

江西省早古生代晚期花岗岩的地球化学特征及其地质意义*

张芳荣^{1,2} 沈渭洲¹ 舒良树^{1**} 向磊¹

ZHANG FangRong^{1,2}, SHEN WeiZhou¹, SHU LiangShu^{1**} and XIANG Lei¹

1. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093

2. 江西省地质调查研究院, 南昌 330030

1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2. Geological Inquiry and Investigation Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330030, China

2009-09-27 收稿, 2010-11-18 改回.

Zhang FR, Shen WZ, Shu LS and Xiang L. 2010. Geochemical features of granites formed at late stage of Early Paleozoic in Jiangxi Province and their geological significances. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12):3456–3468

Abstract Granitic plutons, Shangyou, Doushui, Longhui and Luean, as important members of granites formed at late stage of Early Paleozoic in Jiangxi Province, are characterized by higher SiO₂ content (an average of 73.80%), K₂O/Na₂O ratio (an average of 1.33) and ACNK value (an average of 1.05). They possess distinct enrichment in large ion elements, negative anomaly in Ba, Sr, P and Ti, enrichment in LREEs (an average LREE/HREE of 6.78) and depletion in Eu (an average δEu of 0.39). Isotopically, they have relatively high $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ value (an average of -5.7) and young Nd model age (an average of 1617Ma). In the ACF and (La/Yb)_N- δEu diagrams, they are plotted in the field of S-type or crustal derived type granite. In the $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -t diagram, they are located in the Proterozoic crustal evolution domain in South China. In the Rb/Sr-Rb/Ba and A/MF-C/MF diagrams, they are plotted in the partial melting source field of protolith of argillite and psammite, but not in that of mantle-derived mafic rocks. In addition, Early Paleozoic mantle-derived magmatic rocks have not been found in the studied area. These characteristics indicate that granites formed at late stage of Early Paleozoic in the studied area are belonged to the S-type or crustal derived type granites. Geogenesis of the granitoids is thought being related to the intra-plate tectonism during the late stage of Early Paleozoic. Under the regional compression stress field in the early stage, Wuyi, Nanling and Central Jiangxi blocks collision each other and then accreted onto the southeastern Yangtze block. Later on, the studied area changed into post-collisional extension environment due to a transform of regional stress field, leading to partial melting of the low mature muddy-sandy rocks under influence of pressure reduction and water infiltration in the middle-upper crust, and formation of S-type or crustal derived type granites.

Key words Element and isotopic geochemistry; Granites formed at late stage of Early Paleozoic; Intracontinental orogeny; S-type or crustal derived type granite; Jiangxi Province

摘要 上犹、陡水、龙回和乐安岩体是江西省早古生代晚期花岗岩的重要组成部分。它们具有较高的 SiO₂ 含量(平均 73.80%)、K₂O/Na₂O 比值(平均为 1.33)和 ACNK 值(平均为 1.05);大离子元素明显富集, Ba、Sr、P、Ti 负异常明显;轻稀土元素富集(LREE/HREE 比值平均为 6.78), Eu 亏损相对明显(δEu 值平均为 0.39)。同时, 它们具有稍高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(平均为 -5.7)和相对年轻的 Nd 模式年龄(平均为 1617Ma)。它们在 ACF 和 (La/Yb)_N- δEu 图解中, 投影于 S 型或壳源型花岗岩范围内; 在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -t 图解中, 位于华南元古代地壳演化域内; 在 Rb/Sr-Rb/Ba 和 A/MF-C/MF 图解中, 它们的源区物质是泥质岩和砂质岩而不是幔源基性岩; 此外, 在研究区域内, 迄今未发现早古生代幔源岩岩浆活动。这些特征表明, 研究区内早古生代晚期花岗岩应归属于 S 型或壳源型花岗岩。其形成机制与早古生代晚期的板内作用有关, 即早先受区域挤压应力场影响, 武夷、南岭、赣中等块体彼此拼贴, 进而增生到扬子地块之上; 稍后, 由于应力场的转化, 进入后碰撞伸展环境。并在减压、导水等因素

* 本文受国家自然科学基金重点项目(40634022)和面上基金项目(40972132)联合资助。

第一作者简介: 张芳荣, 男, 1969 年生, 高级工程师, 博士研究生, 长期从事区域地质调查和花岗岩研究工作, E-mail: zfrjxdy@sina.com

** 通讯作者: 舒良树, E-mail: lsslu2003@yahoo.com.cn

的综合影响下,位于中、上地壳层位的低成熟度泥砂质碎屑岩发生部分熔融,形成S型或壳源型花岗岩。

关键词 元素和同位素地球化学;早古生代晚期花岗岩;陆内造山;S型或壳源型花岗岩;江西省

中图法分类号 P588.121

华南地区早古生代花岗岩的分布相当广泛,岩体数已超过100个,总出露面积大于20000km²(周新民,2003),其中以早古生代晚期花岗岩为主。它们主要分布于华南东段的武夷山和武功山-井冈山-诸广山等地区,分别呈北北东和南北走向展布。江西境内早古生代花岗岩的岩性变化较大,以二长花岗岩为主,花岗闪长岩次之,英云闪长岩少量;以块状构

造为主,局部发育片麻状构造(徐克勤等,1960,1963;王德滋等,1978;江西省地质矿产局,1984)。前人已对华南地区早古生代花岗岩的Nd-Sr同位素组成做过一些研究(黄莹和DePaolo,1989;沈渭洲等,1999;陈江峰等1999;洪大卫等,2002)。本文选择江西境内的乐安、上犹、陡水、龙回等4个早古生代晚期岩体(图1,它们的LA-ICPMS锆石U-Pb年龄

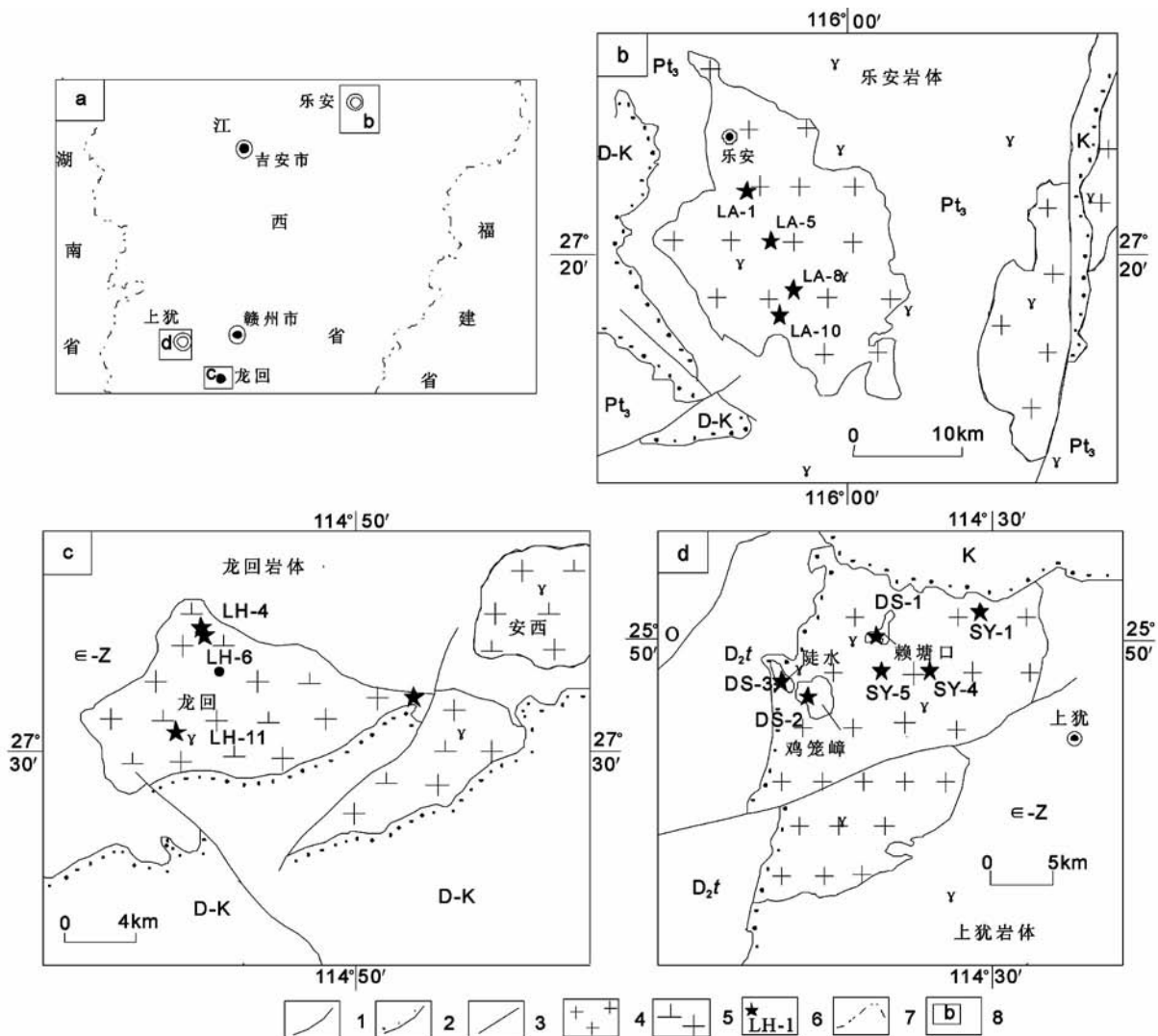


图1 江西省早古生代晚期花岗岩分布略图

1-地质界线; 2-不整合地质界线; 3-断层; 4-早古生代晚期花岗岩; 5-早古生代晚期花岗岩闪长岩; 6-采样位置及编号; 7-省界; 8-岩体位置; Pt₃-新元古代地层; Z-E-震旦纪-寒武纪地层; O-奥陶纪地层; D₂t-中泥盆纪地层; D-K-泥盆-白垩纪地层; K-白垩纪地层

Fig. 1 Distribution map of granites formed at late stage of Early Paleozoic in Jiangxi Province

1-geological boundary; 2-Unconformable boundary; 3-Fault; 4-granites formed at late stage of Early Paleozoic; 5-granodiorites formed at late stage of Early Paleozoic; 6-Sampling location and number; 7-Provincial boundaries; 8-Rock body place; Pt₃-Neoproterozoic; Z-E-Sinian-Cambrian stratum; O-Ordovician stratum; D₂t-Middle Devonian stratum; D-K-Devonian-Cretaceous stratum; K-Cretaceous stratum

分别为 $403.9 \pm 2.9\text{Ma}$ 、 $419.2 \pm 3.3\text{Ma}$ 、 $407.6 \pm 8.4\text{Ma}$ 和 $425.9 \pm 6.6\text{Ma}$ (张芳荣未刊数据), 开展较为详细的元素地球化学和 Nd-Sr 同位素研究, 旨在查明它们的源区特征, 这对深入研究早古生代晚期花岗岩的成因及其成岩构造环境具有重要意义。

1 岩体地质特征

1.1 乐安岩体

乐安岩体位于乐安县城一带, 呈岩基状产出, 出露面积约 380km^2 (图 1b)。岩体侵入于青白口纪地层中, 侵入面以倾向围岩为主, 侵角 $28^\circ \sim 45^\circ$ 。岩体中围岩捕虏体较少, 岩性主要为云母角岩和长英质角岩。外接触带宽 $500 \sim 1500\text{m}$, 变质矿物主要为绿泥石、黑云母、红柱石和堇青石。在岩体的东南部由于糜棱岩化而呈现片麻状构造或定向构造。乐安岩体岩性相对单一, 边缘相不发育; 过渡相较窄, 岩性为中细粒似斑状黑云母二长花岗岩; 中心相为中-中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩 (图 2a, b)。似斑状花岗结构, 块状构造, 斑晶以钾长石为主, 斜长石次之, 含量一般为 $10\% \sim 35\%$, 局部可达 45% , 粒径 $10 \sim 30\text{mm}$, 少数可达 $5 \sim 6\text{cm}$ 。基质粒径一般为 $2 \sim 6\text{mm}$, 少数为 $1 \sim 3\text{mm}$ 。矿物组成主要为钾长石 ($25\% \sim 41\%$)、斜长石 ($25\% \sim 43\%$)、石英 (25%)、黑云母 ($6\% \sim 8\%$) 及少量白云母 ($1\% \sim 3\%$)。副矿物以磁铁矿、锆石、磷灰石为主, 个别含石榴石、榍石、独居石。

1.2 龙回岩体

龙回岩体位于南康市东南部龙回、牛颈一带, 呈岩株状产出, 出露面积约 38km^2 (图 1c)。岩体北、西侧侵入震旦纪、寒武纪地层中, 侵入面内侧面围岩捕虏体, 它呈不规则状, 大小 $3 \sim 8\text{cm}$, 定向不明显。岩体南西侧被中泥盆世地层不整合覆盖。岩体接触变质作用发育, 宽度可达 $1200 \sim 3250\text{m}$, 并出现特征的堇青石、红柱石等变质矿物组合。

龙回岩体岩性较复杂, 以黑云母花岗闪长岩为主 (图 2g), 黑云母二长花岗岩 (图 2h) 和黑云母英云闪长岩少量。细粒-中细粒似斑状花岗结构, 块状构造。斑晶主要由钾长石、斜长石及少量石英 ($1\% \sim 3\%$) 组成, 偶见有黑云母斑晶。斑晶含量变化较大 (一般为 $5\% \sim 20\%$, 局部可达 35%), 粒径 $5 \sim 20\text{mm}$ 。基质粒径 $0.5 \sim 3.5\text{mm}$, 基质矿物主要由斜长石、钾长石、石英、黑云母及少量交代成因白云母组成, 在花岗闪长岩中普遍含有角闪石。副矿物以磷灰石、锆石、电气石和磁铁矿为主, 偶见有榍石和褐帘石。

1.3 上犹岩体

上犹复式岩体位于上犹县城西约 3km , 呈小型岩基状产出, 形态呈椭圆形, 出露总面积约 100km^2 (图 1d)。岩体东及东南部分侵入寒武纪地层, 北部为白垩纪上统沉积不整合覆盖, 西部与中泥盆纪地层呈沉积接触。接触变质作用发育,

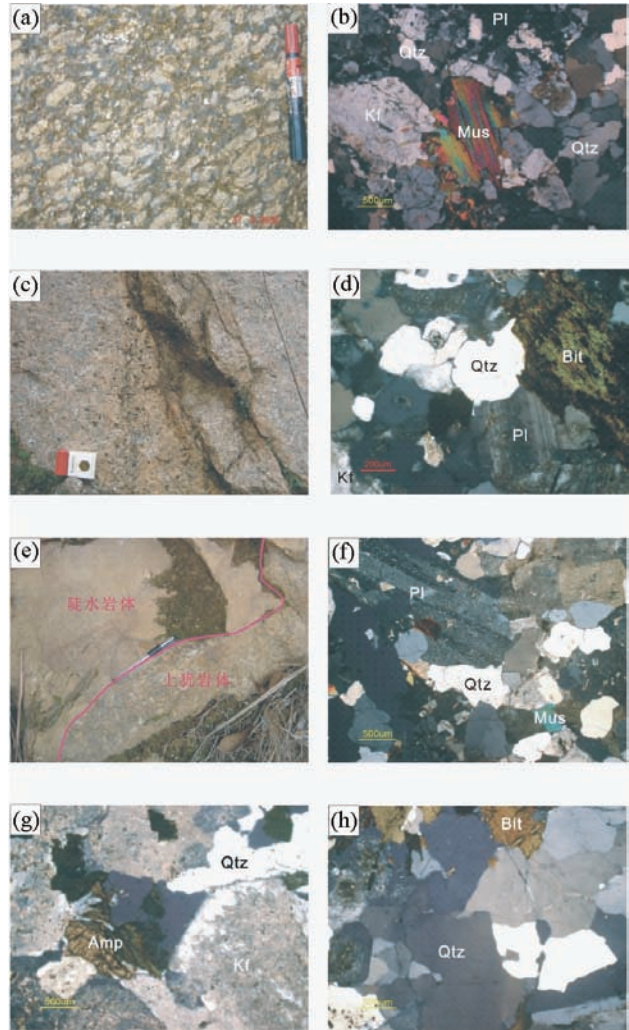


图 2 早古生代晚期花岗岩的野外照片和显微照片

(a)-乐安岩体中粒-中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩; (b)-乐安岩体中粒-中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩显微照片; (c)-上犹岩体中细粒似斑状黑云母二长花岗岩; (d)-上犹岩体中细粒似斑状黑云母二长花岗岩显微照片; (e)-陡水岩体与上犹岩体侵入关系; (f)-陡水岩体细粒花岗岩显微照片; (g)-龙回岩体中细粒含斑黑云母花岗闪长岩显微照片; (h)-龙回岩体中细粒含斑黑云母二长花岗岩显微照片

Fig. 2 Field pictures and photomicrographs for granites formed at late stage of Early Paleozoic

(a)-medium-medium-coarse grained like-porphyritic biotite adamellite in Luean rock body; (b)-micrograph of medium-medium-coarse grained like-porphyritic biotite adamellite in Luean rock body; (c)-medium-fine grained like-porphyritic biotite adamellite in Shangyou rock body; (d)-micrograph of medium-fine grained like-porphyritic biotite adamellite in Shangyou rock body; (e)-intrusive contact between Doushui and Shangyou rock bodies; (f)-micrograph of Doushui fine grained granite; (g)-micrograph of medium-fine grained biotite granodiorite with phenocryst in Longhui rock body; (h)-micrograph of medium-fine grained biotite adamellite with phenocryst in Longhui rock body

变质带宽度一般为 1000 ~ 1500m,最宽可达 2000m。变质带中出现堇青石、红柱石等矿物。

上犹岩体岩性较为单一,主要由边缘相和过渡相组成,中心相不发育。边缘相宽约 3 ~ 5m(最宽约为 20m),岩性为细-中细粒黑云母花岗岩;过渡相(占 98% ~ 99%)岩性以中细粒似斑状黑云母二长花岗岩为主(图 2c, d),似斑状结构,块状构造,偶见有 1 × 2cm 的富云包体。斑晶由钾长石、斜长石组成,粒径 5 ~ 20mm,含量一般为 5% ~ 18%。基质矿物主要由斜长石(中-更长石,44%)、钾长石(25%)、石英(25%)和黑云母(5%)组成,粒径 1 ~ 4mm。副矿物以磷灰石、锆石、独居石、石榴石、钛铁矿、电气石为主。

1.4 陡水岩体

陡水岩体位于上犹县城西约 20km,呈岩瘤或岩枝状产出,出露面积约 9km²(图 1d)。该岩体侵位于上犹岩体内(图 2e),热接触变质作用不明显,岩体边部可见上犹岩体的二长花岗岩捕虏体。陡水岩体岩性以细粒黑云母二长花岗岩和花岗岩为主(图 2f),局部有斑晶,块状构造。斑晶由钾长石、斜长石和石英组成,粒径 2.0 ~ 3.5mm。基质主要由斜长石、钾长石、石英及少量黑云母组成,局部见有白云母,粒径一般为 0.5 ~ 1.5mm。副矿物以磷灰石、锆石、独居石、石榴石、锡石、电气石为主。

2 样品和分析方法

样品分布见图 1。供分析用的样品是在室内显微镜初步研究的基础上选取的。主量元素测试由地矿部江西省中心实验室采用湿法完成,精度优于 2% ~ 5%;微量元素和稀土元素测试在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,采用 Finnigan Element II 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,检测限优于 0.5×10^{-9} ,相对标准偏差优于 5%。Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素测试由中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室完成,详细分析流程见侯增谦等(2005)。同位素比值测定采用德国 Finnigan 公司 MAT-262 热电质谱计。Nd 同位素比值测定采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行质量分馏校正,对 BCR-1 测定的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638 \pm 3(2\sigma)$,对 Jndi-1 测定的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512112 \pm 11(2\sigma)$;Sr 同位素比值测定采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 进行质量分馏校正,对 NBS987 测定的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710226 \pm 12$ 。实验室全流程空白:Sm, Nd 为 5×10^{-11} g, Rb, Sr 为 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ g。

3 结果和讨论

3.1 主量元素

如表 1 所示,早古生代晚期花岗岩的主量元素组成具有

如下特征:① SiO₂ 含量较高(70.75% ~ 77.88%,平均为 73.80%)。② 碱总量和 K₂O/Na₂O 比值除龙回岩体稍低(分别为 6.67% ~ 7.70%,平均为 7.30% 和 0.94 ~ 1.13,平均为 1.02)外,其余岩体都较高(分别为 7.30% ~ 8.85%,平均为 8.10% 和 1.15 ~ 1.81,平均为 1.43)。在 SiO₂-K₂O + Na₂O 图上,它们都位于亚碱性系列花岗岩区域内(图 3a),在 SiO₂-K₂O 图上,它们基本上都位于高钾钙碱性系列内(图 3b)。③ 铝饱和指数稍高, A/CNK 值为 1.01 ~ 1.11(平均为 1.05),属弱过铝花岗岩范畴;在 ACF 图中,数据点都位于斜长石-白云母-黑云母区域内,与 S 型或壳源型花岗岩的范围十分一致(图 3c);在 A/CNK-NK/A 图解上,数据点都位于亚碱性过铝质区域内(图 3d)。④ FeO/(FeO + MgO) 比值低,为 0.05 ~ 0.59,与过铝质花岗岩的特征值(<0.80,肖庆辉等,2002)一致。上述主量元素特征表明,所研究的早古生代晚期花岗岩十分类似于华南地区的 S 型或壳源型花岗岩。

3.2 微量元素

在微量元素蛛网图上,早古生代晚期花岗岩具有几乎完全一致的分布模式,即都是以富集大离子元素 Rb、Th 和稀土元素 Cs、Sm、Y 和 Yb、Ba、Sr、P、Ti 负异常明显,Nb、Ta 负异常较弱,分布曲线明显呈现左侧“隆起”和右侧“平缓”的特征(图 4),相似于南岭地区的 S 型或壳源型花岗岩(孙涛等,2003;周新民,2007)。

由图 4 可知,所研究的早古生代晚期花岗岩属于低 Ba、Sr 花岗岩,与高 Ba、Sr 花岗岩形成过程中有较多地幔物质参与(Tarney and Jones,1994;Fowler and Henney,1996)不同的是,低 Ba、Sr 花岗岩是壳源物质低程度部分熔融的产物(Harris and Inger,1992)。

由表 1 可见,早古生代晚期花岗岩具有较高的 Rb/Sr(0.71 ~ 28.97,平均为 6.38)和 Rb/Nb 比值(5.27 ~ 24.60,平均为 12.60),它们都明显高于中国东部(分别为 0.31 和 6.8,高山等,1999)和全球上地壳(分别为 0.32 和 4.5, Taylor and McLennan,1985)的平均值。

乐安、上犹和龙回岩体的 Nb/Ta(平均值分别为 11.3、6.0 和 8.3)以及 Zr/Hf 比值(平均值分别为 34.4、32.9 和 34.9)虽然都低于正常花岗岩值(分别为 11 和 33 ~ 40, Green,1995;Dostal and Chatterjee,2000),但由于它们的 Zr/Hf 比值明显高于指示存在流体作用的值(25, Irber,1999),因此它们低的 Nb/Ta 比值并不意味着岩浆演化过程中存在流体作用,而是反映它们来源于地壳物质。只有陡水岩体不仅具有低的 Nb/Ta 比值(平均为 3.3),而且其 Zr/Hf 比值(平均为 20.3)也明显低于 25,表明在陡水岩体形成过程中,受到流体作用的影响比较明显。

上述微量元素特征表明,所研究的早古生代晚期花岗岩应源自陆壳物质。

表1 早古生代晚期花岗岩的主量元素 (wt%)、微量元素和稀土元素 ($\times 10^{-6}$) 组成Table 1 Major (wt%), trace and rare earth element ($\times 10^{-6}$) compositions for granites formed at late stage of Early Paleozoic

样品号	LA-1	LA-5	LA-8	LA-10	DS-1	DS-2	DS-3	SY-1	SY-4	SY-5	LH-6	LH-8	LH-11
SiO ₂	73.42	70.88	71.48	72.69	77.33	77.82	76.49	73.91	74.60	74.67	70.75	74.20	71.18
TiO ₂	0.36	0.48	0.28	0.34	0.08	0.08	0.05	0.20	0.21	0.20	0.59	0.27	0.34
Al ₂ O ₃	12.89	14.09	14.28	13.17	12.06	11.99	12.61	13.41	12.96	12.74	13.62	12.94	14.15
Fe ₂ O ₃	2.91	3.19	2.14	2.54	0.52	0.62	0.23	1.68	1.68	1.58	3.78	2.09	2.33
FeO	0.05	0.08	0.06	0.08	0.19	0.14	0.19	0.11	0.13	0.13	0.08	0.06	0.08
MnO	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.03	0.05	0.04	0.07	0.05	0.06
MgO	0.63	0.98	0.52	0.61	0.13	0.18	0.17	0.37	0.49	0.48	1.57	0.66	0.96
CaO	1.61	2.08	1.31	1.34	0.18	0.35	0.19	0.88	0.60	0.74	1.74	1.25	2.06
Na ₂ O	3.14	3.41	3.21	2.82	3.82	3.42	3.37	3.33	3.65	3.36	3.44	3.62	3.80
K ₂ O	4.16	3.93	5.64	5.10	4.63	4.49	5.07	4.88	4.53	5.06	3.23	4.08	3.74
P ₂ O ₅	0.18	0.20	0.14	0.14	0.03	0.03	0.02	0.08	0.08	0.07	0.11	0.08	0.13
LOI	0.60	0.63	0.90	1.14	0.98	0.84	1.58	1.10	1.01	0.92	1.02	0.68	1.17
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	99.97	99.98	99.99	99.98	99.99	99.99	100.0	99.99	99.99
K ₂ O/Na ₂ O	1.32	1.15	1.76	1.81	1.21	1.31	1.50	1.47	1.24	1.51	0.94	1.13	0.98
CaO/Na ₂ O	0.51	0.61	0.41	0.48	0.05	0.10	0.06	0.26	0.16	0.22	0.51	0.35	0.54
A/CNK	1.02	1.03	1.04	1.05	1.04	1.08	1.11	1.08	1.08	1.03	1.11	1.02	1.01
Rb	192.1	180.0	196.4	200.0	306.5	283.0	358.9	219.6	258.6	265.0	87.78	205.3	155.0
Sr	114.3	152.3	128.2	123.2	15.74	18.38	12.39	96.12	66.99	71.79	97.74	125.6	219.6
Y	33.90	24.40	30.62	40.85	48.73	45.55	51.13	21.57	34.07	38.71	13.91	20.62	13.44
Zr	258.7	282.6	179.0	205.1	67.11	56.96	71.62	150.9	133.7	133.3	95.08	112.3	201.8
Hf	7.57	7.75	5.44	6.00	3.57	2.80	3.27	4.38	4.19	4.14	2.61	3.86	5.15
Nb	13.57	20.46	12.95	15.58	18.11	18.21	14.59	17.16	21.23	21.44	16.66	30.88	23.82
Ta	1.29	1.78	1.19	1.33	5.23	6.48	4.14	2.42	3.74	4.07	1.88	4.13	3.02
Ba	426	738	607	501	64.9	57.6	18.7	544	313	319	183	357	767
Th	18.01	20.81	21.40	25.99	16.24	19.38	15.45	16.58	27.92	30.78	17.77	27.12	18.61
U	2.45	2.49	4.99	3.31	5.53	9.53	9.37	4.95	6.73	7.46	3.63	15.06	3.65
Rb/Sr	1.68	1.18	1.53	1.62	19.47	15.40	28.97	2.28	3.86	3.69	0.90	1.64	0.71
Rb/Nb	14.15	8.8	15.17	12.84	16.92	15.54	24.6	12.8	12.18	12.36	5.27	6.65	6.51
Nb/Ta	10.5	11.5	10.9	11.7	3.5	2.8	3.5	7.1	5.7	5.3	8.9	7.5	7.9
Zr/Hf	34.2	36.5	32.9	34.2	18.8	20.3	21.9	34.5	31.9	32.2	36.4	29.1	39.2
La	51.17	58.93	43.61	45.36	13.07	20.22	8.27	30.27	38.67	41.53	15.83	27.28	38.86
Ce	96.10	101.2	90.08	92.76	24.86	38.07	15.61	55.52	73.53	78.74	30.30	53.69	70.22
Pr	10.99	11.29	9.15	9.92	3.04	4.60	1.89	5.60	7.64	7.92	3.15	5.33	6.36
Nd	40.63	40.14	32.12	36.04	11.50	17.38	7.39	19.65	26.99	28.59	11.66	18.56	21.11
Sm	7.58	7.01	6.44	7.17	3.47	4.71	2.44	3.81	5.57	6.09	2.36	3.55	3.54
Eu	0.97	1.36	0.93	0.87	0.13	0.15	0.06	0.81	0.60	0.52	0.43	0.58	0.95
Gd	7.71	6.28	6.44	7.43	4.82	5.42	3.96	3.80	5.89	6.34	2.44	3.55	3.27
Tb	1.03	0.79	0.90	1.13	0.91	0.94	0.81	0.56	0.86	0.97	0.34	0.49	0.43
Dy	6.76	5.06	5.93	8.03	7.72	7.53	7.08	3.99	6.03	6.79	2.42	3.33	2.69
Ho	1.40	1.02	1.21	1.71	1.86	1.74	1.80	0.83	1.28	1.51	0.53	0.76	0.53
Er	3.74	2.64	3.40	4.61	6.07	5.63	5.93	2.60	3.85	4.54	1.64	2.53	1.56
Tm	0.51	0.30	0.47	0.64	1.00	0.92	0.97	0.40	0.61	0.70	0.25	0.38	0.23
Yb	3.13	1.68	2.82	3.84	6.74	6.13	6.48	2.59	3.91	4.64	1.71	2.62	1.47
Lu	0.45	0.26	0.40	0.59	1.05	0.98	1.01	0.40	0.61	0.71	0.27	0.44	0.22
ΣREE	232.2	238.0	203.9	220.1	86.24	114.4	63.70	130.8	176.0	189.6	73.33	123.1	151.4
L/H	8.39	12.20	7.26	5.84	1.86	2.91	1.27	7.62	6.64	6.24	6.64	7.73	13.56
(La/Yb) _N	11.02	23.65	10.43	7.96	1.31	2.22	0.86	7.88	6.67	6.03	6.24	7.02	17.82
(La/Sm) _N	4.25	5.29	29.50	32.80	2.37	2.70	2.13	5.00	4.37	4.29	4.22	4.83	6.91
(Gd/Yb) _N	1.99	3.02	1.84	1.56	0.58	0.71	0.49	1.18	1.22	1.10	1.15	1.09	1.80
δEu	0.38	0.61	0.44	0.36	0.10	0.09	0.06	0.64	0.32	0.25	0.54	0.49	0.84

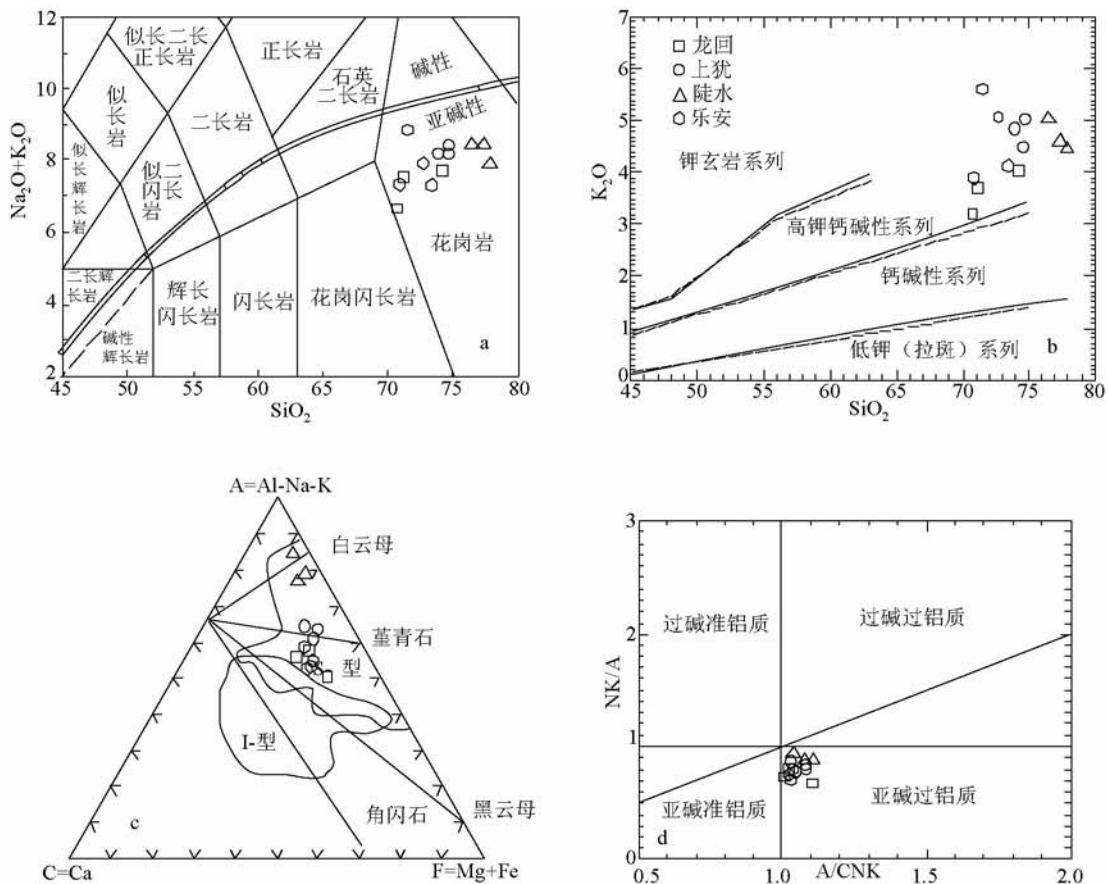


图3 早古生代晚期花岗岩的主量元素图解

(a)-SiO₂-K₂O + Na₂O 图(据 Middlemost, 1994); (b)-SiO₂-K₂O 图(据 Rollinson, 1993); (c)-ACF 图(据徐克勤等, 1984); (d)-A/CNK-NK/A 图(据陈小明等, 2002)

Fig. 3 Diagrams showing the major element compositions of granites formed at late stage of Early Paleozoic

(a)-SiO₂-K₂O + Na₂O diagram (after Middlemost, 1994); (b)-SiO₂-K₂O diagram (after Rollinson, 1993); (c)-ACF diagram (after Xu *et al.*, 1984); (d)-A/CNK-NK/A diagram (after Chen *et al.*, 2002)

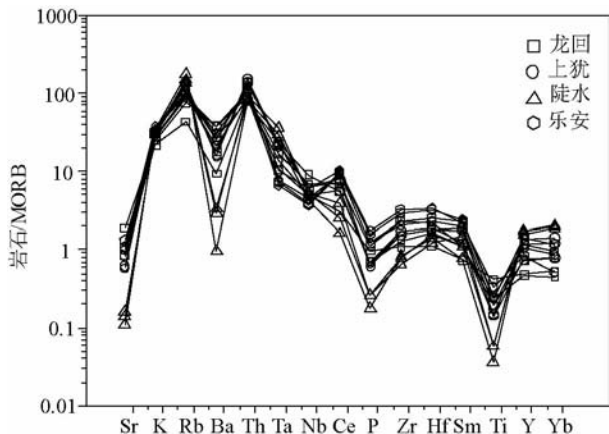


图4 早古生代晚期花岗岩的微量元素蛛网图解(标准化 MORB 值据 Pearce, 1983)

Fig. 4 Trace element spider diagram for the granites formed at late stage of Early Paleozoic (MORB data after Pearce, 1983)

3.3 稀土元素

早古生代晚期花岗岩的稀土总量偏低且变化明显,为 $63.70 \times 10^{-6} \sim 238.0 \times 10^{-6}$ (平均为 154.1×10^{-6})。它们的 LREE/HREE 比值 (1.27 ~ 15.56) 和 $(La/Yb)_N$ 值 (0.86 ~ 17.82) 同样变化明显: 其中,除乐安岩体具有低的 LREE/HREE 比值 (1.27 ~ 2.91) 和 $(La/Yb)_N$ 值 (0.86 ~ 2.22), 配分模式接近水平型外,其余岩体的 LREE/HREE 比值 (5.84 ~ 13.56) 和 $(La/Yb)_N$ 值 (6.03 ~ 17.82) 较为相似,配分模式显示不同程度的右倾型(图 5)。在 Eu 亏损方面,乐安岩体 Eu 的亏损最为明显 ($\delta Eu = 0.06 \sim 0.10$),其余岩体 Eu 的亏损相对明显 (δEu 值除一个样品为 0.84 外,其余为 0.25 ~ 0.64),反映岩浆结晶过程中斜长石分离结晶程度差异较为明显。所有早古生代晚期花岗岩的 La-(La/Sm) 之间呈现较好的正相关分布(图略),反映这些岩体的岩浆过程主要受部分熔融作用控制。

表2 早古生代晚期花岗岩的 Nd-Sr 同位素组成

Table 2 Nd-Sr isotopic compositions for granites formed at late stage of Early Paleozoic

样品号	岩体	t (Ma)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM} (Ma)	资料来源
LH-1	龙回	426	1.457	0.716822(11)	0.70798	0.1082	0.512147(13)	-4.77	1554	本文
LH-4	龙回	426	1.807	0.720772(10)	0.70981	0.1163	0.512178(15)	-4.60	1541	本文
LH-6	龙回	426	2.166	0.730766(10)	0.71762	0.1306	0.512130(10)	-6.32	1680	本文
		426				0.1115	0.512042	-7.00	1735	①
SY-4	上犹	419	12.15	0.778037(12)	0.70553	0.1367	0.512205(12)	-5.24	1587	本文
SY-5	上犹	419	11.41	0.771619(11)	0.70353	0.1315	0.512174(13)	-5.57	1613	本文
SY-7	上犹	419	1.834	0.719700(8)	0.70876	0.1085	0.512160(13)	-4.61	1536	本文
Gn-4	上犹	419	5.058	0.74133	0.71115	0.1139	0.51211	-5.87	1638	②
Gn-3	上犹	419	9.076	0.7664	0.71224	0.156	0.51226	-5.20	1584	②
Gn-02-1	上犹	419	8.476	0.75891	0.70833	0.1403	0.512261	-4.34	1514	②
Gn-02	上犹	419	4.496	0.73965	0.71282	0.1237	0.51221	-4.45	1522	②
JSY-57	上犹	419	6.153	0.74772	0.71100	0.1296	0.512246	-4.06	1491	③
DS-1	陡水	408	66.85	1.059050(13)	0.67062	0.1987	0.512347(12)	-5.79	1622	本文
DS-3	陡水	408	99.55	1.110247(15)	0.53182	0.1988	0.512382(13)	-5.11	1567	本文
JDS-58	陡水	408	64.64	1.06477	0.68918	0.1929	0.512384	-4.76	1539	③
LA-1	乐安	404	4.761	0.739930(12)	0.71254	0.1214	0.512098(14)	-6.65	1689	本文
LA-5	乐安	404	2.742	0.727208(10)	0.71143	0.1030	0.512050(12)	-6.64	1688	本文
LA-8	乐安	404	3.951	0.739588(10)	0.71686	0.1200	0.512082(14)	-6.89	1709	本文
JLA-1	乐安	404	3.26	0.73068	0.71192	0.1121	0.512078	-6.56	1682	③

注:括号内数据为 2σ 误差;岩体年龄数据(锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄)引自张荣荣未刊数据. Nd 模式年龄采用二阶段模式(陈江峰和江博明, 1999)进行计算, 计算公式:

$$t_{\text{DM}} = 1/\lambda \cdot \ln \{ 1 + [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{m}} - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} - [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{m}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{c}}] (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{c}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}] \} , \text{式中: } (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{c}} = 0.118; (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.513151; (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.2136.$$

资料来源:①-沈渭洲等, 1999; ②-Mao *et al.*, 2008; ③-黄萱和 DePaolo, 1989

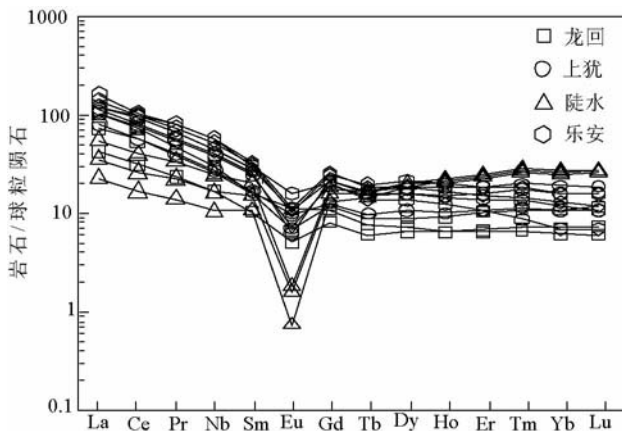
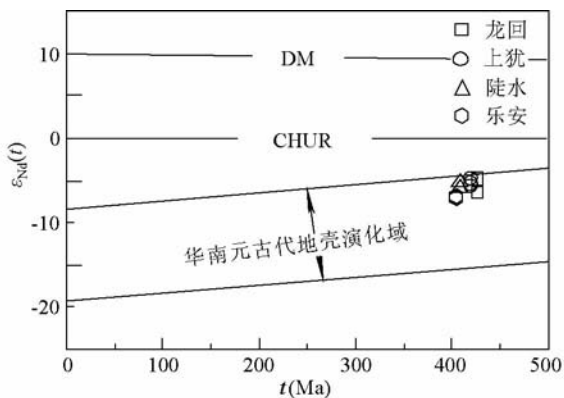


图5 早古生代晚期花岗岩的稀土元素球粒陨石标准化曲线(标准化球粒陨石值据 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns for granites formed at late stage of Early Paleozoic (chondrite data after Taylor and McLennan, 1985)

3.4 Nd-Sr 同位素

如表2所示,早古生代晚期花岗岩体的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值(0.53182~0.71762)变化明显,尤其是 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} > 66$ 的陡水岩体的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值都低于球粒陨石值(0.69897),与这些样品的 Nd 同位素特征明显的不协调,其原因可能主要同它们具有高的 Rb/Sr 比值有关。因为在这种情况下,后期蚀变作用的轻微影响和/或成岩年龄值的稍许偏差都有可能明显影响其校正后的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值。Jahn *et al.* (2001) 和 Wu *et al.* (2002) 也已经指出,用高 Rb/Sr 比值样品的 Sr 同位素初始值来讨论花岗岩的源区特征是不合适的。但 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值低于 12 的样品,其 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值(0.70353~0.71719)与它们的 Nd 同位素组成基本上是吻合的,也与 S 型或壳源型花岗岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值范围相一致(Chappell and White, 2001; 朱炳泉, 1998; 沈渭洲等, 1999; 吴荣新等, 2005)。这表明,低 Rb/Sr 比值样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值可以用于示踪花岗岩

图6 早古生代晚期花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ - t 图解

华南元古代地壳演化域据沈渭洲等(1993)

Fig. 6 $\epsilon_{Nd}(t)$ - t diagram for granites formed at late stage of Early PaleozoicProterozoic crustal evolutionary region in South China after Shen *et al.* (1993)

的物源特征。但考虑到 Sm-Nd 同位素体系活动性小,示踪效果明显优于 Rb-Sr 体系,因此本文将主要根据 Sm-Nd 同位素组成来讨论花岗岩的物质来源。

早古生代晚期花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值稍高,为 $-4.6 \sim -6.9$;采用两阶段模式参数(陈江峰和江博明,1999)计算的 Nd 模式年龄相对年轻,为 1536 ~ 1709Ma,与前人对这些岩体的研究结果(表2)是一致的。在 $\epsilon_{Nd}(t)$ - t 图上,本文数据点都位于华南元古代地壳演化域内,靠近上部的演化线分布(图6),反映它们是由低成熟度地壳物质熔融形成(沈渭洲等,1993)。

虽然上犹岩体两个样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值(0.70353 ~ 0.70553)位于 I 型花岗岩范围内(0.704 ~ 0.706, Chappell

and White, 2001),但这并不排除它们属于 S 型或壳源型花岗岩的可能,因为 S 型或壳源型花岗岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值变化范围较大(Chappell and White, 2001)。同时,这种 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值较高、 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值较低的花岗岩归属于 S 型或壳源型花岗岩范畴的实例在国内外都有报道,如澳大利亚 New England 岩基中的 Hillgrove 和 Bundarra 岩套的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值分别为 1.0 和 -0.6 , $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值分别为 0.7053 和 0.7062(Chappell and White, 1992);皖南地区休宁、歙县和许村岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值分别为 $-0.2 \sim -1.4$ 、 $-0.4 \sim -3.4$ 和 $0.8 \sim -2.1$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值分别为 0.70339 ~ 0.70877、0.70735 ~ 0.70969 和 0.70439 ~ 0.70807(周新民和王德滋,1988;李献华等,2002;吴荣新等,2005)。

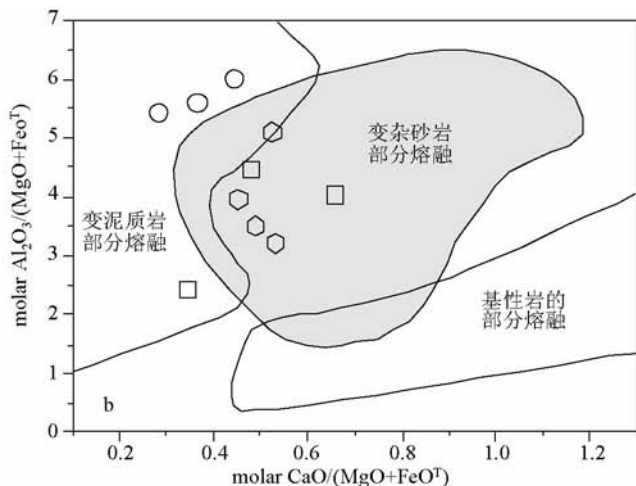
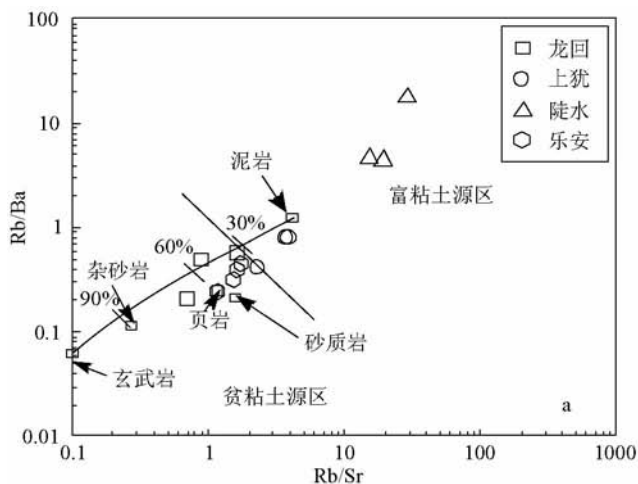
3.5 花岗岩源区特征

花岗岩的源区物质成分特征,可根据 Sylvester(1998)提出的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值和数据点在 Rb/Sr-Rb/Ba 和 A/MF-C/MF 图解上的分布特征进行判别。

由表1可知,乐安和龙回岩体的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值(分别为 0.41 ~ 0.61 和 0.35 ~ 0.54)都大于 0.3,反映其源区物质为砂质岩;上犹和陡水岩体的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值(分别为 0.16 ~ 0.26 和 0.05 ~ 0.10)都小于 0.3,反映其源区物质为泥质岩。

在 Rb/Sr-Rb/Ba 图解上,上犹和陡水岩体因具有较高的 Rb/Sr(分别为 2.3 ~ 3.9 和 15.4 ~ 29.0)和 Rb/Ba 比值(分别为 0.4 ~ 0.8 和 4.7 ~ 19.2)而投影于富粘土源区,而乐安和龙回岩体因具有较低的 Rb/Sr(分别为 1.2 ~ 1.7 和 0.7 ~ 1.6)和 Rb/Ba 比值(分别为 0.2 ~ 0.4 和 0.2 ~ 0.6)而投影于贫粘土源区,没有数据点靠近玄武岩分布(图7a)。

在 A/MF-C/MF 图解上,上犹岩体都投影于变泥质岩区域(陡水岩体由于 CaO 含量明显偏低而投影于图外),乐安

图7 早古生代晚期花岗岩的 Rb/Sr-Rb/Ba(a, 据 Sylvester, 1998) 和 C/MF-A/MF(b, 据 Altherr *et al.*, 2000) 图解Fig. 7 Rb/Sr-Rb/Ba (a, after Sylvester, 1998) and C/MF-A/MF (b, after Altherr *et al.*, 2000) diagrams for granites formed at late stage of Early Paleozoic

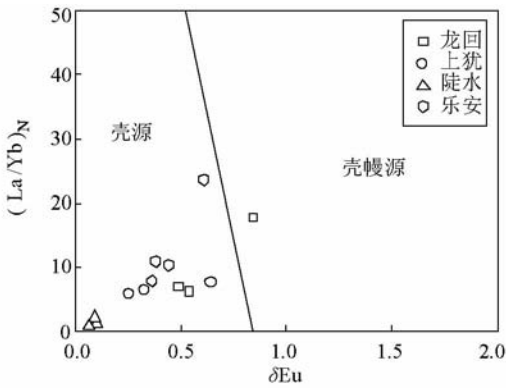


图8 早古生代晚期花岗岩的 $(La/Yb)_N-\delta Eu$ 图解(底图转引自陈佑纬等,2009)

Fig. 8 $(La/Yb)_N-\delta Eu$ diagram for granites formed at late stage of Early Paleozoic (base map after Chen *et al.*, 2009)

和龙回岩体数据点都位于变杂砂岩区域(龙回岩体 LH-8 例外),没有数据点靠近或位于基性岩区域(图 7b)。

由此可知,在所研究的这些早古生代晚期花岗岩中,上犹和陡水岩体的源区由变泥质岩组成,乐安和龙回岩体的源区由变杂砂岩组成。

3.6 花岗岩成因类型归属

我们认为,本文所研究的早古生代晚期花岗岩在成因类型上应归属于 S 型或壳源型花岗岩范畴,主要依据包括:

① 在 $\epsilon_{Nd}(t)-t$ 图解上,所有数据点都投影于华南元古代地壳演化域内(图 5)。

② SiO_2 含量高(平均为 73.80%), $K_2O > Na_2O$ (K_2O/Na_2O 比值平均为 1.33),ACNK 值大于 1(平均为 1.05),在 ACF 图解中,所有数据点都投影于 S 型或壳源型花岗岩区域内(图 3c)。

③ 稀土配分模式呈水平型或略呈右倾型, Eu 亏损相对明显(δEu 平均为 0.39),在 $(La/Yb)_N-\delta Eu$ 图解上,除龙回岩体一个数据点位于壳幔源花岗岩区域外,其余数据点都位于壳源型花岗岩区域内(图 8)。

④ Rb、Th 等大离子元素富集, Ba、Sr、P、Ti 负异常明显, Nb、Ta 负异常较弱,分布模式属于低 Ba、Sr 花岗岩;它们的 Rb/Sr 和 Rb/Nb 比值(平均值分别为 6.4 和 12.6)都明显高于我国东部上地壳平均值(分别为 0.31 和 6.8,高山等,1999)。这些微量元素特征十分相似于南岭地区的 S 型或壳源型花岗岩(周新民,2007)。

⑤ 在所研究的早古生代晚期花岗岩中,均见有少量富铝钙矿物石榴石和电气石。同时,CL 图像显示,这些岩体都含有大量继承锆石,年龄值为 660 ~ 2325Ma(张芳荣未刊资料)。

⑥ 岩浆源区物质成分判别表明,这些早古生代晚期花岗岩的源区物质或是泥质岩,或是砂质岩,没有幔源物质参

与其中。

3.7 关于低 Nd 模式年龄

前人曾认为,从江西的乐安、慈竹一带向南西方向,存在一条早古生代晚期花岗岩的低 Nd 模式年龄带(陈江峰等,1999;洪大卫等,2002),带内花岗岩的 t_{2DM} 年龄都低于 1.8Ga,并提出该带大体与华南小洋盆或加里东残余洋盆的位置(水涛,1987;殷鸿福等,1999)相当, Nd 模式年龄的降低是由加里东裂陷槽内地幔物质上涌加入造成的(陈江峰等,1999)。但这种解释明显与下列地质事实相矛盾:

① 在上述低 Nd 模式年龄花岗岩体中,常见的岩石包体都是残留体、残影体(周新民,2003),迄今还没有发现证据确切的、属于岩浆混合成因的岩石学标志(张芳荣等,2009)。位于乐安-上犹岩体方向上的南城-大余深断裂仅仅控制晚古生代和中生代地层的沉积和分布以及燕山期花岗岩的侵入(江西省地质矿产局,1984),反映在早古生代时期,这一深断裂可能不存在,因而也就不可能有地幔物质沿此深断裂进入地壳。

② 江西及其邻区古生代沉积岩的 Nd 模式年龄都大于 1.8Ga(李献华和 McCulloch,1996;沈渭洲等,2003,2009),反映不可能存在同期幔源岩浆活动,否则,这些沉积物的 Nd 模式年龄将会显著降低(李献华和 McCulloch,1996)。

③ 井冈山地区(沈渭洲等,2009)和湘东南地区(柏道远等,2007)早古生代沉积岩的地球化学特征,以及清晰的野外地质证据(如早古生代晚期地层均为泥砂质韵律层夹碳质层和灰岩层,发育有浅海沉积的灰岩,发现存在腕足类和腹足类等浅海生物化石以及波痕、荷重模、泥砾和小型斜层理等浅海沉积构造标志,舒良树等,2008)都充分证实,这些地区的早古生代沉积盆地属于浅海-半深海环境,而不是大洋,因而这些岩体不可能发育在华南洋盆位置上, Nd 模式年龄的降低也不可能是由加里东裂陷槽内地幔物质上涌加入地壳而造成。

④ Shu *et al.* (2008) 采用锆石 SHRIMP U-Pb 法对福建政和县辉绿岩获得的年龄值为 $795 \pm 7Ma$,与 Li *et al.* (2005) 对该区流纹岩获得的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 $818 \pm 9Ma$ 相似,构成同期双峰式火成岩组合。由此可知,位于政和-大埔断裂带中的火山岩并非是早古生代岛弧火山岩,而是与 Rodinia 超大陆裂解有关的新元古代双峰式火山岩。迄今为止,在华南广大区域内尚未发现有证据确切的早古生代幔源岩浆活动,因而在早古生代晚期花岗岩形成过程中也不可能幔源物质加入。

因此我们认为,上述早古生代晚期花岗岩的低 Nd 模式年龄不是由地幔物质的加入引起,而是反映它们是由低成熟度地壳物质通过部分熔融的方式形成。这是因为:

① 上述岩浆源区判别表明,上犹和陡水岩体的源区由变泥质岩组成,乐安和龙回岩体的源区由变杂砂岩组成,它们都没有幔源岩石卷入。

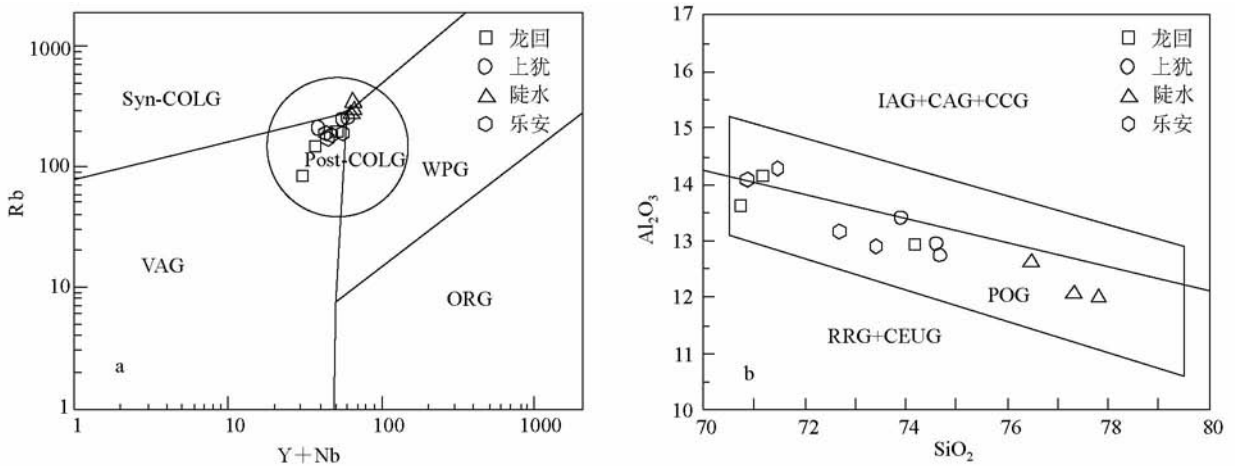


图9 早古生代晚期花岗岩体的 Rb-Y + Nb (a, 据 Pearce, 1996) 和 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (b, 据 Maniar and Piccoli, 1989) 图解
Syn-COLG-同碰撞花岗岩; WPG-板内花岗岩; Post-COLG-后碰撞花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; ORG-洋脊花岗岩; IAG-岛弧花岗岩类;
CAG-大陆弧花岗岩类; CCG-大陆碰撞花岗岩类; POG-后造山花岗岩类; RRG-与裂谷有关的花岗岩类; CEUG-与大陆的造陆抬升有关
的花岗岩类

Fig. 9 Rb-Y + Nb (a, after Pearce, 1996) and $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (b, after Maniar and Piccoli, 1989) diagrams for granites formed at late stage of Early Paleozoic

Syn-COLG-syn-Collision granite; WPG-within plate granite; Post-COLG-post-collision granite; VAG-volcanic arc granite; ORG-ocean ridge granite; IAG-island arc granitoids; CAG-continental arc granitoids; CCG-continental collision granitoids; POG-post-collision granitoids; RRG-rift-related granitoids; CEUG-continental epeirogenic uplift granitoids

② 现有研究业已表明,由低成熟度地壳物质(或新生地壳)部分熔融形成的 S 型花岗岩或火山岩,其 Nd 模式年龄都低于 1.7Ga (Wu *et al.*, 2006; 沈渭洲等, 2007), 反映低 Nd 模式年龄花岗岩或火山岩并不一定是由地幔物质加入引起。

③ 在江西及其邻区的基底变质沉积岩中,也存在不少地壳组分的 Nd 模式年龄低于 1.7Ga, 如相山地区周潭群为 1.68 ~ 1.75Ga (胡恭仁和章邦桐, 1998)、兴国会昌地区板岩和千枚岩为 1.64 ~ 1.79Ga (Mao *et al.*, 2008)、浙江陈蔡群为 1.34 ~ 1.74Ga (程海, 1991; 沈渭洲等, 1993; 谢宴克等, 1996) 和福建马面山群为 0.95 ~ 1.73Ga (黄辉等, 1989)。

④ 与皖南地区的新元古代 S 型或壳源型花岗岩相比,乐安、龙回、上犹和陡水岩体的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较低 (-6.9 ~ -5.1), Nd 模式年龄相对古老 (1536 ~ 1709Ma), 因而完全可以将它们归属于 S 型或壳源型花岗岩范畴。

3.8 成岩构造环境探讨

在 Pearce (1996) 提出的 Rb-Y + Nb 图解中,早古生代晚期花岗岩位于后碰撞花岗岩区域内 (图 9a)。在 Maniar and Piccoli (1989) 提出的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 图解中,它们都位于后造山花岗岩区域内 (图 9b), 而后造山花岗岩的概念与后碰撞花岗岩基本相似。此外,在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图上,它们位于高钾钙碱性系列内 (图 3b), 而高钾钙碱性系列岩浆岩又是后碰撞岩浆活动的重要特征之一 (Liegeois *et al.*, 1998)。由此表明,这些早古生代晚期花岗岩属于后碰撞花岗岩类,是在伸展的

构造环境中形成的。

关于华南地区早古生代晚期事件(原先称加里东运动)的构造属性,长期以来争论不断,其中以弧-陆碰撞占主导地位(饶家荣等, 1993; 孙明志和徐克勤, 1990; 曾勇和杨明桂, 1999; 丘元禧等, 1996, 1998)。最近,许德如等 (2006) 认为,华南早古生代晚期花岗岩是陆-弧-陆碰撞作用产物。这些认识的一个最重要的依据是在闽北地区存在早古生代蛇绿岩或火山岩(全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $560.8 \pm 14\text{Ma}$, 杨树锋等, 1995)。由于这些岩石普遍经受不同程度蚀变作用,因而 Rb-Sr 年龄的可信度值得怀疑。近年采用先进的锆石 SHRIMP U-Pb 定年方法对上述蛇绿岩或火山岩获得的年龄分别为 $795 \pm 7\text{Ma}$ 和 $818 \pm 9\text{Ma}$ (Shu *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2005), 反映这些前泥盆纪蛇绿岩或火山岩都形成于前南华纪,而不是原先认为的“加里东期蛇绿岩套”和“早古生代火山岩”。因而弧-陆碰撞模式或陆-弧-陆碰撞模式均不能合理解释华南早古生代晚期花岗岩的成因动力学背景。

在成冰纪初期,华南陆块可能由于深部地幔岩浆活动的影响而发生裂解 (Li XH *et al.*, 2003; Li ZX *et al.*, 2002, 2003; Shu *et al.*, 2006; Xiang and Shu, 2010), 使原先的华夏地块被肢解成许多次级块体。在这些裂解的块体之间是浅海-半深海盆地而不是大洋盆地 (柏道远等, 2007; 舒良树等, 2008; 沈渭洲等, 2009)。因此,本文研究的这些早古生代晚期花岗岩的形成很可能是,位于浅海-半深海环境中的武夷、

南岭-赣中等块体在受到北侧秦岭-大别地体群拼贴(贾承造等,1988)以及南东侧未知名地体群拼贴(舒良树等,2008)的影响下,彼此之间发生拼贴,进而增生在扬子板块之上,导致各块体的早古生代地层褶皱隆升,使地壳加厚。这种因板块碰撞而加厚的地壳会很快发生自然减薄,使岩石圈进入伸展减薄的构造环境(Turner *et al.*, 1992)。在这种特定的伸展构造环境中,由于在地壳缩短之后的伸展、减薄环境下产生的减压、导水等因素的综合影响下,导致位于中、上地壳层位的低成熟度泥砂质碎屑岩发生部分熔融而形成上犹等早古生代晚期岩体。在成因类型上,这些早古生代晚期花岗岩可归属于S型或壳源型花岗岩范畴。

References

- Altherr R, Holl A, Hegner E *et al.* 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50: 51 - 73
- Bai DY, Zhou L, Wang XH *et al.* 2007. Geochemistry of Nanhuan-Cambrian sandstones in southeastern Hunan and its constraints on Neoproterozoic-Early Paleozoic tectonic setting of South China. *Acta Geologica Sinica*, 81 (6): 755 - 771 (in Chinese with English abstract)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jiangxi Province. 1984. Regional Geology of Jiangxi Province. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Chappell BW and White AJR. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 1 - 26
- Chappell BW and White JR. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later. *Aust. J. Earth Sci.*, 48: 489 - 499
- Chen JF and Jahn BM. 1999. Nd, Sr, Pb isotope tracer and continental crust evolution in SE China. In: Zheng YF (ed.). *Chemical Geodynamics*. Beijing: Science Press, 262 - 287 (in Chinese)
- Chen JF, Guo XS, Tang JF *et al.* 1999. Nd isotopic model ages: Implications of the growth of the continental crust of southeastern China. *J. Nanjing University (Natural Sciences)*, 35 (6): 649 - 658 (in Chinese with English abstract)
- Chen XM, Wang RC, Liu CS *et al.* 2002. Isotopic dating and genesis for Fogang biotite granites of Conghua area, Guangdong Province. *Geol. J. China Uni.*, 8 (3): 293 - 307 (in Chinese with English abstract)
- Chen YW, Bi XW, Hu RZ *et al.* 2009. Comparison of geochemical characteristic of uranium- and nonuranium-bearing Indosinian granites in Guidong composite pluton. *J. Mineral. Petrol.*, 29 (3): 106 - 114 (in Chinese with English abstract)
- Cheng H. 1991. The Late Proterozoic collision orogen in northwestern Zhejiang Province. *Geological Review*, 37 (3): 203 - 213 (in Chinese with English abstract)
- Dostal J and Chatterjee AK. 2000. Contrasting behaviour of Nb/Ta and Zr/Hf ratios in a peraluminous granitic pluton (Nova Scotia, Canada). *Chem. Geol.*, 63: 207 - 216
- Fowler MB, Henney PJ, Darbyshire DPE *et al.* 1996. Petrogenesis of high Ba-Sr granites: The Rogart Pluton, Sutherland. *J. Geol. Soc. London*, 158: 521 - 524
- Gao S, Luo TC, Zhang BR *et al.* 1999. Structure and composition of the continental crust in East China. *Science in China (Series D)*, 29 (3): 204 - 213 (in Chinese)
- Green TH. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. *Chem. Geol.*, 120: 347 - 359
- Harris NBW and Inger S. 1992. Trace element modeling of pelite-derived granites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 110: 46 - 56
- Hong DW, Xie XL and Zhang JS. 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)
- Hou ZQ, Lu JR, Lin SZ *et al.* 2005. The Axial Zone consisting of pyrolyte and eclogite in the Emei Mantle Plume: Major, trace element and Sr-Nd-Pb isotope evidence. *Acta Geologica Sinica*, 79 (2): 200 - 219 (in Chinese with English abstract)
- Hu GR and Zhang BT. 1998. Nd isotopic compositions and material source of metamorphic basement in Central Jiangxi. *Acta Petrol. Mineral.*, 17: 35 - 40 (in Chinese with English abstract)
- Huang H, Li RA and Yang CX. 1989. Chronological study of metamorphic belt from southeastern coastal area, Fujian and its tectonic significance. *Chinese Science Bulletin*, (16): 1249 - 1251 (in Chinese)
- Huang X and DePaolo DJ. 1989. Study of sources of Paleozoic granitoids and the basement of South China by means of Nd-Sr isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 5 (1): 28 - 36 (in Chinese with English abstract)
- Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63: 489 - 508
- Jahn BM, Wu FY, Capdevila R *et al.* 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountain in NE China. *Lithos*, 59: 171 - 198
- Jia CZ, Shi YS and Guo LZ. 1988. The Plate Tectonics of the Eastern Qinling Region. Nanjing: Nanjing University Publishing House, 1 - 130 (in Chinese)
- Li WX, Li XH and Li ZX. 2005. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance. *Precamb. Res.*, 136: 51 - 66
- Li XH and McCulloch MT. 1996. Nd isotopic evolution of sediments from the southern margin of the Yangtze Block and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 12: 359 - 369 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li ZX, Zhou HW *et al.* 2002. SHRIMP U-Pb zircon chronological, geochemical and Nd isotopic study of the Neoproterozoic granitoids in southern Anhui. *Geological Review*, 48 (Suppl.): 8 - 16 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li ZX, Ge W *et al.* 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? *Precamb. Res.*, 122: 45 - 83
- Li ZX, Li XH, Zhou H *et al.* 2002. Grenvillian continental collision in South China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia. *Geology*, 30: 163 - 166
- Li ZX, Li XH, Kinny PD *et al.* 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precamb. Res.*, 122: 85 - 109
- Liegeois JP, Navez J, Hertogen J *et al.* 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids: The use of sliding normalization. *Lithos*, 45: 1 - 28
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 101: 635 - 643
- Mao JR, Zeng QT, Li ZL *et al.* 2008. Precise dating and geological significance of the Caledonian Shangyou pluton in South Jiangxi Province. *Acta Geologica Sinica*, 82 (2): 399 - 408
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Sci. Rev.*, 37: 215 - 224
- Pearce JA. 1996. Sources and setting of granitic rocks. *Episodes*, 19 (4): 120 - 125
- Qiu YX, Ma WP, Fan XL *et al.* 1996. Tectonic nature and tectonic evolution of the "Xuefeng Old Land" in the Caledonian stage. *Regional Geology of China*, (2): 150 - 160 (in Chinese with English abstract)
- Qiu YX, Zhang YC and Ma WP. 1998. Tectonic characteristics and evolution of the Xuefengshan intracontinental orogenic zone. *Geological Journal of China Universities*, 4 (4): 432 - 443 (in Chinese with English abstract)
- Rao JR, Wang JH and Cao YZ. 1993. Deep structure in Hunan. *Hunan Geology*, 7 (Suppl.): 1 - 101 (in Chinese with English abstract)

- Rollinson H. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Singapore: Longman, 1 - 56
- Shen WZ, Zhu JC, Liu CS *et al.* 1993. Sm-Nd isotopic study of basement metamorphic rocks in South China and its constraint on material sources of granitoids. *Acta Petrologica Sinica*, 9(2): 115 - 124 (in Chinese with English abstract)
- Shen WZ, Ling HF, Li WX *et al.* 1999. Study on the Nd-Sr isotopic compositions of granitoids in SE China. *Geol. J. China Uni.*, 5(1): 22 - 32 (in Chinese with English abstract)
- Shen WZ, Yu JH, Zhao L *et al.* 2003. Nd isotopic characteristics of post-Archean sediments from the Eastern Nanling Range: Evidence for crustal evolution. *Chin. Sci. Bull.*, 48: 1740 - 1745 (in Chinese)
- Shen WZ, Ling HF and Sun T. 2007. Sr-Nd isotopic geochemistry of the late Mesozoic granites and volcanic rocks in Southern China. In: Zhou XM (ed.). *Genesis of Late Mesozoic Granite and Lithosphere Dynamic Evolution in Nanling Region*. Beijing: Science Press, 123 - 160 (in Chinese)
- Shen WZ, Shu LS, Xiang L *et al.* 2009. Geochemical characteristics of Early Paleozoic sedimentary rocks in the Jinggangshan area, Jiangxi Province and the constraining to the sedimentary environment. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2442 - 2458 (in Chinese with English abstract)
- Shu LS, Faure M, Jiang SY *et al.* 2006. SHRIMP zircon U-Pb age, litho- and biostratigraphic analyses of the Huaiyu Domain in South China: Evidence for a Neoproterozoic orogen, not Late Paleozoic-Early Mesozoic collision. *Episodes*, 29(4): 244 - 252
- Shu LS, Faure M, Wang B *et al.* 2008. Late Paleozoic-Early Mesozoic geological features of South China; Response to the Indosinian Collision Event in Southeast Asia. *Comptes rendus Geoscience*, 340: 151 - 165 doi:10.1016/j.crte.2007.10.010
- Shu LS, Zhou XM, Yu JH *et al.* 2008. Early Paleozoic orogenic belt in the eastern segment of South China. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1581 - 1593 (in Chinese with English abstract)
- Shui T. 1987. Tectonic framework of the continental basement of southeastern China. *Science in China (Series B)*, (4): 414 - 422 (in Chinese)
- Sun MZ and Xu KQ. 1990. The Caledonian granites in South China and preliminary analysis on their geological setting. *J. Nanj. Uni. (Earth Sciences)*, (4): 10 - 22 (in Chinese with English abstract)
- Sun T, Zhou XM, Chen PR *et al.* 2003. Strongly peraluminous granites of Mesozoic in eastern Nanling Region, Southern China and implications for tectonics. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1209 - 1218 (in Chinese)
- Sylvester PJ. 1998. Post-collisional peraluminous granites. *Lithos*, 45: 29 - 44
- Tarney J and Jones CE. 1994. Trace element geochemistry of orogenic igneous rocks and crustal growth models. *J. Geol. Soc. London*, 151: 855 - 868
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell, 1 - 312
- Turner S, Sandiford M and Foden J. 1992. Some geodynamic and compositional constraints on "postorogenic" magmatism. *Geology*, 20: 931 - 934
- Wang DZ, Lin CY and Zhou XM. 1978. The Cizhu tonalite in Jingxi Province and genesis of the neighbouring regional metamorphic rocks. *Journal of Nanjing University*, 1: 88 - 99 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Sun DY, Li HM *et al.* 2002. A-type granites in northeastern China; Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chem. Geol.*, 187: 143 - 173
- Wu RX, Zheng YF and Wu YB. 2005. Zircon U-Pb age, element and oxygen isotope geochemistry of Neoproterozoic granodiorites in South Anhui. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 587 - 606 (in Chinese with English abstract)
- Wu RX, Zheng YF, Wu YB *et al.* 2006. Reworking of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China. *Precamb. Res.*, 146: 179 - 212
- Xiang L and Shu LS. 2010. Predevonian tectonic evolution of the eastern South China block: Geochronological evidence from detrital zircons. *Science in China (Earth Sciences)*, 53(10): 1427 - 1444
- Xiao QH, Deng JF, Ma DQ *et al.* 2002. *The Ways of Investigation on Granitoids*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Xie DK, Ma RS, Zhang YS *et al.* 1996. *Crust Growth and Mantle Plume Tectonics of South China Continent*. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 257 (in Chinese)
- Xu DR, Chen GH, Xia B *et al.* 2006. The Caledonian adakite-like granodiorites in Banshanpu area, eastern Hunan Province, South China: Petrogenesis and geological significance. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 507 - 521 (in Chinese with English abstract)
- Xu KQ, Liu YJ, Yu SJ *et al.* 1960. Discovery of Caledonian granite in southern Jiangxi. *Geological Review*, 20(3): 112 - 114 (in Chinese)
- Xu KQ, Sun N, Wang DZ *et al.* 1963. The intrusional times, feature of the lithology, the rule of distribution and the attributes of mineralization of polycyclic granitoids in South China. *Acta Geol. Sinica*, 43(1): 1 - 27 (in Chinese with English abstract)
- Xu KQ, Sun N, Wang DZ *et al.* 1984. Petrogenesis of the granitoid and their metallogenetic relations in South China. In: Xu KQ and Tu GC (eds.). *Geology of Granites and Their Metallogenetic Relations*. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1 - 20 (in Chinese)
- Yang SF, Chen HL, Wu GH *et al.* 1995. Discovery of Early Paleozoic island-arc volcanic rock in northern part of Fujian Province and the significance for tectonic study. *Scientia Geologica Sinica*, 30(2): 105 - 116 (in Chinese with English abstract)
- Yin HF, Wu SB, Du YS *et al.* 1999. South China defined as part of Tethyan archipelagic ocean system. *Earth Science*, 24(1): 1 - 12 (in Chinese with English abstract)
- Zeng Y and Yang MG. 1999. Central Jiangxi collision mélange zone. *Regional Geology of China*, 18(1): 17 - 22 (in Chinese with English abstract)
- Zhang FR, Shu LS, Wang DZ *et al.* 2009. Discussions on the tectonic setting of Caledonian granitoids in the eastern segment of South China. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 248 - 258 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM and Wang DZ. 1988. The peraluminous granodiorites with low initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio and their genesis in southern Anhui Province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 4(3): 37 - 45 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM. 2003. My thinking about granite genesis of South China. *Geol. J. China Uni.*, 9(4): 556 - 565 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM. 2007. *Genesis of Late Mesozoic Granites in Nanling Area and Lithosphere Dynamic Evolution*. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Zhu BQ. 1998. *Theory and Application of Isotope System in Earth Science*. Beijing: Science Press (in Chinese)

附中文参考文献

- 柏道远, 周亮, 王先辉等. 2007. 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-早古生代晚期构造背景的制约. *地质学报*, 81(6): 755 - 771
- 陈江峰, 江博明. 1999. Nd, Sr, Pb 同位素踪和中国东南大陆地壳演化. 见: 郑永飞主编. *化学地球动力学*. 北京: 科学出版社, 262 - 287
- 陈江峰, 郭新生, 汤加富等. 1999. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄. *南京大学学报(自然科学)*, 35(6): 649 - 658
- 陈小明, 王汝成, 刘昌实等. 2002. 广东从化佛冈(主体)黑云母花岗岩定年和成因. *高校地质学报*, 8(3): 293 - 307
- 陈佑纬, 毕献武, 胡瑞忠等. 2009. 贵东复式岩体印支期产铀和非产铀花岗岩地球化学特征对比研究. *矿物岩石*, 29(3): 106 - 114
- 程海. 1991. 浙西北晚元古代早期碰撞造山带的初步研究. *地质论评*, 37(3): 203 - 213

- 高山, 骆庭川, 张本仁等. 1999. 中国东部地壳的结构和组成. 中国科学(D辑), 29(3): 204-213
- 洪大卫, 谢锡林, 张季生. 2002. 试析杭州-诸广山-花山高 e_{Nd} 值花岗岩带的地质意义. 地质通报, 21(6): 348-354
- 侯增谦, 卢记仁, 林盛中等. 2005. 峨眉地幔柱轴部的榴辉岩——地幔岩源区主元素、痕量元素及 Sr、Nd、Pb 同位素证据. 地质学报, 79(2): 200-219
- 胡恭仁, 章邦桐. 1998. 赣中变质基底的 Nd 同位素组成和物质来源. 岩石矿物学杂志, 17(1): 35-39
- 黄辉, 李荣安, 杨传夏. 1989. 福建东南沿海变质带的年代学研究及其大地构造意义. 科学通报, (16): 1249-1251
- 黄萱, DePaolo DJ. 1989. 华南古生代花岗岩 Nd-Sr 同位素研究及华南基底. 岩石学报, 5(1): 28-36
- 贾承造, 施央申, 郭令智. 1988. 东秦岭板块构造. 南京: 南京大学出版社, 1-130
- 江西省地质矿产局. 1984. 江西省区域地质志. 北京: 地质出版社
- 李献华, McCulloch MT. 1996. 扬子南缘沉积岩的 Nd 同位素演化及其大地构造意义. 岩石学报, 12(3): 359-370
- 李献华, 李正祥, 周汉文等. 2002. 皖南新元古代花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学和 Nd 同位素研究. 地质论评, 48(增刊): 8-16
- 丘元禧, 马文璞, 范小林等. 1996. “雪峰古陆”加里东期的构造性质与构造演化. 中国区域地质, (2): 150-160
- 丘元禧, 张渝昌, 马文璞. 1998. 雪峰山陆内造山带的构造特征与演化. 高校地质学报, 4(4): 432-443
- 饶家荣, 王纪恒, 曹一中. 1993. 湖南深部构造. 湖南地质, 7(增刊): 1-101
- 沈渭洲, 朱金初, 刘昌实等. 1993. 华南基底变质岩的 Sm-Nd 同位素及其对花岗岩类物质来源的制约. 岩石学报, 9(2): 115-124
- 沈渭洲, 凌洪飞, 李武显等. 1999. 中国东南部花岗岩类 Nd-Sr 同位素研究. 高校地质学报, 5(1): 22-32
- 沈渭洲, 于津海, 赵蕾等. 2003. 南岭东段后太古宙地层的 Sm-Nd 同位素特征与地壳演化. 科学通报, 48(16): 1740-1745
- 沈渭洲, 凌洪飞, 孙涛. 2007. 华南晚中生代花岗岩、火山岩 Sr-Nd 同位素地球化学. 见: 周新民主编. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社, 123-160
- 沈渭洲, 舒良树, 向磊等. 2009. 江西井冈山地区早古生代晚期沉积岩的地球化学特征及其对沉积环境的制约. 岩石学报, 25(10): 2442-2458
- 舒良树, 周新民, 于津海等. 2008. 华南东段早古生代造山带研究. 地质通报, 27(10): 1581-1593
- 水涛. 1987. 中国东南大陆基底构造格局. 中国科学(B辑), (4): 414-422
- 孙明志, 徐克勤. 1990. 华南加里东花岗岩及其形成地质环境试析. 南京大学学报(地球科学), (4): 10-22
- 孙涛, 周新民, 陈培荣等. 2003. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义. 中国科学(D辑), 33(12): 1209-1218
- 王德滋, 林承毅, 周新民. 1978. 江西慈竹英云闪长岩体及其周围区域变质岩的成因. 南京大学学报(自然科学版), (1): 81-99
- 吴荣新, 郑永飞, 吴元保. 2005. 皖南新元古代花岗闪长岩体锆石 U-Pb 定年以及元素和氧同位素地球化学研究. 岩石学报, 21(3): 587-606
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨等. 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社
- 谢谏克, 马荣生, 张禹慎等. 1996. 华南大陆地壳生长过程与地幔柱构造. 北京: 地质出版社. 1-257
- 徐克勤, 刘英俊, 俞受均等. 1960. 江西南部加里东期花岗岩的发现. 地质论评, 20(3): 112-114
- 徐克勤, 孙鼐, 王德滋. 1963. 华南多旋回的花岗岩类的侵入时代、岩性特征、分布规律及其成矿专属性的探讨. 地质学报, 43(1): 1-27
- 徐克勤, 孙乃, 王德滋等. 1984. 华南花岗岩成因与成矿. 见: 徐克勤, 涂光炽主编. 花岗岩地质和成矿关系. 南京: 江苏科学技术出版社, 1-20
- 许德如, 陈广浩, 夏斌等. 2006. 湘东地区板杉铺加里东期埃达克质花岗闪长岩的成因及地质意义. 高校地质学报, 12(4): 507-521
- 杨树锋, 陈汉林, 武光海等. 1995. 闽北早古生代岛弧火山岩的发现及其大地构造意义. 地质科学, 30(2): 105-116
- 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, 24(1): 1-12
- 曾勇, 杨明桂. 1999. 赣中碰撞混合带. 中国区域地质, 18(1): 17-22
- 张芳荣, 舒良树, 王德滋等. 2009. 华南东段加里东期花岗岩类形成构造背景探讨. 地学前缘, 16(1): 248-258
- 周新民, 王德滋. 1988. 皖南低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始比的过铝花岗闪长岩及其成因. 岩石学报, 4(3): 37-45
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考. 高校地质学报, 9(4): 556-565
- 周新民. 2007. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用. 北京: 科学出版社