙治雷, 等. 中新世海水锶同位素演化和古海洋事件[J]. 地学前缘, 2005, 12(2): 133-141.
- [20] 汪凯明, 罗顺社. 海相碳酸盐岩锶同位素及微量元素特征与海平面变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 51-58.

- [21] 汪凯明, 罗顺社. 燕山地区中元古界高于庄组和杨庄组地球化学特征及环境意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(4): 356-363.
- [22] Veizer J, Demovic R. Strontium as a tool for facies analysis[J]. *Sedimentary Petrology*, 1974, 44(1): 93-115.
- [23] 倪善芹, 侯泉林, 王安建, 等. 碳酸盐岩中锶元素地球化学特征及其指示意义——以北京下古生界碳酸盐岩为例[J]. 地质学报, 2010, 84(10): 1510-1516.
- [24] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 360-372.
- [25] Veizer J, Demovic R. Environmental and climatic controlled fractionation of elements in Mesozoic carbonate sequences of the Western Carpathians[J]. *Sedimentary Petrology*, 1973, 43(1): 258-271.
- [26] 吴朝东, 陈其英. 湘西磷块岩的岩石地球化学特征及成因[J]. 地质科学, 1999, 34(2): 213-222.
- [27] Steiner M, Wallis E, Erdtmann B D, et al. Submarine-hydrothermal exhalative ore layers in black shales from south China and associated fossils—Insights into a Lower Cambrian facies and bio-evolution[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 169(3/4): 165-191.
- [28] Jones B, Manning A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(2): 111-129.
- [29] 柏道远, 周亮, 王先辉, 等. 湘东南南华系—寒武系砂岩地球化学特征及对华南新元古代—早古生代构造背景的制约[J]. 地质学报, 2007, 81(6): 755-771.
- [30] Elderfield H, Greaves M J. The rare earth elements in seawater[J]. *Nature*, 1982, 296: 214-219.
- [31] 王中刚, 于学远, 赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 90-93.
- [32] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements; Meteorite studies[C]//Henserson P E. *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [33] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks influence of provenance and sedimentary processes[J]. *Reviews in Mineralogy*, 1989, 21(1): 169-200.
- [34] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1986, 92(2): 181-193.
- [35] 董策, 周建波. 内蒙古东北部中二叠统哲斯组砂岩地球化学特征分析及物源区示踪[J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(5): 663-673.
- [36] 王国茹, 陈洪德, 朱志军, 等. 川东南—湘西地区志留系小河坝组砂岩稀土元素特征及其地质意义[J]. 石油实验地质, 2010, 32(5): 487-495.
- [37] Murray R W. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale[J]. *Geology*, 1990, 18(3): 268-271.
- [38] Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(6): 611-627.
- [39] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO_2 content and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio[J]. *The Journal of Geology*, 1986, 94(8): 635-650.
- [40] 刘英俊. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 42-56.

编辑: 赵国宪

Application of Trace Elements in Analysis of Sedimentary Environments and Provenance of Wulingian Series, South China

Pei Yu, He Youbin, Zeng Yantao, Wen Zhan, Wang Ning

Abstract: Cambrian Wulingian Series is distributed widely in South China, which shows southeastward deepening marine sedimentary environments that are carbonate platform, carbonate platform edge, upper slope, lower slope and basin in sequence in NE-SW zonal distribution. Rock samples are selected from western Hubei, central Hunan, and southern Hunan-southern Jiangxi areas. The geochemical characteristics of trace elements and REE in samples indicates that the whole South China was in an oxygen-poor to anaerobic marine environment but an oxidic environment locally in western Hubei during Wulingian Epoch. Water was perhaps shallower in depth in southern Hunan-southern Jiangxi area than that in the central Hunan area, which means possible existence of an ancient land in the southeast of South China. It is implied that the sediment provenance was derived stably from the upper crust in the northwest and the provenance area probably is under the tectonic setting of continental island arc or the active continental margin.

Key words: Cambrian; Wulingian Series; Trace element; Sedimentary environment; Provenance; South China

Pei Yu: Master degree in progress at Yangtze University. Add: School of Geosciences, Yangtze University, 111 College Rd., Wuhan, Hubei, 430100, China