示,完整的黑色页岩中各种形态硫含量及硫同位素组成对沉积环境、成岩变化研究具有重要的指示作用.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号:49772125)资助项目.

参 考 文 献

- 1 李任伟. 扬子地台早古生代沉积有机质的聚集、热演化及成矿作用研究. 见:叶连俊主编. 生物成矿作用研究. 北京:海洋出版社,1993. 65~83
- 2 蒋治渝,韦龙明,陈民扬. 湘桂粤地区古环境和地层中硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 的演化关系初论. 地球化学,1990,(2):117~126
- 3 储雪蕾,赵瑞,臧文秀,等. 煤和沉积岩中各种形式硫的提取和同位素样品制备. 科学通报,1993,38(20):1887~1890
- 4 Wilkin R T, Barnes H L, Barantley S L. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of redox conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60: 3897~3912
- 5 Berner R A. Sedimentary pyrite formation: an update. *Geochim Cosmochim Acta*, 1984, 48: 605~615
- 6 Carrigan W J, Cameron E M. Petrological and stable isotope studies of carbon and sulfide minerals from the Gunflint Formation, Ontario: evidence for the origin of early Proterozoic iron formation. *Precambrian Res*, 1991, 52: 347~380
- 7 Donnelly T H, Crick I H. Biological and abiological sulfate reduction in two Northern Australian Proterozoic basins. In: Schidlowski M, Golubic S, Kimberley M M, et al. eds. *Early Organic Evolution*. Berlin: Springer-Verlag, 1992. 398~407
- 8 段伟民,陈丽蓉,黄,东海早期成岩过程中黄铁矿的形成史. 中国科学, B 辑,1993, 23 (5): 545~552
- 9 Raiswell R, Berner R A. Pyrite formation in euxinic and semi-euxinic sediments. *American Journal of Science*, 1985, 285: 710~724
- 10 Passier H F, Middelburg J J, de Lange G J, et al. Pyrite contents, microtextures, and sulfur isotopes in relation to formation of the youngest eastern Mediterranean sapropel. *Geology (Boulder)*. 1997, 25(6): 519~522
- 11 Strauss H. The sulfur isotopic record of Precambrian sulfates; new data and a critical evaluation of the existing record. *Precambrian Research*. 1993, 63(3-4): 225~246
- 12 刘宝珺,许效松,著. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿. 北京: 科学出版社,1993. 61~65
- 13 陈先沛. 热水沉积作用的概念和几个岩石学标志. 沉积学报,1992,10(3):124~132
- 14 祁思敬. 喷气沉积矿床国内近期研究的若干认识. 见:北京大学地质系编. 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集. 北京:地震出版社,1998. 804~810

(1998-02-05 收稿,1998-06-28 收修改稿)

北祁连山大陆裂谷硅质岩的稀土元素判别

赵江天 夏林圻 夏祖春 徐学义*

(地质矿产部西安地质矿产研究所,西安710054,* 联系人)

摘要 通过对硅质岩的稀土元素地球化学特征研究,将北祁连山晚元古代-寒武纪大陆裂谷进一步划分为:与中心式火山作用相伴生的硅质岩($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 1$, $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N} = 4.3$, 以及 La_{ex} 为 45%);和与裂隙式火山作用相伴生的硅质岩($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0.92$, $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N} = 1.1$, 以及 La_{ex} 为 60%). 同时,在与中心式火山作用相伴生的硅质岩中,又可区分出一类与块状硫化物矿床有关的硅质岩(HREE 富集),为在类似构造环境中找寻块状硫化物矿床提供了有效的找矿标志.

关键词 北祁连山 大陆裂谷 硅质岩 地球化学特征

位于青海与甘肃交界处的北祁连山是我国重要的早古生代造山带,通过前期区域岩石学

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1999-44-6-665>

和构造学的研究^[1],基本认清了北祁连山早古生代的构造-沉积格架,即从新元古代-奥陶纪,它经历了大陆裂谷-沟弧盆的演化过程,其中尤以大陆裂谷和活动大陆边缘的岩石和构造特征保存较完整,特征较显著.夏林圻等人^[2]将北祁连山大陆裂谷海相火山作用划分为两类:一类为中心式爆发火山作用,以出现双峰式大型火山岩穹为特征;另一类为裂隙式喷发-喷溢火山作用,以出现层状基性火山熔岩为特征.大型火山岩穹主要出露于白银地区和清水沟地区;后者主要出露于黑刺沟等地.与上述两类火山作用密切伴生着大量海相硅质岩,这些硅质岩的完善性和代表性都是古老造山带中所罕见的.

由于硅质岩的物理特征十分模糊不清,用常规岩石学方法很难获得有用的构造信息,因此,本文着重研究这些硅质岩的稀土元素地球化学特征,并与其他作者的研究成果对比^[3],探讨它们对构造环境判别的贡献.

1 样品及分析

在前人工作的基础上,我们在北祁连山新元古代-寒武纪大陆裂谷中选择了13块有代表性的样品.它们的时代,颜色,沉积环境各不相同,其中有7个样品与中心式火山作用相伴生;另外6个样品则与裂隙式火山作用相伴生(表1).SiO₂是所有样品的主要成分,但个别样品中有少量碳酸盐加入.所有样品均由刚玉碾磨碎样机粉碎进行稀土元素分析.稀土元素由中国科学院高能物理研究所用中子活化法分析,误差<10%.

2 结果及讨论

稀土元素测试结果列于表1. Ce 异常($Ce/Ce^* = Ce_N / [(La_N)(Nd_N)]^{1/2}$; La_N/Yb_N 为硅质岩轻稀土(LREE)与重稀土(HREE)的相对富集程度. N 代表北美、欧洲和俄罗斯页岩平均值^[4]的标准化值.我们用 $La_{excess} = La_{ex} = La_{sample} - [Al_{sample} \times (La_{NASC}/Al_{NASC})]$ 对比硅质岩中 La 的丰度与陆源粘土中 La 的含量,用 10⁻⁶为单位^[5],NASC 为北美页岩的平均值^[6].

表1 硅质岩中稀土元素含量(×10⁻⁶)

样品	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	ΣREE	Ce/Ce*	La _N /Yb _N
页岩 ^{a)}	41	83	38	7.5	1.61	1.23	3.53	0.61	177	1	1
硅质岩 ^{b)}	16.9	36.9	16.8	3.38	0.768	0.433	1.18	0.18	76.5	0.88	1.1
与中心式火山作用伴生的硅质岩											
B-1	16.5	29.2	13.5	3.06	0.802	0.689	1.81	0.265	65.8	0.93	0.78
B-2	9.16	17	6.88	1.3	0.329	0.269	0.98	0.174	36.1	1.02	0.83
B-3	17.7	38.9	18.8	5.29	1.71	1.43	4.48	0.744	89	1.02	0.34
W-6	2.19	5.23	3.43	1.09	0.0913	0.199	0.627	0.089	13.4	0.91	0.29
M-6	26.8	51.6	21.8	3.38	0.799	0.428	0.963	0.143	113	0.87	3.3
Q-5	257	465	93.8	6.44	1.52	0.637	1.19	0.166	826	1.4	19
Q-11	12.6	13.7	3.56	0.338	0.0843	0.0512	0.198	0.0313	31	1.2	5.5
与裂隙式火山作用伴生的硅质岩											
F-6	50.3	91.1	46.9	8.1	1.32	1.4	3.74	0.52	204	0.89	1.2
F-9	78.4	149	58.9	11.6	1.71	2.18	5.76	1	309	1	1.2
F-12	37.8	66.1	33	4.73	1.37	0.798	2	0.314	146	0.89	1.7
H-12	46.2	83.5	34.2	7.49	2.43	1.3	4.33	0.665	180	1	0.92
Qlr-6	6.07	9.9	5.45	1.43	0.366	0.231	0.602	0.0934	24.2	0.82	0.87
Qlr-7	11.8	17.9	7.11	1.48	0.312	0.242	1.2	0.198	40.2	0.93	0.85

a) 页岩平均值为世界页岩平均值(包括俄罗斯、北美和欧洲页岩平均值); b) 硅质岩为世界典型裂谷区硅质岩平均值(包括 Carribbean, C. Bem. Rise 和 Bellingh Plain)

运用稀土元素的地球化学特征解释硅质岩的构造环境(图1),已得到广泛应用. 本区硅质岩稀土元素总量(ΣREE)较高,平均值为 165×10^{-6} (除 Gd, Dy, Ho, Er 和 Tm) 略高于大陆边缘沉积区,相当于陆间海盆硅质岩^[5],反映板内裂谷拉张时,构造活动剧烈的特征. Ce 异常在 0.82~1.4 之间变化,平均值为 0.97,与大陆边缘硅质岩类似; $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 值变化较大,这些均反映了板内大陆裂谷硅质岩的特征.

2.1 与中心式火山作用相伴生硅质岩的稀土元素特征

这类硅质岩的 ΣREE 平均值为 168×10^{-6} 略低于世界页岩值(177×10^{-6}),说明在大陆拉张伊始,构造活动剧烈,火山作用强烈,沉积速率较高,硅质岩暴露于海水中的时间较短,吸收稀土元素较少. 而中心式火山作用裂谷阶段的另一重要特征是,由于构造活动剧烈,受沉积速率及陆源输入的双重影响,在同一剖面上的硅质岩可以出现较低的 ΣREE (如在清水沟剖面上,样品 Q-11: 31×10^{-6}),也可以出现极高的 ΣREE (如样品 Q-5: 826×10^{-6}).

与中心式火山作用相伴生的个硅质岩样品 Ce 异常在 0.87~1.4 之间变化,平均值为 1,与大陆边缘硅质岩相同;同时伴生有双峰式大型火山岩穹和大量火山碎屑岩及块状硫化物矿床,为大陆拉张伊始,裂谷的缓慢拉张阶段.

$\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 值反映了 LREE 与 HREE 的分馏特征. 在中心式火山作用阶段, $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 平均值为 4.3,远远高于大陆边缘硅质岩的 $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 比值,反映当时构造活动剧烈,硅质岩形成受陆源输入影响强烈. 但也有例外,在白银和清水沟地区,靠近块状硫化物矿床的硅质岩均显示 HREE 富集, $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 值在 0.29~0.83 之间变化,平均值为 0.56,与含矿酸性火山岩的 $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ 值接近^[7],推测可能受后期含矿热液的影响.

通过与 NASC 进行对比,还可将硅质岩中类似 NASC 的陆源输入成分去除,利用 La_{ex} 对本区硅质岩进行分析. 与中心式火山作用相伴生的硅质岩 La_{ex} 值较低,为 45%,表明该阶段硅质岩主要受陆源输入影响. 另外,与块状硫化物矿床有关的硅质岩,按距矿体远近,其 La_{ex} 值呈

图1 北祁连山硅质标准化稀土模式曲线图
(a) 与中心式火山作用相伴生的硅质岩(白银和清水沟地区); (b) 与裂隙式火山作用相伴生的硅质岩(黑刺沟地区). Δ 示与块状硫化物矿床有关的硅质岩(B-1, B-2, B-3, W-6); $\times$ 示已接近大洋化的硅质岩(Qlr-6, Qlr-7)

规律性变化. 靠近矿体的铁硅质岩($La_{ex} = 33\%$)-铁锰硅质岩($La_{ex} = 42\%$)-锰硅质岩($La_{ex} = 60\%$), 这可能反映了受含矿酸性火山热液的影响程度.

2.2 与裂隙式火山作用相伴生硅质岩的稀土元素特征

从表1中可以看出, 这类硅质岩 ΣREE 较高, 平均值为 210×10^{-6} (除样品 Qh-6 和 Qh-7 以外), 高于世界页岩值(177×10^{-6}), 说明当时构造活动相对稳定, 同时, 火山作用间隙时间较长, 吸收稀土元素较多. 另外, 黑刺沟剖面上部的2个硅质岩样品 ΣREE 却较低, 平均值为 32.2×10^{-6} , 这可能反映当时已远离陆源, 接近深海平原沉积区, 大陆裂谷已向洋盆转化. 随着裂谷拉张强度增大, 进入强烈拉张阶段, 层状溢流拉斑玄武岩出现, 6个硅质岩样品的 Ce/Ce^* 在 0.82~1 之间变化, 平均值为 0.92, 显示弱的负异常. 更进一步, 出露于黑刺沟剖面上部的2个样品, Ce 异常平均值为 0.88, 为这些样品中的最低值, 已接近开阔大洋中硅质岩的 Ce 异常.

在裂隙式火山作用裂谷阶段, 硅质岩 REE 页岩标准化曲线近于平坦, La_N/Yb_N 平均值为 1.1, 并同样可分为两类: 在黑刺沟剖面中下部, La_N/Yb_N 值为 0.92~1.7, 平均值为 1.3, 与大陆边缘区硅质岩的特征类似; 而黑刺沟剖面上部的3个样品 La_N/Yb_N 值分别为 0.85 和 0.87, 平均值为 0.86, 同样表明大陆裂谷已向大洋盆地转化.

类硅质岩中 La_{ex} 平均值为 60%, 也可分为两类: 接近大洋盆地的3个样品(黑刺沟剖面上部) La_{ex} 值最高, 达 62%, 即有 62% 的 La 不同于 NASC 源区, 受陆源输入影响较小; 其次为裂隙式火山作用裂谷阶段中其他硅质岩样品($La_{ex} = 58\%$).

3 结论

(1) 本区硅质岩的地球化学特征与构造环境控制的陆源输入、当地海水性质及热液的相互作用有关, 研究结果证明, 在北祁连山新元古代-寒武纪大陆裂谷中, 利用硅质岩稀土元素的地球化学特征可以进一步划分出: 与中心式火山作用相伴生的硅质岩(ΣREE 为 168×10^{-6} , Ce/Ce^* 平均值为 1, La_N/Yb_N 平均值为 4.3, 以及 La_{ex} 为 45%); 和与裂隙式火山作用相伴生硅质岩(Ce/Ce^* 平均值为 0.92, La_N/Yb_N 平均值为 1.1, 以及 La_{ex} 为 60%).

(2) 在与中心式火山作用相伴生的硅质岩中, 又可区分出一类与块状硫化物矿床有密切关系的硅质岩, 它们以富集 HREE 为特征(La_N/Yb_N 值为 0.56); 并且 La_{ex} 值呈有规律的变化, 从矿体向围岩依次为 33%, 42%, 和 60%. 这就为寻找块状硫化物矿床提供了有效的找矿标志.

(3) 在与裂隙式火山作用相伴生的硅质岩中, 有部分样品(黑刺沟剖面上部的两个样品)已接近大洋盆地硅质岩的稀土元素特征. 它们的 ΣREE 相对较低, 为 32.2×10^{-6} (其余样品为 210×10^{-6}); Ce 异常为 0.88, La_N/Yb_N 值为 0.86, La_{ex} 为 62%. 这说明在晚寒武世北祁连山裂谷已向大洋化方向转化.

致谢 张瑞林和周志强研究员为本文提供了部分样品; 任有祥研究员为本文的编写提供了一定思路, 谨此一并致谢. 本工作为国家自然科学基金(批准号: 49502030)资助项目.

参 考 文 献

- 1 夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 等. 祁连-秦岭山系海相火山岩. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991. 8~28
- 2 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山海相火山岩岩石成因. 北京: 地质出版社, 1996. 18~38

- 3 丁林, 钟大赉. 滇西昌宁孟连带古特提斯洋硅质岩稀土元素和铈异常特征. 中国科学, B 辑, 1995, 25(1): 93~100
- 4 Murray R W, Buchholtzen Brink M R, Jones D L. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale. *Geology*, 1969, 18: 268~271
- 5 Murray R W, Buchholtzen Brink M R, Gerlach D C, et al. Interoceanic variation in the rare earth, major, and trace element depositional chemistry of chert: Perspectives gained from the DSDP and ODP record. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56: 1897~1913
- 6 Gromet L P, Dymek R F, Haskin L A, et al. The "North American Shale composite": Its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48: 2469~2482
- 7 彭礼贵, 任有祥, 李智佩, 等. 甘肃省白银厂铜多金属矿床成矿模式. 北京: 地质出版社, 1995. 48~58

(1998-04-03 收稿, 1998-08-26 收修改稿)

恒定横流中圆孔射流的分维特征

李玉梁* 陈朝泉 江春波

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084. * 联系人)

摘要 应用平面激光诱导荧光技术测量了在恒定横流中圆孔射流的分维数。研究了分维数和动量比的关系、分维数的变化和射流断面高程及稀释度的关系。比较了多孔射流和单孔射流的分维特性。

关键词 恒定横流 射流 分维测量

湍流分维的研究为理解和回答湍流现象提供了一种崭新的工具和方法^[1], 已成为湍流研究的热点之一。Sreenivasan^[2, 3]和黄真理^[4]利用平面激光诱发荧光(PLIF)技术对自由射流获得的湍动图像进行了分维分析, 取得了很有意义的结果。本文用(PLIF)技术观测了恒定横流中射流的瞬时图像(拍摄速度为 1/50 s), 用“数格子”法对这些图像进行了分维测量, 即用边长为 ε 的正方形网络分割图形, 求出所需的网格数 N , 建立 N 值和 ε 值的关系, 利用 $N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-D}$ 的关系, 求出分维数 D 。通过不同实验工况下对射流顺流垂直剖面、不同高度的水平截面和不同值的等稀释度线图形的分维测量, 对恒定横流中圆孔射流的分维特征得出以下结果。

1 分维数与动量比的关系

以 R_m 表示射流动量与横流动量之比

$$R_m = \frac{dV_j^2}{HV_a^2} \quad (1)$$

式中 d 为射流出口直径, V_j 为射流出口流速, H 为横流水深, V_a 为横流流速。通过对 5 种动量比下射流顺流垂直剖面的分维测量, 获得了分维数 D 和动量比的关系, 如图 1 所示。图 2 为某一动量比下测得的射流图形。

由图 1 看出, 当 R_m 约小于 3 时, 分维数随 R_m 的增大而增大, 意味着浓度分布图的破碎程度随射流作用的增加而增加; 当 R_m 约大于 3 时, 分维数基本不变, 为 2.32 左右。此值与 Sreenivasan 对自由射流获得的分维数很接近^[3], 说明当 $R_m > 3$ 时, 横流对射流的影响已比较小, 浓度分布图的破碎程度与自由射流趋于一致。