

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

柏道远, 周亮, 王先辉, 张晓阳, 马铁球

湖南地质调查研究院, 湖南湘潭, 411100

内容提要:湘东南位于扬子板块与华夏地块的交接地带,南华纪—寒武纪期间形成了巨厚的复理石、类复理石连续沉积。其中的砂岩总体上以中等的 SiO_2 含量、高的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值和 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO})$ 值、较高的 $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ 含量及低的 CaO 含量为特征。稀土元素球粒陨石标准化曲线与典型的后太古宙页岩和上陆壳相似,以轻稀土富集、重稀土平坦、铕负异常显著为特征。主量元素和微量元素特征显示出被动大陆边缘、活动大陆边缘和大陆岛弧等多种环境信息。从不同构造背景下的剥蚀原岩及风化条件和搬运沉积过程来看,大陆岛弧和活动大陆边缘形成的砂岩应具有显著区别于被动大陆边缘的地球化学特征,而被动大陆边缘形成的砂岩则可能包含较多的大陆岛弧和活动大陆边缘环境的地球化学信息。因此,湘东南南华系—寒武系砂岩应形成于被动大陆边缘环境。这一判断与古元古代—中元古代岛弧与活动大陆边缘形成岩石为重要原岩,以及沉积盆地因强烈陆内伸展断陷而具一定活性等客观事实相吻合。华南板溪群与冷家溪群间至少存在 40~60 Ma 的沉积缺失,江南造山带新元古代碰撞造山成因的岩浆活动,板块交接带南华纪—早古生代沉积物中岛弧火山物质的缺乏,以及湘(东)南中元古界(甚至更早)结晶基底横向上的连续性等,表明扬子板块与华夏地块之间新元古代—早古生代期间的沉积盆地不是洋盆,而是陆内裂谷盆地。上述基于湘东南砂岩地球化学研究,和根据区域资料分析所得出的关于扬子板块与华夏地块间新元古代—早古生代盆地构造性质的结论,彼此提供了良好的约束。

关键词:砂岩;地球化学;构造背景;新元古代—早古生代;湘东南;华南

近 30 年来,关于华南大地构造属性提出了多种观点。(王鸿祯 1982)、王鸿祯等(1986)、刘宝珺等(1993)认为,华南由扬子与华夏两个主要的地质构造单元组成,其间有华南洋的存在,中元古代的四堡运动过程中,华南洋向扬子陆块的俯冲使扬子东南边缘形成增生的褶皱带,俯冲带不断后退,形成了华夏古陆边缘的沟弧盆系;晋宁运动使扬子与华夏之间的华南洋在东段消失并形成江绍缝合带,而此段以西仍然存在一个残留洋盆,该盆地一直延续到加里东期,除钦防海槽以外的整个华南盆地从中奥陶世开始逐渐关闭,至志留纪末形成加里东褶皱带。郭令智等(1984)认为华南陆块由雪峰造山运动、加里东造山运动及古生代末期或中生代和新生代的造山运动等分别造成江南元古宙地体、华南加里东地体、东南沿海地区和台湾地体的增生所形成。许靖华等(1987)、李继亮等(1989)提出了一个从前震旦纪一直延续到中生代的多岛洋的弧陆碰撞缝合模式,认为“板溪群”是印支期混杂岩而不是成层有序

的前寒武纪正常沉积岩。徐志刚(1995)提出华南晚前寒武纪剪切式开合构造的设想,认为华南在古元古代未形成统一的扬子-华夏古陆,但古陆东北部有一伸入古陆内部的赣皖浙古海湾;中元古代开始“华夏块体”逆时针转动和“扬子块体”顺时针转动使西部张裂成裂陷槽,而赣皖浙古海湾则剪刀式闭合。殷鸿福等(1999)认为华南地区为特提斯洋的多岛洋盆体系的一部分,并认为扬子与华夏之间(中段与南段)在加里东期拼合之前存在一个洋盆——南华洋。王剑等(2001)通过沉积学研究提出了华南新元古代裂谷盆地模式。尹福光等(2003)提出华南地区应是三大陆块群(冈瓦纳大陆群、劳亚大陆群和泛华夏大陆群)中的泛华夏大陆群的东南缘多岛弧系统的组成部分,南华纪—早古生代湘东南及其周边地区为武夷山岛弧的弧后盆地或弧陆碰撞过程中形成的前陆盆地。最近,南京大学十余位长期在华南从事研究工作的学者还专门就华南构造带及“华夏地块”问题展开了讨论,他们对扬子板块与华夏地块碰撞暨

注:本文为中国地质调查局地质大调查项目(编号 200213000035)资助成果。

收稿日期:2007-03-14;改回日期:2007-04-23;责任编辑:周健。

作者简介:柏道远,男,1967年生,高级工程师,主要研究方向为构造学、岩石学和成矿学。Email:daoyuanbai@sina.com。

古华南洋的封闭时代、华南是“华夏地块”还是华南造山带暨是否普遍存在古元古代—中元古代结晶基底等若干地质问题的认识仍存在较大分歧(舒良树, 2006; 章邦桐等, 2006; 胡受奚等, 2006; 于津海等, 2006; 马瑞士, 2006; 王鹤年等, 2006)。

由上可见, 南华纪至早古生代期间扬子与华夏地块之间盆地性质的厘定, 一定程度上成为华南大地构造属性研究的关键。大量已有研究表明, 沉积岩的化学组成真实地记录了物源区的性质和沉积盆地的构造背景(Bhatia, 1983, 1985; Taylor et al., 1985; Bhatia et al., 1986; Roser et al., 1986; McLennan et al., 1990, 1995; Gu, 1994; 顾雪祥, 1996; 顾雪祥等, 2003)。为此, 笔者近年来对地处扬子与华夏交接地带的湘东南地区南华纪—寒武纪地层中的砂岩(主要为浊积岩)进行了系统的主量元素、微量元素和稀土元素地球化学研究。本文即在通过地球化学特征判别南华系—寒武系砂岩构造环境基础上, 结合当前华南地质研究的新进展, 探讨华南新元古代—早古生代的构造背景。

1 地质背景

湘东南地区位于诸广山隆起西侧, 属华夏地块的北西缘, 北西面紧邻扬子地块(王鸿祯, 1982; 王鸿祯等, 1986; 刘宝珺等, 1993; 殷鸿福等, 1999)(图1)。区内大量出露南华纪—奥陶纪地层, 主体为一套由砂岩、板岩组成的复理石、类复理石连续沉

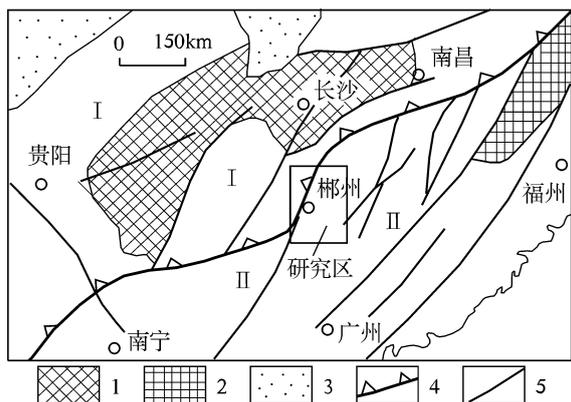


图1 研究区大地构造位置图(据王光杰等, 2000 修改)

Fig. 1 Geotectonic location of the study area

(modified from Wang Guangjie et al., 2000)

I—Yangtze block; II—Cathaysia block; 1—Yangtze

basement uplift; 2—Cathaysia basement uplift; 3—Meso-

Cenozoic basin; 4—plate suture zones; 5—fault

积。南华系下部的泗洲山组整合于青白口纪大江边组之上, 大江边组为一套深灰—灰黑色条带状碳质板岩、含白云质碳质板岩, 含碳质白云质板岩夹极薄层状细晶白云质大理岩。奥陶系被中泥盆世跳马涧组角度不整合覆盖。南华纪—奥陶纪地层于志留纪加里东运动中强烈变形, 形成近东西向—北西西向紧闭—中常线状褶皱(柏道远等, 2006a, 2006b), 尔后于后造山环境下被加里东期花岗岩体侵位(柏道远等, 2006c), 中泥盆世开始被晚古生代沉积盖层覆盖。

南华系自下而上依次为泗洲山组、天子地组、正园岭组。泗洲山组整合于青白口纪大江边组碳质板岩之上, 厚约 550 m, 为灰绿色、深灰色含砾(为冰成泥砾)板岩、粉砂质板岩, 底部夹白云岩透镜体, 上部间夹硅质岩及白云质灰岩、含锰白云岩。天子地组厚约 600 m, 以紫红色、灰绿色粉砂质板岩、板岩与灰绿色中厚层粉砂岩、岩屑石英杂砂岩呈大厚度互层为特征。正园岭组厚 500~800 m, 为灰绿色中厚层—块状长石岩屑杂砂岩、石英杂砂岩夹(粉砂质)板岩。

震旦系自下而上依次为埃歧岭组和丁腰河组。埃歧岭组厚 846.9 m, 底部为青灰色、紫红色粉砂质板岩、板岩夹硅质岩, 往上为灰绿色中厚层至块状长石(岩屑)石英杂砂岩夹粉砂质板岩、板岩, 局部夹少量薄层硅质岩。丁腰河组厚 1.7~24.1 m, 为深灰色、灰黑色硅质岩、泥质硅质岩夹板岩和硅质板岩。

寒武系自下而上依次为香楠组、茶园头组、小紫荆组、爵山沟组。香楠组厚 600 m 左右, 下部为板岩、碳质板岩、硅质板岩与砂岩、粉砂岩构成韵律, 中部为长石石英杂砂岩夹粉砂质板岩、板岩, 上部为板岩、砂质板岩夹砂岩、粉砂岩。茶园头组厚约 1170 m, 下部为灰绿色、青灰色中细粒长石(岩屑)石英杂砂岩夹少量粉砂岩、(粉砂质)板岩, 往上渐变为砂岩与板岩互层。小紫荆组厚 800 m 左右, 下部为深灰色、灰绿色(粉砂质)板岩夹杂砂岩、碳质板岩, 上部为深灰色、灰黑色杂砂岩夹板岩, 局部夹不稳定的灰岩、白云岩。爵山沟组厚 480~950 m, 为灰绿色厚层—块状杂砂岩与板岩互层。

南华系—寒武系砂、板岩中普遍发育鲍马序列, 反映沉积物以浊积成因为主。

2 砂岩地球化学特征

于资兴市黄草乡浙江电站和龙溪乡雷家洞、汝城县外沙乡满天星电站、永兴县中竹乡等地, 对湘东

南南华系、震旦系和寒武系中的砂岩(一般为杂砂岩)分别采集了 9 个、3 个和 10 个样品,进行了主量元素、微量元素和稀土元素分析,测试结果见表 1。顺便指出,由于研究区南华系、震旦系和寒武系属同盆地连续沉积,因此尽管震旦系样品数量偏少,但基本不影响对南华纪—奥陶纪阶段构造环境的整体讨论。

2.1 主量元素特征

南华系、震旦系和寒武系各系砂岩的主量元素组成基本相近(表 1)。 SiO_2 含量中等, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 值 0.11~0.38,一般 0.12~0.22,平均 0.17。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值高(平均达 15.70),且不同样品差别大(0.75~50.2)。 $(\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO})$ 含量较高(Fe_2O_3^* 指以 Fe_2O_3 形式表示的全铁含量),为 4.8%~17.26%,一般 8.0%~12.0%,平均 9.58%。 CaO 含量低,平均 0.45%,除个别外,多数样品小于 0.5%。 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ 值高,平均达 31.95。

2.2 稀土元素和微量元素特征

稀土元素的含量、特征比值和球粒陨石标准化分配模式分别见表 1、图 2。稀土元素含量总体较高, ΣREE 为 $109 \times 10^{-6} \sim 301 \times 10^{-6}$,平均 197。轻稀土富集, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 和 LREE/HREE 值高,分别为 6.57~17.1(平均 9.78)、2.16~4.44(平均 3.49)和 6.28~10.8(平均 8.35)。重稀土平坦, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 为 1.36~2.35,平均 1.72。具显著的铕负异常, Eu/Eu^* 值为 0.58~0.82,平均 0.66。铈异常总体不明显,除个别样品偏低外, Ce/Ce^* 值一般 0.9 左右。尽管稀土组分的绝对含量变化较大,但上述轻稀土富集、重稀土平坦、铕负异常显著、铈异常不明显等特征暨球粒陨石标准化曲线形态与典型的后太古宙页岩和上陆壳(Taylor et al., 1985)相似。

大离子亲石元素 Rb、Ba、Sr 含量(表 1)稍具变化,但各系成分总体接近。其中 Rb、Ba 总体上与后太古宙平均页岩(PAAS)(Taylor et al., 1985)及上陆壳的成分相当,而 Sr 的含量则远低于后太古宙平均页岩(PAAS)(Taylor et al., 1985)及上陆壳(表 2)。

研究区南华系—寒武系砂岩中的 Sc、V、Co、Cr、Ni 等铁镁族元素和 Zr、Hf、Th 等高场强元素的含量(表 1),以及 Zr/Hf 、 Zr/Th 、 La/Th 、 La/Y 、 Th/Sc 、 Sc/Ni 、 Sc/Cr 、 Ti/Zr 、 Cr/Ni 、 Ni/Co 等比值(表 2)尽管显示一定变化,但各系总体接近,与上地壳和

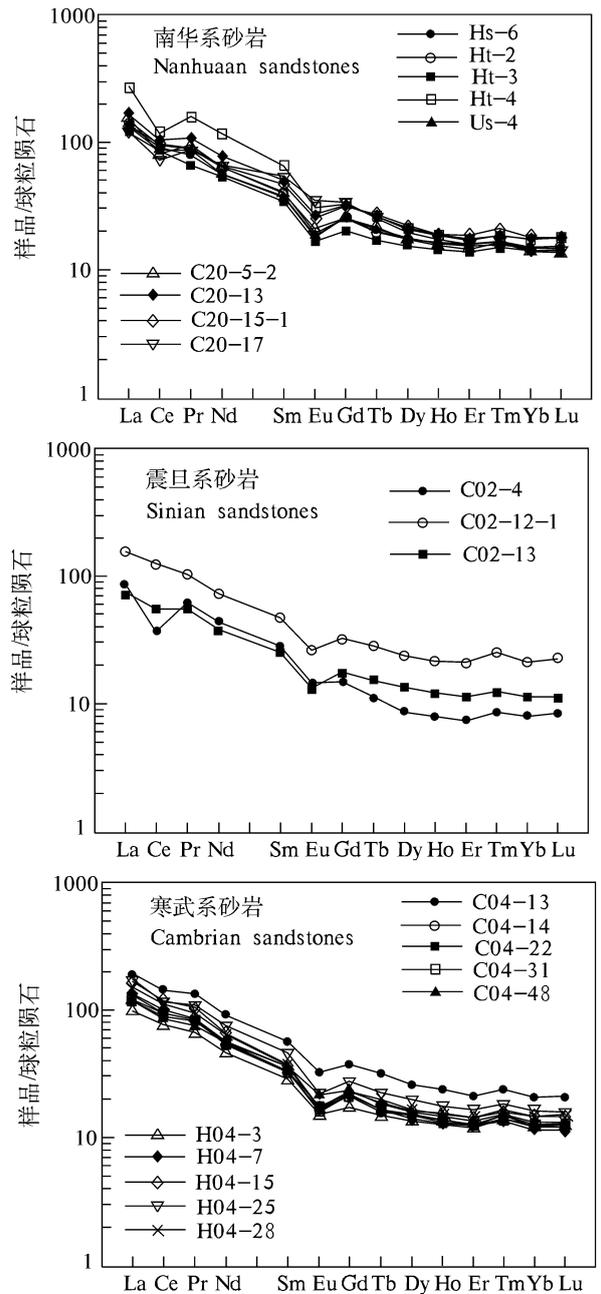


图 2 稀土元素的球粒陨石标准化曲线

(球粒陨石标准化参数数据 Taylor 等 1985)

Fig. 2 Chondrite-normalized distribution patterns of the rare earth elements

(chondrite data from Taylor et al., 1985)

后太古宙页岩(Taylor et al., 1985)成分总体类似或稍有差别。

3 沉积构造背景的地球化学制约

3.1 地球化学判别

与陆源沉积物形成有关的主要因素包括物源类

表 1 湘东南南华纪—寒武纪砂岩岩石化学成分(%)、稀土微量元素丰度($\times 10^{-6}$)及特征值

Table 1 Petrochemical components(%) and contents of rare earth and trace elements($\times 10^{-6}$) and characteristic parameters of the Nanhuaan—Cambrian sandstones in southeast Hunan

时代	南华系砂岩									震旦系砂岩				寒武系砂岩								
样号	Hs-6	Ht-2	Ht-3	Ht-4	Us-4	C20-5-2	C20-13	C20-15-1	C20-17	C02-4	C02-12-1	C02-13	C04-13	C04-14	C04-22	C04-31	C04-48	H04-3	H04-7	H04-15	H04-25	H04-28
SiO ₂	74.88	76.18	75.40	62.84	77.42	78.76	70.62	63.51	81.41	78.95	58.43	70.50	55.81	73.23	76.36	80.60	72.57	73.11	78.80	80.89	82.27	82.00
TiO ₂	0.61	0.69	0.59	0.83	0.58	0.54	0.77	0.69	0.56	0.57	0.72	0.59	0.83	0.58	0.59	0.52	0.58	0.63	0.53	0.58	0.58	0.63
Al ₂ O ₃	10.63	11.12	8.74	18.41	9.78	11.37	14.91	13.87	9.68	9.80	18.24	12.69	21.27	11.66	10.98	9.04	10.69	12.35	9.96	8.87	9.55	9.55
Fe ₂ O ₃	5.57	5.62	4.16	8.84	4.52	4.14	6.55	6.78	4.18	4.92	11.88	6.06	8.64	5.41	4.83	3.73	5.74	5.39	3.81	4.85	2.81	3.61
FeO	2.45	1.62	2.10	1.67	2.28	1.23	1.15	5.19	0.66	1.68	1.28	4.20	4.92	3.22	1.76	1.16	4.28	2.23	1.51	1.71	1.13	0.86
MnO	0.13	0.12	0.11	0.05	0.14	0.06	0.05	0.10	0.01	0.04	0.09	0.07	0.05	0.06	0.03	0.02	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02	0.01
MgO	1.80	1.63	1.47	2.45	1.56	1.10	1.57	3.42	0.51	1.27	2.53	2.38	3.16	1.55	1.62	1.12	1.62	1.35	1.02	0.67	0.73	0.52
CaO	0.22	0.07	3.92	0.08	0.26	0.10	0.09	2.16	0.11	0.11	0.19	0.45	0.08	0.33	0.20	0.25	0.47	0.25	0.28	0.11	0.07	0.06
Na ₂ O	1.82	0.53	1.85	0.10	1.91	0.22	0.11	1.09	0.11	0.05	0.18	0.13	0.14	1.57	1.07	1.27	1.28	1.52	1.93	0.14	0.10	0.10
K ₂ O	1.79	2.33	1.51	4.64	1.43	2.42	4.06	3.01	2.65	2.53	6.33	2.81	4.97	2.24	2.44	2.17	2.58	2.97	1.99	2.03	2.66	2.54
P ₂ O ₅	0.12	0.10	0.14	0.08	0.13	0.05	0.12	0.17	0.11	0.07	0.13	0.13	0.13	0.15	0.12	0.12	0.15	0.15	0.15	0.11	0.07	0.11
LOS	0.50	0.74	0.26	0.79	0.44	0.76	0.70	0.41	0.39	0.49	0.87	0.70	0.85	0.55	1.00	0.80	0.27	0.71	0.51	0.82	0.55	0.73
Fe ₂ O ₃ * + MgO	10.09	8.96	7.97	13.14	8.60	6.61	9.39	15.98	5.43	8.07	15.84	13.10	17.26	10.54	8.40	6.15	12.11	9.22	6.52	7.42	4.80	5.08
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.14	0.15	0.12	0.29	0.13	0.14	0.21	0.22	0.12	0.12	0.31	0.18	0.38	0.16	0.14	0.11	0.15	0.17	0.13	0.11	0.12	0.12
K ₂ O/Na ₂ O	0.98	4.42	0.82	45.1	0.75	11.29	35.91	2.75	23.64	50.20	36.24	21.77	35.36	1.43	2.28	1.70	2.01	1.96	1.03	14.43	26.30	25.00
Al ₂ O ₃ /(Na ₂ O+CaO)	5.23	18.56	1.51	99.39	4.53	35.87	72.55	4.26	43.23	60.75	50.74	22.05	96.32	6.16	8.65	5.93	6.11	6.99	4.51	35.24	55.53	58.69
La	38.3	41.7	35.5	88.9	39.0	48.1	51.3	40.6	36.3	27.4	43.4	23.6	62.2	40.7	37.9	38.5	38.3	31.1	41.5	52.6	56.2	47.1
Ce	73.2	78.5	69.9	88.4	70.7	64.6	84.1	79.1	58.3	31.4	90.9	44.0	114.7	75.5	72.4	75.3	70.1	63.5	80.5	97.3	96.3	89.2
Pr	9.25	10.20	8.87	19.19	10.10	11.11	12.76	10.46	10.28	7.06	11.79	6.24	15.16	9.47	9.36	9.56	8.99	7.93	9.73	11.95	13.21	10.88
Nd	32.9	36.8	31.0	65.1	34.8	37.8	46.6	38.5	39.6	25.2	42.7	22.2	54.4	31.2	31.9	32.3	32.0	26.9	33.6	40.1	44.7	37.7
Sm	6.85	7.88	6.39	12.22	7.22	7.68	9.57	8.92	10.23	5.48	8.84	4.72	10.95	6.16	6.25	6.27	6.89	5.42	6.83	7.38	8.48	7.17
Eu	1.28	1.41	1.16	2.16	1.38	1.50	1.93	1.72	2.48	1.03	1.83	0.98	2.26	1.21	1.25	1.20	1.55	1.12	1.22	1.23	1.56	1.26
Gd	6.12	6.18	5.15	8.01	6.27	6.33	8.02	7.87	8.61	3.79	8.14	4.51	9.86	5.35	5.46	5.46	5.92	4.35	5.53	5.84	6.91	5.78
Tb	0.99	0.96	0.83	1.24	1.02	1.03	1.26	1.31	1.18	0.54	1.36	0.74	1.50	0.79	0.83	0.85	0.91	0.72	0.84	0.94	1.09	0.98
Dy	5.63	5.53	4.78	6.64	5.66	5.71	6.65	7.06	6.44	2.85	7.54	4.22	8.32	4.74	4.84	4.92	5.13	4.21	4.68	5.20	6.46	5.41
Ho	1.14	1.14	0.99	1.36	1.15	1.12	1.38	1.42	1.27	0.58	1.58	0.88	1.71	0.99	0.97	1.00	1.09	0.91	0.96	1.11	1.32	1.14

续表 1

时代	南华系砂岩									震旦系砂岩			寒武系砂岩									
	Hs-6	Ht-2	Ht-3	Ht-4	Us-4	C20-5-2	C20-13	C20-15-1	C20-17	C02-4	C02-12-1	C02-13	C04-13	C04-14	C04-22	C04-31	C04-48	H04-3	H04-7	H04-15	H04-25	H04-28
Er	3.08	3.16	2.76	3.50	3.10	2.90	3.67	3.86	3.24	1.57	4.38	2.37	4.47	2.65	2.61	2.68	2.91	2.55	2.62	3.00	3.60	3.12
Tm	0.48	0.50	0.44	0.55	0.50	0.49	0.58	0.63	0.51	0.26	0.72	0.38	0.70	0.42	0.42	0.42	0.46	0.42	0.42	0.48	0.57	0.51
Yb	2.95	2.97	2.63	3.43	2.91	2.72	3.45	3.57	2.94	1.68	4.36	2.29	4.29	2.51	2.65	2.59	2.65	2.57	2.42	2.92	3.44	3.11
Lu	0.46	0.47	0.42	0.54	0.45	0.42	0.54	0.55	0.45	0.27	0.71	0.36	0.68	0.40	0.42	0.40	0.41	0.40	0.38	0.45	0.51	0.48
ΣREE	183	197	171	301	184	192	232	206	182	109	228	118	291	182	177	182	177	152	191	231	244	214
Eu/Eu*	0.61	0.62	0.62	0.67	0.63	0.66	0.68	0.63	0.82	0.70	0.67	0.66	0.67	0.65	0.66	0.63	0.75	0.71	0.61	0.58	0.63	0.60
Ce/Ce*	0.91	0.89	0.93	0.50	0.84	0.66	0.77	0.90	0.71	0.53	0.94	0.85	0.88	0.90	0.90	0.92	0.89	0.95	0.94	0.91	0.83	0.93
La/Yb	12.98	14.05	13.49	25.93	13.40	17.69	14.88	11.38	12.35	16.31	9.95	10.31	14.5	16.21	14.32	14.88	14.45	12.09	17.13	18.00	16.35	15.14
(La/Yb) _N	8.57	9.28	8.91	17.10	8.85	11.7	9.83	7.52	8.16	10.8	6.57	6.81	9.58	10.70	9.46	9.83	9.54	7.98	11.30	11.90	10.80	10.00
(La/Sm) _N	3.41	3.23	3.38	4.44	3.29	3.82	3.27	2.78	2.16	3.05	2.99	3.05	3.46	4.03	3.70	3.75	3.39	3.49	3.70	4.34	4.04	4.00
(Gd/Yb) _N	1.67	1.67	1.57	1.88	1.73	1.87	1.87	1.77	2.35	1.81	1.50	1.58	1.85	1.71	1.65	1.69	1.79	1.36	1.84	1.61	1.61	1.49
LREE/HREE	7.70	8.37	8.43	10.80	7.68	8.17	8.00	6.76	6.28	8.36	6.86	6.40	8.16	9.14	8.67	8.85	8.02	8.36	9.64	10.50	9.16	9.35
Sc	11	10	12	18	8	8	14	16	11	12	20	16	20	10	10	8	10	11	8	11	11	11
V	83	86	66	111	66	68	124	108	75	73	134	100	143	72	70	57	73	78	85	62	61	67
Cr	76	85	60	83	70	64	97	82	75	68	127	81	109	75	73	49	70	67	61	72	66	76
Co	13.1	13.3	10.1	22.2	10.0	15.6	11.9	17.6	2.9	10.1	30.1	19.9	6.9	12.0	8.7	4.7	11.0	8.9	11.0	7.5	6.3	7.4
Ni	32	33	23	97	25	28	72	43	17	36	74	48	49	25	24	15	27	29	30	34	18	17
Zn	72	85	66	177	62	58	179	82	42	73	108	71	153	77	45	28	64	100	42	75	37	30
B	40	37	22	62	31	23	42	43	21	28	33	28	56	27	27	20	22	32	14	34	27	30
Rb	86	103	65	113	65	110	158	124	100	106	234	106	172	93	103	79	106	124	89	82	100	100
Sr	25	11	113	18	23	17	13	36	11	12	9	12	13	5.6	31	44	77	51	53	7.8	15	13
Ba	349	323	1072	452	310	420	588	374	322	281	509	357	1314	795	794	621	694	790	611	480	580	490
Y	27.7	28.7	24.5	29.5	27.3	26.5	33.1	34.9	30.3	13.1	38.0	21.5	39.8	23.9	23.2	25.0	27.5	21.4	23.7	25.8	35.2	27.8
Zr	238	290	242	179	249	205	219	189	186	166	138	126	148	221	213	223	188	218	210	269	237	283
Hf	6.8	7.7	6.6	4.6	6.5	6.5	5.7	4.6	5.2	4.2	1.6	4.0	4.2	5.1	6.0	5.8	5.2	6.5	5.5	7.1	6.3	7.7
Th	16	16	10	23	12	8	15	15	10	10	21	8.5	22	14	14	12	13	11	12	18	16	18

注:①所有样品由湖北武汉综合岩矿测试中心完成。②主量元素氧化物采用常规湿法分析。③氧化物分析值均已换算为干体系,Fe₂O₃*表示全铁,以Fe₂O₃形式给出。④微量元素采用PE Elan6000型等离子体质谱测定(ICP-MS)。球粒陨石标准化参数数据 Taylor等(1985)。

表2 湘东南南华纪—寒武纪砂岩与不同构造环境下杂砂岩的化学组成对比
Table 2 Comparison of chemical compositions of the Nanhuan—Cambrian sandstones
in southeast Hunan with the graywackes from various tectonic settings

	湘东南砂岩			显生宙不同构造环境下杂砂岩				PAAS	上陆壳
	南华系	震旦系	寒武系	大洋岛弧	大陆岛弧	活动大陆边缘	被动大陆边缘		
SiO ₂ (%)	73.49	69.29	75.56	58.83	70.69	73.86	81.95	62.80	66.00
Al ₂ O ₃ (%)	12.06	13.58	11.39	17.11	14.04	12.89	8.41	18.9	15.20
Fe ₂ O ₃ (%)	5.59	7.62	4.88	1.95	1.43	1.30	1.32		
FeO(%)	2.04	2.39	2.28	5.52	3.05	1.58	1.76	6.50	4.50
CaO(%)	0.78	0.25	0.21	5.83	2.68	2.48	1.89	1.30	4.20
MgO(%)	1.72	2.06	1.34	3.65	1.97	1.23	1.39	2.20	2.20
Na ₂ O(%)	0.86	0.12	0.91	4.10	3.12	2.77	1.07	1.20	3.90
K ₂ O(%)	2.65	3.89	2.66	1.60	1.89	2.90	1.71	3.70	3.40
TiO ₂ (%)	0.65	0.63	0.61	1.06	0.64	0.46	0.49	1.00	0.50
MnO(%)	0.08	0.07	0.03	0.15	0.10	0.10	0.05	0.11	
P ₂ O ₅ (%)	0.11	0.11	0.13	0.26	0.16	0.09	0.12	0.16	
Fe ₂ O ₃ *+MgO(%)	9.57	12.34	8.75	11.73	6.79	4.63	2.89	9.35	7.15
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.17	0.20	0.16	0.29	0.20	0.18	0.10	0.30	0.23
K ₂ O/Na ₂ O	13.96	36.07	11.15	0.39	0.61	0.99	1.60	3.08	0.87
Al ₂ O ₃ /(Na ₂ O+CaO)	31.68	44.51	28.41	1.72	2.42	2.56	4.15	7.56	1.88
<i>n</i>	9	3	10	7	9	7	7		
La($\times 10^{-6}$)	46.6	31.5	44.6	8.20	27.0	37.0	39.0	38.0	30.0
Ce($\times 10^{-6}$)	74.1	55.4	83.5	19.4	59.0	78.0	85.0	80.0	64.0
Nd($\times 10^{-6}$)	40.3	30.1	36.5	11.2	28.3	35.8	42.0	32.0	26.0
ΣREE($\times 10^{-6}$)	205	152	204	58.0	146	186	210	183	146
Eu/Eu*	0.66	0.67	0.65	1.04	0.80	0.60	0.55	0.66	0.65
La/Yb	15.1	12.2	15.3	4.20	11.0	12.5	15.9	13.6	13.6
(La/Yb) _N	9.99	8.06	10.11	2.80	7.50	8.30	10.8	9.20	9.20
(Gd/Yb) _N	1.82	1.63	1.66	1.31	1.49	1.26	2.75	1.36	1.40
LREE/HREE	8.02	7.21	8.98	3.80	7.70	9.10	8.50	9.45	9.47
Rb($\times 10^{-6}$)	103	148	105	18	67	115	61	160	112
Sr($\times 10^{-6}$)	30	11	31	637	250	141	66	200	350
Ba($\times 10^{-6}$)	468	382	717	370	444	522	253	650	550
K/Rb	210	214	209	578	219	189	178	192	250
Rb/Sr	5.96	14.55	6.53	0.05	0.65	0.89	1.19	0.8	0.32
Ba/Rb	5.14	2.73	6.81	21.3	7.5	4.5	4.7	4.06	4.91
Ba/Sr	22.3	36.6	45.7	0.95	3.55	3.8	4.7	3.25	1.57
Th($\times 10^{-6}$)	13.9	13.2	15.0	2.27	11.1	18.8	16.7	14.6	10.7
Zr($\times 10^{-6}$)	222	143	221	96	229	179	298	210	190
Hf($\times 10^{-6}$)	6.0	3.2	5.9	2.1	6.3	6.8	10.1	5.0	5.8
K/Th	1630	2448	1490	4055	1296	1252	681	2103	2617
Zr/Hf	37.0	52.4	37.3	45.7	36.3	26.3	29.5	42.00	32.76
Zr/Th	17.5	12.7	15.3	48	21.5	9.5	19.1	14.4	17.8
La/Th	3.50	2.53	2.99	4.26	2.36	1.77	2.2	2.60	2.80
La/Y	1.61	1.44	1.64	0.48	1.02	1.33	1.31	1.41	1.36
Sc($\times 10^{-6}$)	12	16	11	19.5	14.8	8	6	16	11
V($\times 10^{-6}$)	87	102	77	131	89	48	31	150	60
Co($\times 10^{-6}$)	13	20	8	18	12	10	5	23	10
Cr($\times 10^{-6}$)	77	92	72	37	51	26	39	110	35
Ni($\times 10^{-6}$)	41	53	27	11	13	10	8	55	20
Zn($\times 10^{-6}$)	91	84	65	89	74	52	26	85	71
La/Sc	3.99	1.98	4.18	0.55	1.82	4.55	6.25	2.38	2.73
Th/Sc	1.18	0.80	1.39	0.15	0.85	2.59	3.06	0.91	0.97
Cr/Ni	2.35	1.76	2.87	3.4	3.9	2.6	4.9	2.00	1.75
Ni/Co	3.36	2.81	3.33	0.62	1.22	1.04	1.42	2.39	2.00
Sc/Ni	0.35	0.31	0.44	2.3	1.44	0.77	1.9	0.29	0.55
Sc/Cr	0.16	0.18	0.15	0.57	0.32	0.3	0.16	0.15	0.31
Ti/Zr	17.8	26.4	17.1	56.8	19.7	15.3	6.74	28.6	15.8
<i>n</i>	9	3	10	11	32	10	15		

注：*n*为样品数；稀土元素球粒陨石标准化参数数据 Taylor等(1985)；不同构造环境杂砂岩的数据据 Bhatia(1983)和 Bhatia等(1986)；后太古宙平均页岩(PAAS)和上陆壳成分据 Taylor等(1985)。

型、风化条件、搬运过程以及成岩后生作用等。由于这些因素主要受沉积盆地的构造环境控制 (Pettijohn et al., 1972; Blatt et al., 1980, Bhatia, 1983), 使得利用陆源沉积物的化学组成研究板块构造暨沉积盆地构造环境成为可能 (Maynard et al., 1982; Bhatia, 1983, 1985; Bhatia et al., 1986; Roser et al., 1986; Floyd et al., 1987; Cullers et al., 1988; Frost et al., 1989; McLennan et al., 1990; Gu, 1994; Kumon et al., 1994)。虽然沉积物地球化学组成与沉积构造环境之间的关系较为复杂 (Vander Kamp et al., 1985; Cullers et al., 1988; Frost et al., 1989; McLennan et al., 1990; Haughton et al., 1991; Kumon et al., 1994), 但由于地史时期的物源区多被剥蚀破坏, 因此沉积岩的某些主量元素和微量元素在判别古代沉积盆地的构造性质中发挥了重要作用。

Roser 等 (1986) 和 Maynard 等 (1982) 分别提出了砂岩和泥岩沉积盆地构造环境的 K_2O/Na_2O-SiO_2 图解 (图 3a) 和 $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ 图解 (图 3b)。其中 Roser 等 (1986) 所划分的活动大陆边缘 (active continental margin, ACM) 包括了一系列复杂的位于活动板块边界之上或邻近活动板块边界的构造上活动的大陆边缘, 盆地沉积物中石英含量中等, 来自于大陆边缘岩浆弧 (沉积于包括海沟、弧前、弧间和弧后在内的一系列盆地环境) 或与走滑断层有关的隆升区 (沉积于拉张盆地), 这类环境与 Reading (1982) 所定义的与俯冲作用有关的盆地、大陆碰撞盆地和与平移断裂有关的拉张盆地等大致相当。Roser 等 (1986) 所划分的被动大陆边缘 (passive continental margin, PM) 包括了稳定大陆边缘的板内盆地和克拉通内部盆地, 沉积物富含石英, 来自稳定的大陆地区并沉积于远离活动板块边缘的地方 (Reading, 1982), 这类盆地与 Reading 定义的陆壳上的盆地和与洋底扩张、夭折裂谷及大西洋型大陆边缘有关的盆地等相当。

Bhatia (1983) 和 Bhatia 等 (1986) 将大陆边缘和大陆盆地划分为大洋岛弧 (oceanic arc)、大陆岛弧 (continental arc)、活动大陆边缘 (active continental margin) 和被动大陆边缘 (passive continental margin) 等 4 种构造类型, 并研究提出了判别沉积盆地构造环境的若干主量元素地球化学参数及构造环境主量元素判别函数图解 (图 4)。最具判别意义的参数包括 $(Fe_2O_3^* + MgO)$ (%)、 TiO_2 (%)、 Al_2O_3/SiO_2 、 K_2O/Na_2O 和 $Al_2O_3/(Na_2O + CaO)$

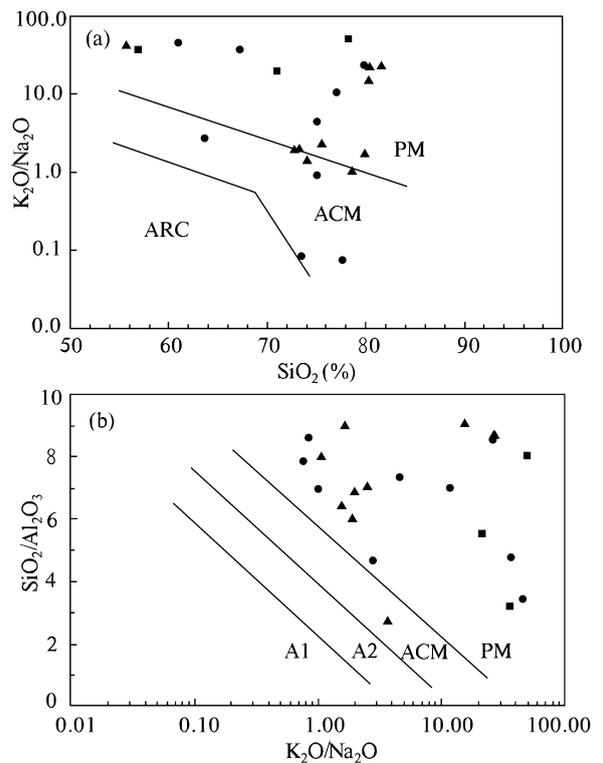


图 3 研究区南华系—寒武系砂岩的 K_2O/Na_2O-SiO_2 (a) 和 $SiO_2/Al_2O_3-K_2O/Na_2O$ (b) 构造环境判别图

Fig. 3 Tectonic setting discrimination diagrams of K_2O/Na_2O-SiO_2 (a) and $SiO_2/Al_2O_3-K_2O/Na_2O$ (b) for the Nanhua—Cambrian sandstones from the study area. The boundaries of different tectonic setting is from Roser et al. (1986) (a) and Maynard et al. (1982) (b); ARC—oceanic island arc; ACM—active continental margin; PM—passive continental margin; A1—basaltic and andesitic detrital; A2—evolved island arc of felsic intrusive rock detrital; ●—Nanhua sandstones; ■—Sinian sandstones; ▲—Cambrian sandstones

比值, 其中 $(Fe_2O_3^* + MgO)$ 代表岩石中相对基性的组分, Al_2O_3/SiO_2 大致表示石英的富集程度 (或长石与石英的比例), K_2O/Na_2O 代表了岩石中钾长石和白云母与斜长石的比例, $Al_2O_3/(Na_2O + CaO)$ 大致代表沉积岩中最不活动组分与最活动组分之间的比率。

Kumon 等 (1994) 提出了一种 $Al_2O_3/SiO_2 - (FeO + MgO)/(SiO_2 + K_2O + Na_2O)$ 判别图 (图 5), 用以区分不成熟岛弧 (immature island arc)、进化岛弧 (evolved island arc) 和成熟岩浆弧 (mature

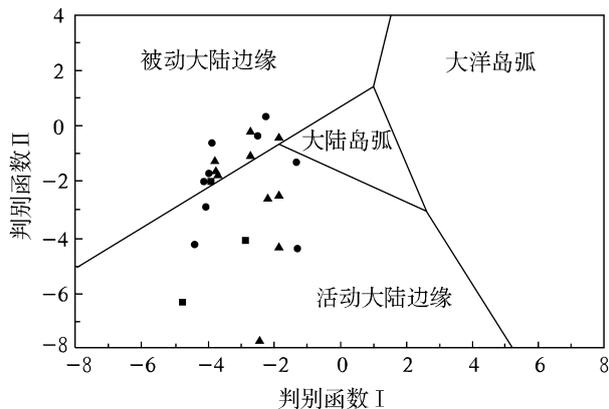


图4 研究区南华系—寒武系砂岩的主量元素构造环境判别分析图

Fig. 4 Diagram of discriminant scores for the Nanhuaan—Cambrian sandstones from the study area 构造环境判别分析系数和不同构造环境的分布区域据 Bhatia (1983); ●—南华系砂岩; ■—震旦系砂岩; ▲—寒武系砂岩 The discriminant scores and the fields of different tectonic setting is from Bhatia (1983); ●—Nanhuaan sandstones; ■—Sinian sandstones; ▲—Cambrian sandstones

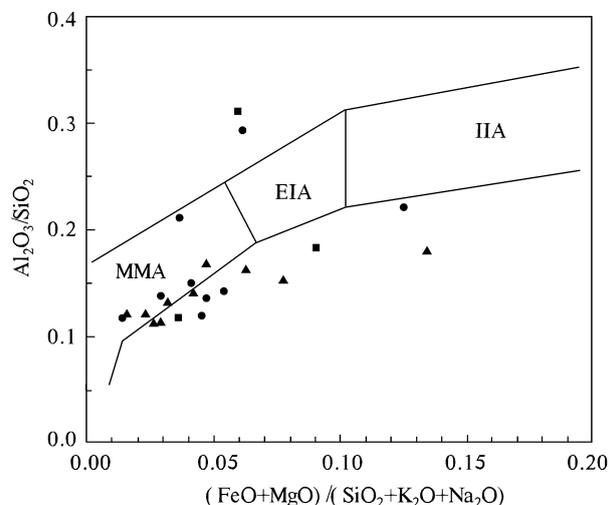


图5 研究区南华系—寒武系砂岩沉积构造环境的 $Al_2O_3/SiO_2-(FeO+MgO)/(SiO_2+K_2O+Na_2O)$ 判别图

Fig. 5 Tectonic setting discrimination diagrams of $Al_2O_3/SiO_2-(FeO+MgO)/(SiO_2+K_2O+Na_2O)$ for the Nanhuaan—Cambrian sandstones

不同构造环境之间的界线据 Kumon 等 (1994): IIA—不成熟岛弧; EIA—进化岛弧; MMA—成熟岩浆弧; ●—南华系砂岩; ■—震旦系砂岩; ▲—寒武系砂岩

The boundaries of different tectonic setting is from Kumon et al. (1994): IIA—immature island arc; EIA—evolved island arc; MMA—mature magmatic arc; ●—Nanhuaan sandstones; ■—Sinian sandstones; ▲—Cambrian sandstones

石英的比例, 而 $(FeO+MgO)/(SiO_2+K_2O+Na_2O)$ 则代表岩石中相对碱性组分(火山岩)与长英质组分(火山岩)的比率。研究区南华系—寒武系砂岩在 Roser 等 (1986) 的 K_2O/Na_2O-SiO_2 图 (图 3a) 中, 大部分样品落入被动大陆边缘区 (PM), 少量落入活动大陆边缘区 (ACM); 在 Maynard 等 (1982) 的 $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ 关系图 (图 3b) 中, 几乎全部落入被动大陆边缘区 (PM)。

如表 2 所示, 与 Bhatia 等提出的参数比较, 研究区南华系—寒武系砂岩不同主量元素地球化学参数显示的构造类型较复杂: $(Fe_2O_3^*+MgO)/TiO_2$ 和 Al_2O_3/SiO_2 主要与大陆岛弧和活动大陆边缘相当; K_2O/Na_2O 和 $Al_2O_3/(Na_2O+CaO)$ 较 Bhatia (1983) 和 Bhatia 等 (1986) 提出的各环境类型参数显著偏高, 但更接近于被动大陆边缘。而在 Bhatia (1983) 提出的构造环境主量元素判别函数图解 (图 4) 中, 分布于被动大陆边缘区和活动大陆边缘区的样品数相近, 但被动大陆边缘区内的样品点非常集中, 而活动大陆边缘区内样品点则非常分散, 似乎暗示沉积作用主要受控于被动大陆边缘环境, 部分样品点落入活动大陆边缘区有可能由于被剥蚀的早期岩石形成于活动大陆边缘环境等原因所致。

在 Kumon 等 (1994) 提出的 $Al_2O_3/SiO_2-(FeO+MgO)/(SiO_2+K_2O+Na_2O)$ 判别图 (图 5) 中, 研究区南华系—寒武系砂岩主要位于成熟岩浆弧区及其外围 (下部)。Kumon 等 (1994) 所定义的进化岛弧和成熟岩浆弧分别相当于 Bhatia (1983) 和 Bhatia 等 (1986) 的大陆岛弧和活动大陆边缘环境。鉴于被动大陆边缘沉积更富含石英 (Al_2O_3/SiO_2 比值更低), 因此, 图 5 总体显示出活动大陆边缘和被动大陆边缘构造环境。由于沉积岩中的微量元素, 尤其是 La、Ce、Y、Th、Zr、Hf、Ti 和 Sc 等活性较弱且在海水中停留时间较短的元素在风化、搬运和沉积过程中能定量地转移到碎屑沉积物中, 因而能良好地反映母岩性质和沉积盆地的构造环境 (Taylor et al., 1985; Bhatia et al., 1986; McLennan et al., 1990; Gu, 1994; 顾雪祥, 1996)。在表 2 中所列出的最具判别意义的特征微量元素及其比值参数中, 湘东南南华系—寒武系砂岩的 Hf、Sc、Zn、Zr/Hf、La/Th、Th/Sc 等与大陆岛弧杂砂岩相似; La/Sc 与活动大陆边缘杂砂岩相似; ΣREE 、La/Yb、Zr/Th、Sc/Cr 等与被动大陆边缘杂砂岩相似; K/Th、Co、Ti/Cr 等与大陆岛弧和活动大陆边缘两种构造环境下形成的杂砂岩相似; La、Ce、Nd、K/Rb、Zr、La/Y

magmatic arc)。其中, Al_2O_3/SiO_2 大致代表长石与

等与大陆岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘 3 种构造环境下形成的杂砂岩相似。在 Ti/Zr-La/Sc 构造环境判别图(图 6)中,绝大多数点均落于活动大陆边缘构造区内。在 Bhatia 等(1986)认为最具构造判别意义的 La-Th-Sc、Th-Co-Zr/10 和 Th-Sc-Zr/10 三角图(图 7)中,主要落在大陆岛弧区及其与活动大陆边缘、被动大陆边缘的分界线附近。

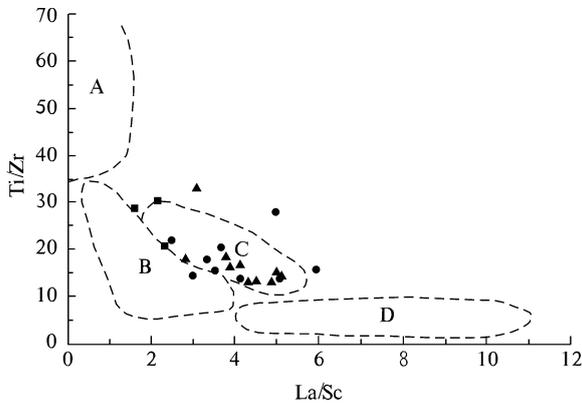


图 6 研究区南华系—寒武系砂岩构造环境的 Ti/Zr-La/Sc 判别图

Fig. 6 Tectonic setting discrimination diagrams of Ti/Zr-La/Sc for the Nanhuaan—Cambrian sandstones from the study area

不同构造环境的分布区域据 Bhatia 等(1986): A—大洋岛弧; B—大陆岛弧; C—活动大陆边缘; D—被动大陆边缘; ●—南华系砂岩; ■—震旦系砂岩; ▲—寒武系砂岩

The fields of different tectonic setting is from Bhatia et al. (1986): A—oceanic island arc; B—continental arc; C—active continental margin; D—passive continental margin. ●—Nanhuaan sandstones; ■—Sinian sandstones; ▲—Cambrian sandstones

3.2 沉积构造环境分析

据上述可以看出,根据不同的主量元素和微量元素含量、地球化学特征值以及相关判别图解等,对研究区南华系—寒武系砂岩进行构造环境判别所得出的结论差别较大。总体而言,主量元素特征值显示的环境既有活动大陆边缘和大陆岛弧,也有被动大陆边缘;主量元素判别图解主要显示为被动大陆边缘,部分反映活动大陆边缘信息;微量元素含量及特征值反映出大陆岛弧、活动大陆边缘、被动大陆边缘等多种环境,且以大陆岛弧和活动大陆边缘为主;微量元素判别图解主要显示为活动大陆边缘或大陆岛弧。那么,研究区南华纪—寒武纪期间的沉积盆地性质究竟为何? 根据沉积物源和风化、搬运、沉积过程等分析,笔者认为厘定为被动大陆边缘更为合

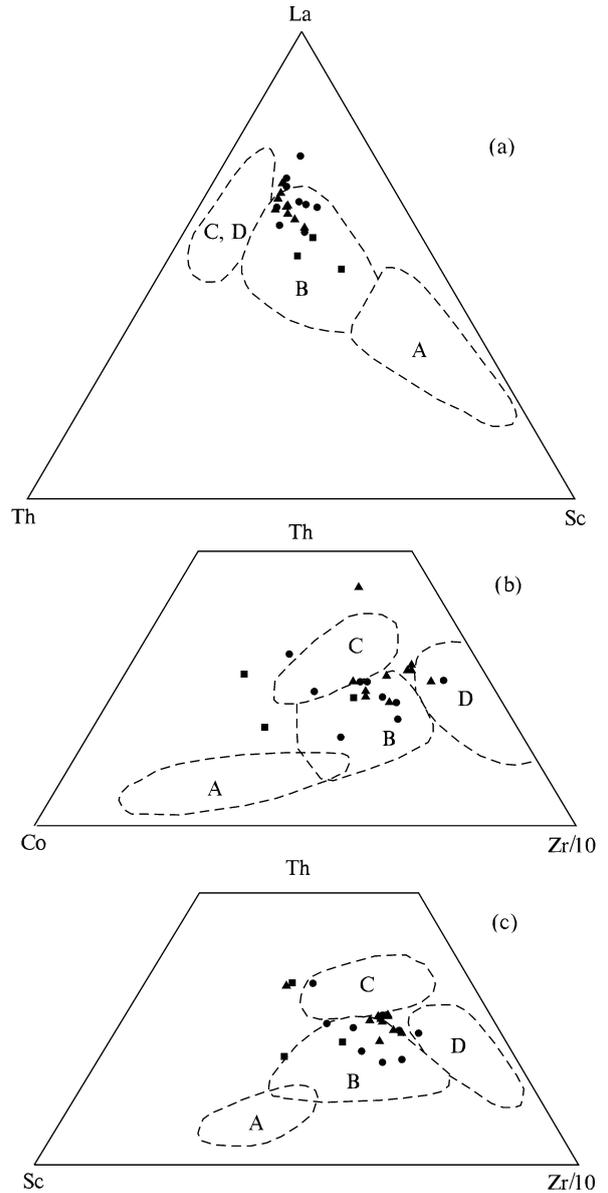


图 7 研究区南华系—寒武系砂岩构造环境的 La-Th-Sc(a)、Th-Co-Zr/10 (b)和 Th-Sc-Zr/10 (c)判别图

Fig. 7 Tectonic setting discrimination diagrams of La-Th-Sc (a), Th-Co-Zr/10 (b) and Th-Sc-Zr/10 (c) for the Nanhuaan—Cambrian sandstones from the study area

不同构造环境的分布区域据 Bhatia 等(1986): A—大洋岛弧; B—大陆岛弧; C—活动大陆边缘; D—被动大陆边缘; ●—南华系砂岩; ■—震旦系砂岩; ▲—寒武系砂岩

The fields of different tectonic setting is from Bhatia et al. (1986): A—oceanic island arc; B—continental arc; C—active continental margin; D—passive continental margin; ●—Nanhuaan sandstones; ■—Sinian sandstones; ▲—Cambrian sandstones

适,分析如下。

决定陆源沉积物(尤其是浊积成因杂砂岩)化学组成的因素总体可分为两个方面,一是陆地剥蚀原

岩的物质组成,另一个是风化条件、搬运过程、沉积过程、成岩后生作用等,本文暂分别称之为“继承性因素”和“沉积成岩过程因素”。利用沉积物化学组成判别沉积盆地古构造环境是建立在这样一个基本假设之上,即沉积期间物源区的性质与控制邻区沉积盆地的构造作用过程密切相关。因此,当陆源沉积物的原岩是更早时期形成且构造环境与沉积期构造环境差别很大时,受继承性因素影响,陆源沉积物的化学组成会不同程度显示出原岩形成时的构造环境的信息。

大陆岛弧环境下通常形成大量的具特征化学组成的安山质火山岩及侵入岩等。岛弧边缘盆地中的陆源沉积物主要来源于这些同时期形成的新生火成物质,这是影响沉积物化学组成的继承性因素。岛弧环境下构造活动性较强,盆地沉积物通常应经历更短时间的风化剥蚀和更短距离的搬运过程,同时沉积物中包含有来源于盆地内的同期的火山物质,这是影响沉积物化学组成的沉积成岩过程因素。不难理解,上述特征的继承性因素和沉积成岩过程因素将使大陆岛弧环境下的陆源碎屑沉积具有非常特征的化学组成。因此,陆源沉积物地球化学性质所反映的构造环境信息一般应与大陆岛弧高度吻合,至少不会出现太多的被动大陆边缘环境(构造属性与物质组成等与岛弧环境相差太大)的地球化学信息。

Bhatia (1983) 和 Bhatia 等 (1986) 所定义的活动大陆边缘环境即相当于 Kumon 等 (1994) 所定义的成熟岩浆弧,因此陆源沉积物的化学组成可能很大程度上取决于先期岩浆岩(继承性因素)。此外,活动大陆边缘环境由于洋壳的俯冲而具有更高的构造活动性,边缘盆地的陆源沉积物经历了更短时间的风化、剥蚀、搬运和沉积过程(沉积成岩过程因素),所形成岩石具有更低的成分成熟度。与大陆岛弧类似,上述特征的继承性因素和沉积成岩过程因素将导致活动大陆边缘环境下的陆源碎屑沉积具有相应特征的化学组成或性质,其反映的构造环境信息一般应较好吻合于活动大陆边缘,部分或少数情况下可能显示大陆岛弧信息(当原岩为先期岛弧环境产物时),但不太可能出现过多的与之构造活动性迥异的被动大陆边缘环境的地球化学信息。

被动大陆边缘一般经历过更高程度的陆壳演化过程,组成岩石常为早期的沉积岩和变质岩。此外,被动大陆边缘的构造性质稳定,陆缘盆地的陆源沉积物通常经历了更长时间的风化剥蚀和更长距离的

搬运,所形成岩石具有更高的成分成熟度。上述继承性因素和沉积成岩过程因素决定了一般被动大陆边缘环境下的陆源沉积物具有相应的特征的地球化学组成,因此一般情况下可以根据沉积物化学组成较明确厘定出被动大陆边缘环境。然而,对于被动大陆边缘而言,影响沉积物化学组成的继承性因素实际可能更为复杂,即原岩中很可能还包含有大量的早期岛弧或活动大陆边缘环境下形成的岩石,在此情况下沉积物的化学组成将不同程度包含大陆岛弧或活动大陆边缘环境的信息。此外,被动大陆边缘的构造稳定性是相对的,部分被动大陆边缘可能存在一定的活动性,如伸展盆地在早期强烈断陷期间即无疑具有相当的构造活动性(事实上,Roser 等 (1986) 所定义的活动大陆边缘即包括有与走滑断层有关的隆升区拉张盆地)。受此影响沉积物亦会包含活动大陆边缘环境的地球化学信息。

笔者认为,研究区南华纪—寒武纪期间的沉积盆地为被动大陆边缘陆内裂谷环境,但由于原岩中包含有大量早期(古元古代—中元古代)岛弧与活动大陆边缘环境下形成的岩石(王鸿祯,1982;王鸿祯等,1986;刘宝珺等,1993;尹福光等,2003;舒良树,2006;于津海等,2006;马瑞士,2006;王鹤年等,2006),且新元古代至早古生代期间为强拉张的具一定活动性的裂谷盆地(王剑等,2001),因此沉积物显示有活动大陆边缘和大陆岛弧的地球化学信息。如前所述,相对主量元素而言,沉积岩中的 La、Ce、Y、Th、Zr、Hf、Ti、Sc 等化学性质稳定的微量元素更能定量地转移到碎屑沉积物中,这就是研究区南华系—寒武系杂砂岩在微量元素方面比主量元素更多显示大陆岛弧和活动大陆边缘信息的原因所在。

值得指出的是,在 Bhatia (1985) 提出的稀土元素-常量元素源区判别图(图 8)中,大部分样品点落于或更靠近花岗片麻岩及沉积岩型区,这也与一般被动大陆边缘的主要岩石组成相吻合。

综上所述,从不同构造背景下的剥蚀原岩(继承性因素)及风化条件和搬运沉积过程(沉积成岩过程因素)来看,大陆岛弧和活动大陆边缘形成的砂岩应具有显著区别于被动大陆边缘的地球化学特征,而被动大陆边缘形成的砂岩则可能包括较多的大陆岛弧和活动大陆边缘环境的地球化学信息。由此判断,包含多种构造环境地球化学信息的湘东南南华系—寒武系砂岩实际应形成于被动大陆边缘环境。正是由于原岩中包含大量古元古代—中元古代岛弧与活

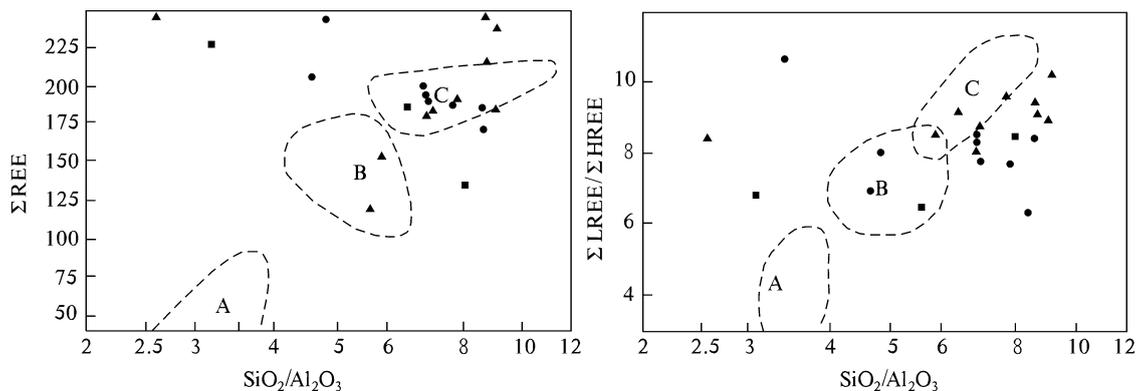


图 8 研究区南华系—寒武系砂岩的稀土元素-常量元素源区判别图

Fig. 8 Source-area discrimination diagrams of REE vs major elements for the Nanhuayan—Cambrian sandstones from the study area

不同源区类型据 Bhatia (1985): A—安山岩型; B—英安岩型; C—花岗岩片麻岩及沉积岩型;

●—南华系砂岩; ■—震旦系砂岩; ▲—寒武系砂岩

The boundaries of different source-area is from Bhatia (1985): A—andesite type; B—dacite type;

C—granitic gneiss and sedimentary rock type; ●—Nanhuaan sandstones; ■—Sinian sandstones; ▲—Cambrian sandstones

动大陆边缘环境岩石,以及沉积盆地因强烈陆内伸展断陷而具有一定活动性等原因,导致了南华系—寒武系砂岩中包含了部分活动大陆边缘和大陆岛弧的地球化学信息。

4 讨论

4.1 沉积物构造环境地球化学判别及板溪群构造环境问题

虽然众多学者提出了陆源沉积物构造环境判别的若干图解、参数,但实际上沉积物地球化学组成与沉积构造环境之间的关系更为复杂(Vander Kamp et al., 1985; Cullers et al., 1988; Frost et al., 1989; McLennan et al., 1990; Haughton et al., 1991; Kumon et al., 1994),上述湘东南南华系—寒武系砂岩地球化学特征即显示出被动大陆边缘、活动大陆边缘和大陆岛弧等多种环境信息。显然,当出现多种构造环境信息时应通过谨慎分析确定环境属性:当某种环境信息量占绝对优势时,一般宜以其作为沉积盆地的构造环境;当多种环境信息均有较多显示时,则应结合物源区性质及风化、搬运、沉积作用的条件和过程作具体分析。本文正是在分析不同环境条件下沉积物可能包含的地球化学信息,并充分考虑区域物源区特征和沉积盆地相对活动性的基础上,最终确定湘东南南华系—寒武系形成于被动大陆边缘环境。这一思路可供同类研究借鉴。

顾雪祥等(2003)在通过沉积物地球化学特征判别江南造山带雪峰隆起区新元古代板溪群地球化学

特征时,发现主量元素特征在显示活动大陆边缘信息的同时,亦显示出大量的被动大陆边缘信息。他们最终确定为活动大陆边缘弧后沉积盆地,认为被动大陆边缘信息的显示与风化沉积过程及成岩和变质过程导致 Na_2O 和 CaO 亏损有关。但如以本文分析思路来看,则板溪群有可能形成于被动大陆边缘环境。笔者认为以沉积成岩和变质作用等导致沉积岩中 Na_2O 和 CaO 相对原岩亏损来解释板溪群被动大陆边缘地球化学信息的出现可能欠妥,因为用总结构造环境判别的沉积岩同样经历过风化、剥蚀、搬运、沉淀、成岩等过程,而板溪群很低的变质程度似乎也难以引起 Na_2O 和 CaO 等明显的流失亏损。此外,以下的区域构造背景分析亦表明新元古代板溪群形成于被动裂谷环境的可能性更大。

4.2 区域构造背景与湘东南南华系—寒武系砂岩构造环境的相互制约

本文研究结论为全面认识华南前泥盆纪构造演化提供了新的证据,同时又可从区域构造背景资料得到印证。

华南由扬子与华夏两个主要的地质构造单元组成,其间曾有华南洋的存在,自元古宙开始经历了多期次的不同规模不同级次构造单元间发生的弧-弧碰撞、弧-陆碰撞、陆-陆碰撞以及构造单元内部的裂解等构造事件,最终导致了扬子与华夏两个一级构造单元的拼接和焊合。从长期的大量研究成果来看,对华南大地构造属性的认识在这一总体概念上已趋于一致,分歧主要在于构造演化的一些具体细

节上,如不同次级构造单元的划分(包括构造单元性质和单元间界线的认定)及相互关系,不同构造单元间的碰撞时限等。其中最重要和最受关注的分歧是华南洋(存在洋壳及洋壳俯冲作用的大洋)的时空演化暨扬子与华夏两陆块的碰撞拼接时代。

与全球 Grenville 造山事件(1.4~1.0 Ga)和 Rodinia 超大陆形成(1.0~0.8 Ga)(Hoffman, 1991, 1992; Windley, 1995; McLelland et al., 1996)相对应,中元古代末—新元古初(1.05~1.00 Ga)、青白口纪末—南华纪初(800 Ma 左右)华南先后经历了四堡运动和晋宁运动,使扬子与华夏之间的华南洋在东段消失并形成江绍缝合带(王鸿祯, 1982; 王鸿祯等, 1986; 刘宝珺等, 1993)。但晋宁运动后中段和南段华南洋是否封闭及华南洋的演化过程,不同学者持截然不同的观点。王鸿祯等(1986)、刘宝珺等(1993)、殷鸿福等(1999)认为晋宁运动后江绍缝合带以西仍然存在一个残留洋盆,该盆地一直延续到加里东期,至志留纪末盆地封闭形成加里东褶皱带(除钦防海槽外)。至今仍有很多学者持这一观点(胡受奚等, 2006; 于津海等, 2006; 马瑞士, 2006; 王鹤年等, 2006)。许靖华等(1987)更是提出华南洋从前震旦纪一直延续到中生代、“板溪群”是印支期混杂岩的与一般学者大相径庭的观点。何科昭等亦以赣东北蛇绿岩带中发现含晚古生代放射虫硅质岩为依据,提出赣东北存在一条印支期碰撞对接缝合带,重新支持许靖华的“板溪混杂岩”模式(赵崇贺等, 1996; 何科昭等, 1999)。不过有关皖南、赣东北蛇绿岩带中生代生物化石证据目前已有不少明确的否认(陈旭等, 1995; 廖卓庭, 2000)。王剑等(2001)提出了与上述观点完全不同的华南新元古代裂谷盆地模式,认为中元古代末至新元古代初的“晋宁—四堡”运动使古华南洋关闭,华夏地块与扬子克拉通碰撞,新元古代早期(814~1000 Ma 之间)华南“晋宁—四堡”造山带以剥蚀作用为主,华南裂谷系始于约 820 Ma 左右(王剑等, 2003)。舒良树(2006)也持类似观点。联系到近年来华南地质研究尤其是同位素年代学研究的有关进展,笔者认为“新元古代裂谷盆地”模式更为可信。具体理由如下:

第一,近年来获得的一系列关于华南新元古界的底界年龄表明华南在新元古代早中期缺失了相当长时间的沉积地层。桂北鹰扬关群基性火山岩的 TIMS 锆石 U-Pb 定年测试结果为 819 ± 11 Ma(周汉文等, 2002),康滇地区苏雄组火山岩高精度 SHRIMP

锆石 U-Pb 定年测试结果为 803 ± 12 Ma(李献华等, 2001)。湖南益阳地区沧水铺组陆相英安质火山集块岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 814 ± 12 Ma,与以往获得的 925~933 Ma 的锆石 U-Pb 年龄和 Rb-Sr 等时线年龄差距很大(王剑等, 2003)。滇中峨山岩体、桂北寨滚岩体、本洞岩体、峒马岩体、三防岩体、田朋岩体、皖南许村岩体、三峡黄陵花岗岩等被华南新元古代地层沉积超覆的侵入岩的年龄一般在 800~835 Ma 之间(李献华, 1999; 王孝磊等, 2006)。上述资料表明华南新元古界底界年龄在 800~820 Ma 左右。新元古界下伏不整合接触的冷家溪群以往一般被认为属中元古代地层,但缺少可靠的年龄依据,实际形成时代可能要晚,目前有研究认为冷家溪群的上限年龄在 860 Ma 左右。即便如此,板溪群与冷家溪群间也至少缺失了约 40~60 Ma 的沉积(至少是扬子板块一侧如此),反映了扬子与华夏地块在“晋宁—四堡”运动中已完成碰撞造山。

第二,已有研究表明,湖南冷家溪群和广西四堡群中的中元古代火山—侵入岩主要具有岛弧火山岩特征(王孝磊等, 2003; 周金城等, 2003a, 2003b),其中湖南南桥玄武岩为俯冲带附近的古洋壳残片(周金城等, 2003b)。以往江南造山带的新元古代基性岩浆和花岗质岩浆活动通常被视为岛弧产物(于津海等, 2006),并被当作新元古代华南洋盆存在的主要证据。然而近年来更为详实的研究却表明,湖南新元古代古丈—怀化—黔阳—通道一带的火山—侵入岩以及震旦纪高桥玄武岩均形成于板内裂谷构造环境(唐晓珊等, 1997; 陈多福等, 1998; 王孝磊等, 2003; 郑基俭等, 2001);而沿扬子板块西缘江南造山带分布的桂北、湘东北、江西九岭及安徽许村、休宁、歙县等地的新元古代强过铝花岗岩是华夏和扬子地块相互碰撞的产物,属典型的后碰撞花岗岩(邱检生等, 2002; 王孝磊等, 2004, 2006; 周金城等, 2005)。上述岩石学研究新进展印证了华南由中元古代岛弧+南华洋→中元古代末至新元古代早期扬子与华夏间的碰撞造山→新元古代后期拉张裂解的构造演化过程。

第三,湘东南及其邻近地区南华纪—早古生代发育巨厚的地槽相沉积(殷鸿福等, 1999),其主要由砂、泥质组成,基本未见火山物质,与岛弧边缘或活动大陆边缘增生楔(一般有大量火山物质)迥然不同。此外,目前为止在两陆块交接带的湘赣一带并未发现确实的新元古代洋壳残片,也一定程度反映出新元古代华南洋存在的可能性不大。

第四,可以想象,如若存在新元古代—早古生代的华南洋,则扬子板块的南东边缘与华夏地块的北西边缘将有相当宽度和相当厚度的沉积超覆在洋壳之上,如此即会造成加里东运动两块体碰撞后横切交接带有相当宽度的中元古界结晶基底缺失。然而,近年来的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和 La-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析发现,湘东南和湘南地区自东向西的锡田、骑田岭、阳明山、九嶷山等中生代花岗岩体中均含有中元古代(个别早元古代)继承性锆石(付建明等,2004a,2004b;马铁球等,2005;朱金初等,2005;陈卫锋等,2006)。鉴于这些岩体主要来源于较深部陆壳重熔并有部分地幔物质加入(刘昌实等,1990;柏道远等,2005),继承性锆石来源于地层的可能性不大,因此上述古老锆石年龄应大致反映该地区东西方向上具有连续的中元古代(甚至更老)的结晶基底(与丁兴等(2005)关于华南陆壳基底可能具有多旋回幕式生长特征的认识相吻合);而该地区在新元古代—早古生代系武夷地体(华夏地块的西部次级单元)之西、扬子大陆之东的华南边缘海(马瑞士,2006),构造沉降强烈(殷鸿福等,1999),很可能为扬子板块与华夏地块交接的核心地带;且骑田岭岩体所在的茶陵-郴州大断裂被认为可能为扬子与华夏的分界(王新光,1991;王光杰等,2000;洪大卫等,2002)。因此,很可能为两板块交接带的湘(东)南地区不太可能存在新元古代—早古生代的华南洋。

总之,多种证据表明扬子板块与华夏地块之间新元古代—早古生代期间的沉积盆地不是洋盆,而是新元古代后期开始发育的陆内裂谷盆地。值得说明的是,政和-大埔断裂上一系列镁铁—超镁铁质杂岩的发育等表明南华纪时政和—大埔一线的东南地区可能为洋壳,西侧的武夷地体可能为岛弧(马瑞士,2006)。但政和—大埔南华纪小洋盆系华夏地块内部的构造单元,与新元古代华南洋盆不存在的认识并不矛盾。

显然,上述诸多资料所证实的新元古代—早古生代华南盆地属陆内裂谷盆地的结论,与本文通过湘东南震旦系—寒武系砂岩地球化学特征研究得出的被动大陆边缘环境的认识相吻合,彼此间提供了良好的约束。

5 结论

(1)湘东南南华系—寒武系砂岩的地球化学特征显示出被动大陆边缘、活动大陆边缘和大陆岛弧

等多种环境信息。从不同构造背景下的剥蚀原岩(继承性因素)及风化条件和搬运沉积过程(沉积成岩过程因素)来看,大陆岛弧和活动大陆边缘形成的砂岩应具有显著区别于被动大陆边缘的地球化学特征,而被动大陆边缘形成砂岩则可能包括较多的大陆岛弧和活动大陆边缘环境的地球化学信息。鉴此,该套砂岩应形成于被动大陆边缘环境。这一判断与古元古代—中元古代岛弧与活动大陆边缘形成岩石为重要原岩,以及沉积盆地因强烈陆内伸展断陷而具一定活动性等客观事实相吻合。

(2)华南新元古界与中元古界之间近 200 Ma 的沉积缺失,江南造山带新元古代碰撞造山成因的岩浆活动,板块交接带南华纪—早古生代沉积物中岛弧火山物质的缺乏,以及湘(东)南中元古界(甚至更早)结晶基底横向上的连续性等,表明扬子板块与华夏地块之间新元古代—早古生代期间的沉积盆地不是洋盆,而是陆内裂谷盆地。

(3)上述基于湘东南砂岩地球化学研究,和根据区域资料分析所得出的关于扬子板块与华夏地块间新元古代—早古生代盆地构造性质的结论,彼此提供了良好的约束。

参 考 文 献

- 柏道远,陈建超,马铁球,等. 2005. 湘东南骑田岭岩体 A 型花岗岩的地球化学特征及其构造环境. 岩石矿物学杂志, 24(4):255~272.
- 柏道远,陈建成,孟德保,等. 2006a. 湖南炎陵印支期隔槽式褶皱形成机制. 地球科学与环境学报, 28(4):10~14.
- 柏道远,王先辉,马铁球,等. 2006b. 湘东南印支期褶皱特征及形成机制. 华南地质与矿产, (4): 50~57.
- 柏道远,黄建中,马铁球,等. 2006c. 湘东南志留纪彭公庙花岗岩体的地质地球化学特征及其构造环境. 现代地质, 20(1):130~140.
- 陈多福,潘品铭,徐文新,等. 1998. 华南震旦纪基性火山岩的地球化学及构造环境. 岩石学报, 14(3):343~350.
- 陈卫锋,陈培荣,周新民,等. 2006. 湖南阳明山岩体的 La-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成因研究. 地质学报, 80(7):1065~1077.
- 陈旭,戎嘉余,Rowley D B,等. 1995. 对华南早古生代板溪群的质疑. 地质论评, 41(5):389~398.
- 丁兴,周新民,孙涛. 2005. 华南陆壳基底的幕式生长——来自广东古寨花岗岩闪长岩中锆石 LA-ICPMS 定年的信息. 地质论评, 51(4):382~392.
- 付建明,马昌前,谢才富,等. 2004a. 湖南九嶷山复式花岗岩体 SHRIMP 锆石定年及其地质意义. 大地构造与成矿学, 28(4):370~378.
- 付建明,马昌前,谢才富,等. 2004b. 湖南骑田岭岩体东缘紫岭岩体的锆石 SHRIMP 定年及其意义. 中国地质, 31(1):96~100.
- 郭令智,施央申,马瑞士,等. 1984. 中国东南部地体构造的研究. 南京大学学报(自然科学版), 26(4):1~7.
- 顾雪祥. 1996. 沉积物地球化学特征与沉积盆地构造背景分析. 当

- 代地质科学技术进展—1995. 北京:中国地质大学出版社, 205~212.
- 顾雪祥,刘建明,Oskar Schula,等. 2003. 江南造山带雪峰隆起区元古宙沉积岩沉积构造背景的地球化学制约. 地球化学, 32(5): 406~426.
- 何科昭,赵崇贺,乐昌硕,等. 1999. “板溪群”构造属性的再认识与思考. 地学前缘, 6(4):353~362.
- 洪大卫,谢锡林,张季生. 2002. 试析杭州—诸广山—花山高 ϵ_{Nd} 值花岗岩带的地质意义. 地质通报, 21(6):348~354.
- 胡受奚,叶瑛. 2006. 对“华夏古陆”、“华夏地块”及“扬子—华夏古陆统一”等观点的质疑. 高校地质学报, 12(4): 432~439.
- 李继亮,孙枢,许靖华,等. 1989. 南华夏造山带构造演化的新证据. 地质科学, 24(3):217~226.
- 李献华. 1999. 广西北部新元古代花岗岩锆石 U-Pb 年代学及其构造意义. 地球化学, 28(1):1~9.
- 李献华,周汉文,李正祥,等. 2001. 扬子块体西缘新元古代双峰式火山岩的锆石 U-Pb 年龄和岩石化学特征. 地球化学, 30(4): 315~322.
- 廖卓庭. 2000. 一则更正和由此引发的思考. 安徽地质, 19(1):78~80.
- 刘宝珺,许效松,潘杏南,等. 1993. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿. 北京:科学出版社.
- 刘昌实,朱金初,沈渭洲,等. 1990. 华南陆壳改造系列花岗岩类型划分和成岩物质来源. 地质学报, 64(1):43~52.
- 马瑞士. 2006. 华南构造演化新思考兼论“华夏古陆”说中的几个问题. 高校地质学报, 12(4):448~456.
- 马铁球,柏道远,王先辉. 2005. 湘东南茶陵地区锡田岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 地质通报, 24(5):415~419.
- 邱检生,周金城,张光辉,等. 2002. 桂北前寒武纪花岗岩岩石的地球化学与成因. 岩石矿物学杂志, 21(3):187~208.
- 舒良树. 2006. 华南前泥盆纪构造演化:从华夏地块到加里东期造山带. 高校地质学报, 12(4): 418~431.
- 唐晓珊,黄建中,郭乐群. 1997. 再论湖南板溪群及其大地构造环境. 湖南地质, 16(4):219~226.
- 王光杰,滕吉文,张中杰. 2000. 中国华南大陆及陆缘地带的大地构造基本格局. 地球物理学进展, 15(3):25~43.
- 王鹤年,周丽娅. 2006. 华南地质构造的再认识. 高校地质学报, 12(4):457~465.
- 王鸿祯. 1982. 中国地质构造发展的主要阶段. 地球科学, 7(3):155~137.
- 王鸿祯,杨巍然,刘本培. 1986. 华南地区古大陆边缘构造史. 武汉:武汉地质学院出版社.
- 王剑,刘宝珺,潘桂荣. 2001. 华南新元古代裂谷盆地演化——Rodinia 超大陆解体的前奏. 矿物岩石, 21(3):135~145.
- 王剑,李献华, Duan T Z, 等. 2003. 沧水铺火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及“南华系”底界新证据. 科学通报, 48(46):1726~1731.
- 王孝磊,周金城,邱检生,等. 2003. 湖南中一新元古代火山—侵入岩地球化学及成因意义. 岩石学报, 19(1):49~60.
- 王孝磊,周金城,邱检生,等. 2004. 湘东北新元古代强过铝花岗岩的成因:年代学和地球化学证据. 地质论评, 50(1):65~76.
- 王孝磊,周金城,邱检生,等. 2006. 桂北新元古代强过铝花岗岩的成因:锆石年代学和 Hf 同位素制约. 岩石学报, 22(2):326~342.
- 王新光. 1991. 华南加里东期花岗岩研究及其形成的地质构造背景分析. 南京:南京大学地球科学系.
- 许靖华,孙枢,李继亮. 1987. 是华南造山带而不是华南地台. 中国科学(B辑), 17(2):1107.
- 徐志刚. 1995. 华南晚前寒武纪剪刀式开合构造及其动力学. 地质学报, 69(4):285~295.
- 尹福光,万方,陈明. 2003. 泛华夏大陆群东南缘多岛弧盆系统. 成都理工大学学报(自然科学版), 30(2):126~131.
- 殷鸿福,吴顺宝,杜远生,等. 1999. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分. 地球科学—中国地质大学学报, 24(1):1~12.
- 于津海,魏震洋,王丽娟,等. 2006. 华夏地块:一个由古老物质组成的年轻陆块. 高校地质学报, 12(4):440~447.
- 章邦桐,胡恭任. 2006. 赣中存在中元古代变质基底的岩石地球化学证据及其地质意义. 高校地质学报, 12(4):466~474.
- 赵崇贺,何科昭,周正国,等. 1996. 关于华南大地构造问题的再认识. 现代地质, 10(4):512~517.
- 郑基俭,贾宝华,刘耀荣,等. 2001. 湘西安江地区镁铁质—超镁铁等岩形成时代、岩浆来源和形成环境. 中国区域地质, 20(2): 164~169.
- 周汉文,李献华,王汉荣,等. 2002. 广西鹰扬关群基性火山岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质论评, 48(增刊):22~25.
- 周金城,王孝磊,邱检生,等. 2003a. 南桥高度亏损 N-MORB 的发现及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 22(3):211~216.
- 周金城,王孝磊,邱检生,等. 2003b. 桂北中一新元古代镁铁质—超镁铁质岩的岩石地球化学. 岩石学报, 19(1):9~18.
- 周金城,王孝磊,邱检生. 2005. 江南造山带西段岩浆作用特性. 高校地质学报, 11(4): 527~533.
- 朱金初,张辉,谢才富,等. 2005. 湘南骑田岭竹枳水花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学和岩石学. 高校地质学报, 11(3):335~342.
- Bai Daoyuan, Chen Jianchao, Ma Tieqiu, et al. 2005. Geochemical characteristics and tectonic setting of Qitianling A-type granitic pluton in Southeast Hunan. Acta Petrologica et Mineralogica, 24(4): 255~272(in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Chen Jiancheng, Meng Debao, et al. 2006a. Forming mechanism of Indosinian trouhg-like folds in Yanling region, Hunan. Journal of Earth Sciences and Environment, 28(4):10~14 (in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Wang Xianhui, Ma Tieqiu, et al. 2006b. Characteristics and forming mechanism of Indosinian folds in the southeast Hunan. Geology and Mineral Resources of South China, (4):50~57 (in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Ma Tieqiu, et al. 2006c. Geology and Geochemistry of the Silurian Penggongmiao granitic pluton in the southeastern Hunan Province and its implication for tectonic setting. Geoscience, 20(1):130~140 (in Chinese with English abstract).
- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. J. Geol., 91:611~627.
- Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control. Sediment. Geol., 45:97~113.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. Contrib. Mineral. Petrol., 92:181~193.
- Blatt H, Middleton G V, Murray R. 1980. Origin of sedimentary rocks. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1~782.
- Chen Duofu, Pan Jinming, Xu Wenxin, et al. 1998. Geochemistry of Sinian basalts from South China and its tectonic setting. Acta Petrologica Sinica, 14(3): 343~350 (in Chinese with English abstract).
- Chen Weifeng, Chen Peirong, Zhou Xinmin, et al. 2006. Single-

- zircon La-ICP-MS U-Pb dating of the Yangmingshan granitic pluton in Hunan, South China and its petrogenetic study. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1065~1077 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xu, Xu Jiayu, Rowley D B, et al. 1995. Is the early Paleozoic Banxiocan in South China necessary? *Geological Review*, 41(5): 389~398 (in Chinese with English abstract).
- Cullers R L, Basu A, Suttner L J. 1988. Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root batholith, Montana, U. S. A. *Chem Geol.*, 70(7): 335~348.
- Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall; Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *J. Geol. Soc. London*, 144: 531~542.
- Frost C D, Coombs D S. 1989. Nd isotope character of New Zealand sediments; Implications for terrane concepts and crustal evolution. *Am. J. Sci.*, 289: 744~770.
- Ding Xing, Zhou Xinmin, Sun Tao. 2005. The episodic growth of the continental crustal basement in south China: single zircon LA-ICPMS U-Pb dating of Guzhai granodiorite in Guangdong. *Geological Review*, 51(4): 382~392 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, et al. 2004a. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Jiuyishan composite granite in Hunan and its geological significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(4): 370~378 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, et al. 2004b. Zircon SHRIMP dating of the Cailing granite on the eastern margin of the Qitianling granite, Hunan, south China, and its significance. *Geology in China*, 31(1): 96~100 (in Chinese with English abstract).
- Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Ma Ruishi, et al. 1984. Tectonostratigraphic terranes of southeast China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 26(4): 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Gu X X. 1994. Geochemical characteristics of the Triassic Tethys-turbidites in the north western Sichuan, China; Implications for provenance and interpretation of the tectonic setting. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58(21): 4615~4631.
- Gu Xuexiang. 1996. Geochemical characteristics of sediments and tectonic setting analysis of sedimentary basins. *Developments in Geosciences and Technology - 1995*. Beijing: China Univ Geosci Press, 205~212 (in Chinese with English abstract).
- Gu Xuexiang, Liu Jianming, Oskar Schula, et al. 2003. Geochemical constraints on the tectonic setting of the Proterozoic turbidites in the Xuefeng Uplift region of the Jiangnan orogenic belt. *Geochimica*, 32(5): 406~426 (in Chinese with English abstract).
- Haughton P D W, Todd S P, Morton A C. 1991. Sedimentary provenance studies—how and why? *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, 57: 1~11.
- He Kezhao, Zhao Chonghe, Yue Changshuo, et al. 1999. Reexamination and impression on "Banxi Group". *Earth Science Frontiers*, 6(4): 353~362 (in Chinese with English abstract).
- Hoffman P F. 1991. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? *Science*, 252: 1409~1412.
- Hoffman P F. 1992. Supercontinents. *Encyclopedia of Earth System Science*, Vol. 4. San Diego: Academic Press, 323~328.
- Hong Dawei, Xie Xilin, Zhang Jisheng. 2002. Geological significance of the Hangzhou—Zhuguangshan—Huashan high- ϵ_{Nd} granite belt. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 348~354 (in Chinese with English abstract).
- Hu Shouxi, Ye Ying. 2006. Question to "Cathaysia old land", "Cathaysia block" and "united Yantze-Cathaysia old land" of South China. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 432~439 (in Chinese with English abstract).
- Kumon F, Kiminami K. 1994. Modal and chemical compositions of the representative sandstones from the Japanese Islands and their tectonic implications. In: Kumon F, Yu K M, ed. *Proceedings 29th IGC, Part A*. Utrecht: VSP, 135~151.
- Li Jiliang, Sun Shu, Xu Jinhua, et al. 1989. New evidences about the evolution of the south Cathay orogenic belt. *Chinese Journal of Geology*, 24(3): 217~226 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua. 1999. U-Pb zircon ages of granites from northern Guangxi and their tectonic significance. *Geochimica*, 28(1): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Li Zhenxiang, et al. 2001. Zircon U-Pb age and petrochemical characteristics of the Neoproterozoic bimodal volcanics from western Yangtze block. *Geochimica*, 30(4): 315~322 (in Chinese with English abstract).
- Liao Zhuoting. 2000. A correction and the reflection on it. *Anhui Geology*, 19(1): 78~80 (in Chinese with English abstract).
- Liu Baojun, Xu Xiaosong, Pan Xinnan, et al. 1993. Sedimentation of Ancient Continent of South China, Its Crust Evolution and Metallogenesis. Beijing: Science Press.
- Liu Changshi, Zhu Jinchu, Sheng Weizhou, et al. 1990. Classification and source materials of continental crust transformation series granitoids in south China. *Acta Geologica Sinica*, 64(1): 43~52 (in Chinese with English abstract).
- Ma Ruishi. 2006. New thought about the tectonic evolution of South China with discussion on several problems of the Cathaysian old land. *Journal of China Universities*, 12(4): 448~456 (in Chinese with English abstract).
- Ma Tieqiu, Bai Daoyuan, Wang Xianhui. 2005. Zircon SHRIMP dating of the Xitian granite pluton, Chaling, southeastern Hunan, and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 24(5): 415~419 (in Chinese with English abstract).
- Maynard J B, Valloni R, Yu H. 1982. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins. *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, 10: 551~561.
- McLelland J, Daly J S, McLelland J M. 1996. The Grenville orogenic cycle (ca. 1350 ~ 1000Ma): An Adirondack perspective. *Tectonophysics*, 265: 1~28.
- McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T, et al. 1990. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54(7): 2015~2050.
- McLennan S M, Hemming S R, Taylor S R, et al. 1995. Early Proterozoic crustal evolution; Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59(6): 1153~1117.
- Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. 1972. Sand and sandstone. New York: Springer-Verlag, 1~618.
- Qiu Jiansheng, Zhou Jincheng, Zhang Guanghui, et al. 2002.

- Geochemistry and origin of Precambrian granites from northern Guangxi. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(3):187~208 (in Chinese with English abstract).
- Reading H G. 1982. Sedimentary basins and global tectonics. *Proc Geologists Assoc.*, 93:321~350.
- Roser B P, Korsch R J. 1986. 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. Geol.*, 94(5):635~650.
- Shu Liangshu. 2006. Predevonian tectonic evolution of south China from Cathaysian block to Caledonian period folded orogenic belt. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 418~431 (in Chinese with English abstract).
- Tang Xiaoshan, Huang Jianzhong, Guo Lequi. 1997. Hunan Banxi Group and its tectonic environment. *Hunan Geology*, 16(4):219~226 (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell, 1~312.
- Van der Kamp P C, Leake B E. 1985. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin. *Trans. R. Soc. Edinb.*, 76:411~499.
- Wang Guangjie, Teng Jiwen, Zhang Zhongjie. 2000. The continental structure pattern of south China and its marginal regions. *Progress in Geophysics*, 15(3): 25~43 (in Chinese with English abstract).
- Wang Henian, Zhou Liya. 2006. A further understanding in geological structure of South China. *Journal of China Universities*, 12(4): 457~465 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hongzhen. 1982. The main stages of crustal development of China. *Earth Science*, 7(3):155~137 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hongzhen, Yang Weiran, Liu Benpei. 1986. *Tectonic History of the Ancient Continental Margins of South China*. Wuhan: Wuhan Geological Institute Publishing House (in Chinese).
- Wang Jian, Liu Baojun, Pan Guitang. 2001. Neoproterozoic rifting history of south China significance to Rodinia Breakup. *Mineral Petrol.*, 21(3):135~145 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Li Xianhua, Duan T Z, et al. 2003. Zircon SHIMP U-Pb age of the Cangshuipu volcanic and new evidence of the basal boundary of "the Nanhuaan System". *Chinese Science Bulletin*, 48(46):1726~1731 (in Chinese).
- Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Qiu JianSheng, et al. 2003. Geochemistry of the Meso-Neoproterozoic volcanic-intrusive rocks from Hunan province and its petrogenic significances. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 49~60 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Qiu Jiansheng, et al. 2004. Petrogenesis of Neoproterozoic peraluminous granites from northeastern Hunan province: Chronological and geochemical constraints. *Geological Review*, 50(1):65~76 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Qiu JianSheng, et al. 2006. Petrogenesis of the Neoproterozoic strongly peraluminous granitoids from northern Guangxi: constraints from zircon geochronology and Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2):326~342 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xinguang. 1991. *Study on the Caledonian Granites in South China and Their Tectonic Environments*. Nanjing: Department of Earth Sciences, Nanjing University (in Chinese with English abstract).
- Windley B F. 1995. *The Evolving Continents* (3rd ed). New York: John Wiley, 1~526.
- Xu Jinhua, Sun Shu, Li Jiliang. 1987. Huanan alps, not South China platform. *Science in China (Series B)*, 17(2): 1107 (in Chinese with).
- Xu Zhigang. 1995. Late Precambrian scissors-type opening-closing tectonics and its dynamics in South China. *Acta Geologica Sinica*, 69(4): 285~295 (in Chinese with English abstract).
- Yin Fuguang, Wan Fang, Chen Ming. 2003. The multi-arc basin system on the south-eastern margin of the Pan-cathaysian continental group. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 30(2):126~131 (in Chinese with English abstract).
- Yin Hongfu, Wu Shunbao, Du Yuansheng, et al. 1999. South China defined as part of Tethyan archipelagic ocean system. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(1):1~12 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jinhai, Wei Zhenyang, Wang Lijuan, et al. 2006. Cathaysia block: a young continent composed of ancient materials. *Journal of China Universities*, 12(4):440~447 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong, Hu Gongren. 2006. The geochemical evidences for existence of Mesoproterozoic metamorphic basement in central Jiangxi province. *Journal of China Universities*, 12(4):466~474 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Chonghe, He Kezhao, Zhou Zhengguo, et al. 1996. New understanding on geotectonic problem on south China block. *Geoscience*, 10(4): 512~517 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jijian, Jia Baohua, Liu Yaorong, et al. 2001. Age, magma source and formation environment of mafic-ultramafic rocks in the Anjiang area, western Hunan. *Regional Geology of China*, 20(2): 164~169 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Hanwen, Li Xianhua, Wang Hanrong, et al. 2002. Zircon U-Pb age of Yinyangguang Group basic volcanics from Guangxi and its geological significance. *Geological Review*, 48(Suppl):22~25 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jincheng, Wang Xiaolei, Qiu Jiansheng, et al. 2003a. The discovery of Nanqiao highly depleted N-MORB and geological significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3):211~216 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jincheng, Wang Xiaolei, Qiu Jiansheng, et al. 2003b. Litho-geochemistry of Meso- and Neoproterozoic mafic-ultramafic rocks from northern Guangxi. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1):9~18 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jincheng, Wang Xiaolei, Qiu Jiansheng. 2005. The characters of magmatism in the western section of the Jiangnan orogenic belt. *Geological Journal of China Universities*, 11(4): 527~533 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jinchu, Zhang Hui, Xie Caifu, et al. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology, petrology and geochemistry of the Zhujianshui granite, Qitianling pluton, southern Hunan province. *Journal of China Universities*, 11(3): 335~342 (in Chinese with English abstract).

Geochemistry of Nanhuan—Cambrian Sandstones in Southeastern Hunan, and Its Constraints on Neoproterozoic—Early Paleozoic Tectonic Setting of South China

BAI Daoyuan, ZHOU Liang, WANG Xianhui, ZHANG Xiaoyang, MA Tieqiu

Hunan Institute of Geology Survey, Xiangtan, Hunan, 411100

Abstract

Southeastern Hunan lies in the transition area of the Yangtze and Cathaysia block. Thick flysch formation formed during the Nanhuan—Cambrian in the area. The sandstones of the sediments on the whole are characterized by intermediate SiO_2 contents, high $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ and $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO})$ ratios, clearly high $\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}$ and CaO contents. The REE distribution patterns are uniform and similar to typical post-Archean shales and the upper continental crust, with LREE enrichment, flat HREE, and significant negative Eu-anomalies. Characteristics of major and trace elements show information of several different tectonic settings of passive continental margin, active continental margin and continental arc. According to the corroded protoliths, efflorescent conditions and carry-subside processes for sediment, the rocks formed in continental arc and active continental margin should possess geochemical characteristics different observably from those in passive continental margin, while the rocks formed in passive continental margin can embrace some geochemical information of continental arc and active continental margin. Therefore the Nanhuan—Cambrian sandstones from southeastern Hunan were formed in a tectonic setting of passive continental margin. The idea coincide with the objective fact that Paleo-Mesoproterozoic rocks formed in continental arc and active continental margin were major protoliths of the Nanhuan—Cambrian sandstones, and that the violently down-faulted sedimentary basin took on some activity. Some evidences such as at least 40~60 Ma absence of sediment between the Banxi Group and Lengjiayi Group, Neoproterozoic magmatism related with collisional orogeny in Jiangnan orogens, the absence of island-arc volcanic material in the Nanhuan—Early Paleozoic sediments and the continuous Mesoproterozoic (even earlier) crystalline basement in southeastern Hunan indicate that the Neoproterozoic—Early Paleozoic sedimentary basin between the Yangtze and Cathaysia block was not an oceanic but intracontinental rift basin. The idea about the tectonic setting of the Neoproterozoic—Early Paleozoic sedimentary basin between the Yangtze and Cathaysia block based on the geochemistry of the sandstones from southeast Hunan correspond with that based on regional materials.

Key words: sandstone; geochemistry; tectonic setting; Neoproterozoic—Early Paleozoic; southeastern Hunan; South China