

皖北地区新元古代构造背景的转换: 来自碎屑岩地球化学的证据

孙林华, 桂和荣

宿州学院地球科学与工程学院, 安徽宿州 234000

摘要: 在对安徽省北部宿州新元古代史家组砂岩地球化学特征分析的基础上, 结合前人发表的淮南和凤阳新元古代刘老碑组页岩的地球化学数据, 对它们的物源和构造背景进行了对比讨论。结果表明: 刘老碑组页岩的地球化学特征表明其来自于中-酸性火成岩高程度的首次风化, 而史家组砂岩则来自于经历了再循环的古老地壳物质较低程度的风化。刘老碑组页岩相对史家组砂岩具有高(MgO+Fe₂O₃)、TiO₂含量和Al₂O₃/SiO₂比值的特征, 结合 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10 判别图解, 表明二者可能沉积于不同的构造背景, 其中前者属于大陆岛弧(也可能是弧后盆地), 而后者则形成于相对稳定的被动大陆边缘或者板内。结合前人关于皖北新元古代研究的相关进展, 证实了华北板块东南缘构造背景在新元古代时期经历了从活动向稳定的转变。

关键词: 地球化学; 碎屑岩; 新元古代; 构造背景; 皖北

中图分类号: P595; P588.21; P542.4 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2011.05.02

Transition of Neoproterozoic Tectonic Background in Northern Anhui Province: Evidence from Geochemistry of Clastic Rocks

SUN Lin-hua, GUI He-rong

School of Earth Science and Engineering, Suzhou University, Suzhou, Anhui 234000

Abstract: Based on a geochemical analysis of sandstones of Neoproterozoic Shijia Formation in Suzhou of northern Anhui Province, in combination with previously published geochemical data of shales of Neoproterozoic Liulaobei Formation, the authors made a comparatively study of the provenance and tectonic setting of these two suites of clastic rocks. The results indicate that the shales of Liulaobei Formation might have originated from the first cycle of intermediate-felsic volcanic rocks with intense weathering, whereas sandstones of Shijia Formation were probably generated by low-intense weathering of the recycled old crust material. The shales of Liulaobei Formation are characterized by high (MgO+Fe₂O₃) and TiO₂ content and Al₂O₃/SiO₂ ratios relative to the sandstones of Shijia Formation. These data, together with La-Th-Sc and Th-Sc-Zr/10 discrimination diagrams, imply that they were deposited in different settings, i.e., the former was deposited in a continental island arc (probably back-arc basin), whereas the latter was in a passive continental margin or intra-plate environment. In combination with previous studies of the Neoproterozoic evolution in northern Anhui Province, these results demonstrate that the tectonic background of the southeast margin of North China Craton underwent transition from active to passive during Neoproterozoic.

Key words: geochemistry; clastic rock; Neoproterozoic; tectonic setting; northern Anhui Province

本文由安徽省高校优秀青年人才基金(编号: 2010SQRL190)和宿州学院科研平台项目(编号: 2010YKF30)联合资助。

收稿日期: 2011-07-19; 改回日期: 2011-08-30。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 孙林华, 男, 1981年生。博士, 讲师。主要从事岩石地球化学的研究与教学工作。通讯地址: 234000, 安徽省宿州市汴河路71号。电话: 0557-2871038。E-mail: sunlinh@hotmail.com。

碎屑沉积岩对于研究它们的源区组成、地质演化、风化程度及构造背景等具有不可替代的作用(Taylor et al., 1985), 尤其是对于火成岩缺乏的地区, 如华北板块东南缘。目前对于碎屑沉积岩的研究主要集中于岩石学和地球化学方法, 但由于岩石学方法存在的一些问题, 如源区的岩石成分不能完全有效地在 QFL(石英-长石-岩屑)三角图中表示出来、矿物成分统计时存在的不确定性等(Fedo et al., 1995), 导致越来越多的地质工作者逐渐倾向于使用地球化学的方法对碎屑沉积物的物源和构造背景进行研究(如李双应等, 2003, 2004; Cullers, 2000; Yan et al., 2002; Armstrong-Altrin et al., 2004; Rashid, 2005)。

地球化学方法在碎屑沉积岩上的应用主要基于风化过程中难迁移的元素, 如高场强元素(Th、Sc 及 Zr)、稀土元素及其相应比值(如 La/Sc、La/Th、Co/Th 等)被广泛应用于碎屑沉积岩物源和构造背景的研究(Taylor et al., 1985; Bhatia et al., 1986; McLennan et al., 1991)。此外, 主量元素亦被广泛应用, 如 Al_2O_3/TiO_2 比值、 $(SiO_2/20)-(K_2O+Na_2O)-(MgO+TiO_2+FeO^*)$ 判别图解等(Hayashi et al., 1997)。

关于皖北地区新元古代大地构造演化一直存在争议, 主要集中于两个方面: 首先是沉积时限的争议, 如杨杰东等(2001)及郑文武等(2004)给出的沉积时限为 750 ~ 900 Ma, 而孙林华等(2010)根据 Sr 同位素与 Kumar 等(2002)对比认为该时限为 800 ~ 1000 Ma。随着近年来年代学研究的进展(柳永清等, 2005; 王清海等, 2011), 基本上把皖北新元古界的时限限制在了 8 ~ 10 亿年。其次是构造背景的争议, 目前仍有待进一步的研究, 如潘国强等(2000)强调本区处于板内环境, 李双应等(2003)则认为皖北新元古代时期为弧后盆地, 而王清海等(2011)则认为本区新元古代为板内陆缘伸展环境。

新元古代时期岩浆记录的不足和单一对理解该区大地构造演化造成了重要影响, 因此有必要进行其他方面的工作以解决上述争议。安徽省宿州市东部发育有完整的新元古代沉积记录, 是研究皖北地区新元古代大地构造演化的重要材料。同时, 考虑到碎屑沉积岩在区域大地构造演化研究中的重要意义, 本文在对该区新元古代史家组砂岩地球化学测试的基础上, 结合李双应等(2003)报道的淮南刘老碑组页岩的地球化学特征, 利用地球化学手段对皖北地区新元古代两个不同时期的两组碎屑岩的物质来源和构造背景进行了探讨, 以期为进一步深化认识华北板块东南缘新元古代时期大地构造演化提供

信息。

1 区域地质背景与样品岩石学特征

研究区位于华北板块东南缘, 区内地层以新元古代和古生代为主, 并遭受燕山期华北-扬子两大板块挤压而形成一系列北东向延伸的褶皱。研究区以蚌埠隆起划分为北部淮北-宿县地层分区和淮南地层分区, 区内新元古代地层保留良好, 与本文研究有关的新元古代地层从老到新依次为五山组、刘老碑组、四十里长山组、贾园组、赵圩组、倪园组、九顶山组、张渠组、魏集组、史家组和望山组(安徽省地质矿产局, 1987)。其中新元古代碎屑岩地层在淮南分区以刘老碑组为代表, 而在淮北-宿县分区以史家组为代表。前人在关于皖北地区新元古代地层对比的认识上存在差异, 如安徽省地质矿产局(1987)将史家组划归为上震旦统而没有与刘老碑组进行对比, 但李双应等(2003)更倾向于认为史家组和刘老碑组相当。

总体而言, 根据各组的岩性特征, 皖北地区新元古代地层从五山组直到望山组大体上可以划分为两个旋回: 五山组-魏集组以碎屑岩为主逐渐变化为碳酸盐岩为主, 而史家组-望山组同样具有由浅变深的特征。研究区内辉绿岩以岩床或岩脉的形式侵位于新元古代地层中, 被侵位地层包括贾园组、赵圩组、倪园组、九顶山组和望山组等(柳永清等, 2005; 王清海等, 2011 及图 1B)。其中侵位于赵圩组和倪园组的辉绿岩年龄为 976 ~ 1038 Ma(柳永清等, 2005), 而侵位于九顶山组的辉绿岩年龄约为 890 Ma(王清海等, 2011)。

皖北地区史家组仅限于在安徽省宿州市东北栏杆乡黑峰岭一带出露, 该区魏集组、史家组及望山组为单斜地层, 贾园组、赵圩组及倪园组以逆冲推覆形式覆盖在它们之上, 且史家组中部有宽约 40 m 的辉绿岩侵入(图 1B)。其中史家组下部为浅灰白色夹紫红色页岩及粘土岩, 含泥质石英粉砂岩, 底部以白色风化粘土层与魏集组假整合接触; 上部为浅黄灰色中厚层含海绿石石英砂岩及薄层条带状石英粉砂岩, 与望山组整合接触。所采集样品为黄绿色石英粉砂岩及石英砂岩, XRD 分析显示主要由石英和碱性长石(主要为钾长石和微斜长石)组成, 副矿物包括黑、白云母和少量岩屑。此外, 大部分样品具有一定程度的方解石胶结(地球化学组成中表现为高 CaO 含量)。由于史家组出露有限, 仅采集了 7 个样品进行分析。

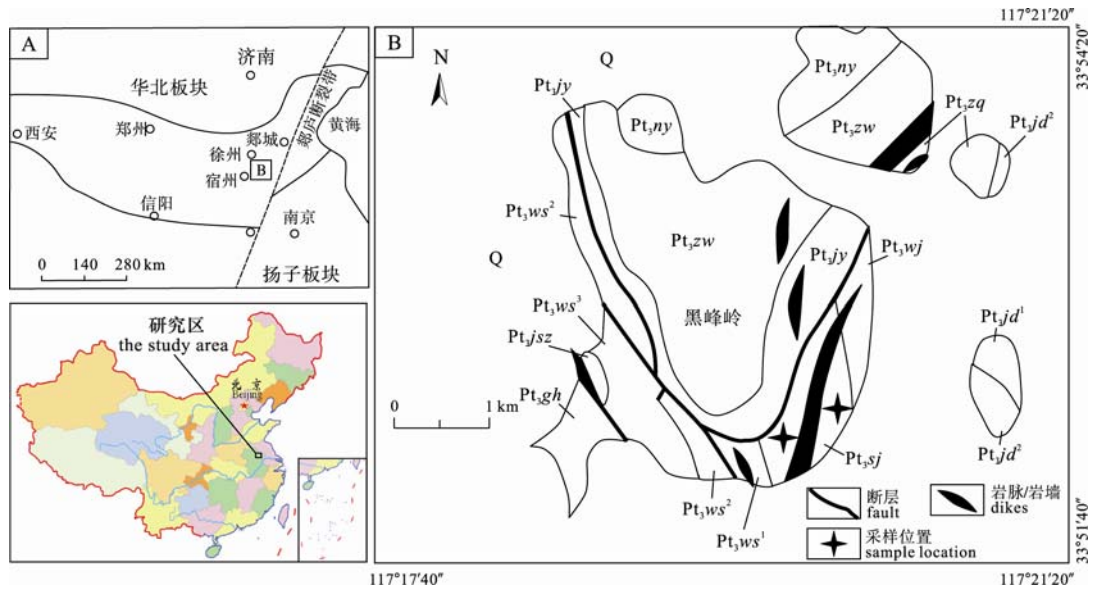


图 1 研究区新元古代地质简图(据安徽省地质矿产局, 1987 修改)

Fig. 1 Simplified Neoproterozoic geological map of the study area (modified after Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province, 1987)

Pt_{3jy}-贾园组; Pt_{3zw}-赵圩组; Pt_{3ny}-倪园组; Pt_{3jd}-九顶山组; Pt_{3zq}-张渠组; Pt_{3wj}-魏集组; Pt_{3sj}-史家组; Pt_{3ws}-望山组; Pt_{3jsz}-金山寨组; Pt_{3gh}-沟后组

Pt_{3jy}-Jiayuan Formation; Pt_{3zw}-Zhaowei Formation; Pt_{3ny}-Niyuan Formation; Pt_{3jd}-Jiudingshan Formation; Pt_{3zq}-Zhangqu Formation; Pt_{3wj}-Weiji Formation; Pt_{3sj}-Shijia Formation; Pt_{3ws}-Wangshan Formation; Pt_{3jsz}-Jinshanzhai Formation; Pt_{3gh}-Gouhou Formation

2 测试方法

样品首先经切割表层和超纯水清洗后, 用玛瑙钵研磨至 200 目, 然后送实验室进行分析。主量元素采用 XRF(Axios-PW4400)进行分析, 并用标样 GSR-1 和 GSR-3 进行监控, 测试精度优于 5%。微量元素(含稀土元素)用 ICP-MS(Finnigan MAT-ELEMENT)进行测试, 标样为 OU-6、AMH-1 和 GBPG-1, 相对标准偏差在 1%~5%之间。以上测试在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。

3 结果

史家组 7 个砂岩分析样品的主微量元素组成列于表 1。下文中刘老碑组页岩数据引自李双应等(2003), 同时引用了上地壳组成(UCC, McLennan, 2001)作为对比。

3.1 主量元素

与上地壳组成相比, 史家组砂岩具有明显偏高的 SiO₂(75.83%~82.45%, 平均 78.82%)和 K₂O 含量(2.91%~5.07%, 平均 4.18%), 但 Al₂O₃ 含量明显偏低(4.70%~9.06%, 平均 6.64%)(表 1)。此外, 史家组砂岩具有相对上地壳偏低的 TiO₂、Fe₂O₃、MnO、MgO、Na₂O 和 P₂O₅ 含量(图 2A), 可能与石英的“稀释”作用有关。

控制碎屑沉积岩主量元素组成的矿物(包括粘土矿物和造岩矿物)可以由 ICV 指数((Fe₂O₃+K₂O+Na₂O+CaO+MgO+MnO)/Al₂O₃)进行估计。一般高岭石、伊利石和云母的 ICV 值小于 1, 而造岩矿物如斜长石和钾长石的 ICV 值大于 1(Cox et al., 1995)。史家组砂岩的 ICV 值除 1 个样品小于 1 外, 其他均大于 1(平均 1.68), 表明其主量元素组成主要由造岩矿物控制。此外, 史家组砂岩的 K₂O/Al₂O₃ 为 0.64, 表明史家组砂岩中大量长石的存在对岩石化学成分具有控制作用(Cox et al., 1995)。

3.2 微量元素

从图 2B 可以看出, 史家组砂岩具有与上地壳相似的大离子亲石元素(如 Rb、Ba)组成, 但 Sr 含量明显较上地壳偏低。Zr 和 Hf 明显高于上地壳组成, 并显示出较高的 Zr/Hf 比值(平均 40.2), 表明砂岩中含有大量的锆石, 因为其 Zr/Hf 值与锆石相似(39, Murali et al., 1983)。此外, 过渡族元素如 Sc、V 和 Co 等明显低于上地壳组成, 表明其中镁铁质矿物含量偏低。对于稀土元素而言, La、Ce、Sm、Eu、Yb 及 Lu 均低于上地壳组成, 同部分主量元素一样, 可能与石英的“稀释”作用有关。

经上地壳标准化的稀土元素配分型式见图 2C。从图中可以看出, 史家组砂岩总体表现出轻稀土亏损而重稀土富集的特征, 稀土总量低于上地壳。单纯就元素比值而言, 史家组砂岩的 La/Yb 及 La/Sm

表 1 史家组砂岩主量元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)组成
 Table 1 Major (%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) concentrations of Shijia Formation sandstone

	SJ-1	SJ-2	SJ-3	SJ-4	SJ-5	SJ-6	SJ-7	UCC
SiO ₂	76.15	76.09	78.39	75.83	80.44	81.67	82.45	66.00
TiO ₂	0.51	0.48	0.30	0.34	0.61	0.41	0.52	0.68
Al ₂ O ₃	7.64	7.36	4.75	4.70	9.06	5.39	7.60	15.20
Fe ₂ O ₃	1.30	1.32	0.74	0.60	1.62	0.92	2.83	5.03
MnO	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.08
MgO	0.32	0.28	0.15	0.18	0.36	0.16	0.35	2.20
CaO	4.35	4.74	7.14	8.21	0.12	4.02	0.16	4.20
Na ₂ O	0.35	0.36	0.36	0.32	0.37	0.29	0.36	3.90
K ₂ O	4.86	5.07	3.42	2.91	5.04	3.87	4.07	3.40
P ₂ O ₅	0.05	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.15
LOI	4.53	4.23	5.90	7.61	1.77	3.53	1.94	112
Rb	120	116	77.3	75.8	131	86.2	112	350
Sr	34.9	47.9	57.0	54.6	30.2	43.6	27.3	550
Ba	660	660	437	388	749	523	567	17.0
Pb	15.5	12.0	8.80	11.2	16.5	10.3	20.6	10.7
Th	8.89	7.97	4.78	9.71	9.72	8.28	8.21	2.80
U	1.88	1.89	1.00	2.06	1.81	1.77	1.82	190
Zr	482	406	306	989	498	544	491	5.80
Hf	12.0	10.2	7.56	24.4	12.7	13.5	12.0	22.0
Y	18.1	18.9	14.5	18.6	11.9	17.6	9.43	30.0
La	19.7	18.3	11.0	17.3	19.8	16.0	14.3	64.0
Ce	34.3	33.8	20.5	33.9	33.8	31.4	24.7	4.50
Sm	2.86	2.93	2.04	3.03	2.40	2.92	1.64	0.88
Eu	0.61	0.64	0.47	0.61	0.48	0.60	0.33	2.20
Yb	2.27	2.29	1.46	2.44	1.95	2.00	1.62	0.32
Lu	0.35	0.35	0.23	0.39	0.30	0.31	0.26	13.6
Sc	5.90	5.43	3.48	4.11	5.35	3.80	4.14	107
V	34.8	30.1	15.3	16.8	42.8	17.6	39.1	17.0
Co	4.79	6.37	1.97	1.81	1.75	3.50	5.22	4.34
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	9.97	10.3	16.5	16.1	8.88	15.2	10.8	0.9
K ₂ O/Na ₂ O	13.8	14.0	9.39	9.07	13.5	13.4	11.4	32.8
Zr/Hf	40.2	39.8	40.5	40.5	39.2	40.3	40.9	0.79
Th/Sc	1.51	1.47	1.37	2.36	1.82	2.18	1.98	2.21
La/Sc	3.34	3.37	3.16	4.21	3.70	4.21	3.45	1.59
Co/Th	0.54	0.80	0.41	0.19	0.18	0.42	0.64	1.76
La/Co	4.11	2.87	5.58	9.56	11.3	4.57	2.74	13.6
La/Yb	8.68	7.99	7.53	7.09	10.2	8.00	8.83	6.67
La/Sm	6.89	6.25	5.39	5.71	8.25	5.48	8.72	

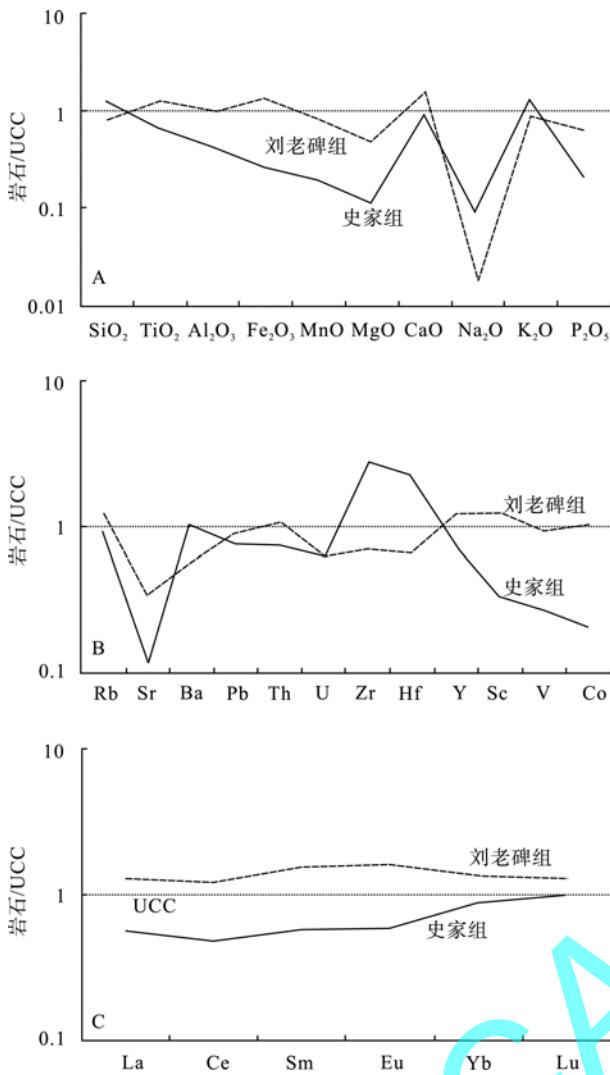


图2 上地壳标准化史家组砂岩和刘老碑组页岩主量元素(A)、微量元素(B)和稀土元素(C)
 Fig. 2 UCC normalized major(A), trace(B) and rare earth(C) elements of Shijia Formation sandstone and Liulaobei Formation shale

值分别为 8.33 和 6.67, 其中 La/Yb 低于上地壳组成而 La/Sm 与上地壳相近。

4 讨论

4.1 碎屑物源分析

在 Roser 等(1988)提出的判别图解中, 史家组砂岩显示其具有石英岩-沉积岩的物源, 而刘老碑组页岩除一个样品具有石英岩物源外, 其他样品显示中性-镁铁质火成岩的物源(图 3A)。根据 Hayashi 等(1997)提出的 $(SiO_2/20)-(Na_2O+K_2O)-(MgO+TiO_2+FeO^*)$ 判别图解($FeO^*=Fe_2O_3 \times 0.9$), 史家组砂岩位于流纹岩附近, 而刘老碑组页岩则位于安山岩附近(图 3B)。

此外, $Al_2O_3-(CaO+Na_2O)-K_2O$ (A-CN-K)图解不仅可以被用于估算化学风化程度, 也可以被用于推

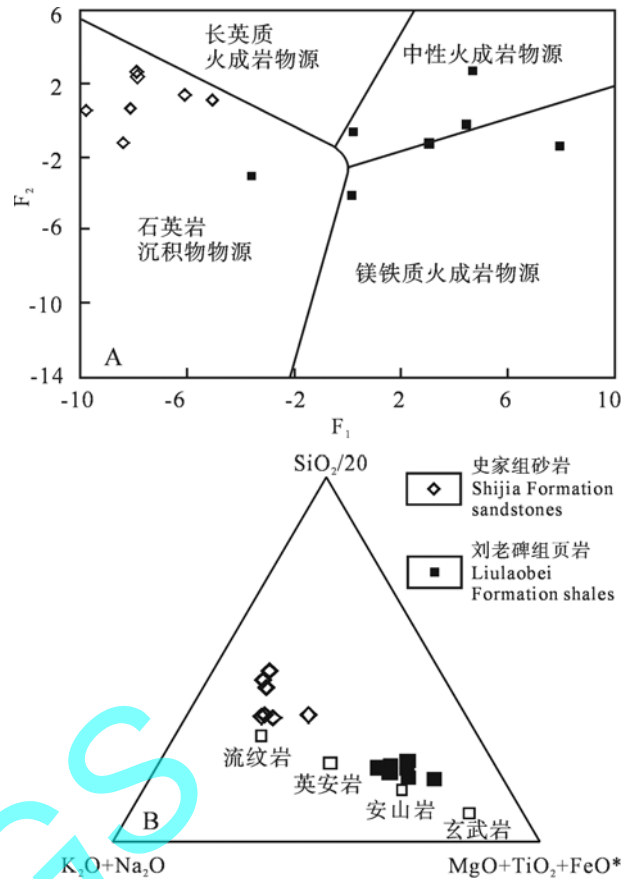


图3 碎屑沉积岩物源 F_1-F_2 (A) (据 Roser et al., 1988)和 $(SiO_2/20)-(Na_2O+K_2O)-(MgO+TiO_2+FeO^*)$ 判别图解(B) (据 Hayashi et al., 1997)
 Fig. 3 F_1-F_2 (A) (after Roser et al., 1988) and $(SiO_2/20)-(Na_2O+K_2O)-(MgO+TiO_2+FeO^*)$ (B) (after Hayashi et al., 1997) provenance discrimination diagrams of clastic sediment rocks

断碎屑沉积物的物源。化学风化指数 CIA 的计算公式为: $CIA=100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)$ (Nesbitt et al., 1982), 其中各氧化物均为摩尔值, CaO^* 特指硅酸盐矿物中的 CaO 含量。在计算之前采用了 McLennan(1993)提出的方法对 CaO 含量进行校正($CaO^*=CaO-10/3 \times P_2O_5$)。如果 CaO^* 小于 Na_2O 的摩尔数, 采用 CaO^* 作为硅酸盐矿物的 CaO 含量, 反之则采用 Na_2O 作为硅酸盐矿物的 CaO 含量。从校正后的 A-CN-K 图(图 4)可以看出, 史家组砂岩可能来自于钾长石含量偏高的酸性物源且经历了较低程度的风化, 而刘老碑组页岩则可能是斜长石偏高的中性-基性源区经高程度风化的产物。

部分元素(如 Th、Zr、Hf、Sc、V、Co 和稀土元素)对碎屑沉积物源区具有良好的指示意义(Bhatia, 1985)。镁铁质会导致碎屑沉积物中 Sc、V 和 Co 等元素的升高, 而长英质则会引起 La、Zr 和 Th 等元素的增加。从表 1 及图 2 可以发现, 史家组

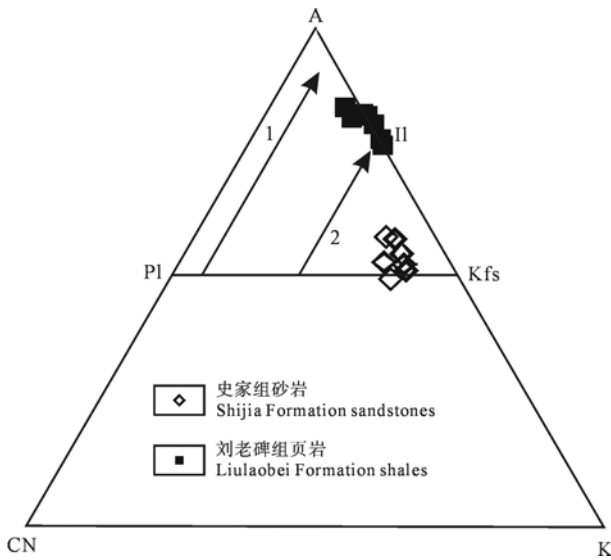


图 4 史家组砂岩及刘老碑组页岩 A-CN-K 图解
 Fig. 4 A-CN-K diagram of the Shijia Formation sandstone and Liulaobei Formation shale
 1-安山岩风化趋势; 2-花岗岩风化趋势;
 Pl-斜长石; Kfs-钾长石; Il-伊利石
 1-weathering trend of andesite; 2-weathering trend of granite;
 Pl-plagioclase; Kfs-K-feldspar; Il-illite

砂岩与上地壳相比具有明显偏低的 Sc、V 和 Co 含量，但极其富集的 Zr 和仅少量亏损的 La 和 Th 表明其物源更可能是长英质的。与史家组砂岩不同，刘老碑组页岩具有接近上地壳的上述元素组成，而 Sc 甚至高于上地壳组成，表明刘老碑组页岩的物源具有相对上地壳偏高的镁铁质物源贡献。

此外，史家组砂岩的 Co/Th (0.45) 明显低于上地壳的值 (1.59)，而 Zr/Hf(40.2)、Th/Sc(1.81) 和 La/Sc(3.63) 则高于上地壳组成(32.8、0.8 和 2.2)，表明其物源镁铁质贡献很低，而主要来自于酸性的源区。但对于刘老碑组页岩而言，其 Co/Th(1.56)、Zr/Hf(34.3)、Th/Sc(0.70) 和 La/Sc(2.31) 均接近上地壳组成，表明其物源和上地壳类似，且具有较史家组砂岩偏高的镁铁质物源贡献。

根据 Condie(1989)提出的 Th-Hf-Co 物源判别图解(图 5A)，史家组砂岩位于板内石英岩及长石砂岩区，而刘老碑组页岩则位于页岩和岛弧杂砂岩区，表明二者的物源存在区别，前者更可能具有稳定板内环境下的物源，而后者则更可能与活动性质的物源有关。进一步而言，在 Hf-La/Th 判别图解中(图 5B)，史家组砂岩具有明显高于刘老碑组页岩的 Hf 含量，暗示其被动大陆边缘物质增加，而刘老碑组页岩具有长英质岛弧的物源。

总之，从主量和微量元素可以看出，史家组砂岩和刘老碑组页岩应该具有不同的物源，前者以板

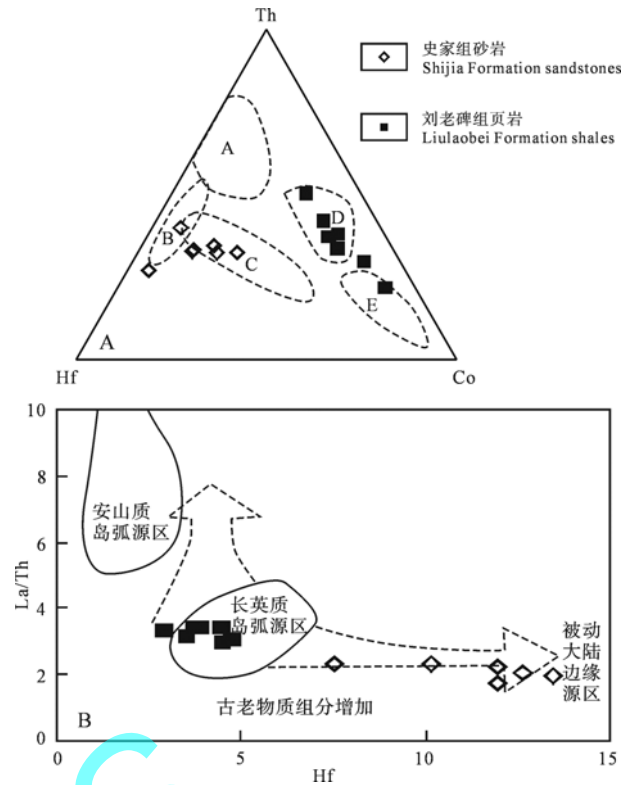


图 5 Th-Hf-Co (据 Condie, 1989) (A) 及 Hf-La/Th 物源判别图解(B) (据 Floyd et al., 1987)
 Fig. 5 Th-Hf-Co (A) (after Condie, 1989) and Hf-La/Th provenance discrimination diagram (B) (after Floyd et al., 1987)
 A-长英质火成岩; B-板内石英岩; C-长石砂岩;
 D-页岩(平均地壳); E-杂砂岩(岛弧)
 A-felsic volcanic rocks; B-quartzite from cratonic basin;
 C-feldspar sandstones; D-shale (average upper continental crust);
 E-graywackes (arcs)

内稳定物源为主，而后者可能以岛弧长英质物源为主。此外，由于沉积岩物源的地球化学特征可能因为再循环受到改变，在 Al₂O₃-Zr-TiO₂ 图解中(图 6)，史家组砂岩具有明显 Zr 富集的趋势，表明其物源与

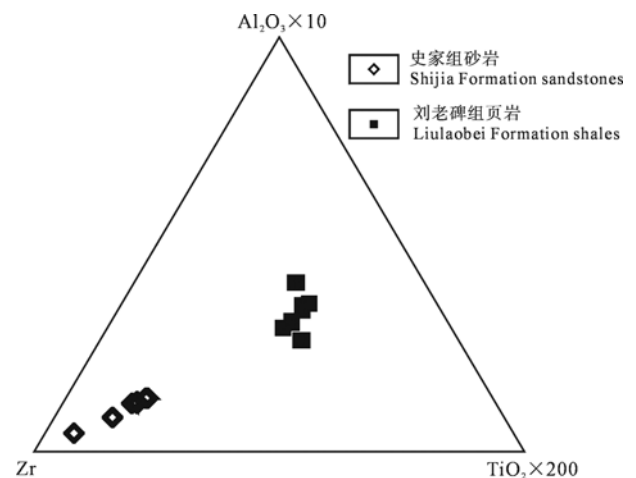


图 6 10×Al₂O₃-Zr-200×TiO₂ 三角图
 Fig. 6 Triangle diagram of 10×Al₂O₃-Zr-200×TiO₂

再循环有关, 间接证实了史家组砂岩来自于稳定古老物质的观点, 而刘老碑组页岩则无这一趋势, 说明它们可能是火成岩首次风化后沉积的产物。

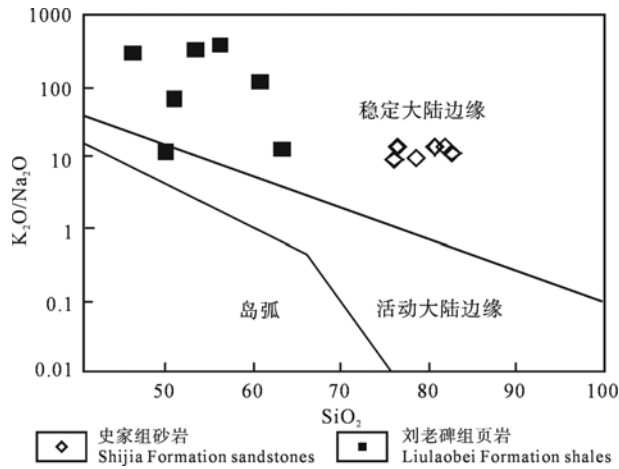


图 7 SiO_2 - $(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$ 构造背景判别图解 (据 Roser et al., 1988)

Fig. 7 SiO_2 - $(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$ tectonic discrimination diagram (after Roser et al., 1988)

4.2 构造背景的确定与转变

研究表明, 碎屑沉积岩地球化学特征在很大程度上受到其所处构造背景的控制, 因此不同构造背景下形成的碎屑岩具有不同的地球化学特征(Bhatia, 1985; Roser et al., 1988)。根据 Roser 等(1988)提出的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ - SiO_2 判别图解, 史家组砂岩和刘老碑组页岩绝大多数投点于被动大陆边缘。但这一结果是值得怀疑的, 因为从图 4 中可以发现, 刘老碑组页岩投点近平行于 A-K 边分布, 因此它们可能受到了明显后期钾交代的影响, 导致 K_2O 含量及 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 的增加, 从而使得在判别图上出现误判。因此, 进一步使用 Bhatia(1983)提出的 $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$ - TiO_2 及 $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$ - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 判别图进行识别(图 8), 史家组砂岩以低的 $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$ 、 TiO_2 含量及 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 而位于被动大陆边缘, 而刘老碑组页岩则位于大陆岛弧和大洋岛弧之间。此外, 在微量元素 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10 判别图解上(图 9, Bhatia et al., 1986)也得到了相似的结论。

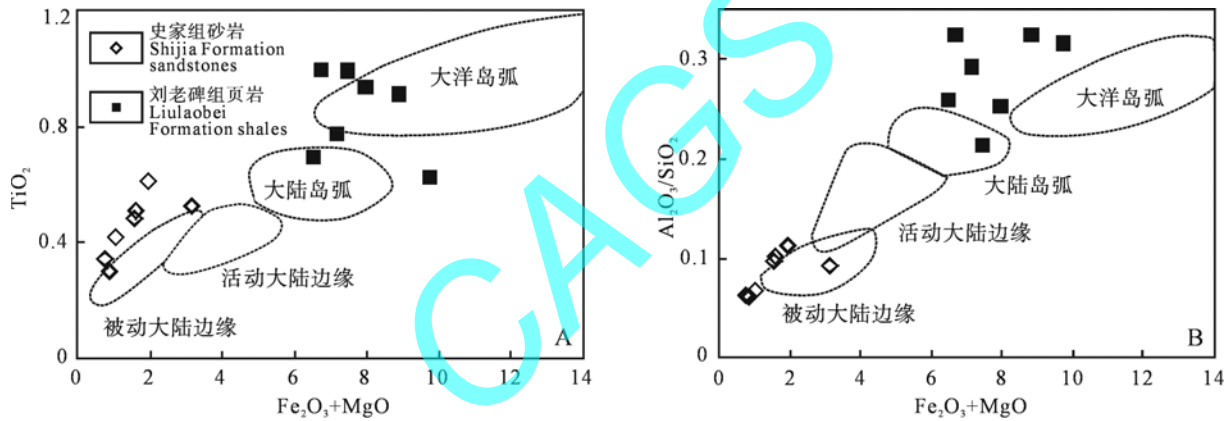


图 8 $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$ - TiO_2 (A)及 $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$ - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 构造背景判别图(B) (据 Bhatia, 1983)

Fig. 8 $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$ - TiO_2 (A) and $(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$ - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ tectonic discrimination diagram (B) (after Bhatia, 1983)

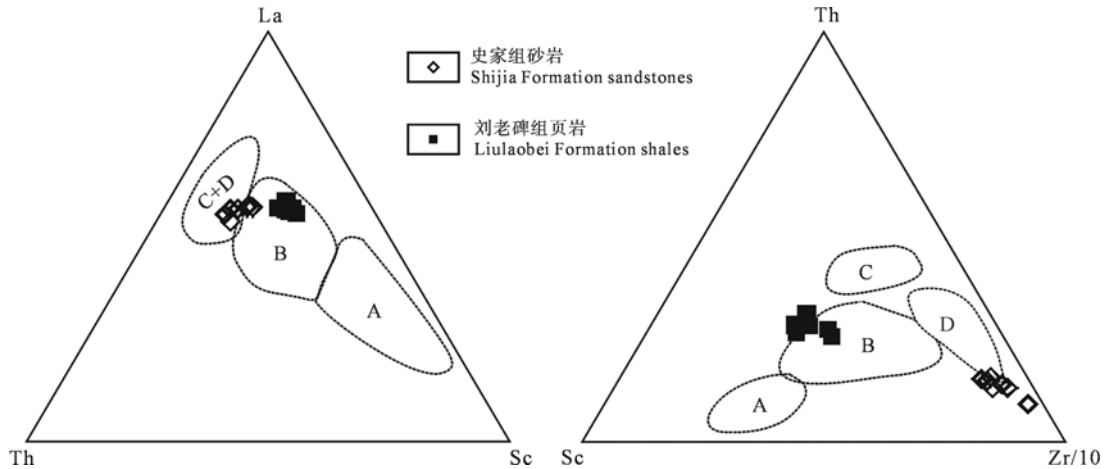


图 9 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10 构造背景判别图解(据 Bhatia et al., 1986)

Fig. 9 La-Th-Sc and Th-Sc-Zr/10 tectonic discrimination diagram (after Bhatia et al., 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

A-oceanic island arc; B-continental island arc; C-active continental margin; D-passive continental margin

由于碎屑沉积物地球化学特征的继承性,在识别碎屑岩构造背景上可能存在一些问题,其中最为典型的是该构造背景反映的是物源区的构造背景还是沉积时的构造背景(李双应等,2004)。但从上述物源分析和构造背景判别可以看出,刘老碑组和史家组碎屑岩在物源供给上存在差别是可以肯定的。结合我们曾报道的贾园组(孙林华等,2010)的情况来看,贾园组混积岩中陆源碎屑的特征与刘老碑组的类似(均显示出岛弧的特征),因此我们认同安徽省地质矿产局(1987)的观点,即刘老碑组和史家组并不对应,前者应属于贾园组更下部层位的地层。

岩相古地理研究表明,皖北地区前寒武纪构造格局以现今东西向为主(安徽省地质矿产局,1987)。也就是说,能够对宿州地区供给碎屑物源的可能主要来自于北部和南部,北部为华北板块腹地,而南部则为华北板块南缘(可能是淮阳古陆?)。北部华北板块腹地具有古老的结晶基底,从而能够有效地为皖北地区提供具有再循环性质的、长英质的且具有板内性质的古老物源(如史家组物源),而华北板块南缘存在的中-新元古代安山岩的风化可以为刘老碑组提供物源(李双应等,2003),这一推断与碎屑岩地球化学特征反映的相一致(图3、5和6)。由于物源供给存在差异,皖北地区在刘老碑组和史家组沉积时期的构造背景也应该是存在差异的:刘老碑组时期为南部供给,因此华北板块东南缘应该是南高北低,到史家组时期则转为北高南低。

如前所述,关于皖北地区新元古代构造演化存在很大的争议。从皖北新元古代的基本沉积特征(安徽省地质矿产局,1987)来看,从五山组、刘老碑组一直到魏集组属于华北板块东南缘新元古代第一次伸展期,而史家组到望山组则对应于第二次伸展。由于近年来报道的年代学数据逐渐表明皖北新元古代沉积时限在800~1000 Ma之间(柳永清等,2005;王清海等,2011),而史家组年龄大致为820~846 Ma(安徽省地质矿产局,1987;孙林华等,2010)。同时,考虑到史家组及其下部魏集组之间假整合的事实(白色风化粘土层,见前文),并结合Rodinia超大陆的相关进展(Li et al., 2008)可以推断,皖北地区新元古代第一次伸展应该对应于Rodinia超大陆的汇聚期(>0.8 Ga),而第二次伸展对应于Rodinia超大陆的裂解期(<0.8 Ga)。这与刘老碑组页岩可能处于弧后盆地而史家组砂岩产于被动大陆边缘或者板内的认识是一致的(李双应等,2003及本文数据)。

5 结论

通过对安徽省北部宿州新元古代史家组砂岩的地球化学分析,结合前人发表的淮南新元古代刘老碑组页岩的地球化学数据及皖北新元古代相关研究进展,取得了如下认识:

(1)皖北新元古代史家组砂岩源于经历过再循环的古老地壳物质较低程度的风化,而刘老碑组页岩则来自于中-酸性火成岩的首次高程度风化;

(2)史家组砂岩形成于相对稳定的构造背景,可能是被动大陆边缘或板内环境,而刘老碑组页岩形成于活动的构造背景,可能是弧后盆地或大陆岛弧;

(3)皖北新元古代时期经历了构造背景从活动向稳定的转变,从而保留了对应于Rodinia超大陆汇聚和裂解的沉积学证据。史家组之前的沉积对应于Rodinia超大陆的汇聚而史家组-望山组期间的伸展则可能与Rodinia超大陆的裂解相对应。

参考文献:

- 安徽省地质矿产局, 1987. 安徽省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 李双应, 岳书仓, 杨建, 贾志海. 2003. 皖北新元古代刘老碑组页岩的地球化学特征及其地质意义[J]. 地质科学, 38(2): 241-253.
- 李双应, 李任伟, 岳书仓, 王道轩, 刘因, 孟庆任, 金福全. 2004. 安徽肥西中生代碎屑岩地球化学特征及其对物源制约[J]. 岩石学报, 20(3): 667-676.
- 柳永清, 高林志, 刘燕学, 宋彪, 王宗秀. 2005. 徐淮地区新元古代初期镁铁质岩浆事件的锆石 U-Pb 定年[J]. 科学通报, 50(22): 2514-2521.
- 潘国强, 孔庆友, 吴俊奇, 刘家润, 张庆龙, 曾家湖, 刘道忠. 2000. 徐宿地区新元古代辉绿岩床的地球化学特征[J]. 高校地质学报, 6(1): 53-63.
- 孙林华, 桂和荣, 陈松, 马艳平, 王桂梁. 2010. 皖北新元古代贾园组混积岩物源和构造背景的地球化学示踪[J]. 地球学报, 31(6): 833-842.
- 王清海, 杨德斌, 许文良. 2011. 华北陆块东南缘新元古代基性岩浆活动: 徐淮地区辉绿岩床群岩石地球化学、年代学和 Hf 同位素证据[J]. 中国科学(地球科学), 41(6): 796-815.
- 郑杰东, 郑文武, 王宗哲, 陶仙聪. 2001. Sr、C 同位素对苏皖北部上寒武系时代的界定[J]. 地层学杂志, 25(1): 44-47.
- 郑文武, 杨杰东, 洪天求, 陶仙聪, 王宗哲. 2004. 辽南与苏皖北部新元古代地层 Sr 和 C 同位素对比及年龄界定[J]. 高校地质学报, 10(2): 165-178.

References:

- ARMSTRONG-ALTRIN J S, LEE Y I, VERMA S P, RAMASAMY S. 2004. Geochemistry of Sandstones from the Upper Miocene Kudankulam Formation, Southern India: Implications for Provenance, Weathering and Tectonic Setting[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 74(2): 285-297.
- BHATIA M R. 1983. Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones[J]. *The Journal of Geology*, 91(6): 611-627.
- BHATIA M R. 1985. Rare Earth Element Geochemistry of Australian Paleozoic Graywackes and Mudrocks: Provenance and Tectonic Control[J]. *Sedimentary Geology*, 45(1-2): 97-113.
- BHATIA M R, CROOK K A W. 1986. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basin[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181-193.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province. 1987. *Regional Geology of Anhui Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English Summary).
- CONDIE K C. 1989. Geochemical Changes in Basalts and Andesites Across the Archean-Proterozoic Boundary: Identification and Significance[J]. *Lithos*, 23: 1-18.
- COX R, LOWE D R, CULLERS R L. 1995. The Influence of Sediment Recycling and Basement Composition on Evolution of Mudrock Chemistry in the Southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919-2940.
- CULLERS R L. 2000. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies[J]. *Lithos*, 51(3): 181-203.
- FEDO C M, NESBITT H W, YOUNG G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 23: 921-924.
- 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]. *Journal of the Geological Society*, 144(4): 531-542.
- HAYASHI K I, FUJISAWA H, HOLLAND H D, OHOMOTO H. 1997. Geochemical of ~ 1.9 Ga sedimentary rocks from northern Labrador, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4115-4137.
- KUMAR B, SHARMA S D, SREENIVAS B, DAYAL A M, RAO M N, DUBEY N, CHAWLA B R. 2002. Carbon, oxygen and strontium isotope geochemistry of Proterozoic carbonate rocks of the Vindhyan Basin, central India[J]. *Precambrian Research*, 113(1-2): 43-63.
- LI Shuang-ying, YUE Shu-cang, YANG Jian, JIA Zhi-hai. 2003. Geochemical Characteristics and Implications of Neoproterozoic Shales from the Liulaobei Formation in North Anhui[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 38(2): 241-253(in Chinese with English abstract).
- LI Shuang-ying, LI Ren-wei, YUE Shu-cang, WANG Dao-xuan, LIU Yin, MENG Qing-ren, JIN Fu-quan. 2004. Geochemistry of Mesozoic Detrital Rocks and its Constraints on Provenance in Feixi area, Anhui Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 667-676(in Chinese with English abstract).
- LI Z X, BOGDANOVA S V, COLLINS A S, DAVIDSON A, WAELE B D, ERNST R E, FITZSIMONS I C W, FUCHS R A, GLADKOVICH D P, JACOBS J, KARLSTROM K E, LU S, NATAPOV L M, PEASE V, PISAREVSKY S A, THRANE K, VERNIKOVSKY V. 2008. Assembly, Configuration, and Break-Up History of Rodinia: A Synthesis[J]. *Precambrian Research*, 160(1-2): 179-210.
- LIU Yong-qing, GAO Lin-zhi, LIU Yan-xue, SONG Biao, WANG Zong-xiu. 2005. Zircon U-Pb Dating for the Earliest Neoproterozoic Mafic Magmatism in the Southern Margin of the North China Block[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(22): 2514-2521(in Chinese).
- MCLENNAN S M, TAYLOR S R. 1991. Sedimentary Rocks and Crustal Evolution: Tectonic Setting and Secular Trends[J]. *The Journal of Geology*, 99(1): 1-21.
- MCLENNAN S M. 1993. Weathering and Global Denudation[J]. *The Journal of Geology*, 101(2): 295-303.
- MCLENNAN S M. 2001. Relationships Between the Trace Element Composition of Sedimentary Rocks and Upper Continental Crust[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(4), doi: 10.1029/2000GC000109.
- MURALI A V, PARTHASARATHY R, MAHADEVAN T M, SANKAR D M. 1983. Trace Element Characteristics, REE Patterns and Partition Coefficients of Zircons from Different Geological Environment—A Case Study on Indian Zircons[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47: 2047-2052.

- NESBITT H W, YOUNG G M. 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites[J]. *Nature*, 299: 715-717.
- PAN Guo-qiang, KONG Qing-you, WU Jun-qi, LIU Jia-run, ZHANG Qing-long, ZENG Jia-hu, LIU Dao-zhong. 2000. Geochemical Features of Neoproterozoic Diabase Sills in Xuzhou-Suzhou Area[J]. *Geological Journal of China Universities*, 6(1): 53-63(in Chinese with English abstract).
- RASHID S A. 2005. The Geochemistry of Mesoproterozoic Clastic Sedimentary Rocks from the Rautgara Formation, Kumaun Lesser Himalaya: Implications for Provenance, Mineralogical Control and Weathering[J]. *Current Science*, 88(11): 1832-1836.
- ROSER B, KORSCH R. 1988. Provenance Signatures of Sandstone-Mudstone Suites Determined Using Discriminant Function Analysis of Major-Element Data[J]. *Chemical Geology*, 67(1-2): 119-139.
- SUN Lin-hua, GUI He-rong, CHEN Song, MA Yan-ping, WANG Gui-liang. 2010. Provenance and Tectonic Setting of the Neoproterozoic Diamictites from Jiayuan Formation in Northern Anhui Province: Evidence from Geochemical Study[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(6): 833-842(in Chinese with English abstract).
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M. 1985. The Continental Crust: its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell Publishing Incorporated.
- WANG Qing-hai, YANG De-bin, XU Wen-liang. 2011. Neoproterozoic Mafic magmatism in the Southeast Margin of North China Craton: Evidence from Geochemistry, Geochronology and Hf Isotope of the Diabase Sills in Xuhuai Area[J]. *Science China(Terrae)*, 41(6): 796-815(in Chinese).
- YAN Q R, GAO S L, WANG Z Q, LI J L, XIAO W J, HOU Q L, YAN Z, CHEN H L. 2002. Geochemical Constrains of Sediments on the Provenance, Depositional Environment and Tectonic Setting of the Songliao Prototype Basin[J]. *Acta Geologica Sinica(English edition)*, 76(4): 455-462.
- YANG Jie-dong, ZHENG Wen-wu, WANG Zong-zhe, TAO Xian-cong. 2001. Age Determination of the Upper Precambrian System of Northern Jiangsu-Anhui by Using Sr and C Isotopes[J]. *Journal of Stratigraphy*, 25(1): 44-47(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Wen-wu, YANG Jie-dong, HONG Tian-qiu, TAO Xian-cong, WANG Zong-zhe. 2004. Sr and C Isotopic Correlation and the Age Boundary Determination for the Neoproterozoic in the Southern Liaoning and Northern Jiangsu-Northern Anhui Provinces[J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(2): 165-178(in Chinese with English abstract).