

# 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

孙林华<sup>1)</sup>, 桂和荣<sup>1)</sup>, 陈 松<sup>1)</sup>, 马艳平<sup>1)</sup>, 王桂梁<sup>2)</sup>

1)宿州学院地球科学与工程学院, 安徽宿州 234000;

2)中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221008

**摘要:** 在野外调查和岩石学研究的基础上, 对皖北新元古代贾园组混积岩进行了系统的元素地球化学(包括稀土元素)分析, 结果表明: 该套混积岩主要由不同比例(1:1.5 ~ 1:9)的碳酸盐和陆源碎屑组分混合而成, 属于“相缘渐变沉积混合”。其元素含量与碳酸盐组分和陆源碎屑组分比例密切相关, 但 La、Th、Zr 及 Sc 等元素之间的比值主要受控于陆源碎屑而相对稳定, 可以用于识别碎屑物源区及其构造背景。地球化学特征证实混积岩中陆源碎屑组分主要来自与大陆岛弧有关的长英质火山岩, 但也存在少量古老基底的参与。结合最近研究进展推断, 皖北新元古代沉积活动可能主要发生在与 1.0 ~ 0.8 Ga 之间, 其沉积环境与 Rodinia 超大陆汇聚过程中导致的华北板块东南缘弧后伸展有关。

**关键词:** 物源; 构造背景; 混积岩; 地球化学; 新元古代; 皖北

中图分类号: P588.21; P588.245; P59 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2010)06-833-10

## Provenance and Tectonic Setting of the Neoproterozoic Diamictites from Jiayuan Formation in Northern Anhui Province: Evidence from Geochemical Study

SUN Lin-hua<sup>1)</sup>, GUI He-rong<sup>1)</sup>, CHEN Song<sup>1)</sup>, MA Yan-ping<sup>1)</sup>, WANG Gui-liang<sup>2)</sup>

1) School of Earth Sciences and Engineering, Suzhou University, Suzhou, Anhui 234000;

2) School of Resource and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008

**Abstract:** Field observation and petrographic study as well as a systematic analysis of major and trace elements (including rare earth elements) were carried out for diamictites from the Neoproterozoic Jiayuan Formation in northern Anhui Province. The results imply that these diamictites are composed of carbonates and terrigenous detritus of variable proportions (1/1.5 ~ 1/9) and belong to “mixed sedimentation with gradual facies change”. The concentrations of elements are closely related to the relative concentrations of carbonates and terrigenous detritus, whereas the ratios between La, Th, Zr and Sc are controlled by terrigenous detritus with limited variations, and hence can be used as tracers for the discrimination of provenance of terrigenous detritus and its tectonic background. Geochemical features demonstrate that the terrigenous detritus was mainly derived from the continental arc felsic volcanics, with minor contribution from the old basement. Combined with recent research achievements, the authors hold that the Neoproterozoic sedimentation in northern Anhui Province probably took place between 1.0 and 0.8 Ga, and the sedimentary environment was related to the back arc extension of the southeastern margin of the North China Craton during the convergence of Rodinia supercontinent.

**Key words:** provenance; tectonic setting; diamictites; geochemistry; Neoproterozoic; northern Anhui Province

本文由国家自然科学基金(编号: 40873015)、安徽省高校优秀青年人才基金(编号: 2010SQRL190)和宿州学院博士基金(编号: 2009jb04)联合资助。

收稿日期: 2010-05-11; 改回日期: 2010-08-17。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。

虽然在华北板块的周缘逐渐发现了与 Rodinia 超大陆汇聚过程中 Grenville 造山有关的年代学记录(陆松年等, 2004a, b; 王涛等, 2005; 张臣, 2004), 但相对而言, 华北板块东部尤其是东南部对应这一事件的岩浆活动则相对比较隐形(郑永飞, 2003), 保留下来的是巨厚的沉积地层, 它们和小规模的侵入体无疑成为了记录华北板块东南缘新元古代大地构造演化的重要实证(孙林华等, 2010a)。然而, 由于岩浆记录的相对贫乏以及目前尚没有可靠的碳酸盐岩定年方法, 皖北中-新元古代沉积时限一直备受争议: 如潘国强等(2000)根据研究区内辉绿岩的 Ar-Ar 年龄认为皖北新元古代沉积时限为 604~723 Ma, 而柳永清等(2005)同样根据辉绿岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄认为是 976~1038 Ma。杨杰东等(2001)及郑文武等(2004)依据碳酸盐 Sr-C 同位素对比认为在 750~900 Ma 之间, 李双应等(2003)则认为区内史家组与淮南刘老碑组相同, 其 Rb-Sr 年龄为 840 Ma。由于上述时代争议, 对该区构造背景的认识也存在板内裂谷、被动大陆边缘和弧后盆地之争(潘国强等, 2000; 杨杰东等, 2001; 李双应等, 2003; 郑文武等, 2004; 柳永清等, 2005)。相比之下, 皖北新元古代大量出露的沉积岩尤其是部分与陆源碎屑有关的沉积岩, 有可能包含了重要的地质信息, 但目前此类研究较少。由于构造背景对沉积过程、物源及成岩作用存在影响, 不同类型或构造背景的沉积岩某些元素含量或比值存在系统差异(Bhatia, 1985), 因此对皖北新元古代沉积岩尤其是与陆源碎屑有关的沉积岩开展地球化学研究将有望为上述争议提供制约。

混积岩最早由杨朝青和沙庆安(1990)提出, 是指陆源碎屑与碳酸盐颗粒及灰泥混生在一起的一类沉积岩。有关混合沉积的分类及形成机制、沉积环境等已有学者进行了多次研究(张雄华, 2000; 沙庆安, 2001; 马艳萍等, 2003), 但地球化学方面的研究尚未引起关注, 相关的文献很少(Sun et al., in press)。在对皖北新元古代地层进行研究的过程中, 笔者等在其中发现了大量的混合沉积, 而其中又以贾园组混合沉积最为典型。在详细野外调查和岩石学分析的基础上, 进行了系统的主微量元素地球化学测试, 并结合最近研究进展, 对皖北新元古代沉积时限进行了重新考虑, 进而利用地球化学手段对贾园组混积岩的碎屑物源区特征及其所反映的构造背景进行了约束, 以期为探讨华北板块东南缘新元古代大地构造演化提供信息, 同时为混积岩地球化学研究提供参考。

## 1 区域地质背景及样品岩石学特征

研究区在构造上位于华北板块南缘淮北凹陷带, 更细分则归为灵璧台隆。在地层分区上, 属华北地层大区晋冀鲁豫地层分区徐州—宿县地层小区(安徽省地矿局, 1987)。往东距郯庐断裂带约 100 km, 现今的构造线以北西-南东为主, 主要受控于燕山期因扬子板块和华北板块挤压所导致的北西向挤压作用。区内新元古代地层从底到顶依次为贾园组、赵圩组、倪园组、九顶山组、张渠组和魏集组, 往西到栏杆乡可见史家组和望山组(图 1)。从图 1 地层柱可以看出, 区内新元古界沉积相以碳酸盐岩台地为主, 总体上属陆表浅海环境, 但沉积环境变化经历了由浅变深再变浅的沉积旋回。区内岩浆活动较少, 仅在研究区北部及栏杆乡南部可见少量辉绿岩脉侵入到倪园组、赵圩组、张渠组和望山组中(潘国强等, 2000; 柳永清等, 2005)。

本文研究样品取自皖北灵璧县北部渔沟镇北东约 12 km 土山贾园组(地理坐标: 33°56.02'N, 117°41.40'E, 图 1), 野外产状为 310°∠30°。岩性从底到顶变化明显, 底部以粉砂岩为主, 顶部以碳酸盐岩为主, 总体为连续变化, 碳酸盐组分逐渐增加, 与上部赵圩组以臼齿状灰岩为界。多数情况下碳酸盐颗粒与陆源碎屑颗粒为混合沉积(比较均一), 但也有部分以灰岩透镜体产出于混积岩中, 碎屑物含量较高的岩石中可见微细交错层理发育(图 2)。样品采集从顶往底进行, 岩石为黄色-灰黄色, 砂糖状断口, 碳酸盐组分为方解石, 自形程度较低, 粒度为 0.01~0.02 mm, 含量从 10% 到 60% 不等, 陆源碎屑组分以石英为主, 磨圆较好, 粒度在 0.2~0.4 mm 之间(少量颗粒较大, 达到了 1 mm), 含量为 40%~90%, 泥质含量较少(<5%)。按照张雄华(2000)给出的分类, 贾园组混积岩包括陆源碎屑质-碳酸盐混积岩、含碳酸盐-陆源碎屑混积岩和碳酸盐质-陆源碎屑混积岩, 而按照贾园组混合沉积的渐变特征, 在成因上属于相缘渐变沉积混合。

## 2 分析方法

全岩样品首先用切割机除去表面, 仅采用中间无裂隙且相对比较坚硬的部分, 随后将其碎至 1 cm<sup>3</sup> 左右的小块并用超纯水进行 3 次(每次 1 分钟)振荡清洗。然后用经清洗无污染的玛瑙研钵破碎至 200 目以下, 送实验室进行制样分析。样品主微量元素组

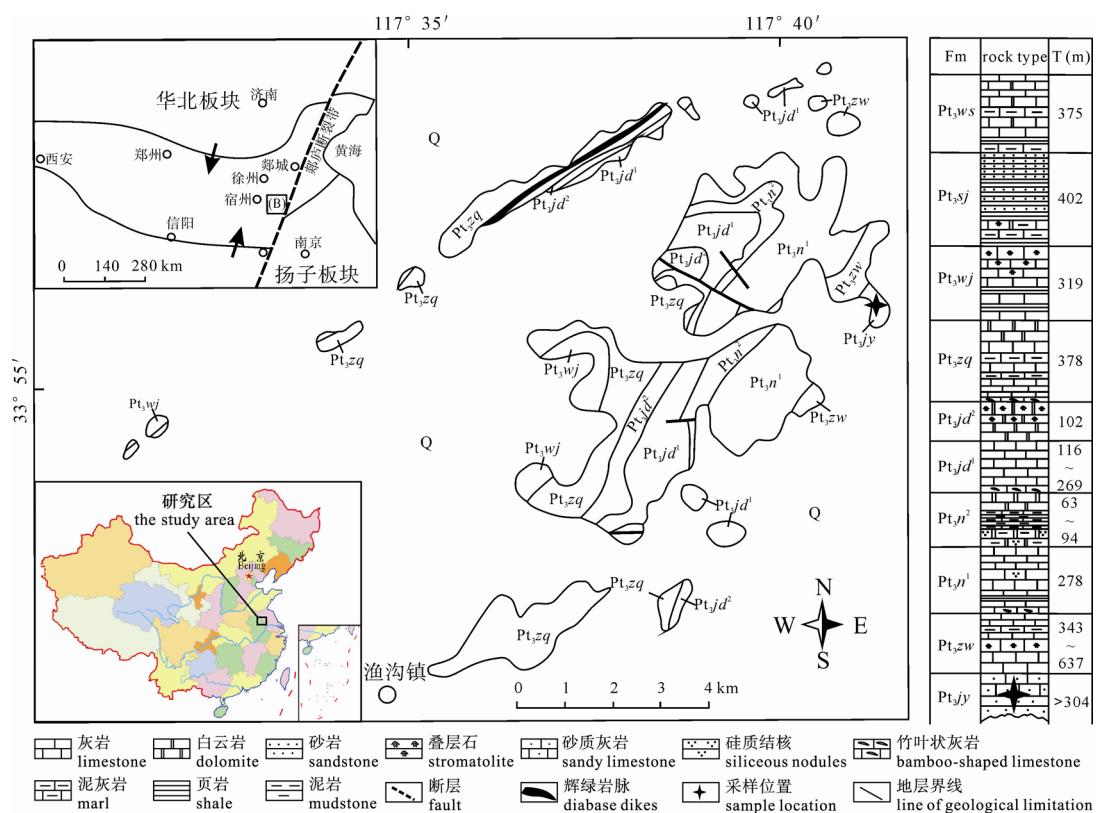


图 1 研究区地质简图及新元古代地层柱状图(图中箭头表示物源供给方向, 据李双应等 (2003) 修改)  
Fig. 1 Simplified geological map and Neoproterozoic stratigraphic column of the study area (arrows showing the source providing direction, modified after Li et al., 2003)

Pt<sub>3</sub>jy-贾园组; Pt<sub>3</sub>zw-赵圩组; Pt<sub>3</sub>n-倪园组; Pt<sub>3</sub>jd-九顶山组; Pt<sub>3</sub>zq-张渠组; Pt<sub>3</sub>wj-魏集组; Pt<sub>3</sub>sj-史家组; Pt<sub>3</sub>ws-望山组; Fm-组; T-厚度  
Pt<sub>3</sub>jy-Jiayuan Formation; Pt<sub>3</sub>zw-Zhaowei Formation; Pt<sub>3</sub>n-Niyuan Formation; Pt<sub>3</sub>jd-Jiudingshan Formation; Pt<sub>3</sub>zq-Zhangqu Formation;  
Pt<sub>3</sub>wj-Weiwei Formation; Pt<sub>3</sub>sj-Shijia Formation; Pt<sub>3</sub>ws-Wangshan Formation; Fm-Formation; T-Thickness

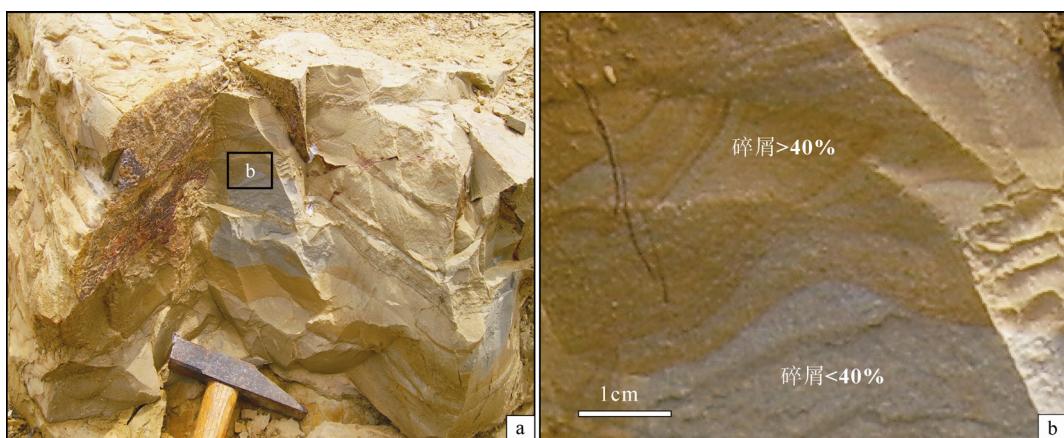


图 2 贾园组混积岩野外照片  
Fig. 2 Field observation of the diamictites in Jiayuan Formation

成均在广州地球化学研究所同位素年代学与地球化学重点实验室完成, 分别采用 XRF、ICP-MS 方法。XRF 主量元素分析方法与 Goto et al.(1994) 报道的相似, 分析精度优于 5%, ICP-MS 微量元素分析流程见刘颖等(1996), 大多数元素分析精度优于 3%。共测试了 9 个样品, 结果列于表 1、2。

### 3 结果

#### 3.1 主微量元素含量及其特征值

从表 1、2 可以看出, 因碳酸盐组分和陆源碎屑组分相对含量的变化(1:1.5 ~ 1:9), 贾园组混积岩的主微量元素含量变化较大。其 SiO<sub>2</sub> 和 CaO 含量较高,

表 1 贾园组混积岩主量元素(wt%)分析结果

Table 1 Analytical results of major oxides (wt%) of the diamictites in Jiayuan Formation

	09JY-1	09JY-2	09JY-3	09JY-4	09JY-5	09JY-6	09JY-7	09JY-8	09JY-9
SiO <sub>2</sub>	22.27	29.16	34.84	34.85	35.77	38.52	41.66	42.96	60.53
TiO <sub>2</sub>	0.23	0.63	0.48	0.37	0.31	0.56	0.85	0.58	0.71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.76	7.37	6.16	5.05	3.98	7.93	10.96	7.44	9.67
CaO	36.05	28.79	26.08	27.43	28.77	22.68	16.70	20.97	8.74
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.63	2.74	2.44	2.16	2.44	3.85	4.90	3.13	5.27
MgO	1.53	1.10	2.14	1.87	0.97	1.65	2.75	1.62	1.73
K <sub>2</sub> O	1.21	2.59	1.68	1.28	0.88	1.96	3.04	1.96	2.47
Na <sub>2</sub> O	0.39	0.05	0.43	0.64	0.04	0.05	0.22	0.35	0.75
MnO	0.07	0.09	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.11	0.12	0.11	0.10	0.11	0.12	0.12	0.15
LOI	32.39	26.72	25.14	25.88	26.39	22.24	18.36	20.57	9.57
Total	99.63	99.34	99.57	99.71	99.72	99.61	99.74	99.64	

注: LOI-烧失量(H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub>)表 2 贾园组混积岩微量元素( $\times 10^{-6}$ )分析结果Table 2 Analytical results of trace elements ( $\times 10^{-6}$ ) of the diamictites in Jiayuan Formation

	09JY-1	09JY-2	09JY-3	09JY-4	09JY-5	09JY-6	09JY-7	09JY-8	09JY-9
Sc	3.87	9.30	7.07	5.24	2.84	8.62	12.4	8.04	9.82
V	24.7	56.1	40.3	28.2	23.3	51.8	79.4	45.4	62.0
Cr	8.33	36.6	23.4	18.3	11.5	36.6	62.7	30.6	45.9
Co	9.43	13.5	10.1	10.3	14.8	14.5	12.4	13.6	40.5
Ni	10.2	16.5	11.9	11.4	13.5	19.5	21.2	14.5	24.1
Rb	42.3	105	66.2	47.7	28.5	81.2	127	77.3	86.8
Sr	927	425	645	739	609	444	347	491	267
Y	15.2	17.5	21.5	19.2	14.9	20.7	21.1	21.3	24.9
Zr	50.8	112	133	152	138	120	155	197	242
Nb	3.72	10.0	7.41	5.71	4.85	8.60	13.3	8.76	12.1
Ba	126	434	258	202	129	331	486	320	381
La	14.2	20.7	23.3	19.4	13.1	23.9	28.4	27.5	30.5
Ce	29.6	41.4	48.4	41.0	26.6	48.2	55.6	56.5	60.9
Pr	3.79	5.12	5.97	5.06	3.42	5.97	6.75	7.05	7.62
Nd	15.0	19.2	23.2	19.9	13.6	23.2	24.6	26.5	29.0
Sm	3.22	3.72	4.55	3.91	2.86	4.54	4.46	4.93	5.60
Eu	0.783	0.828	0.951	0.849	0.665	0.971	0.896	0.963	1.09
Gd	3.23	3.60	4.41	3.73	2.91	4.29	4.00	4.58	5.18
Tb	0.497	0.562	0.676	0.594	0.451	0.667	0.636	0.688	0.791
Dy	2.78	3.35	3.90	3.56	2.63	3.79	3.87	4.01	4.60
Ho	0.546	0.680	0.777	0.715	0.531	0.767	0.808	0.820	0.947
Er	1.45	2.00	2.22	1.98	1.48	2.13	2.33	2.32	2.67
Tm	0.206	0.296	0.323	0.293	0.215	0.317	0.355	0.338	0.392
Yb	1.33	1.98	2.09	1.89	1.42	2.07	2.34	2.20	2.66
Lu	0.196	0.294	0.323	0.294	0.227	0.316	0.358	0.347	0.421
Hf	1.40	3.29	3.82	4.18	3.82	3.36	4.50	5.59	6.88
Ta	0.303	0.778	0.592	0.473	0.406	0.686	1.06	0.726	1.05
Th	4.39	11.3	9.41	7.54	5.74	9.75	14.9	12.1	13.5
$\Sigma$ REE	76.778	103.634	121.144	103.093	70.073	121.131	135.458	138.73	152.364
La/Yb	10.7	10.4	11.1	10.2	9.2	11.5	12.1	12.5	11.4
Ce/Ce*	0.99	0.99	1.01	1.02	0.97	0.99	0.98	1.00	0.98
Eu/Eu*	0.74	0.69	0.65	0.68	0.70	0.67	0.65	0.62	0.62
Nd <sub>SN</sub> /Yb <sub>SN</sub>	0.94	0.80	0.92	0.88	0.79	0.93	0.87	1.00	0.90

注: Ce/Ce\*=Ce<sub>SN</sub>/SQRT(La<sub>SN</sub>×Pr<sub>SN</sub>), Eu/Eu\*=Eu<sub>SN</sub>/SQRT(Sm<sub>SN</sub>×Gd<sub>SN</sub>), SN 表示 PAAS 标准化

分别为 22.27%~60.53% 和 8.74%~36.05%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  相对较高(3.76%~10.96%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为 1.63%~5.27%,  $\text{MgO}$  和  $\text{K}_2\text{O}$  含量分别为 0.97%~2.75% 和 0.88%~3.04%, 其余主量元素氧化物含量均小于 1%, 如  $\text{TiO}_2=0.23\%~0.85\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}=0.04\%~0.75\%$ 。在所有主量元素中,  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  之间具有较好的正相关, 而与  $\text{CaO}$ 、 $\text{MnO}$  之间呈现负相关关系(图 3), 暗示  $\text{CaO}$ 、 $\text{MnO}$  主要与海相碳酸盐沉积有关, 而其他元素主要受陆源碎屑的影响。同主量元素一致, 与陆源碎屑有关的元素如  $\text{Sc}$ 、 $\text{V}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Co}$ 、 $\text{Zr}$ 、 $\text{Hf}$ 、 $\text{Th}$  及 REE 等元素含量变化均较大, 但均与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  具有较好的正相关(图 3), 而  $\text{Sr}$  则与  $\text{CaO}$  具有较好的正相关性。

因为具有较好的相关性, 贾园组混积岩具有稳定的  $\text{La}/\text{Th}$  和  $\text{Th}/\text{Sc}$  值, 分别为 1.83~3.22(平均 2.53) 和 1.13~2.02(平均 1.57), 但  $\text{Zr}/\text{Sc}$  值变化较大, 为 12.1~48.4(平均 30.21)。上述比值均和样品  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量没有明显的线性相关性(图 4), 反映陆源碎屑物质对混积岩的上述比值具有明显的控制作用。这些相对稳定的比值为利用混积岩的地球化学特征识别构造背景提供了前提。

利用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{CaO}$  的负相关性及其与陆源碎屑有关的元素如  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、REE、 $\text{Sc}$ 、 $\text{Hf}$  等的正相关性, 假定陆源碎屑物中  $\text{CaO}$  含量为 0, 可以大致估计出陆源碎屑物的  $\text{SiO}_2$  含量为约 68.63%,  $\text{La}$  含量为  $38.8 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Hf}$  含量为  $8.23 \times 10^{-6}$ 。这种推断陆源碎屑组分元素含量的方法基于两个原因: 1) 陆源碎屑组分元素含量与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的相关性以及相应比值的稳定性; 2) 这一做法与部分研究者在研究沉积物物源特征时用盐酸剔除海相自生沉积物的方法(邵磊等, 2001) 具有相似性。

### 3.2 稀土元素 PAAS 标准化配分型式

贾园组混积岩稀土元素后太古代平均页岩(PAAS, 据 McLennan, 1989) 标准化配分图解见图 5。总体而言, 贾园组混积岩稀土总量变化较大( $\sum \text{REE} = 70.1 \times 10^{-6} \sim 152 \times 10^{-6}$ ) 且与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  具有明显的正相关, 轻稀土相对重稀土在总量上明显富集, 表现为具有变化较小的  $\text{La}/\text{Yb}$  值(9.2~12.5, 平均 11.0)。经 PAAS 标准化后, 贾园组混积岩具有较为平坦的稀土配分型式, 但轻、重稀土相对中稀土而言存在轻微亏损, 且这种亏损程度随着碳酸盐组分的增加而缓慢增大的趋势。除重稀土略微富集外,

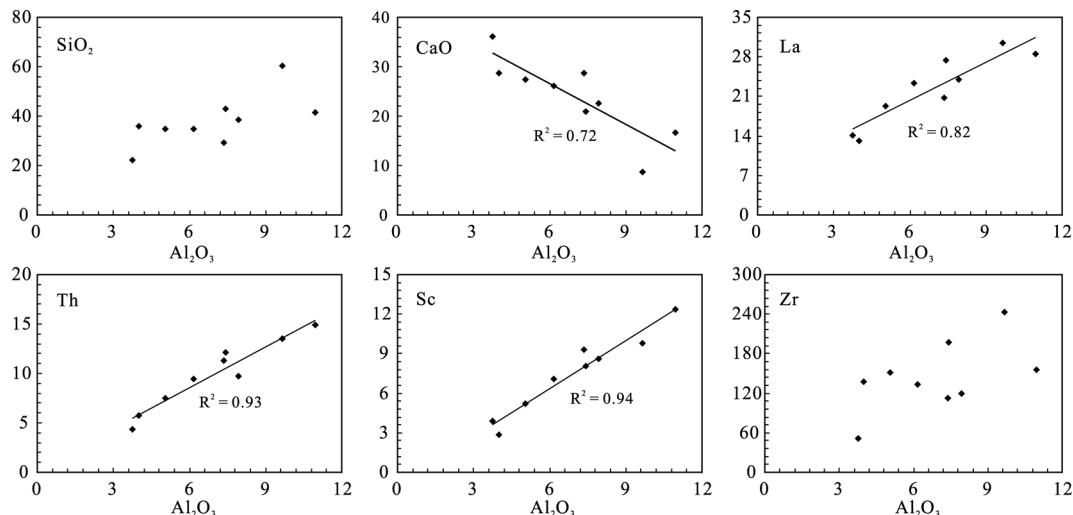


图 3 贾园组混积岩  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与部分主微量元素相关性图解

Fig. 3 Correlations between  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and selected major oxides and trace elements of the diamictites in Jiayuan Formation

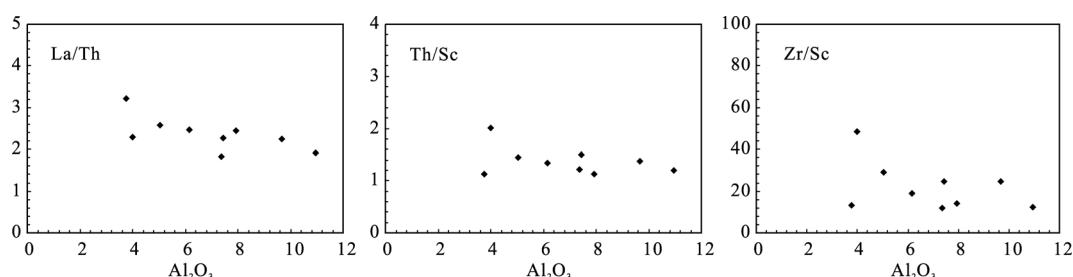


图 4 贾园组混积岩  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{La}/\text{Th}$ 、 $\text{Th}/\text{Sc}$  及  $\text{Zr}/\text{Sc}$  相关性图解

Fig. 4  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{La}/\text{Th}$ ,  $\text{Th}/\text{Sc}$  and  $\text{Zr}/\text{Sc}$  diagrams of the diamictites in Jiayuan Formation

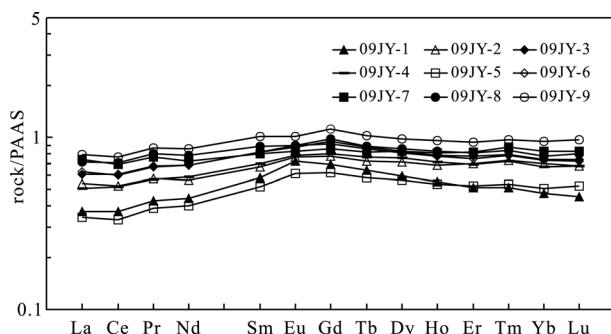


图 5 贾园组混积岩稀土元素 PAAS 标准化配分型式(标准化数据引自文献 McLennan, 1989)

Fig. 5 PAAS normalized REE patterns of the diamictites in Jiayuan Formation (data for normalization from McLennan, 1989)

总体与上地壳中平均稀土元素的分配型式相似。同时, 样品的  $Y/Ho$  值为 25.7~28.1, 也接近 PAAS 的相应比值。

相近的稀土元素特征表明贾园组混积岩的陆源碎屑组分来源比较单一且稳定。贾园组混积岩中未出现明显 Ce 异常, 明显不同于海相沉积物中常见的 Ce 的负异常, 这一方面可能与沉积环境无明显的氧化或还原条件, 另一方面也进一步证实了碳酸盐组分对混积岩稀土元素特征的影响较弱, 其稀土元素特征在很大程度上受控于陆源碎屑组分。此外, 贾园组混积岩由于  $Ce/Ce^*$  及  $Eu/Eu^*$  变化较小, 分别为 0.62~0.74 和 0.97~1.02, 所以  $\Sigma REE$ 、 $Ce/Ce^*$  及  $Eu/Eu^*$  之间没有明显的相关性, 表明后期成岩作用对其稀土元素特征没有明显影响(刘士林等, 2006)。

## 4 讨论

如前所述, 对华北板块东南缘新元古代大地构造演化存在较大争议。鉴于沉积时限在探讨区域大

地构造演化中的重要性, 下文首先结合最近的研究进展, 对其沉积时限进行了重新思考, 然后就贾园组混积岩地球化学所反映的碎屑物质来源和构造背景进行讨论。

### 4.1 沉积时限的重新考虑

总体而言, 从区内沉积特征来看, 自下部贾园组开始直到史家组, 相当于一个完整的海侵-海退的过程, 然后到望山组, 又开始了新的海侵。如果同时考虑到贾园组之下的岠山组、新兴组和兰陵组(均以陆源碎屑组分为主, 且兰陵组和下部泰山群呈现不整合接触, 安徽省地矿局, 1987), 可以发现, 区内经历了裂解下陷(从兰陵组开始)—接受海相碳酸盐沉积(从贾园组到魏集组)—隆升(史家组)—再次下陷接受海相沉积(望山组)的旋回。存在的问题是, 第一次下陷和第二次下陷到底谁应该对应于 Rodinia 超大陆的裂解, 是第一次与 Rodinia 超大陆汇聚有关抑或第二次与超大陆的裂解有关?

因为区内辉绿岩普遍风化较为严重, 而 Ar-Ar 法年龄容易受到后期热事件的影响, 从而使得对辉绿岩形成年龄的估计偏低, 但锆石的封闭温度较高不易受后期热事件的影响, 因此 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄的可靠性要高于 Ar-Ar 法。其次, 杨杰东等(2001)和郑文武等(2004)所报道的 Sr-C 同位素对比年龄主要依据的是 Shields(1999)在 0.9~0.5 Ga 之间的同位素演化曲线, 如果真实的沉积年龄大于 0.9 Ga, 则无法在图上得以正确体现。反之, 利用杨杰东等(2001)报道的数据, 以 Kumar et al.(2002)总结的中-新元古代海水 Sr 同位素演化曲线作为对比, 皖北新元古代沉积的时限有可能在 0.8~1.0 Ga 之间(图 6a), 且数据能够较好的拟合, 而不存在杨杰东

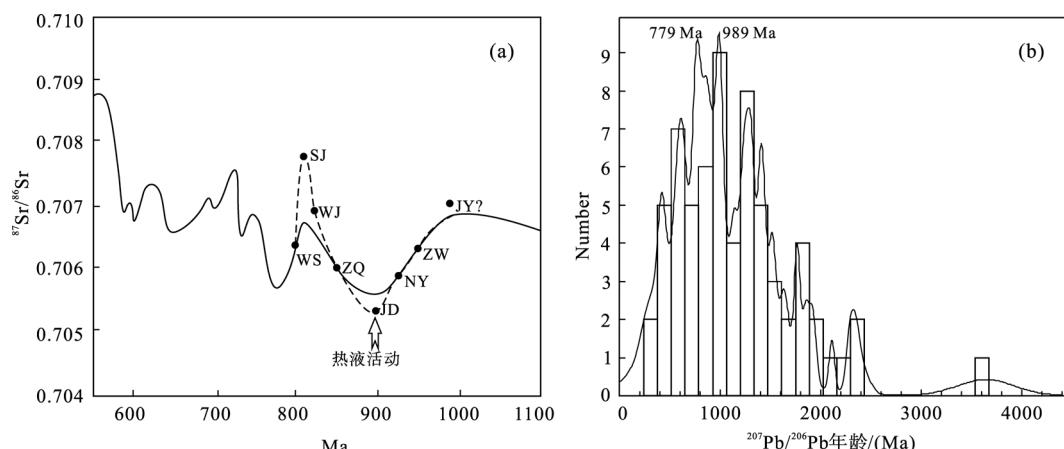


图 6 (a) 皖北中元古代-寒武纪海水  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  曲线与世界中元古代-寒武纪  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  对比(数据引自杨杰东等(2001); 底图据 Kumar et al. (2002), WS、SJ 等均为图 1 中地层组名拼音缩写); (b) 皖北新元古代辉绿岩锆石  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄频率分布图(课题组未发表数据)

Fig. 6 (a) Comparison of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  isotopic curve (from Mesoproterozoic to Cambrian) between northern Anhui Province and the world (data from Yang et al. (2001); Sr isotopic curve of seawater from Kumar et al. (2002); WS, SJ etc. signifying abbreviations of the names of Formations in Fig.1); (b)  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  age frequency of zircons from the Neoproterozoic diabases in northern Anhui Province (unpublished data)

等(2001)和郑文武等(2004)中出现的时代冲突问题(如史家组年龄大于赵圩组)。此外, 赵圩组和倪园组投点的年龄(0.9~1.0 Ga 之间)与柳永清等(2005)报道的侵入于赵圩组和倪园组的辉绿岩的 SHRIMP U-Pb 年龄(976~1038 Ma)更为接近, 同时和我们最近对辉绿岩锆石进行的 La-ICP-MS 测年结果(图 6b, 课题组未发表数据)所表现出来的存在 989 Ma 的峰值年龄接近, 而对史家组年龄的估计也与李双应等(2003)报道的相似。

因此, 皖北新元古代沉积时限更可能在 0.8~1.0 Ga 之间(从贾园组到望山组), 该时期可能有两次重要地质事件的参与: 史家组沉积之前(>0.84 Ga)的裂解可能与 Rodinia 超大陆汇聚过程中的弧后盆地有关(柳永清等, 2005; 李双应等, 2003; 孙林华等, 2010a), 而史家组及其之后的沉积构造背景目前尚无法确认, 不排除与超大陆的裂解有关。但考虑到李双应等(2003)曾报道刘老碑组(对应于皖北史家组)具有较高的化学风化指数, 故这一推断需要通过进一步的研究来确认。

#### 4.2 构造背景及物源探讨

由于沉积时限的不确定性, 导致对区域大地构造演化的认识存在争议。从前人研究成果来看, 因时代不同导致的对构造背景的认识主要分为三种: 板内裂谷、被动大陆边缘和弧后盆地。如果在时代上与 Rodinia 超大陆的汇聚与裂解相对应, 则前两者更接近于裂解阶段(0.6~0.9 Ga), 而后者更倾向于对应 Rodinia 大陆汇聚阶段(>0.9 Ga)(Li et al., 2008)。

地球化学手段被广泛应用于地质过程、构造背景及岩石成因等方面的研究。早期主要集中在火成岩(Pearce et al., 1973; Winchester et al., 1979), 后期

则被扩展到应用于探讨沉积岩的构造背景与物源性质(Bhatia, 1983; Bhatia et al., 1986; 徐田武等, 2007; 张传恒等, 2009)。就目前而言, 地球化学对沉积岩源区和构造背景的约束主要基于在风化或搬运过程中相对稳定元素(如稀土、Th、Sc、Zr、Co 等)的含量或比值(Bhatia, 1985)。

受岩石样品中较高含量的碳酸盐组分(10%~60%)影响, 同时考虑到 Na、K、Ca、Mg 等元素可能受后期风化作用的影响而丢失, 从而引起对构造背景的误判。在下文的讨论中, 选择了 La、Th、Sc、Zr 等不易受后期风化作用改造的元素进行, 而没有采用主量元素判别图解。此外, 由于样品的 La、Th、Sc、Zr 之间具有较好的协变性, 其相互之间的比值与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  之间没有明显的相关性而基本稳定(图 4), 表明其比值未受到碳酸盐组分多少的影响而主要受控于陆源碎屑, 因此可以用于构造背景的判别。

从图 7 可以看出, 无论是在 Th-Sc-Zr/10 还是 La-Th-Sc 判别图解上, 贾园组混积岩基本上落在了大陆岛弧的范围之内, 但比较靠近活动大陆边缘和被动大陆边缘, 这一结果表明, 贾园组混积岩的碎屑组分可能主要来自与大陆岛弧构造背景有关的环境, 但也存在稳定基底物质的参与, 这一认识与 Sun et al.(in press)根据皖北新元古代其他组碳酸盐岩及混积岩所取得的认识相同。

此外, 利用稀土元素的非迁移性, Bhatia(1985)总结了判别沉积盆地构造背景的 REE 参数和稀土分布特征, 经对比可以发现, 贾园组混积岩的 La/Yb 比较稳定(9.22~12.49), 且与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  之间没有明显相关性, 接近大陆岛弧和安第斯型大陆边缘的相应比值( $11.0 \pm 3.6$  和 12.5)。进一步通过稀土总量、La

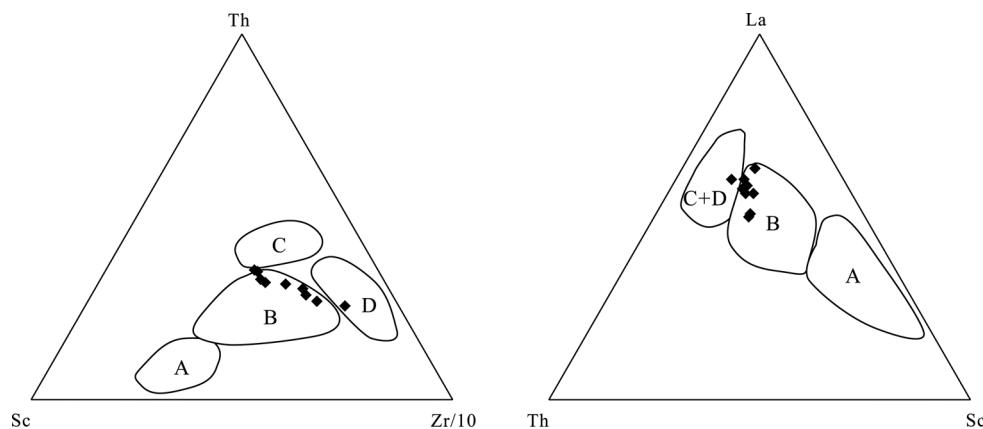


图 7 贾园组混积岩 Th-Sc-Zr/10 及 La-Th-Sc 判别图(底图据 Bhatia and Crook, 1986)  
Fig. 7 Th-Sc-Zr/10 and La-Th-Sc discrimination diagrams of the diamictites in Jiayuan Formation  
(after Bhatia and Crook, 1986)

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 arc; B-continental arc; C-active continental margin; D-passive continental margin

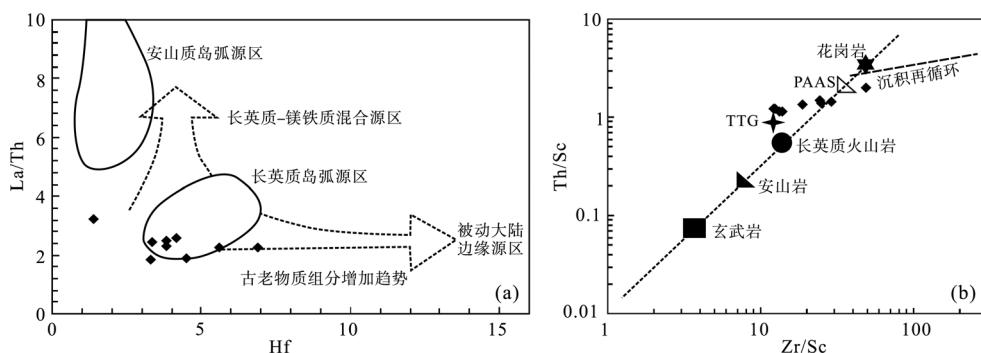


图 8 贾园组混积岩 Hf-La/Th 及 Zr/Sc-Th/Sc 图解(a、b 底图分别引自 Floyd and Leveridge, 1987 和 McLennan et al., 1993)

Fig. 8 Hf-La/Th (after Floyd and Leveridge, 1987) and Zr/Sc-Th/Sc (after McLennan et al., 1993) diagrams of the diamictites in Jiayuan Formation

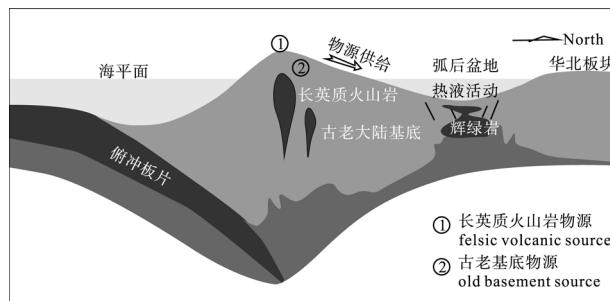


图 9 皖北新元古代构造背景示意图

Fig. 9 Diagrammatic map showing Neoproterozoic tectonic setting of northern Anhui Province

及 Ce 含量与 CaO 之间的协变关系(假定混积岩中碎屑组分的 CaO 含量为零), 得出的稀土总量、La 及 Ce 含量与大陆岛弧和安第斯型大陆边缘的相应值同样很接近。

在进一步的物源分析中, 利用 Hf-La/Th 图解进行了识别(图 8a), 可以看出, 贾园组碎屑组分主要来自于长英质岛弧源区, 但存在少量被动大陆边缘物质的参与。此外, 在 Zr/Sc-Th/Sc 图解上(图 8b), 贾园组混积岩主要分布于 TTG、长英质火山岩和 PAAS 之间, 同样支持上述认识。同时, 在图 8b 中还可以发现, 贾园组陆源碎屑物质未发生明显的沉积循环, 应该是直接从长英质火山岩及古老基底源区直接搬运沉积的产物。

综上可知, 贾园组混积岩的碎屑物质可能主要来自于与大陆岛弧有关的构造背景, 结合前文所述的沉积时限(0.8~1.0 Ga)及辉绿岩(潘国强等, 2000; 柳永清等, 2005)和热液活动(严贤勤等, 2006; 孙林华等, 2010b)发育的事实, 推测其形成与 Rodinia 超大陆汇聚过程中导致的大陆岛弧及弧后盆地有关。在弧后盆地的发育过程中, 由于岛弧火山作用的存在, 为贾园组沉积提供了大量的物源, 而不可避免的, 一部分原古老基底的物质也参与了沉积(图 6 辉

绿岩中发现的约 36 亿年的锆石可能就是古老基底来源)。同时, 在弧后盆地裂解过程中, 产生了辉绿岩侵入体, 且在包括倪园组和九顶山组在内的沉积中发育了热液沉积活动(图 9)。

尽管以前有研究者曾认为中-新元古代时期(特别是晋宁期)曾发生过洋壳向华北板块南缘的俯冲(Wang et al., 1984; 刘波等, 1999), 但目前尚没有确切的年代学依据可以证实在华北板块南部曾经存在过岛弧火山作用, 是否被中新生代大规模的构造运动所改造? 因此, 进一步的研究工作, 尤其是年代学研究(包括华北板块南缘火山作用年代学及碎屑锆石年代学)工作仍有待进行。

## 5 结论

通过对皖北新元古代贾园组混积岩的地球化学分析, 并结合前人研究成果, 取得了如下认识:

1) 贾园组混积岩主要由碳酸盐组分和陆源碎屑组分经不同比例(1: 1.5~1: 9)混合而成, 属于相缘渐变沉积混合;

2) 混积岩中陆源碎屑组分主要是与大陆岛弧有关的长英质火山岩, 但也存在少量古老基底物质的参与;

3) 皖北新元古代沉积时限可能在 1.0~0.8 Ga 之间, 其沉积环境与 Rodinia 超大陆汇聚过程中导致的华北板块东南缘弧后伸展有关。

## 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.
- 刘波, 钱祥麟, 王英华. 1999. 华北板块早古生代构造-沉积演化[J]. 地质科学, 34(3): 347-356.
- 刘士林, 刘蕴华, 林舸, 周叶, 龚发雄, 张德圣. 2006. 渤海湾盆地南堡凹陷新近系泥岩稀土元素地球化学特征及其地质意

- 义[J]. 现代地质, 20(3): 449-456.
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用ICP-MS准确测定岩石样品中的40余种微量元素[J]. 地球化学, 25(6): 552-558.
- 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.
- 陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 郝国杰, 周红英, 相振群. 2004b. 秦岭造山带中-新元古代(早期)地质演化[J]. 地质通报, 23(2): 107-112.
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 于海峰, 金巍, 郭坤一. 2004a. 新元古代时期中国古大陆与罗迪尼亞超大陆的关系[J]. 地学前缘, 11(2): 515-523.
- 马艳萍, 刘立. 2003. 大港海滩区第三系湖相混积岩的成因与成岩作用特征[J]. 沉积学报, 21(4): 607-613.
- 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.
- 沙庆安. 2001. 混合沉积与混积岩的讨论[J]. 古地理学报, 3(3): 63-66.
- 邵磊, 李献华, 韦刚健, 刘颖, 房殿勇. 2001. 南海陡坡高速堆积体的物质来源[J]. 中国科学(D辑), 31(10): 828-833.
- 孙林华, 桂和荣, 贺振宇, 陈松, 马艳平. 2010b. 皖北新元古代硅质灰岩的发现及其地质意义[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 33(1): 110-116.
- 孙林华, 桂和荣. 2010a. 皖北新元古代大地构造演化研究进展[J]. 安徽地质, 20(1): 20-24.
- 王涛, 张宗清, 王晓霞, 王彦斌, 张成立. 2005. 秦岭造山带核部新元古代碰撞变形及其时代——强变形同碰撞花岗岩与弱变形脉体锆石SHRIMP年龄限定[J]. 地质学报, 79(2): 220-231.
- 徐田武, 王英民, 曾溅辉, 陈莉琼, 朱志强, 李明刚. 2007. 苏北盆地高邮——海安地区晚白垩世泰州组沉积相及物源分析[J]. 地球学报, 28(6): 627-634.
- 严贤勤, 孟凡巍, 袁训来. 2006. 徐淮地区新元古代九顶山组燧石结核的地球化学特征[J]. 微体古生物学报, 23(3): 295-302.
- 杨朝青, 沙庆安. 1990. 云南曲靖盆地中泥盆统曲靖组的沉积环境: 一种陆源碎屑和海相碳酸盐的混合作用[J]. 沉积学报, 8(2): 59-65.
- 杨杰东, 郑文武, 王宗哲, 陶仙聪. 2001. Sr、C同位素对苏皖北部上前寒武系时代的界定[J]. 地层学杂志, 25(1): 44-47.
- 张臣. 2004. 华北克拉通北缘中段新元古代热-构造事件及其演化[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 40(2): 232-240.
- 张传恒, 刘耀明, 史晓颖, 高林志, 张聪. 2009. 下江群沉积地质特征及其对华南新元古代构造演化的约束[J]. 地球学报, 30(4): 495-504.
- 张雄华. 2000. 混积岩的分类与成因[J]. 地质科技情报, 19(4): 31-34.
- 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.
- 郑永飞. 2003. 新元古代岩浆活动与全球变化[J]. 科学通报, 48(16): 1705-1720.
- References:**
- 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).
- BHATIA M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. Journal of Geology, 91: 611-627.
- BHATIA M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic greywackes and mudstones: provenance and tectonic control[J]. Sedimentary Geology, 45: 97-113.
- BHATIA M R, CROOK K A W. 1986. Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. Contribution of Mineral and Petrology, 92: 181-193.
- 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.
- GOTO A, TATSUMI Y. 1994. Quantitative analysis of rock samples by an X-ray fluorescence spectrometer[J]. The Rigaku Journal, 11: 40-59.
- 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: 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]. Acta Geologica Sinica, 38(2): 241-253(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, FUCK R A, GLADKOCHEB D P, JACOBS J, KARLSTROM K E, LU S, NATAPOV L M, PEASE V, PISAREVSKY S A, THRANE K, VEMIKOVSKY V. 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis[J]. Precambrian Research, 160(1-2): 179-210.
- LIU Bo, QIAN Xiang-lin, WANG Ying-hua. 1999. Tectono-sedimentary evolution of North China Plate in early Paleozoic[J]. Chinese Journal of Geology, 34(3): 347-356(in Chinese with English abstract).
- LIU Shi-lin, LIU Yun-hua, LIN Ge, ZHOU Ye, GONG Fa-xiong, ZHANG De-sheng. 2006. REE geochemical characteristics and geological significance of mudstone from Neogene, Nanpu Sag, Bohai Basin[J]. Geoscience, 20(3): 449-456(in Chinese with English abstract).
- LIU Ying, LIU Hai-chen, LI Xian-hua. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements using ICP-MS[J]. Geochemica, 25(6): 552-558(in Chinese with English abstract).
- 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).
- LU Song-nian, LI Huai-kun, CHEN Zhi-hong, YU Hai-feng, JIN Wei, GUO Kun-yi. 2004a. Relationship between Neoproterozoic cratons of China and Rodinia[J]. Earth Science Frontiers, 11(2): 515-523(in Chinese with English abstract).

- LU Song-nian, CHEN Zhi-hong, LI Huai-kun, HAO Guo-jie, ZHOU Hong-ying, XIANG Zhen-qun. 2004b. Late Mesoproterozoic-early Neoproterozoic evolution of the Qinling Orogen[J]. Geological Bulletin of China, 23(2): 107-112(in Chinese with English abstract).
- MA Yan-ping, LIU Li. 2003. Sedimentary and diagenetic characteristics of Paleogene lacustrine “Hunji” rock in beach district, Dagang[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 21(4): 607-613(in Chinese with English abstract).
- MCLENNAN S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes[C]//LIPIN B R, MCKAY G A. Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. Reviews in Mineralogy, 21: 169-200.
- MCLENNAN S M, HEMMING S, MCDANIEL D K, HANSON G N. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[C]//JOHNSON M J, BASU A. Processes controlling the composition of clastic sediments. Geological Society of America(Special Paper), 284: 21-40.
- 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).
- PEARCE J A, CANN J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. Earth and Planetary Science Letter, 19: 290-300.
- SHA Qing-an. 2001. Discussion on mixing deposit and Hunji Rock[J]. Journal of Palaeogeography, 3(3): 63-66(in Chinese with English abstract).
- SHAO Lei, LI Xian-hua, WEI Gang-jian, LIU Ying, FANG Dian-yong. 2001. Provenance of the high-deposition-rate sediment drift in the slope of the South China Sea[J]. Science in China(Series D), 31(10): 828-833(in Chinese).
- SHIELDS G A. 1999. Working towards a new stratigraphic calibration scheme for the Neoproterozoic-Cambrian[J]. Eclogae Geologicae Helveticae, 92: 221-233.
- SUN Lin-hua, GUI He-rong. 2010a. Advanced in study of Neoproterozoic geotectonic evolution in northern Anhui Province[J]. Geology of Anhui, 20(1): 20-24(in Chinese with English abstract).
- SUN Lin-hua, GUI He-rong, HE Zhen-yu, CHEN Song, MA Yan-ping. 2010b. Discovery of Neo-Proterozoic siliceous limestone in northern Anhui Province and its geological significance[J]. Journal of Hefei University of Technology (Nature Science Edition), 33(1): 110-116(in Chinese with English abstract).
- SUN Lin-hua, GUI He-rong, CHEN Song, MA Yan-ping, HE Zhen-yu. Geochemical characteristics of the Neoproterozoic carbonates from northern Anhui Province, China, and their geological significances[J]. Chinese Journal of Geochemistry(in press).
- WANG Hong-zhen, QIAO Xiu-fu. 1984. Proterozoic stratigraphy and tectonic framework of China[J]. Geological Magazine, 121(6): 599-614.
- WANG Tao, ZHANG Zong-qing, WANG Xiao-xia, WANG Yan-bin, ZHANG Cheng-li. 2005. Neoproterozoic collisional deformation in the core of the Qinling Orogen and its age: constrained by zircon SHRIMP dating of strongly deformed syn-collisional granites and weakly deformed granitic veins[J]. Acta Geologica Sinica, 79(2): 220-231(in Chinese with English abstract).
- WINCHESTER J A, FLOYD P A. 1997. Geochemical discrimination of different magma series and the differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 20: 325-343.
- XU Tian-wu, WANG Ying-min, ZENG Jian-hui, CHEN Li-qiong, ZHU Zhi-qiang, LI Ming-gang. 2007. Sedimentary facies and provenance analysis of late Cretaceous Taizhou Formation in Gaoyou-Haian depression, north Jiangsu (Subei) Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 28(6): 627-634(in Chinese with English abstract).
- YAN Xian-qin, MENG Fan-wei, YUAN Xun-lai. 2006. Geochemical characteristics of the cherts of the Neoproterozoic Jiudingshan Formation in northern Jiangsu and Anhui Province[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 23(3): 295-302(in Chinese with English abstract).
- YANG Chao-qing, SHA Qing-an. 1990. Environment of Qujing Formation of Yunnan Qujing: A mixed sedimentation of marine carbonates and terrigenous clastics[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 8(2): 59-65(in Chinese with English abstract).
- 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).
- ZHANG Chen. 2004. Hot-Tectonic Events and Evolution of North Margin of the North China Craton in Meso-Neoproterozoic[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 40(2): 232-240(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Chuan-heng, LIU Yao-ming, SHI Xiao-yin, GAO Lin-zhi, ZHANG Cong. 2009. Sedimentological features of the Xiajiang Group and their constrains on the Neoproterozoic tectonic evolution of south China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(4): 495-504(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xiong-hua. 2000. Classification and origin of mixosedimentite[J]. Geological Science and Technology Information, 19(4): 31-34(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Wen-wu, YANG Jie-dong, HONG Tian-qi, 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).
- ZHENG Yong-fei. 2003. The Neoproterozoic magmatism and global climate change[J]. Chinese Science Bulletin, 48(16): 1705-1720(in Chinese).