

大别北麓汤家坪花岗斑岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年和岩石地球化学特征及其对岩石成因的制约*

魏庆国^{1,2} 高昕宇^{1,2} 赵太平^{1**} 陈伟^{1,2} 杨岳衡³

WEI QingGuo^{1,2}, GAO XinYu^{1,2}, ZHAO TaiPing^{1**}, CHEN Wei^{1,2} and YANG YueHeng³

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2010-01-13 收稿, 2010-03-17 改回.

Wei QG, Gao XY, Zhao TP, Chen W and Yang YH. 2010. Petrogenesis of Tangjiaping granite porphyry in northern Dabie: Evidence from Zircon LA-ICPMS U-Pb dating and geochemical characteristics. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5):1550-1562

Abstract Tangjiaping granite porphyry is located in the northern part of Dabie orogen. Zircon LA-ICPMS U-Pb dating of 20 zircon grains from Tangjiaping granite porphyry gives a concordant age of 121.6 ± 4.6 Ma, the later stage of Early Cretaceous. The granite porphyry is petrochemically characterized by high silica ($\text{SiO}_2 > 72\%$) and alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} > 7.4\%$) with ACNK values between 0.99 and 1.18. The rocks are enriched in light-REE and show an obviously fractionation between light- and heavy-REE elements and serious negative abnormality of Eu ($\delta\text{Eu} = 0.40 \sim 0.58$), Sr, Ba, Nb. P_2O_5 increases with increasing SiO_2 ; Pb decreases with increasing SiO_2 ; Y and Th decrease with increasing Rb. Combined with petrological and geochemical characteristics, Tangjiaping granite porphyry can be classified as the highly fractionated S-type granite. The intrusion has clearly negative $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value ($-17.6 \sim -10.4$) and $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ value ($-15.5 \sim -13.7$), and the Hf and Nd model age are 1843 ~ 2281 Ma and 2034 ~ 2178 Ma, respectively suggesting that the Tangjiaping granite was formed by partial melting of the crust. The moderate I_{Sr} ratios indicate that the magma source should include low-mature crust. In combination with the characteristics of REE, we argue that Tangjiaping granite was formed by the lower crust.

Key words Tangjiaping granite porphyry; Highly fractionated S-type granite; Zircon U-Pb dating; Hf isotopes; Lower crust partial melting

摘要 河南商城县汤家坪花岗斑岩产于大别造山带北麓, 岩体位于早白垩世达权店花岗岩体的南缘。岩体斑晶含量占 10% 左右, 主要由钾长石、斜长石和石英组成, 基质主要由钾长石、斜长石、石英和少量黑云母组成, 副矿物主要为磁铁矿、赤铁矿、锆石。花岗斑岩中锆石 U-Pb 年龄为 121.6 ± 4.6 Ma, 为早白垩世中晚期。汤家坪花岗斑岩含白云母, 无角闪石, 具高硅 ($\text{SiO}_2 > 72\%$)、高碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} > 7.4\%$) 的特征, 铝饱和指数 (ACNK) 为 0.99 ~ 1.18, 轻稀土富集、重稀土亏损 ($\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 10.9 \sim 44.5$, 明显亏损 Eu ($\delta\text{Eu} = 0.40 \sim 0.58$)、Sr、Ba、Nb 等。 P_2O_5 与 SiO_2 含量呈正相关关系、Pb 与 SiO_2 含量呈负相关关系、Y、Th 随 Rb 升高而降低, 属弱过铝质高分异 S 型花岗岩。汤家坪花岗斑岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($-17.6 \sim -10.4$) 和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($-15.5 \sim -13.7$) 值均显示出壳源特征, $t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$ 和 $t_{\text{DM2}}(\text{Nd})$ 分别为 1843 ~ 2281 Ma 和 2034 ~ 2178 Ma, 反映汤家坪花岗斑岩来源于古老地壳物质的重熔, 中等的初始 Sr 同位素指示源岩中可能有部分低成熟度地壳物质加入。结合稀土元素特征, 认为汤家坪花岗

* 本文受国家基础研究发展计划(973)项目(2006CB403502)资助。

第一作者简介: 魏庆国, 男, 1982 年生, 博士研究生, 岩石学专业, E-mail: weiqingguo2000@163.com

** 通讯作者: 赵太平, 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 岩石学专业, E-mail: tpzhao@gig.ac.cn

斑岩源岩来源较深,主要源于下地壳物质。

关键词 汤家坪花岗斑岩;高分异 S 型花岗岩;锆石 U-Pb 定年;Hf 同位素;下地壳部分熔融

中图法分类号 P588.121; P597.3

1 引言

东秦岭-大别地区是我国重要的 Mo、Au、Pb、Zn 多金属成矿区,研究发现大部分矿床的形成与中生代花岗岩的形成有成因联系(Stein *et al.*, 1997; 陈衍景等, 2000; 张正伟等, 2001; 李永峰等, 2005; 叶会寿等, 2006)。大部分矿床集中于华北南缘-东秦岭地区,在大别地区则较少有较大规模的矿床产出。以河南商城县汤家坪斑岩型大型钼矿(河南省地矿厅区域地质调查队, 1994^①)和安徽金寨县沙坪沟斑岩型特大型钼矿为代表的一系列钼矿在大别山地区的发现,使在该地区深入找矿充满了前景。

东秦岭-大别地区钼矿带成因的研究有赖于对含矿岩体的成因类型、成岩过程、构造环境和物质来源等进行研究。汤家坪钼矿赋存于汤家坪花岗斑岩的内外接触带中,花岗斑岩被认为是该钼矿的成矿母岩(马宏卫, 2007; 袁德志等, 2008)。此类花岗斑岩在东秦岭-大别地区分布较广,是东秦岭-大别地区斑岩型矿床的主要成矿母岩。已有研究者对汤家坪花岗斑岩进行了部分岩石地球化学工作,并在此基础上提出其属于超酸性铝不饱和高钾钙碱性系列,形成于后碰撞构造环境,软流圈减压熔融流体系统提供了岩浆侵位动力和

成矿物质来源(杨泽强, 2009)。但对该岩体的研究,目前还缺乏年代学及同位素地球化学的研究,影响了对此花岗岩的成因类型和岩浆源区等问题的探讨。此外,汤家坪花岗斑岩与商城花岗岩体、达权店花岗岩体相伴产出,对于它们之间的成因关系,也需要在对比地球化学、年代学、同位素地球化学等资料的基础上来加以讨论。

本文通过对采集的汤家坪花岗斑岩样品进行全岩地球化学、锆石 U-Pb 定年及原位 Hf 同位素组成进行研究,并结合其岩石学特征分析了花岗斑岩的岩石成因,制约其物质来源,进而为研究东秦岭-大别地区中生代花岗岩及其与钼多金属成矿的关系提供更多的依据。

2 地质背景

汤家坪花岗斑岩位于河南省商城县达权店村以南约 10km,构造上位于大别山变质核杂岩隆起带北部(图 1),属东秦岭造山带的东延部分。汤家坪花岗斑岩出露面积 0.34km²,为小斑岩体(图 2);平面上岩体呈东南大、北西小的弯月型,岩体为不规则的岩株,与围岩呈侵入接触关系,是汤家坪钼矿的成矿母岩(马宏卫, 2007; 杨泽强等, 2008)。区域地层主要为元古宙大别片麻杂岩,岩性为黑云斜长片麻岩、

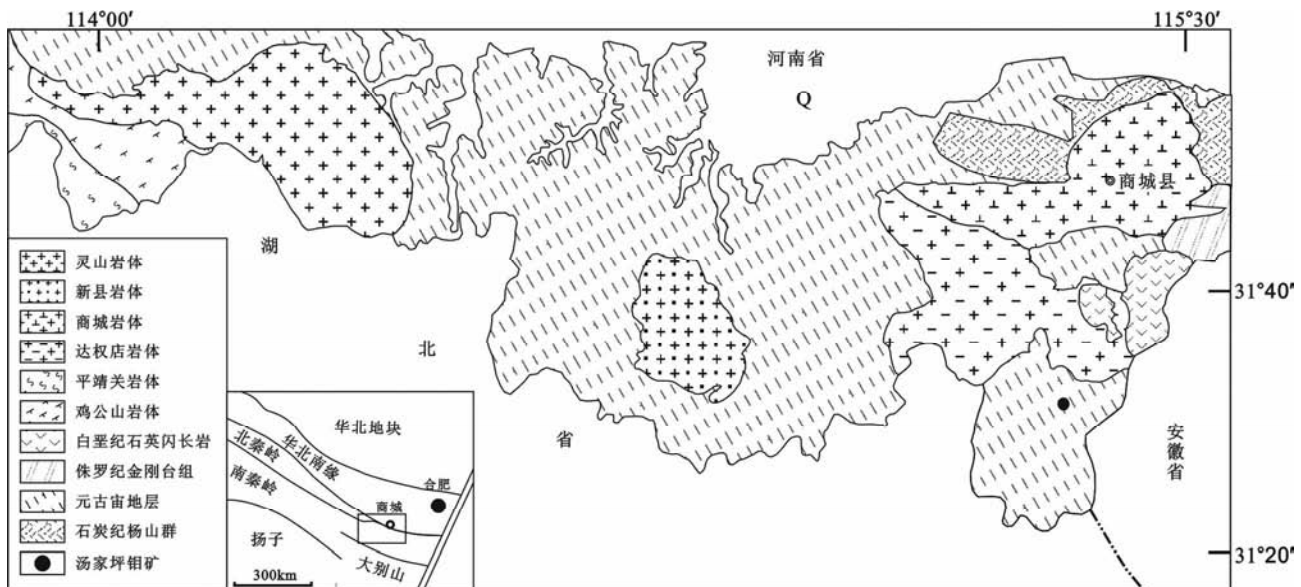


图 1 大别北麓华北南缘桐柏-商城地质简图(据河南省地矿局第三地质调查队, 2007^②)

Fig. 1 Geological map of Tongbai-Shangcheng area in northern Dabie, southern margin of North China Craton

^① 河南省地矿厅区域地质调查队. 1994. 中华人民共和国区域地质调查报告. 1:5 万商城幅和达权店幅

^② 河南省地矿局第三地质调查队. 2007. 河南省南部地质图(1:25 万)

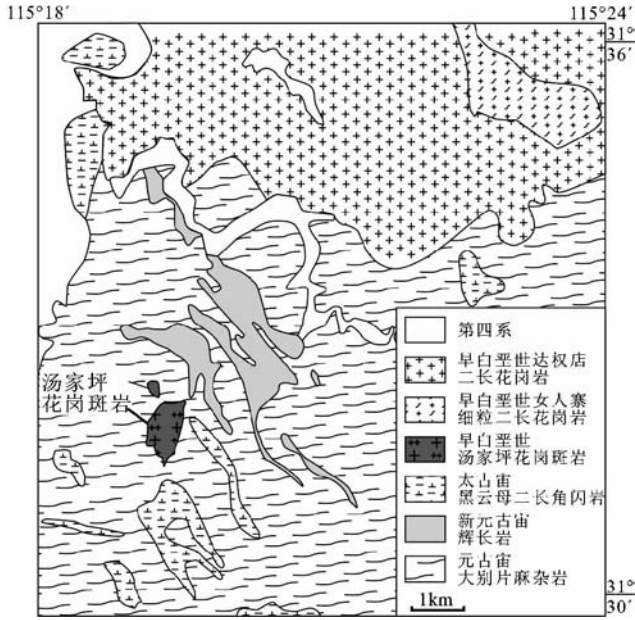


图2 汤家坪花岗斑岩区域地质图(河南省地矿局第三地质调查队,2006^①,2007)

Fig.2 Geological map of Tangjiaping granite porphyry



图3 汤家坪花岗斑岩照片

(a)-花岗斑岩;(b)-花岗斑岩岩芯;(c)-含矿花岗斑岩

Fig.3 Photograph of Tangjiaping granite porphyry

(a)-granite porphyry; (b)-rock core; (c)-ore-bearing porphyry

呈半自形-他形粒状,颗粒大小0.6~0.9 mm,普遍被熔蚀成港湾状、不规则状,有的为浑圆状。基质成分主要为石英、钾长石、斜长石,另有少量黑云母、白云母分布。副矿物主要为磁铁矿、赤铁矿、锆石、榍石、磷灰石和金红石等。

4 样品与分析方法

本文选取了1个花岗斑岩样品(取样位置:N31°32'50", E115°20'01")的锆石用于LA-ICPMS U-Pb年代学和Lu-Hf同位素分析;选取10个较新鲜的花岗斑岩样品,用于全岩主微量元素的测试分析。

锆石U-Pb定年及Hf同位素组成分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成。U-Pb用Agilent公司7500a型ICPMS进行测试,Lu-Hf同位素测试用德国Finnigan MAT公司制造的Neptune型多接收电感耦合等离子体质谱(MC-

斜长角闪片麻岩和斜长角闪岩。区域构造以推覆构造和断裂构造为主,东西向商城断裂位于该区北部,近南北向商城-麻城断裂位于其西部。区域岩浆岩以早白垩中酸性侵入岩为主,有少量基性岩墙。

3 岩体岩石学特征

汤家坪花岗斑岩(图3)呈浅肉红色,斑状结构,基质具细粒-微细粒花岗结构,块状构造。斑晶主要为钾长石斑晶、浅肉红色,多数为微斜长石,颗粒大小1~3mm,自形程度高,普遍发育格子双晶,个别见卡氏双晶,常见有斜长石嵌晶。费氏台测定钾长石的2V介于65°~84°之间,一般65°~70°,三斜度0.53~0.85,有序化程度中等,显示岩体形成于浅成环境(杨泽强,2009)。斜长石斑晶呈灰白色,半自形板柱状,可见斜长石呈包体分布于钾长石大斑晶之内;部分发育细密而平直的聚片双晶,局部见钠长石化的净边。所有的长石皆见绢云母粘土岩化蚀变。X射线斑晶衍射结果,显示其结构有序度指数为83.9,属低温过渡型斜长石,费氏台测定斜长石多为更长石,少部分为钠长石(杨泽强,2009)。石英斑晶

ICP-MS),加载德国Lamda Physik公司的Geolas193nm准分子激光取样系统。激光束直径为60μm,剥蚀频率为8Hz,能量密度为15~20J·cm⁻²,剥蚀时间约60s。详细的分析程序见Xu *et al.* (2004)。本次实验测定过程中,91500锆石的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf的测定结果为0.282301±20,该值与用溶液法获得的值(0.282306±28; Woodhead *et al.*, 2004)在误差范围内一致。锆石U-Pb同位素及U、Th数据处理使用Glitter4.0软件(Jackson *et al.*, 2004)、U-Pb谐和线图和加权平均年龄的计算及绘图用Isoplot3.0软件(Ludwig, 1999)完成。

主、微量元素分析在香港大学地球科学系完成。主微量元素分析用X射线荧光光谱化学分析(XRF)熔铸玻璃片法,分析仪器为Phillips PW2400,分析精度优于1%~2%。微量元

① 河南省地矿局第三地质调查队. 2006. 河南省商城县汤家坪钼矿区地形地质图

表 1 汤家坪花岗斑岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年数据

Table 1 Zircon LA-ICPMS U-Pb data of Tangjiaping granite porphyry

样品号	(all) Pb ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	U/Th	同位素比值						年龄 (Ma)					
					$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ
01	21	161	336	2.08	0.1144	0.0198	0.2944	0.0494	0.0187	0.0008	1870	336	262	39	119	5
02	28	1722	796	0.46	0.0660	0.0038	0.1901	0.0102	0.0209	0.0005	805	76	177	9	133	3
03	17	343	718	2.10	0.0526	0.0040	0.1393	0.0101	0.0192	0.0004	312	173	132	9	123	2
04	15	823	374	0.45	0.0842	0.0126	0.2236	0.0327	0.0193	0.0006	1298	309	205	27	123	4
05	7	156	148	0.95	0.2198	0.0238	0.6854	0.0677	0.0226	0.0010	2979	181	530	41	144	6
06	53	1135	1914	1.69	0.0491	0.0030	0.1320	0.0079	0.0195	0.0003	153	139	126	7	124	2
07	16	590	607	1.03	0.0586	0.0038	0.1547	0.0098	0.0191	0.0003	553	147	146	9	122	2
08	41	1041	1689	1.62	0.0518	0.0028	0.1287	0.0068	0.0180	0.0003	274	128	123	6	115	2
09	29	552	1121	2.03	0.0617	0.0020	0.1712	0.0051	0.0202	0.0003	662	39	160	4	129	2
10	34	1133	1336	1.18	0.0671	0.0035	0.1766	0.0089	0.0191	0.0003	842	112	165	8	122	2
11	25	702	734	1.05	0.0499	0.0043	0.1328	0.0113	0.0193	0.0003	190	198	127	10	123	2
12	15	689	460	0.67	0.0461	0.0038	0.1233	0.0100	0.0194	0.0003	200	181	118	9	124	2
13	20	955	441	0.46	0.0549	0.0072	0.1502	0.0193	0.0199	0.0004	408	294	142	17	127	3
14	9	253	311	1.23	0.0479	0.0029	0.1232	0.0073	0.0187	0.0003	95	137	118	7	119	2
15	22	655	755	1.15	0.0869	0.0057	0.2520	0.0158	0.0210	0.0004	1358	130	228	13	134	2
16	18	456	606	1.33	0.0514	0.0028	0.1522	0.0080	0.0215	0.0003	260	126	144	7	137	2
17	10	224	262	1.17	0.0492	0.0047	0.1351	0.0126	0.0199	0.0004	156	216	129	11	127	2
18	13	494	500	1.01	0.0528	0.0038	0.1328	0.0094	0.0182	0.0003	322	166	127	8	116	2
19	16	386	638	1.65	0.0563	0.0032	0.1650	0.0089	0.0212	0.0003	466	128	155	8	135	2
20	16	486	563	1.16	0.0584	0.0040	0.1675	0.0111	0.0208	0.0003	546	153	157	10	133	2

素分析在 VG Elemental Plasma Quad Excell ICP-MS 上进行, 分析流程采用 Qi *et al.* (2000), 分析精度可达 5%。

Sr-Nd 同位素分析测试均在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室采用 Micromass 公司 Isoprobe 型 MC-ICP-MS 测定。 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$ 值用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 标准化, 详细分析测定方法见韦刚健等 (2002); $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 标准化, 详见梁细荣等 (2003)。Sr-Nd 同位素分析精度高于 0.002%。

5 分析结果

5.1 锆石 U-Pb 年代学

汤家坪花岗斑岩锆石晶形相对完好, 主要为长柱状, 长宽比为 1.3 : 1 到 4.3 : 1, 锆石颜色以浅黄色为主。对汤家坪花岗斑岩 TJP-3-33 样品 20 个锆石颗粒的 20 个点进行了 U-Pb 同位素分析 (表 1)。锆石的 Th 含量介于 $161 \times 10^{-6} \sim 1722 \times 10^{-6}$, 平均 648×10^{-6} ; U 含量为 $148 \times 10^{-6} \sim 1914 \times 10^{-6}$, 平均 715×10^{-6} ; U/Th = 0.45 ~ 2.10, 平均为 1.22。如图 4, 大部分锆石的数据点位于 U-Pb 谐和线下方, 部分锆石的数据点偏离谐和线, 但它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄基本一致, 20 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值介于 $115 \pm 2\text{Ma} \sim 144 \pm 6\text{Ma}$, 其中 4 颗锆石的 Pb 丢失严重, 偏离谐和线较远, 剩下 16 颗锆石数据点谐和年龄为 $121.6 \pm 4.6\text{Ma}$ (图 4), 代表汤家坪花岗

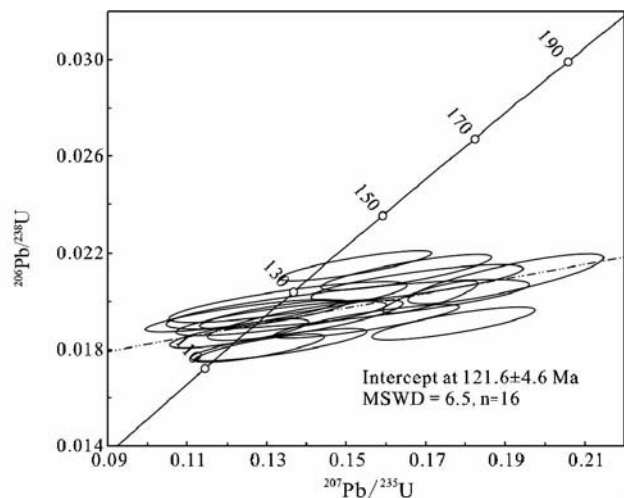


图 4 汤家坪花岗斑岩的锆石 LA-ICPMS U-Pb 谐和图
Fig. 4 Zircon LA-ICPMS U-Pb concordia diagram of Tangjiaping granite porphyry

斑岩的结晶年龄。

5.2 地球化学特征

5.2.1 主要元素

汤家坪花岗斑岩的主、微量元素分析结果列于表 2。汤家坪花岗斑岩 SiO_2 含量较高 (72.06% ~ 78.08%), $\text{Al}_2\text{O}_3 =$

表2 汤家坪花岗斑岩的主量元素 (wt%) 和微量元素 ($\times 10^{-6}$) 分析结果Table 2 Major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) elements compositions of Tangjiaping granite porphyry

样品号	TJP-13	TJP-14	TJP-15	TJP-17	TJP-19	TJP-3	TJP-3-2	TJP-3-33	TJP-3-6	TJP-5
SiO ₂	77.58	72.06	77.55	76.51	77.13	78.08	76.60	76.04	76.28	77.35
TiO ₂	0.19	0.08	0.22	0.18	0.21	0.30	0.37	0.33	0.35	0.17
Al ₂ O ₃	12.39	15.56	11.81	12.42	12.64	12.15	12.14	12.43	12.29	12.79
Fe ₂ O ₃ ^T	0.57	0.73	1.74	0.20	1.53	0.88	0.68	0.48	0.72	1.33
MnO	0.00	0.01	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MgO	0.27	0.20	0.41	0.22	0.31	0.53	0.45	0.35	0.47	0.27
CaO	0.14	0.62	0.81	0.30	0.58	0.17	0.22	0.20	0.25	0.44
Na ₂ O	2.38	4.33	3.77	2.60	2.73	2.81	2.95	3.57	3.06	3.25
K ₂ O	6.50	6.32	3.66	6.51	4.82	5.03	5.59	5.80	5.44	4.37
P ₂ O ₅	0.03	0.02	0.06	0.08	0.08	0.12	0.12	0.07	0.12	0.07
总量	100.05	99.93	100.07	99.03	100.05	100.08	99.13	99.28	98.99	100.05
ACNK	1.11	1.03	1.01	1.04	1.17	1.17	1.07	0.99	1.08	1.18
ANK	1.13	1.12	1.16	1.09	1.30	1.20	1.11	1.02	1.13	1.27
K ₂ O/Na ₂ O	2.73	1.46	0.97	2.50	1.77	1.79	1.89	1.62	1.78	1.34
Mg [#]	48.0	35.0	32.0	69.0	29.0	54.0	57.0	59.0	56.0	29.0
Ga	18.3	32.8	20.6	22.7	23.8	18.3	18.5	19.6	18.4	19.8
Rb	383	336	241	316	293	262	236	262	229	302
Ba	221	153	273	192	198	348	358	318	390	203
Th	65.4	44.7	51.2	70.9	64.9	71.4	81.7	81.2	82.5	73.9
Nb	47.4	62.0	40.5	73.3	67.3	67.9	69.5	71.0	63.9	68.1
U	8.20	48.7	21.0	14.7	13.9	50.0	52.7	39.7	53.5	17.2
Ta	3.93	4.63	2.60	4.59	3.85	4.64	5.10	4.88	4.63	4.64
Sr	38.2	67.8	111	45.8	57.3	53.1	57.9	56.2	64.6	48.2
Y	7.61	9.49	16.4	11.5	11.5	14.2	14.7	15.1	14.9	10.6
Zr	132	122	107	153	150	203	200	162	200	129
Hf	4.79	6.54	3.30	4.33	4.11	6.76	6.28	5.54	6.54	4.56
Pb	9.08	24.8	14.9	8.85	11.1	14.1	13.0	14.8	15.0	14.2
Mo	190	236	13.9	282	1077	617	233	260	772	765
La	64.7	21.3	46.5	46.0	51.3	63.2	54.6	54.3	64.7	58.1
Ce	91.6	34.4	77.1	77.8	84.6	102	92.1	93.8	108.0	95.0
Pr	7.65	2.95	7.03	6.81	7.22	9.90	9.11	8.59	10.20	8.16
Nd	21.3	8.55	20.9	19.3	21.0	31.3	29.5	27.3	31.0	22.7
Sm	2.79	1.28	3.17	2.73	2.67	4.72	4.42	4.18	4.77	3.23
Eu	0.36	0.23	0.40	0.33	0.33	0.60	0.66	0.59	0.67	0.36
Gd	1.92	1.12	2.28	1.83	1.78	3.68	3.77	3.22	3.86	2.28
Tb	0.27	0.19	0.38	0.27	0.26	0.52	0.54	0.53	0.58	0.31
Dy	1.36	1.16	2.33	1.38	1.43	2.94	2.92	2.72	3.06	1.55
Ho	0.23	0.26	0.45	0.29	0.28	0.58	0.56	0.54	0.59	0.35
Er	0.82	0.90	1.37	0.96	0.96	1.84	1.75	1.73	1.73	1.08
Tm	0.13	0.17	0.27	0.17	0.18	0.26	0.28	0.30	0.28	0.20
Yb	1.04	1.41	1.71	1.20	1.29	1.93	1.84	1.87	1.92	1.54
Lu	0.18	0.30	0.29	0.23	0.23	0.31	0.33	0.33	0.36	0.23
ΣREE	194	74.2	164	159	174	224	202	200	232	195
δEu	0.48	0.58	0.45	0.45	0.46	0.44	0.49	0.49	0.47	0.40
(La/Yb) _N	44.5	10.9	19.5	27.4	28.5	23.4	21.3	20.8	24.1	27.1
(Gd/Yb) _N	1.52	0.66	1.11	1.26	1.14	1.57	1.70	1.42	1.66	1.23
(Ho/Yb) _N	0.66	0.56	0.79	0.73	0.66	0.89	0.91	0.87	0.92	0.69
10000 × Ga/Al	2.79	3.79	3.30	3.46	3.57	2.86	2.89	2.99	2.83	2.92
T(°C)	760	726	722	765	773	799	786	754	786	757

注: Fe₂O₃^T 为全铁, ACNK = Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O) 摩尔数分数比; ANK = Al₂O₃ / (Na₂O + K₂O) 摩尔数分数比; Mg[#] = Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺) × 100; δEu = 2Eu_N / (Sm_N + Gd_N); (La/Yb)_N, (Gd/Yb)_N 和 (Ho/Yb)_N 为球粒陨石标准化值, 标准化值引自 Sun and McDonough, 1989; T(°C) 为锆石饱和温度, $T_{Zr} = 12900 / [2.95 + 0.85M + \ln(496000/Zr_{melt})]$, $M = (Na + K + 2Ca) / (Al \times Si)$, Zr_{melt} 为锆含量 (Watson and Harrison, 1983)

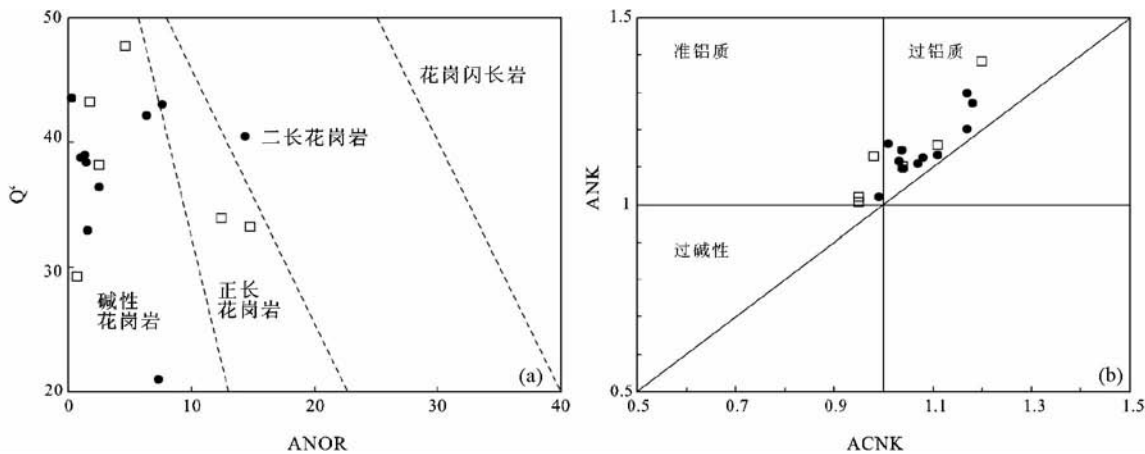


图 5 Q'-ANOR 标准化矿物图解和 ANCK-ANK 图解

●为本次工作所测的汤家坪花岗斑岩样品；□引自杨泽强,2009；(a) 底图据 Streckeisen and Le Maitre, 1979, (b) 底图据 Peccerillo and Taylor, 1976； $Q' = Q / (Q + Or + Ab + An) \times 100$ ； $ANOR = An / (Or + An) \times 100$ (标准矿物计算)

Fig. 5 Q'-ANOR normative composition diagram for classification of Tangjiaping granite and Tangjiaping granite porphyry ANCK-ANK diagram

●Samples of Tangjiaping granite porphyry in this study；□ from Yang, 2009；(a) after Streckeisen and Le Maitre, 1979, (b) after Peccerillo and Taylor, 1976； $Q' = Q / (Q + Or + Ab + An) \times 100$ ； $ANOR = An / (Or + An) \times 100$ (CIPW)

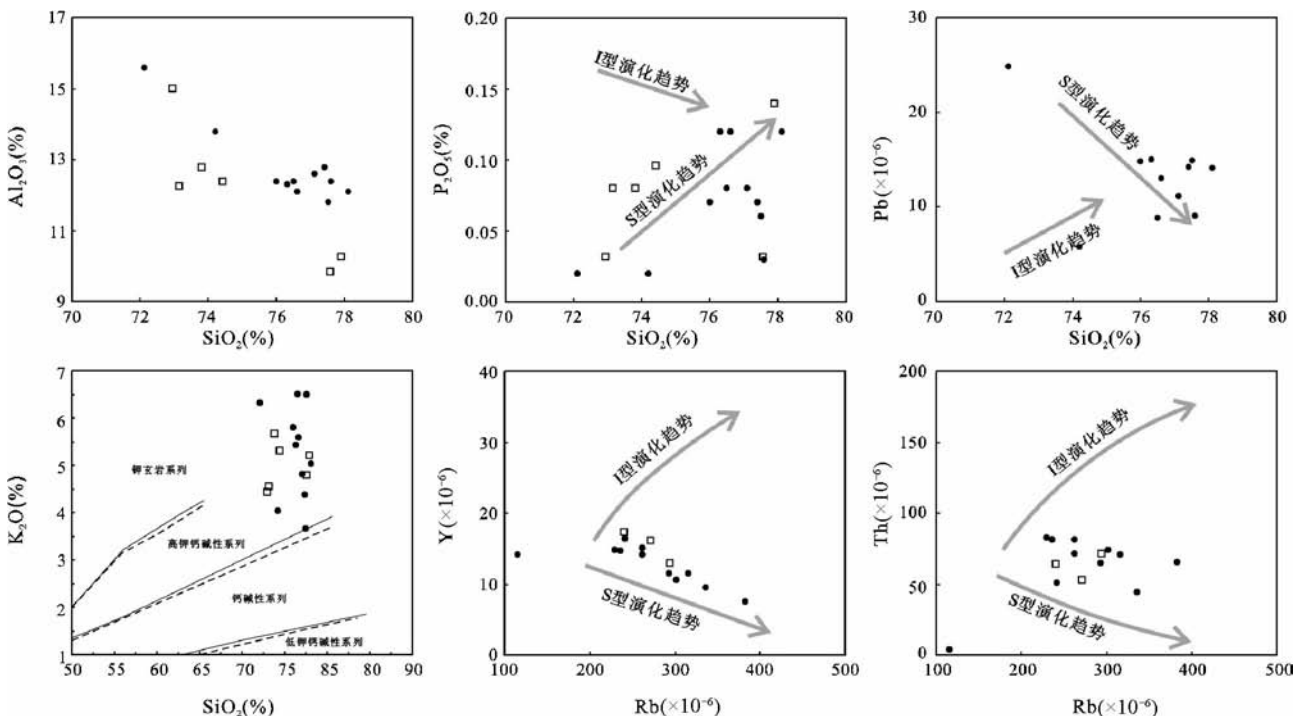


图 6 汤家坪花岗斑岩哈克图解

样品符号与图 5 同

Fig. 6 Harker diagrams for Tangjiaping granite porphyry

Symbols are same as in Fig. 5

11.81% ~ 15.56%, $MgO = 0.20\% \sim 0.53\%$, $Mg^\# (Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+}))$ 摩尔比值) = 29 ~ 69, 平均 47, $Fe_2O_3^T = 0.20\% \sim 1.74\%$, $CaO = 0.14\% \sim 0.81\%$ (表 2)。岩体碱含

量高, $K_2O = 3.66\% \sim 6.51\%$, $Na_2O = 2.38\% \sim 4.33\%$, K_2O / Na_2O 比值较高(0.97 ~ 2.73)属于高钾钙碱性系列。在花岗岩的 Q'-ANOR 标准化矿物图解上, 投影于二长花岗岩、正长

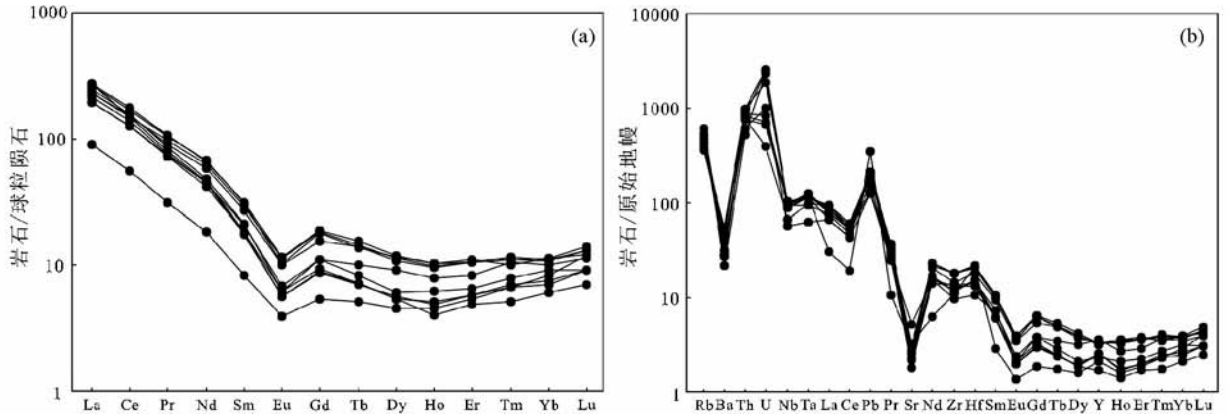


图7 汤家坪花岗斑岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b) (标准化值引自 Sun and Mcdonough, 1989)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle normalized trace elements spider diagram(b) for Tangjiaping granite porphyry (after Sun and Mcdonough, 1989)

表3 汤家坪花岗斑岩的锆石 Hf 同位素组成

Table 3 Zircon Hf isotopic compositions of Tangjiaping granite porphyry

测点号	t_{Ma}	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	$\pm 2\sigma$	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	$\pm 2\sigma$	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{Lu/Hf}$
01	119	0.015858	0.000764	0.282302	0.000014	-16.6	-14.1	0.50	1332	2065	-0.98
02	133	0.063659	0.002633	0.282402	0.000017	-13.1	-10.4	0.60	1255	1843	-0.92
03	123	0.027104	0.001364	0.282305	0.000013	-16.5	-13.9	0.46	1350	2059	-0.96
04	123	0.048975	0.001828	0.282363	0.000015	-14.5	-11.9	0.53	1284	1932	-0.94
05	144	0.033223	0.001300	0.282354	0.000021	-14.8	-11.8	0.74	1278	1937	-0.96
06	124	0.039450	0.001819	0.282283	0.000014	-17.3	-14.7	0.50	1397	2109	-0.95
07	122	0.032021	0.001259	0.282252	0.000014	-18.4	-15.8	0.50	1420	2177	-0.96
08	115	0.028483	0.001209	0.282207	0.000012	-20.0	-17.6	0.42	1481	2281	-0.96
09	129	0.025488	0.000997	0.282273	0.000014	-17.7	-14.9	0.50	1381	2125	-0.97
10	122	0.045135	0.001981	0.282272	0.000015	-17.7	-15.2	0.53	1419	2135	-0.94
11	123	0.036243	0.001412	0.282355	0.000015	-14.8	-12.2	0.53	1281	1948	-0.96
12	124	0.043346	0.001502	0.282280	0.000014	-17.4	-14.8	0.50	1390	2114	-0.95
13	127	0.056448	0.001900	0.282352	0.000015	-14.9	-12.2	0.53	1302	1954	-0.94
14	119	0.030171	0.001076	0.282333	0.000015	-15.5	-13.0	0.53	1300	1997	-0.97
15	134	0.023798	0.000946	0.282299	0.000012	-16.7	-13.9	0.42	1343	2064	-0.97
16	137	0.029192	0.001188	0.282272	0.000013	-17.7	-14.8	0.46	1390	2123	-0.96
17	127	0.023581	0.000825	0.282325	0.000013	-15.8	-13.1	0.46	1303	2009	-0.98
18	116	0.033215	0.001212	0.282284	0.000013	-17.3	-14.8	0.46	1374	2109	-0.96
19	135	0.026236	0.001001	0.282270	0.000015	-17.8	-14.9	0.53	1385	2128	-0.97
20	133	0.026864	0.000980	0.282288	0.000014	-17.12	-14.3	0.50	1360	2089	-0.97

注:锆石 Hf 同位素成分的计算所用的参数: ^{176}Lu 衰变常数 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}$, 球粒陨石 $^{176}Lu/^{177}Hf = 0.0332$, $^{176}Hf/^{177}Hf = 0.282772$ (Blichert-Toft J and Albarede F, 1997); 亏损地幔 $^{176}Lu/^{177}Hf = 0.0384$, $^{176}Hf/^{177}Hf = 0.28325$ (Griffin *et al.*, 2000); 平均地壳 $f_{cc} = 0.55$, 亏损地幔 $f_{Lu/Hf} = 0.157$. t 为样品形成时间, 采用锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄值

花岗岩、碱性花岗岩范围内(图 5a)。铝饱和指数 ACNK = 0.99 ~ 1.18, 在 ANK-ACNK 图解中大部分样品投影于弱过铝质花岗岩区(图 5b)。Al₂O₃ 含量随 SiO₂ 含量增高而降低, P₂O₅ 含量随 SiO₂ 含量增高而升高, 到 SiO₂ 大于 75% 时开始迅速下降(图 6)。岩体的分异指数很高(分异指数(DI) = Qz + Or + Ab + Ne + Lc + Kp, 92.1 ~ 97.4)。

5.2.2 微量元素

汤家坪花岗斑岩的稀土总量 ΣREE 为 $74.2 \times 10^{-6} \sim 232 \times 10^{-6}$, 平均为 177×10^{-6} , 稀土总量变化比较大; 其球粒陨石标准化稀土配分曲线为右倾型(图 7a), 表现为轻稀土富集($(La/Yb)_N = 10.9 \sim 44.5$); 重稀土亏损, 且重稀土分馏不显著($(Gd/Yb)_N = 0.66 \sim 1.70$), 配分曲线平坦; Eu 负异常明显($\delta Eu = 0.40 \sim 0.58$)。样品的原始地幔标准化蛛网图(图 7b)显示汤家坪花岗斑岩富集大离子亲石元素(Rb、Th、

表 4 汤家坪花岗斑岩的 Sr-Nd 同位素组成

Table 4 Whole-rock Rb-Sr and Sm-Nd isotopic compositions of Tangjiaping granite porphyry

样品号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$\frac{87}{86}\text{Rb}$ $\frac{87}{86}\text{Sr}$	$\frac{87}{86}\text{Sr}$	I_{Sr}	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$\frac{147}{144}\text{Sm}$ $\frac{147}{144}\text{Nd}$	$\frac{143}{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$
TJP-3-33	262	56.2	13.1678	0.728391	0.7056	4.18	27.3	0.0971	0.51178	-13.7	2034	-0.51
TJP-17	316	45.8	19.4881	0.741223	0.7075	2.73	19.3	0.0897	0.51172	-14.9	2127	-0.54
TJP-19	293	57.3	14.4431	0.725237	0.7003	2.67	21.0	0.0807	0.51169	-15.5	2178	-0.59
TJP-5	302	48.2	17.6973	0.732617	0.7020	3.23	22.7	0.0903	0.51172	-14.8	2124	-0.54

Pb), 亏损高场强元素(Nb、Ta、Sr、Zr、Hf), 相对 Rb 和 Th 亏损 Ba。随 SiO_2 含量增加, Pb、Y、Th 有降低趋势(图 6)。

5.3 同位素特征

5.3.1 锆石 Lu-Hf 同位素

20 颗锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282207 ~ 0.282402, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.000764 ~ 0.002633(表 3); 除一个样品, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002, 表明这些锆石在形成以后, 具有较少放射成因 Hf 的积累, 因而可以用测试的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值代表锆石形成时的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值(Amelin *et al.*, 1999, 2000; 吴福元等, 2007b)。锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -17.6 ~ -10.4, 加权平均值为 -14.1 ± 0.5 。Hf 同位素单阶段模式年龄 t_{DM1} 为 1255 ~ 1481 Ma; 两阶段模式年龄 t_{DM2} 为 1843 ~ 2281 Ma。低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和古老的 Hf 模式年龄表明, 汤家坪花岗斑岩来源于地壳物质。

5.3.2 全岩 Sr-Nd 同位素组成

本次研究中对四件汤家坪花岗斑岩样品进行了 Sr-Nd 同位素分析(表 4)。Sr 同位素测试值在 0.725237 ~ 0.741223 之间, 各样品的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 均较低(13.1678 ~ 19.4881)。根据锆石 U-Pb 定年所得到的年龄(121.6 Ma)进行放射性成因 Sr 扣除后得到的初始 Sr 同位素组成 I_{Sr} 为 0.7003 ~ 0.7075, 其中一个样品的 I_{Sr} 较低, 指示源岩可能是有部分低成熟度地壳或亏损地幔的加入。

花岗斑岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 变化于 -13.7 ~ -15.5, 指示花岗斑岩来源于地壳部分熔融, 没有幔源岩浆的加入。 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值变化于 -0.51 ~ -0.59 之间, 与太古宙后大陆地壳 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 平均值(-0.4)(McLennan and Hemming, 1992) 相比偏差较大, 所以本文采用 Nd 二阶段模式年龄计算, t_{DM2} 年龄于 2034 ~ 2178 Ma 之间, 指示汤家坪花岗斑岩来源于古老的地壳物质, 与 Hf 同位素的结果吻合, 结合 Sr 同位素数据, 排除亏损地幔加入的可能, 认为源岩可能有部分低成熟度的地壳组分加入。

6 讨论

6.1 成因类型

汤家坪花岗斑岩样品中无角闪石, 具高的 SiO_2 含量(72.06% ~ 78.08%), 全碱含量($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.43\% \sim$

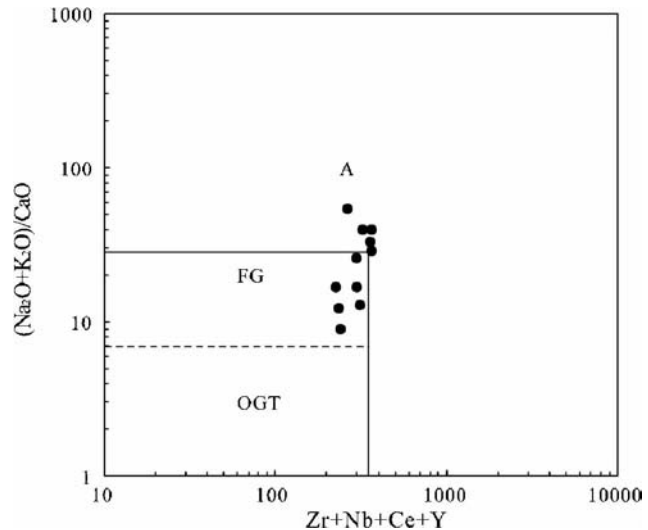


图 8 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO} - \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ 图解(据 Whalen *et al.*, 1987)

A-A 型花岗岩; FG-分异 M + I + S 型花岗岩; OGT-非分异 M + I + S 型花岗岩

Fig. 8 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ vs. $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ classification diagram(after Whalen *et al.*, 1987)

A-A-type granite; FG-Fractionated felsic granites; OGT-unfractionated M-, I- and S-type granites

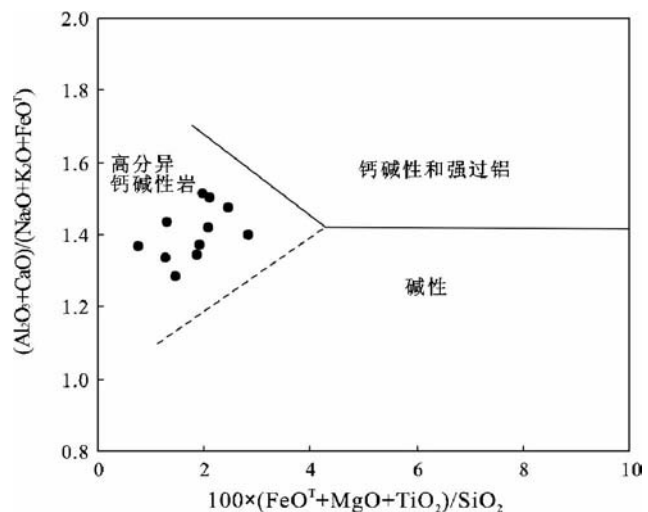


图 9 花岗岩主元素判别图(据 Sylvester, 1989)

Fig. 9 Discrimination diagram of granite by major elements (after Sylvester, 1989)

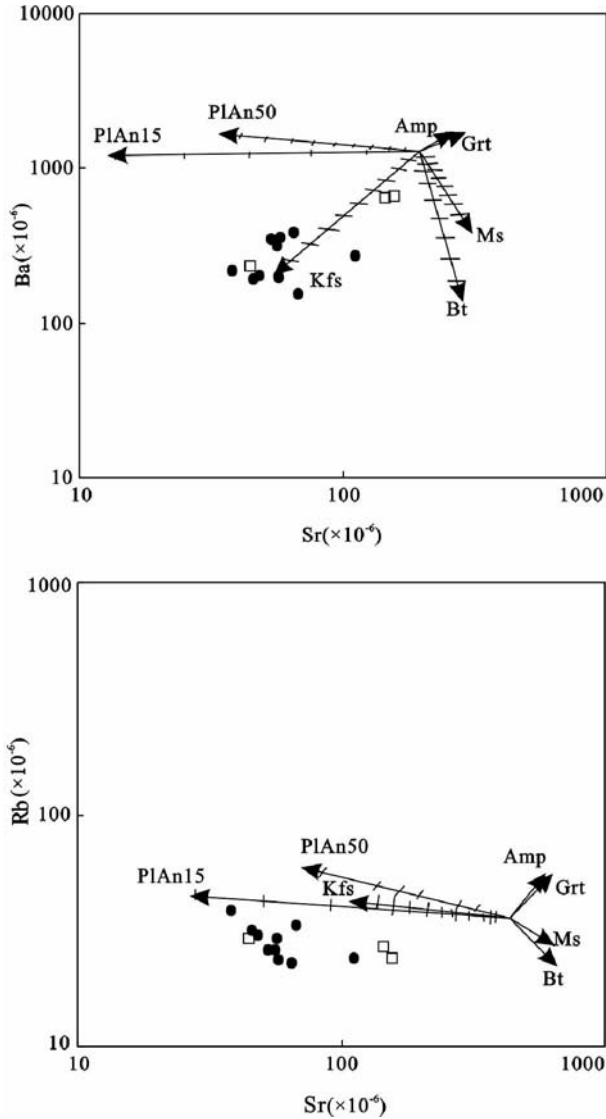


图 10 汤家坪花岗斑岩造岩矿物结晶分异判别图解(据 Janousek *et al.*, 2004)

Pl_{An50}-斜长石 (An = 50); Pl_{An15}-斜长石 (An = 15); Kfs-钾长石; Bi-黑云母; Ms-白云母; Grt-石榴子石; Amp-角闪石. 图例同图 4

Fig. 10 Ba vs. Sr and Rb vs. Sr plots for Tangjiaping granites (after Janousek *et al.*, 2004)

Pl_{An50}-plagioclase (An = 50); Pl_{An15}-plagioclase (An = 15); Kfs-K-feldspar; Bi-biotite; Ms-amphibolite; Grt-garnet; Amp-amphibole. Symbols are same as in Fig. 4

10.65%)高, Rb/Sr 比值(2.17 ~ 10.0)高, Sr、Ba、Nb、Eu 等元素显著亏损, 岩石呈过铝质等特征, 充分说明岩浆经历了高程度的结晶分异作用。对于高演化程度花岗岩的成因分类通常比较困难, 因为无论是 I 型、S 型、A 型, 当它们经历高度结晶分异作用之后, 其矿物组成和化学成分都趋近于低共结点的花岗岩, 从而使这三种类型花岗岩的鉴定出现困难(吴福元等, 2007a)。

对于 I 型、S 型的划分, 早期研究提出的铝饱和指数

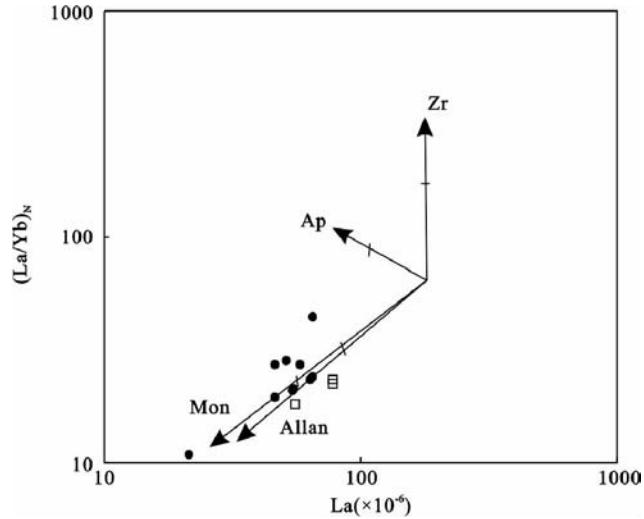


图 11 汤家坪花岗斑岩副矿物结晶分异作用过程判别图解 Alln-褐帘石; Mon-独居石; Ap-磷灰石; Zr-锆石; 磷灰石的分配系数数据 Arth (1976); 锆石分配系数数据 Mahood and Hildreth (1983); 褐帘石分配系数数据 Green and Pearson (1986); 独居石分配系数数据 Yurimoto *et al.* (1990)

Fig. 11 Discrimination diagram showing the fractional crystallization process by separation of accessory minerals for Tangjiaping granite

Allan-allanite; Mon-monazite; Ap-apatite; Zr-zircon; Partition coefficients are from Arth (1976) for apatite, Mahood and Hildreth (1983) for zircon, Green and Pearson (1986) for allanite and Yurimoto *et al.* (1990) for monazite

ACNK = 1.1 作为两者的分界值, 但这一指标仅适用于未经强烈结晶分异的花岗岩(吴福元等, 2007a), 对于高分异的汤家坪花岗斑岩并不合适。实验研究表明, P₂O₅ 在弱过铝质和强过铝质岩浆中随 SiO₂ 增加变化趋势不同, 这种性质被成功地用于区分 I 型和 S 型花岗岩类(Li *et al.*, 2007; Chappell, 1999; Wu *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2006; 李献华等, 2007)。在 P₂O₅ 随 SiO₂ 变化的图解上, 数据点总体沿 S 型演化趋势分布, 即 P₂O₅ 与 SiO₂ 含量呈正相关关系。富 Y 矿物会在过铝质岩浆演化的早期阶段结晶出来, 从而引起分异的 S 型花岗岩的 Y 含量低, 并与 Rb 含量呈负相关关系(李献华等, 2007), 汤家坪花岗斑岩表现出 Y 随 Rb 的升高而降低的 S 型演化趋势(图 6)。Pb、Th 也表现出 S 型花岗岩的演化趋势, 与 Rb 含量呈负相关关系(图 6)。此外, 汤家坪花岗斑岩含少量白云母。这些特征均表明, 汤家坪花岗斑岩地球化学特征与 I 型花岗岩不同, 具有 S 型花岗岩特征。

由于 SiO₂ > 72% 的铝质 A 型花岗岩与高分异 S 型花岗岩有许多相似之处, 两者极易混淆(King *et al.*, 1997), 如两者具有相似的矿物学和地球化学特点(Chappell and White, 1992)。如果采用目前常用的 10000 × Ga/Al = 2.6 为 A 型花岗岩的判断标志(Whalen *et al.*, 1987), 高分异花岗岩则全为 A 型(吴福元等, 2007a)。一般来说, 高分异花岗岩 FeO^T

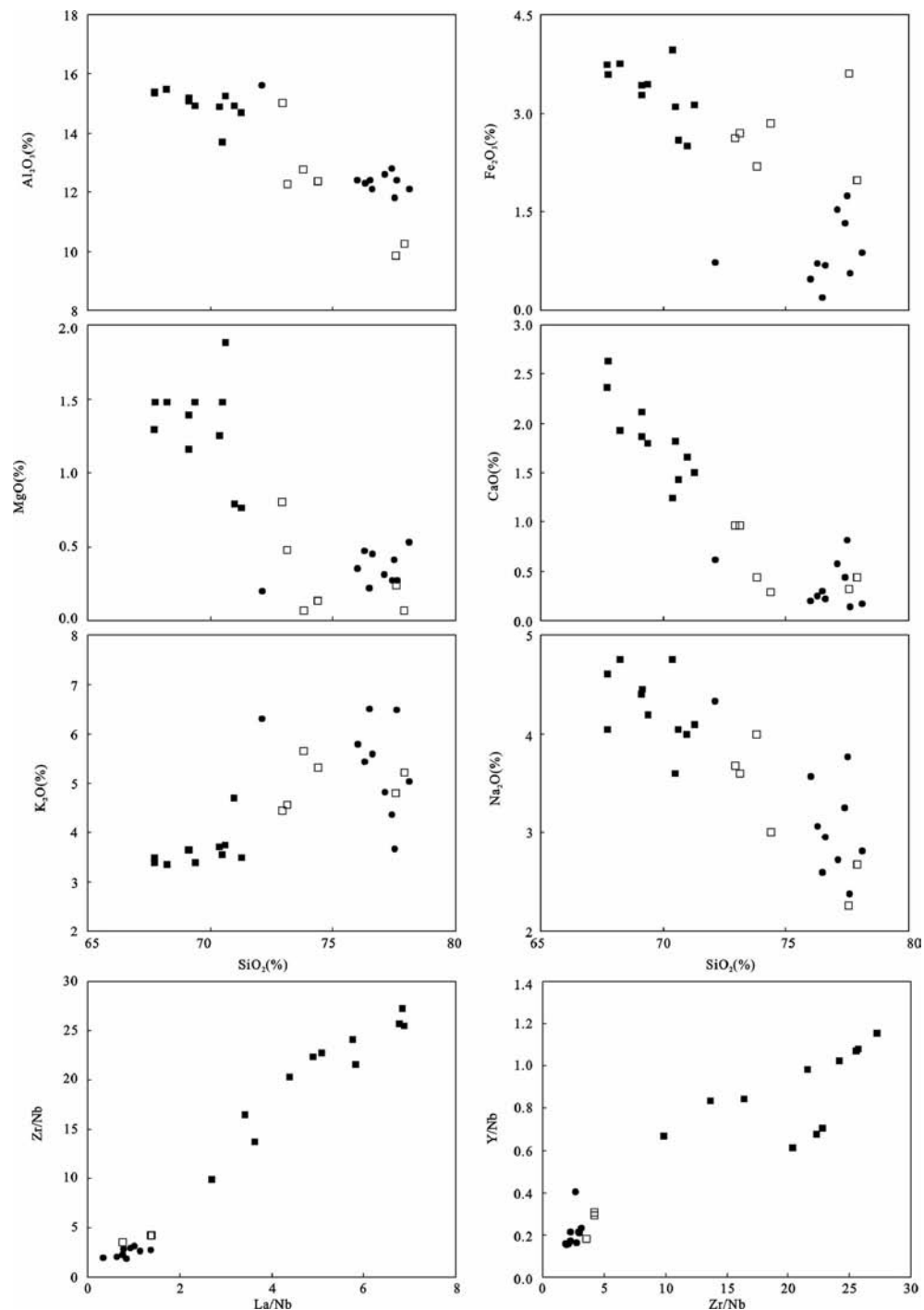


图 12 汤家坪花岗斑岩与商城岩体哈克图解

■ 商城岩体,引自刘文斌等,2003;其他符号同图 5

Fig. 12 Harker diagrams of Tangjiaping granite porphyry and Shangcheng granitic body

■ Shangcheng granite data from Liu *et al.*, 2003; other symbols are same as in Fig. 5

含量较低(多 < 1%), A 型花岗岩的重要特征是形成温度高、无水、铝质、非造山成因,尤其是高温、无水的特点,是 A 型花岗岩区别于高分异花岗岩的重要参数(King *et al.*, 1997)。汤家坪花岗斑岩的 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量多低于 1%。计算得到的锆石饱和温度为 722 ~ 786°C, 以及岩石含有云母显示富水特

征,显示了高分异花岗岩的特点,而非 A 型花岗岩。在图 8 中,大部分样品位于高分异的花岗岩区域;在图 9 中,岩体同样显示出为高分异钙碱性岩。综上分析,汤家坪花岗斑岩应属于高分异 S 型花岗岩。

6.2 结晶分异过程

微量元素蛛网图上显示,汤家坪花岗岩斑岩显著亏损 Sr、Ba、Nb、Eu 等元素。一般认为元素的亏损是由某种富集该元素的矿物结晶分异引起的,Nb 负异常与榍石、金红石等结晶分异有关,Eu 负异常主要是由斜长石和钾长石结晶分异引起的,其中斜长石的结晶分异会产生 Sr、Eu 的亏损,钾长石结晶分异会产生 Eu、Ba 亏损(Wu *et al.*, 2003)。虽然汤家坪花岗岩斑岩 SiO₂ 的变化范围不大,但随 SiO₂ 的增大,Zr、Ba、Pb、Y、Th 有降低趋势,且 Rb 含量很高,均大于 200×10^{-6} ($229 \times 10^{-6} \sim 383 \times 10^{-6}$)。在 Ba-Sr、Rb-Sr 对数图解(图 10)上,花岗岩斑岩数据的变化趋势反映了岩体形成过程中主要经历了钾长石和斜长石的分异。较低的 MgO、Fe₂O₃^T 含量可能由于以黑云母为主的铁镁质矿物的分异。相对于主要矿物来说,副矿物的结晶分异对稀土元素含量变化影响较大。岩石的稀土总量随 SiO₂ 增高而降低,应是成岩过程中分配系数较高的矿物(如磷灰石、褐帘石、独居石、锆石等)分异所致。在 La-(La/Yb)_N 变异图解(图 11),从汤家坪花岗岩斑岩样品点在图中的分布来看,独居石和褐帘石的分异是控制成岩过程中稀土元素含量变化的主要因素。

6.3 岩石成因

6.3.1 区域岩浆演化

研究区内早白垩世花岗岩分布从北向南依次为商城岩体、达权店和汤家坪花岗岩斑岩。商城、达权店两个岩体的面积很大,达到岩基规模;汤家坪岩体出露面积小,多呈岩株状产出。商城岩体和达权店均为黑云母二长花岗岩,粒度由粗到细,汤家坪岩体主要为钾长花岗岩。前人曾对商城花岗岩体做过研究(刘振宏等,1994;刘文斌等,2003),认为商城岩体总体上具有中国东部埃达克质花岗岩的地球化学特征,形成过程中存在结晶分异作用的影响,形成于增厚下地壳部分熔融。汤家坪花岗岩斑岩体和商城花岗岩体主量元素哈克图解及不相容元素图解(图 12)显示,二者随 SiO₂ 的增加具有基本一致的演化趋势,主量元素变化显示汤家坪花岗岩的演化程度明显较高。Zr、Nb、La、Y 的不相容元素图解(图 12)中,两个岩体不相容元素含量呈线性变化。此外,商城岩体中斜长石、钾长石和黑云母含量相对较高,无 Eu 负异常,具有 Sr、Ba 正异常(刘文斌等,2003),通过斜长石、钾长石及富集稀土的副矿物高程度结晶分异,可能形成 Eu、Sr、Ba、Nb 负异常的汤家坪花岗岩斑岩。且商城岩体成岩年龄为 133 ~ 128Ma (Ar³⁹-Ar⁴⁰,河南省地矿厅区域地质调查队,1994),本文测试汤家坪花岗岩斑岩锆石 U-Pb 年龄为 121.6Ma,相对较晚形成。因此汤家坪花岗岩斑岩和大花岗岩基可能为同源岩浆不同期次侵入活动的产物,应为早白垩世中酸性岩浆结晶分异晚阶段的产物。

6.3.2 物质来源

同位素数据显示,汤家坪花岗岩斑岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-17.6 \sim$

-10.4 , $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 变化于 $-15.5 \sim -13.7$,二者基本吻合,均显示出壳源特征,计算得到的 Hf、Nd 同位素二阶段模式年龄分别为 1843 ~ 2281Ma 和 2034 ~ 2178Ma,反映汤家坪花岗岩来源于古老地壳物质的重熔。此外,大离子亲石元素的富集和 Nb、Ta 等高场强元素的亏损,也表明其源岩主要来自地壳。汤家坪岩体具有非常高的 SiO₂ 含量,且岩体附近没有发现大规模的基性岩体,再结合岩浆结晶锆石没有显著幔源特征的 Hf 同位素记录,认为地幔物质基本没有参与汤家坪岩体的形成,但是可能为花岗岩的形成提供了热源。汤家坪岩体具有低的 HREE、MREE、Y、Yb 的含量,表明有石榴子石和角闪石的存留,因为 HREE 相容于石榴子石、MREE 相容于角闪石(葛小月等,2002;吴福元等,2002),暗示角闪石和石榴子石是重要的残留相,表明汤家坪花岗岩斑岩源岩来源较深,主要源于下地壳物质。

7 结论

(1) 大别北麓的汤家坪花岗岩斑岩的成岩年龄为 $121.6 \pm 4.6\text{Ma}$,较早白垩世早期商城花岗岩基的形成稍晚。汤家坪花岗岩斑岩和其它早白垩世岩体(商城、达权店)为同源岩浆演化的产物。

(2) 岩石地球化学资料显示汤家坪花岗岩为高分异 S 型花岗岩。

(3) 汤家坪花岗岩斑岩锆石 Sr-Nd-Hf 同位素组成,反映其物质来源于古老地壳物质的重熔,且源岩来源较深,为下地壳物质。

致谢 陈衍景老师和杨艳同学在野外样品采集过程中给予帮助,周艳艳和杨阳同学协助进行了样品的分析工作,成文过程中得到香港大学高剑锋博士的诸多意见,在此一并致以诚挚的谢意。

References

- Amelin Y, Lee DC, Halliday AN and Pidgeon RT. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. *Nature*, 399: 252 - 255
- Amelin Y, Lee DC and Halliday AN. 2000. Early-Middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 4205 - 4225
- Arth JG. 1976. Behaviour of trace elements during magmatic processes: A summary of theoretical models and their applications. *J. Res. U. S. Geol. Survey*, 4: 41 - 47
- Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148: 243 - 258
- 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. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46: 535 - 551

- Chen YJ, Li C, Zhang J, Li Z and Wang HH. 2000. Sr and O isotopic characteristics of porphyries in the Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type. *Science in China (Series D)*, 43 (Supp.): 82 - 94
- Ge XY, Li XH, Chen ZG and Li WP. 2002. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Yanshanian high-Sr/low-Y intermediate-felsic igneous rocks from eastern China; Constraints on crustal thickness of eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 47 (6): 474 - 480 (in Chinese)
- Green TH and Pearson NJ. 1986. Rare earth element partitioning between titanite and coexisting silicate liquid at high pressure and temperature. *Chem. Geol.*, 74: 201 - 216
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, Acherbergh E van, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle; LA-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim Cosmochim Acta*, 64: 133 - 147
- Jackson SE, Pearson NJ, Griffin WL and Belousova EA. 2004. The application of laser ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LAM-ICP-MS) to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chem. Geol.*, 211: 47 - 69
- Janousek V, Finger F, Roberts M, Fryda J, Pin C and Dolejs D. 2004. Deciphering the petrogenesis of deeply buried granites; Whole-rock geochemical constraints on the origin of largely undepleted granulites from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif. *Trans. R. Soc. Edinb. Earth Sci.*, 95: 141 - 159
- King PL, White AJR, Chappell BW and Allen CM. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38: 371 - 391
- Li XH, Li ZX, Li WX and Wang YJ. 2006. Initiation of the Indosinian Orogeny in South China; Evidence for a Permian magmatic arc in the Hainan Island. *J. Geol.*, 114: 341 - 353
- Li XH, Li XW and Li ZX. 2007. Re-discussion on genetic type of Nanling granitoid and its tectonic significance. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 981 - 992 (in Chinese)
- Li XH, Li ZX, Li WX, Liu Y, Yuan C, Wei GJ and Qi CS. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China; A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96(1-2): 186 - 204
- Li YF, Mao JW, Hu HB, Guo BJ and Bai FJ. 2005. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic molybdenum deposits in East Qinling area. *Mineral Deposits*, 24(3): 292 - 301 (in Chinese with English abstract)
- Liang XR, Wei GJ, Li XH and Liu Y. 2003. Precise measurement of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and Sm/Nd ratios using multiple collectors inductively coupled plasma mass spectrometer (MC-ICPMS). *Geochimica*, 32 (1): 91 - 96 (in Chinese with English abstract)
- Liu WB, Liu ZH and Zhang SJ. 2003. Geological and geochemical features of Shangcheng granite body and its genetic implication, Henan Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, 4: 7 - 23 (in Chinese with English abstract)
- Liu ZH, Peng SM and Bai CJ. 1994. The Characteristics of petrology of Shangcheng rock body and its genesis. *Henan Geology*, 12(2): 100 - 118 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig K. 1999. Isoplot/Ex version 2.0; A geochronological tool kit for Microsoft Excel. *Geochronology Center Berkeley, Special Publication*
- Ma HW. 2007. Characteristics of geochemical anomaly of the Tangjiaping molybdenum deposit and its prospecting indicators in Shangcheng, Henan. *Mineral Resources and Geology*, 21 (5): 520 - 526 (in Chinese with English abstract)
- Mahood G and Hildreth W. 1983. Large partition coefficients for trace elements in high-silica rhyolites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47: 11 - 30
- McLennan SM and Hemming S. 1992. Samarium/neodymium elemental and isotopic systematizes in sedimentary rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56: 887 - 898
- Peccerillo R and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene cal-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58: 63 - 81
- Qi L, Hu J and Gregoire DC. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Talanta*, 51: 507 - 513
- Stein HJ, Markey RJ, Morgan JW, Du A and Sun Y. 1997. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenum from the East Qinling molybdenum belt, Shanxi Province, China. *Econ. Geol.*, 98: 175 - 180
- Streckeisen A and Le Maitre RW. 1979. A chemical approximation to the modal QAPF classification of the igneous rocks. *Neues Jahrb. Miner. Abh.*, 136: 169 - 206
- Sun SS and McDonough. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basin. Geological Society Special Publication. Blackwell Scientific Publications*, 42: 313 - 346
- Sylvester PJ. 1989. Post-collisional alkaline granites. *J. Geol.*, 97: 261 - 280
- Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited; Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 64: 295 - 304
- Wei GJ, Liang XR, Li XH and Liu Y. 2002. Precise measurement of Sr isotopic composition of liquid and solid base using (LP)MC-ICPMS. *Geochimica*, 31(3): 295 - 299 (in Chinese)
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites; Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95: 407 - 419
- Woodhead J, Hergt J, Shelley M, Eggins S and Kemp R. 2004. Zircon Hf-isotope analysis with an excimer laser, depth profiling, ablation of complex geometries, and concomitant age estimation. *Chem. Geol.*, 209: 121 - 135
- Wu FY, Ge WC and Sun DY. 2002. The definition, discrimination of adakites and their geological role. In: Xiao QH, Deng JF, Ma DQ *et al.* (eds.). *The Ways of Investigation on Granitoids*. Beijing: Geological Publishing House, 172 - 191 (in Chinese)
- Wu FY, Jahn BM, Wilder SA, Lo CH, Yui TF, Lin Q, Ge WC and Sun DY. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66: 241 - 273
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007a. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (6): 1217 - 1238 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007b. Lu-Hf isotopic systematic and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185 - 220 (in Chinese with English abstract)
- Xu P, Wu RY, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2004. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating. *Chinese Science Bulletin*, 49: 1642 - 1648
- Yang ZQ, Wan SQ, Ma HW and Tang ZG. 2008. Geochemistry and mineralization model of Tangjiaping Mo deposit in Shangcheng County, Henan Province. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 788 - 794 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZQ. 2009. Geochemistry and tectonic setting of the Tangjiaping Mo-riched granodiorite porphyry in the Northern Dabie Mountains. *Geological Review*, 55 (5): 745 - 752 (in Chinese with English abstract)
- Ye HS, Mao JW, Li YF, Guo BJ, Zhang CQ, Liu J, Yan QR and Liu YG. 2006. SHRIMP Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the superlarge Donggou porphyry Mo deposit in East Qingling, China, and its geological implication. *Acta Geologica Sinica*, 80 (7): 1078 - 1087 (in Chinese with English abstract)
- Yuan DZ, Zhao RQ and Li JL. 2008. Research on geneses of Tangjiaping molybdenum deposit in Shangcheng County of Henan Province. *Express Information of Mining Industry*, 8: 21 - 24 (in Chinese)
- Yurimoto H, Duck EF, Papike JJ and Shearer CK. 1990. Are discontinuous chondrite-normalized REE patterns in pegmatitic granite systems the results of monazite fractionation? *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54: 2141 - 2145

Zhang ZW, Zhu BQ, Chang XY, Qiang LZ and Wen MX. 2001. Petrogenetic-metallogenetic background and time-space relationship of the East Qinling molybdenum ore belt, China. *Geological Journal of China Universities*, 7(3): 307–315 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈衍景, 李超, 张静, 李震, 王海华. 2000. 秦岭钼矿带斑岩体锶氧同位素特征与岩石成因机制和类型. *中国科学(D辑)*, 30(增刊): 64–72
- 葛晓月, 李献华, 陈志刚, 李伍平. 2002. 中国东部燕山期高Sr低Y型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约. *科学通报*, 47(6): 474–480
- 李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. *科学通报*, 52(9): 981–992
- 李永峰, 毛景文, 胡华斌, 郭保健, 白凤军. 2005. 东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景. *矿床地质*, 24(3): 292–301
- 梁细荣, 韦刚建, 李献华, 刘颖. 2003. 利用MC-ICPMS精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值. *地球化学*, 32(1): 91–96
- 刘文斌, 刘振宏, 张世佼. 2003. 河南商城岩体地质地球化学特征及成因意义. *华南地质与矿产*, 4: 7–23
- 刘振宏, 彭松民, 白朝军. 1994. 商城岩体岩石学特征及其成因探讨. *河南地质*, 12(2): 100–118
- 马宏卫. 2007. 河南商城汤家坪钼矿地球化学异常特征及找矿标志. *矿产与地质*, 21(5): 520–526
- 韦刚健, 梁细荣, 李献华, 刘颖. 2002. (LP) MC-ICPMS方法精确测定液体和固体样品的Sr同位素组成. *地球化学*, 31(3): 295–299
- 吴福元, 葛文春, 孙德有. 2002. 埃达克质岩的概念、识别标志及其地质意义. 见: 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨等主编. *花岗岩研究思维与方法*. 北京: 地质出版社, 172–191
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007a. 花岗岩成因研究的若干问题. *岩石学报*, 23(6): 1217–1238
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007b. Lu-Hf同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 23(2): 185–220
- 杨泽强, 万守全, 马宏卫, 唐中刚. 2008. 河南商城县汤家坪钼矿床地球化学特征与成矿模式. *地质学报*, 82(6): 788–794
- 杨泽强. 2009. 北大别山商城汤家坪富钼花岗岩斑岩体地球化学特征及构造环境. *地质论评*, 55(5): 745–752
- 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 郭保健, 张长青, 刘珺, 闫全人, 刘国印. 2006. 东秦岭东沟超大型斑岩钼矿床SHRIMP锆石U-Pb和辉钼矿Re-Os年龄及其地质意义. *地质学报*, 80(7): 1078–1087
- 袁德志, 赵瑞强, 李吉林. 2008. 河南省商城县汤家坪钼矿床成因研究. *矿业快报*, 8: 21–24
- 张正伟, 朱炳权, 常向阳, 强立志, 温明星. 2001. 东秦岭钼矿带成岩成矿背景及时空统一性. *高校地质学报*, 7(3): 307–315