

华北陆块南缘中生代合峪花岗岩的地球化学特征与成因^{*}

高昕宇^{1,2} 赵太平^{1**} 原振雷³ 周艳艳^{1,2} 高剑峰⁴

GAO XinYu^{1,2}, ZHAO TaiPing^{1**}, YUAN ZhenLei³, ZHOU YanYan^{1,2} and GAO JianFeng⁴

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 100039

3. 河南省国土资源科学研究院, 郑州 450053

4. 香港大学地球科学系, 香港

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

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

3. Academy of Land and Resources of Henan Province, Zhengzhou 450053, China

4. Department of Earth Sciences, University of Hong Kong, Hong Kong, China

2010-04-01 收稿, 2010-09-03 改回.

Gao XY, Zhao TP, Yuan ZL, Zhou YY and Gao JF. 2010. Geochemistry and petrogenesis of the Heyu batholith in the southern margin of the North China block. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12):3485–3506

Abstract Heyu batholith in Waifang Mountain, Henan Province, located in the southern margin of the North China block. It is a multi-stage intrusion with a total area of outcrop up to 784km². Heyu batholith mainly consists of biotitic monzogranite and can be subdivided into 6 units. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Heyu batholith porphyry gives concordant ages of 148.2 ~ 135.3Ma. SiO₂, Al₂O₃ and MgO contents are 67.16% ~ 75.43%, 13.29% ~ 15.92% and 0.26% ~ 1.12%, respectively. Heyu batholith is high K calc-alkaline and metaluminous-peraluminous, with K₂O + Na₂O > 8.0%, Na₂O/K₂O = 0.82 ~ 1.43, ACNK = 0.94 ~ 1.09. The rocks are relatively enriched in LREE and depleted in HFSE ((La/Yb)_N = 14.5 × 10⁻⁶ ~ 49.9 × 10⁻⁶, average 27.2 × 10⁻⁶). Variable Sr content comparing with typical adakite (102 × 10⁻⁶ ~ 848 × 10⁻⁶, average 290 × 10⁻⁶) and low Y and Yb contents (Y = 3.21 × 10⁻⁶ ~ 17.3 × 10⁻⁶; Yb = 0.43 × 10⁻⁶ ~ 2.16 × 10⁻⁶), and slightly negative Eu anomaly (δEu = 0.57 ~ 0.89) suggest that the fractional crystallization of the magma is obvious and a feldspar residual in the source is unlikely. The initial I_{Sr} ratio range from 0.7071 to 0.7090, and the ε_{Sr}(t) value is 40.8 ~ 65.9. Negative ε_{Nd}(t) value (-16.4 ~ -11.2) with old t_{DM2} ages of 1.85 ~ 2.27Ga and negative ε_{Hf}(t) values (-25.39 ~ -5.25) with old t_{DM2} age of 1301 ~ 2846Ma suggest that the batholith was probably formed by partial melting of the south Qinling and Yangtze crystalline basement with the participation of Xiong'er Group and Taihua Group. In combination with the regional tectonic evolution, we suggested that the crust in the study area was thickened in early stage of intra-continental subduction of the Qinling orogenic belt intra-continental collision during Mesozoic, and the mantle-derived magma upwelling, and thereby the Heyu batholith formed in the southern margin of the North China Block.

Key words Zircon U-Pb age; Sr-Nd-Hf isotope; Petrogenesis; Heyu batholith; Southern margin of the North China block

摘要 合峪花岗岩基位于华北陆块南缘外方山地区,为豫西地区燕山期最大的岩基,出露总面积达784km²,有多期侵入的特点,可划分为6个单元。主要岩石类型为黑云母二长花岗岩。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄资料表明,合峪花岗岩基侵位时间为148.2 ~ 135.3Ma。合峪花岗岩基的 SiO₂ = 67.16% ~ 75.43%, Al₂O₃ = 13.29% ~ 15.92%, MgO = 0.26% ~ 1.12%, K₂O + Na₂O > 8%, Na₂O/K₂O = 0.88 ~ 1.43, 属于高钾钙碱性系列, ACNK = 0.94 ~ 1.09, 为准铝质-弱过铝质花岗岩。岩体轻稀土富集、重稀土亏损 ((La/Yb)_N = 14.5 × 10⁻⁶ ~ 49.9 × 10⁻⁶, 平均值 27.2 × 10⁻⁶), Sr 含量变化较大 (102 × 10⁻⁶ ~ 848 × 10⁻⁶, 平均

* 本文受国家973项目(2006CB403502)和河南省科技攻关项目(26407号)联合资助。

第一作者简介:高昕宇,女,1984年生,博士研究生,岩石地球化学专业,E-mail: purplegxy@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

290×10^{-6}), Y、Yb 含量低 ($Y = 3.21 \times 10^{-6} \sim 17.3 \times 10^{-6}$; $Yb = 0.43 \times 10^{-6} \sim 2.16 \times 10^{-6}$), Eu 弱亏损 ($\delta Eu = 0.57 \sim 0.89$), 反映熔体发生过长石分离结晶作用, 源岩部分熔融生成熔体时残留相组合中没有或很少有长石的存在。合峪花岗岩基 $I_{Sr} = 0.7071 \sim 0.7090$, $\varepsilon_{Sr}(t) = 40.8 \sim 65.9$, $\varepsilon_{Nd}(t) = -16.4 \sim -11.2$, 其 t_{DM2} 为 $1.85 \sim 2.27 Ga$; 锆石的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 主要集中于 $-25.39 \sim -5.25$ 之间, t_{DM2} 年龄介于 $1301 \sim 2846 Ma$ 。同位素数据显示合峪花岗岩基的源岩主要为南秦岭及扬子地块结晶基底, 还混有少量熊耳群及太华群的物质。综合区域地质演化, 认为合峪花岗岩基形成于秦岭造山带中生代陆内俯冲, 岩石圈增厚, 幔源岩浆上涌底侵导致下地壳部分熔融形成。

关键词 华北陆块南缘; 合峪花岗岩基; 锆石 U-Pb 年龄; Sr-Nd-Hf 同位素; 成因机制

中图法分类号 P588.121; P597.3

1 引言

华北陆块的构造体制从三叠纪时期的挤压环境向晚侏罗-白垩纪的伸展环境发生转化, 出现了大面积的岩浆侵位和火山喷发 (Guo *et al.*, 2001; Xu *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2005) 以及 Mo-Au-Ag 多金属矿床的大规模成矿 (陈衍景等, 1998, 2004; 周新华等, 2002; 毛景文等, 2003, 2006)。华北陆块南缘小秦岭-熊耳山-外方山成岩-成矿带发育全球最大的栾川-洛南斑岩-矽卡岩型钼矿带以及规模仅次于胶东金矿集区的小秦岭大型金矿集区 (罗铭玖等, 2000), 同时发育众多中小型 Pb-Zn-Ag 矿床 (燕长海, 2004), 是研究华北克拉通南缘破坏过程的岩浆与成矿响应的关键地区之一。本区的钼 (钨)-金、多金属矿床常与小斑岩体和大花岗岩基相伴产出, 以往的研究工作大多围绕与成矿关系密切的小斑岩体 (Stein *et al.*, 1997; 陈衍景等, 2000; 张正伟等, 2001; 卢欣祥等, 2002; 李永峰, 2005; 叶会寿等, 2006), 而对与小斑岩体相伴产出的大花岗岩基以及小斑岩体与大花岗岩基的关系研究较少。要深入认识小秦岭-熊耳山-外方山地区中生代大规模岩浆-成矿活动与华北克拉通岩石圈减薄和成矿可能存在的成因联系, 有必要深入研究这些侵入岩形成时代、侵位次序、岩石成因、岩浆起源等。

合峪花岗岩基为华北陆块南缘燕山期最大的岩基, 具有多期侵入的特点。前人曾给出 K-Ar 年龄 $102 \pm 7.3 Ma$ (尚瑞钧和严阵, 1988); Rb-Sr 年龄 $110 \sim 126.3 \pm 6.3 Ma$ (尚瑞钧和严阵, 1988; 张宗清等, 2002) 及 Ar-Ar 年龄 $131.8 \pm 0.65 \sim 135.7 \pm 1.3 Ma$ (张宗清等, 2002; Han *et al.*, 2007), 这些年龄数据结果相差较大, 且没有给出具体采样位置。近期的 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得的单个样品年龄, 如 $127.2 \pm 1.4 Ma$ (毛景文等, 2005) 和 $134.5 \pm 1.5 Ma$ (郭波等, 2009) 只代表其中某一次侵入事件的年龄, 不足以反映复式岩体岩浆侵位的时序。此外, 目前有关岩石学、地球化学和同位素组成的资料报道较少。本文利用 LA-ICP-MS 测定合峪花岗岩基不同单元的锆石 U-Pb 年龄以确定合峪花岗岩基的形成时序, 并根据其地球化学特征, 讨论其成因及构造环境, 为深入认识华北陆块南缘中生代大规模岩浆活动规律及其与华北克拉通岩石圈减薄的成因联系提供线索。

2 区域地质概况及岩石学特征

合峪花岗岩基位于华北陆块南缘外方山地区, 北以

马超营断裂带为界, 南以栾川断裂带为界 (图 1)。岩体呈北西向产出, 出露总面积达 $784 km^2$, 其中发育有派生细粒花岗岩脉与伟晶岩脉。岩体侵入于太古宙太华群、中元古代熊耳群以及元古代龙王石童花岗岩和伏牛山片麻状花岗岩中, 与围岩接触处常引起热变质的角岩化 (李永峰, 2005)。

合峪花岗岩基呈套环式分布, 有多期侵入的特点。内乡幅 1:25 万区调报告 (河南省区域地质调查院, 2002^①) 根据岩性特征及接触关系将岩基划分为 6 个单元, 第一到第四单元为主侵入期岩体, 第五、第六单元为末期。第一单元为大斑中粗粒黑云母二长花岗岩, 斑晶由条纹长石组成, 粒径 $20 \sim 30 mm$, 个别达 $70 mm$, 斑晶含量 $10\% \sim 25\%$, 局部集中呈聚斑状, 含量达 $40\% \sim 60\%$ 。第二单元为中斑中粗粒黑云母二长花岗岩, 斑晶由条纹长石组成, 含量 $8\% \sim 10\%$, 粒径 $10 \sim 20 mm$, 个别达 $50 mm$, 分布较均匀, 仅局部富集呈团块状。第三单元为含中斑中粗粒黑云母二长花岗岩, 呈岩株状产出, 斑晶由条纹长石组成, 含量 $1\% \sim 5\%$, 粒径 $10 \sim 15 mm$, 局部斑晶较少。第四单元为含小斑细中粒黑云母二长花岗岩, 呈岩株、岩脉状产出, 斑晶由钾长石组成, 含量 $3\% \sim 5\%$, 粒径 $5 \sim 10 mm$ 。第五单元为细粒黑云母二长花岗岩, 呈岩株、岩脉群状产出。第六单元为细粒黑云母正长花岗岩, 岩体呈近东西向岩脉状产出。合峪花岗岩基主体普遍含钾长石斑晶, 斑晶大小一般为 $1 \sim 3 cm$, 自形, 发育简单双晶, 偶呈定向、半定向排列。从第一单元到第六单元岩性由二长花岗岩向正长花岗岩逐渐变化, 结构上表现为斑晶含量从多→少→无、粒径由大→小、基质由中粗粒→细中粒→细粒。因为第五单元只在车村-木植街断裂以南出露较少, 本次工作中没有采集到合适样品, 所以文中年代学和地球化学样品是基于其它五个单元。

岩体总体为灰白-浅肉红色, 主要矿物为条纹长石、钾长石、斜长石、石英、黑云母, 且第一单元到第六单元钾长石含量逐渐增加。条纹长石一般呈半自形的板柱状, 被石英交代后边缘呈锯齿状。斜长石为更钠长石或更长石, 一般呈自形至半自形宽板状, 聚片双晶发育。石英为他形不规则粒状, 部分具波状消光, 石英颗粒内有钾长石、斜长石等成分的细小包体。副矿物以磷灰石、榍石、磁铁矿为主, 锆石、黄铁矿、萤石为次。

^① 河南省区域地质调查院. 2002. 1:25 万内乡县幅中华人民共和国区域地质调查报告

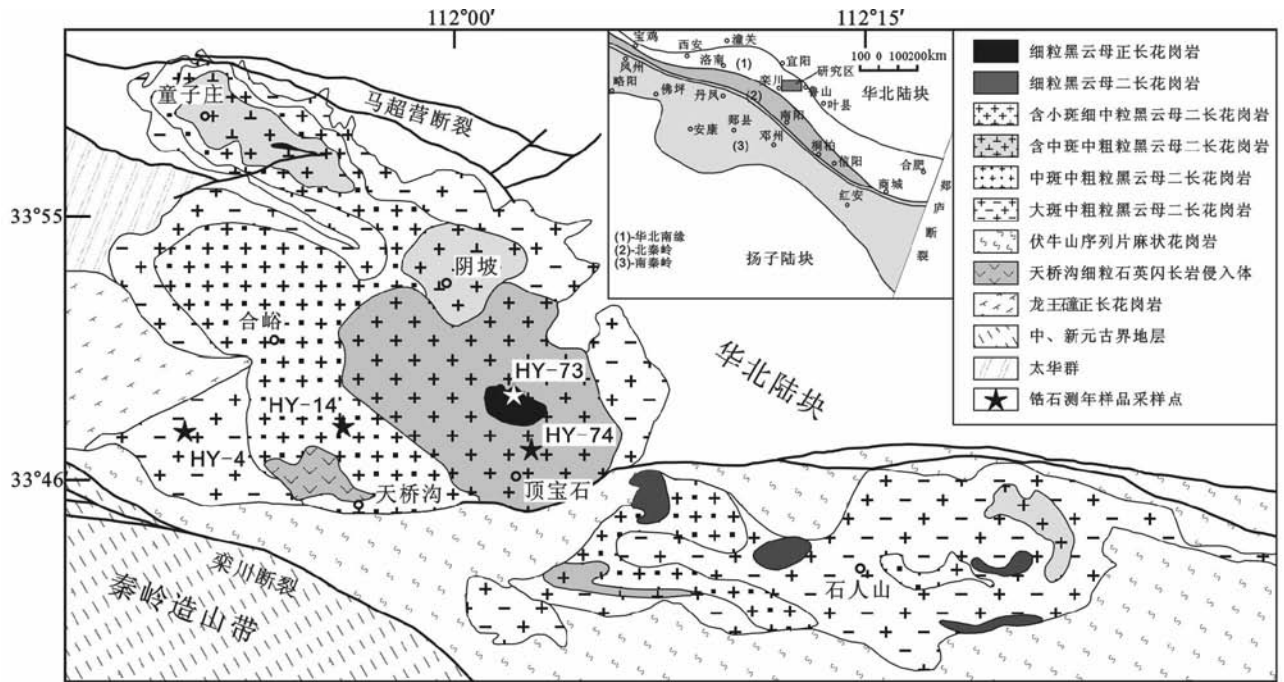


图1 合峪花岗岩地质简图(据河南省区域地质调查院,2002)

Fig. 1 Simplified geological map of the Heyu batholith

3 样品及分析方法

主量元素和微量元素测试在香港大学地球科学系进行。主量元素用 X 射线荧光光谱法 (XRF) 测试, 测试仪器为 Philips PW 2400 光谱仪。将约 1g 岩石粉末样品与湿硼酸锂按 1:10 的比例混合后, 在 1300℃ 的温度下, 于铂金坩锅中熔融制成玻璃片, 然后用 XRF 方法测定氧化物含量。主要氧化物的分析误差一般小于 2%。微量元素及稀土元素用 ICP-MS 测试, 所用质谱仪为 Thermo Plasma-Quad Excell ICP-MS。将样品粉末 (约 0.05g) 与 HF 和 HNO₃ 溶液混合后置于一种高压的钢套中放在保温箱充分溶解。在质谱分析过程中用 Rh 元素作为内标来进行内部校正, 纯的元素标样作为外部校正 (Qi *et al.*, 2000), 实验室标样 BHVO-1 和 SY-4 作为参考标准, 分析精度高于 5%。

锆石 U-Pb 及 Hf 同位素定年分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成。U-Pb 使用 Agilent 公司 7500a 型 ICPMS 进行测试, Lu-Hf 同位素测试使用 Thermo 公司制造的 Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱 (MC-ICP-MS), 加载德国 Lamda Physik 公司制造的 Geolas193nm 准分子激光取样系统。激光束直径为 60 μm, 剥蚀频率为 8Hz, 能量密度为 15~20 J·cm⁻², 剥蚀时间约 60s。详细的分析程序见 Wu *et al.* (2006) 和 谢烈文等 (2008)。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。数据标准化根据 ¹⁷⁹Hf/¹⁷⁷Hf = 0.7325, 质量歧视校正用指数法则进行, Yb 和 Lu 的干扰校正取 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu = 0.02655 (Chu *et al.*, 2002) 和 ¹⁷⁶Yb/¹⁷²Yb = 0.5887, 而 Yb 分馏校正则根据 ¹⁷²Yb/¹⁷³Yb = 1.35272 用指数法则进行 (Wu *et al.*, 2006)。

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测定。样品在超净岩石化学实验室分离纯化后, 采用 Micromass 公司 Isoprobe 型多接收器等离子体质谱 (MC-ICPMS) 测定。对 Sr-Nd 同位素分析所需样品采用酸淋滤方法进行预处理, 以减少后期蚀变作用对同位素比值, 尤其是 Sr 的影响。大约 130mg 全岩粉末样品加入纯化 HF-HClO₄, 在高温下完全溶解。Rb-Sr 和 REE 的分离和纯化是在装有 5 毫升体积 Bio-rad AG 50W-X12 交换树脂 (200~400 目) 的石英交换柱进行的, 将接收的 Rb、Sr 和 REE 分别蒸干, 用 0.1 mol/L 的盐酸 200 μL 再次溶解 REE, 将其转移到萃淋树脂离子交换柱上进行 Sm 和 Nd 分离。⁸⁶Sr/⁸⁸Sr 和 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd 比值分别用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194 和 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 校正。详细的试验流程及仪器分析情况见梁细荣等 (2003)。Sr、Nd 同位素分析精度高于 0.002%。

4 合峪花岗岩基的形成时代

本文选取合峪花岗岩基第一、第二、第四和第六单元的

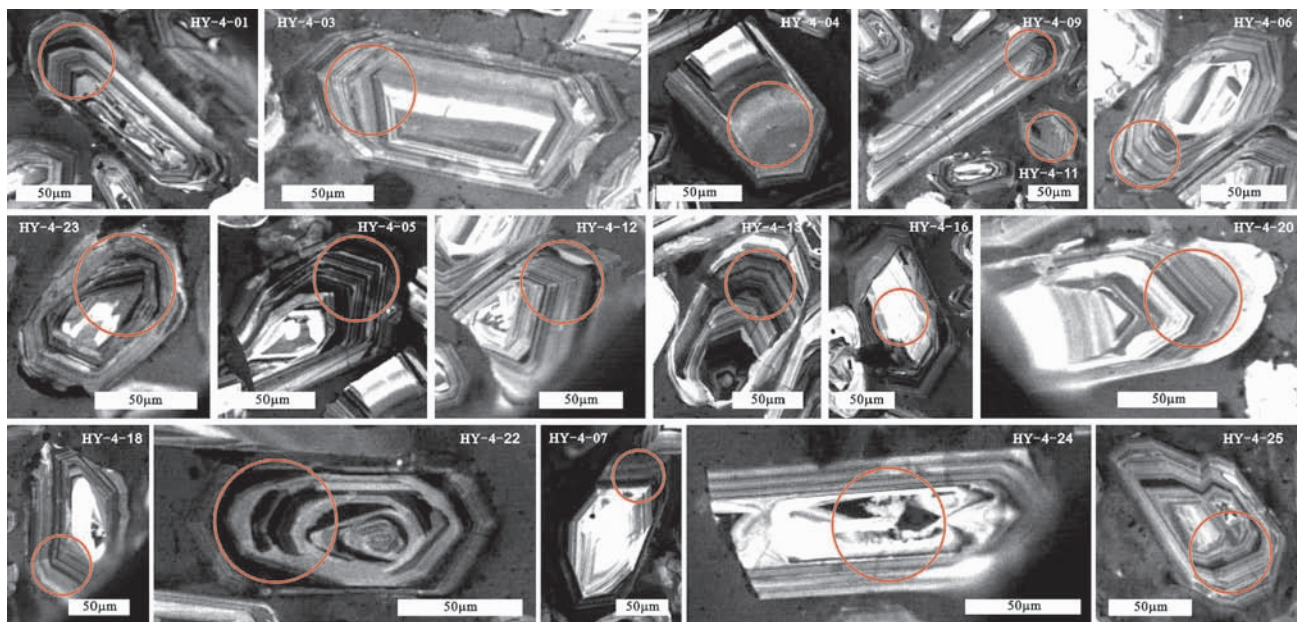


图2 合峪花岗岩基样品锆石 CL 图像

Fig.2 Zircon CL images of Heyu batholith

表1 合峪花岗岩基 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测试结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for the Heyu batholith

测点号	Th/U	同位素比值 $\pm 1\sigma$						年龄 (Ma)					
		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
		比值	σ	比值	σ	比值	σ	年龄	σ	年龄	σ	年龄	σ
HY-4-01	0.61	0.05017	0.00246	0.14496	0.00689	0.02096	0.00025	203	114	137	6	134	2
HY-4-03	0.81	0.05509	0.00726	0.17119	0.02185	0.02254	0.00075	416	298	160	19	144	5
HY-4-04	0.94	0.05967	0.00277	0.20228	0.01233	0.02449	0.00054	591	94	187	10	156	3
HY-4-05	0.58	0.04741	0.00111	0.13391	0.00441	0.02073	0.00032	70	48	128	4	132	2
HY-4-06	1.01	0.06302	0.00165	0.17595	0.00675	0.02042	0.00024	709	61	165	6	130	2
HY-4-07	0.92	0.06498	0.00596	0.2116	0.01908	0.02362	0.00040	774	200	195	16	150	3
HY-4-09	0.67	0.06953	0.00238	0.22457	0.00890	0.02381	0.00073	915	38	206	7	152	5
HY-4-11	0.64	0.05056	0.00101	0.16327	0.00465	0.02385	0.00061	221	29	154	4	152	4
HY-4-12	0.57	0.05849	0.00088	0.18509	0.00503	0.02296	0.00048	548	28	172	4	146	3
HY-4-13	0.48	0.04832	0.00125	0.14380	0.00405	0.02192	0.00039	115	35	136	4	140	2
HY-4-16	0.52	0.08921	0.00191	2.38813	0.04456	0.19416	0.00202	1409	42	1239	13	1144	11
HY-4-18	0.73	0.04935	0.00095	0.13453	0.00256	0.01996	0.00013	165	32	128	2	128	0.8
HY-4-20	0.41	0.05111	0.00215	0.15421	0.00677	0.02194	0.00025	246	80	146	6	140	2
HY-4-22	0.81	0.05144	0.00095	0.14344	0.00497	0.02040	0.00048	261	40	136	4	130	3
HY-4-23	0.70	0.04882	0.00152	0.14085	0.00480	0.02115	0.00035	139	49	134	4	135	2
HY-4-24	0.79	0.08015	0.00305	1.87139	0.06525	0.16934	0.00258	1201	77	1071	23	1008	14
HY-4-25	0.65	0.05730	0.00126	0.17821	0.00467	0.02305	0.00060	503	26	167	4	147	4
HY-14-01	0.49	0.08156	0.00215	1.46569	0.03498	0.13034	0.00146	1235	53	916	14	790	8
HY-14-02	1.66	0.11111	0.00135	0.34823	0.00387	0.02273	0.00024	1818	9	303	3	145	2
HY-14-03	0.77	0.05356	0.00234	0.16701	0.00703	0.02262	0.00027	353	101	157	6	144	2
HY-14-04	0.69	0.05302	0.00199	0.18147	0.00650	0.02482	0.00028	330	87	169	6	158	2
HY-14-05	0.50	0.05258	0.00186	0.16319	0.00545	0.02251	0.00026	311	82	153	5	143	2
HY-14-06	0.58	0.09673	0.00254	3.13745	0.07406	0.23525	0.00269	1562	50	1442	18	1362	14
HY-14-07	0.79	0.06922	0.00364	0.21026	0.01073	0.02203	0.00028	905	111	194	9	140	2
HY-14-08	0.61	0.05691	0.00321	0.18600	0.01020	0.02370	0.00031	488	128	173	9	151	2
HY-14-09	0.48	0.06639	0.00291	0.20858	0.00877	0.02279	0.00029	819	94	192	7	145	2
HY-14-10	0.93	0.08417	0.00347	0.26516	0.01037	0.02285	0.00030	1296	82	239	8	146	2

续表 1

Continued Table 1

测点号	Th/U	同位素比值 $\pm 1\sigma$						年龄 (Ma)					
		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
		比值	σ	比值	σ	比值	σ	年龄	σ	年龄	σ	年龄	σ
HY-14-11	0.64	0.05533	0.00300	0.17949	0.00943	0.02353	0.00032	425	124	168	8	150	2
HY-14-12	0.88	0.05255	0.00294	0.16437	0.00895	0.02268	0.00029	309	130	155	8	145	2
HY-14-13	0.59	0.05542	0.00236	0.18035	0.00737	0.02360	0.00028	429	97	168	6	150	2
HY-14-14	0.63	0.05079	0.00208	0.16412	0.00644	0.02344	0.00028	231	97	154	6	149	2
HY-14-15	0.24	0.12761	0.00182	3.19570	0.03208	0.18163	0.00184	2065	26	1456	8	1076	10
HY-14-16	1.14	0.10926	0.00255	0.35019	0.00742	0.02324	0.00032	1787	20	305	6	148	2
HY-14-17	0.94	0.07033	0.00335	0.22173	0.01018	0.02287	0.00029	938	100	203	8	146	2
HY-14-18	0.65	0.05917	0.00343	0.19174	0.01086	0.02350	0.00030	573	130	178	9	150	2
HY-14-19	0.84	0.05688	0.00267	0.18046	0.00817	0.02301	0.00028	487	106	168	7	147	2
HY-14-20	0.72	0.05016	0.00266	0.15904	0.00822	0.02299	0.00028	203	123	150	7	147	2
HY-74-01	0.83	0.05145	0.00261	0.15562	0.00758	0.02202	0.00039	261	79	147	7	140	2
HY-74-02	0.93	0.10669	0.00466	0.34088	0.01374	0.02325	0.00047	1744	45	298	10	148	3
HY-74-03	1.17	0.08961	0.00419	0.27543	0.01205	0.02236	0.00044	1417	54	247	10	143	3
HY-74-04	0.79	0.07879	0.00397	0.23988	0.01139	0.02214	0.00044	1167	63	218	9	141	3
HY-74-05	0.74	0.09966	0.00248	0.28979	0.00660	0.02114	0.00030	1618	22	258	5	135	2
HY-74-06	0.62	0.08141	0.00349	0.26297	0.01061	0.02348	0.00042	1231	51	237	9	150	3
HY-74-07	0.95	0.10193	0.00480	0.28232	0.01243	0.02009	0.00033	1660	89	252	10	128	2
HY-74-08	0.63	0.07715	0.00669	0.22803	0.01906	0.02146	0.00055	1125	126	209	16	137	3
HY-74-09	0.98	0.06568	0.01714	0.19890	0.05125	0.02196	0.00090	796	550	184	43	140	6
HY-74-10	0.89	0.08097	0.00703	0.24535	0.02069	0.02198	0.00045	1221	177	223	17	140	3
HY-74-11	0.98	0.06830	0.00327	0.19842	0.00908	0.02108	0.00036	878	66	184	8	134	2
HY-74-12	0.75	0.09854	0.01265	0.34468	0.04221	0.02537	0.00104	1597	169	301	32	162	7
HY-74-13	0.31	0.13664	0.00410	0.47424	0.01286	0.02517	0.00042	2185	25	394	9	160	3
HY-74-14	0.83	0.07376	0.00329	0.29864	0.01255	0.02936	0.00054	1035	55	265	10	187	3
HY-74-15	0.75	0.07374	0.00894	0.24794	0.02943	0.02438	0.00060	1034	257	225	24	155	4
HY-74-16	1.21	0.06336	0.00183	0.19757	0.00545	0.02260	0.00030	720	36	183	5	144	2
HY-74-17	0.41	0.10783	0.00301	0.32687	0.00837	0.02197	0.00033	1763	26	287	6	140	2
HY-74-18	1.57	0.06455	0.00186	0.19154	0.00525	0.02150	0.00029	760	35	178	4	137	2
HY-74-19	0.80	0.07908	0.00259	0.25017	0.00771	0.02292	0.00034	1174	38	227	6	146	2
HY-74-20	0.61	0.07286	0.00369	0.24795	0.01196	0.02466	0.00047	1010	67	225	10	157	3
HY-73-01	2.60	0.19513	0.01227	0.70326	0.04098	0.02614	0.00062	2786	106	541	24	166	4
HY-73-02	1.92	0.07347	0.00490	0.26838	0.01729	0.02647	0.00054	1027	97	241	14	168	3
HY-73-03	1.24	0.08606	0.00915	0.26458	0.02754	0.02230	0.00048	1340	214	238	22	142	3
HY-73-04	1.65	0.06598	0.00157	0.19522	0.00441	0.02144	0.00027	806	27	181	4	137	2
HY-73-05	0.76	0.07731	0.00207	0.23923	0.00603	0.02242	0.00030	1129	29	218	5	143	2
HY-73-06	1.03	0.09203	0.00627	0.25878	0.01713	0.02039	0.00033	1468	133	234	14	130	2
HY-73-07	0.88	0.09480	0.00616	0.30493	0.01909	0.02333	0.00041	1524	126	270	15	149	3
HY-73-08	0.28	0.08668	0.00200	1.30410	0.02613	0.10911	0.00124	1353	45	848	12	668	7
HY-73-09	1.05	0.06807	0.00160	0.20136	0.00449	0.02144	0.00027	871	26	186	4	137	2
HY-73-10	1.18	0.08938	0.00435	0.25975	0.01198	0.02108	0.00033	1412	95	234	10	134	2
HY-73-11	1.48	0.09870	0.00209	0.31101	0.00608	0.02284	0.00029	1600	19	275	5	146	2
HY-73-12	0.53	0.05953	0.00154	0.17805	0.00438	0.02168	0.00028	587	31	166	4	138	2
HY-73-13	0.80	0.07814	0.00451	0.24128	0.01341	0.02239	0.00035	1150	118	219	11	143	2
HY-73-14	1.47	0.06543	0.00197	0.21018	0.00603	0.02329	0.00032	788	37	194	5	148	2
HY-73-15	1.09	0.07647	0.00236	0.23556	0.00688	0.02234	0.00032	1107	36	215	6	142	2
HY-73-16	2.22	0.06863	0.00462	0.29253	0.01891	0.03091	0.00068	888	97	261	15	196	4
HY-73-17	1.01	0.07746	0.00156	0.23385	0.00441	0.02189	0.00027	1133	19	213	4	140	2
HY-73-18	1.11	0.10255	0.00129	1.30589	0.01520	0.09235	0.00103	1671	10	848	7	569	6
HY-73-19	0.62	0.05754	0.00170	0.16802	0.00475	0.02118	0.00028	512	39	158	4	135	2
HY-73-20	1.30	0.08979	0.00667	0.29126	0.02088	0.02353	0.00046	1421	146	260	16	150	3

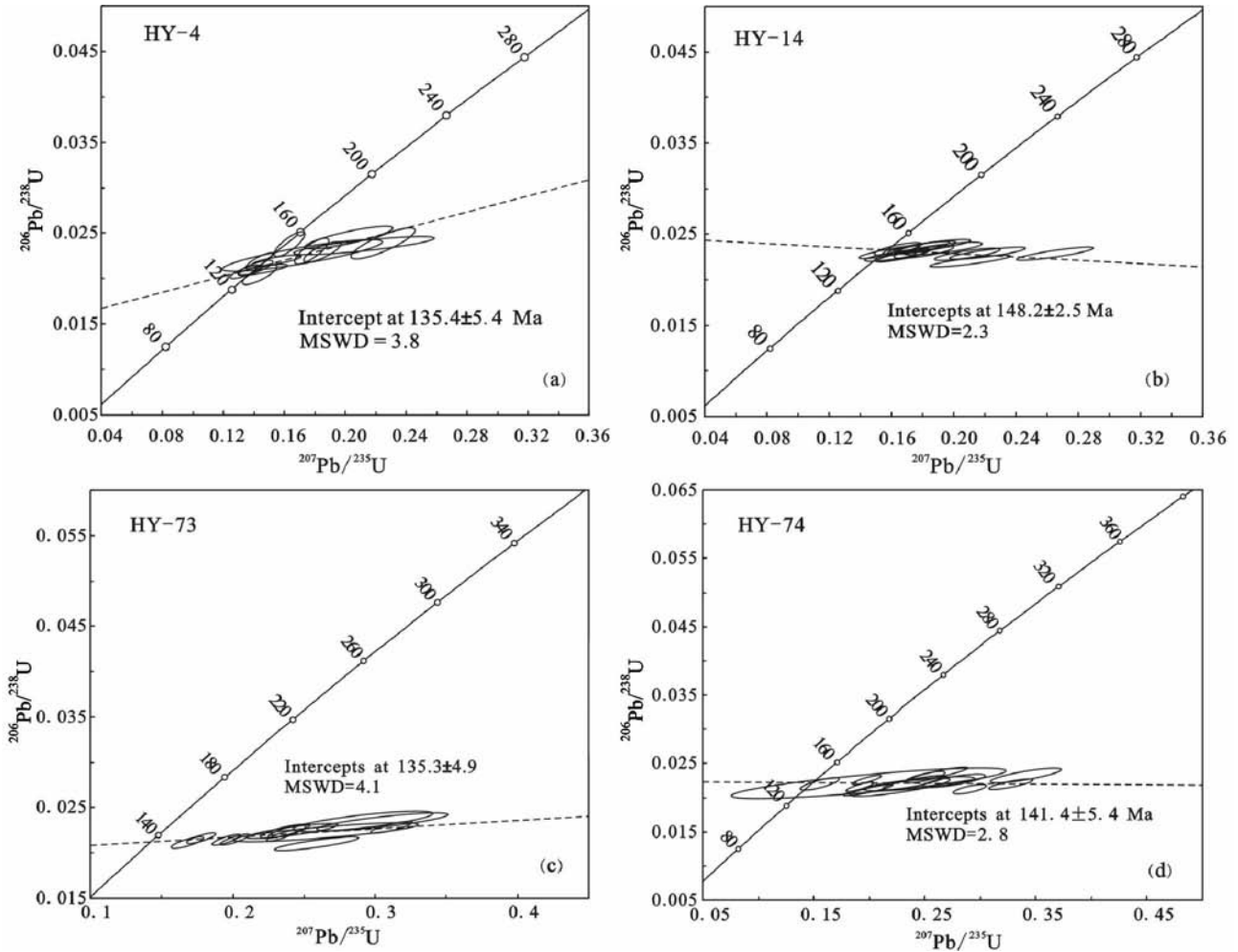


图3 合峪花岗岩基锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谱和图

Fig. 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordant diagrams for the Heyu batholith

花岗岩样品进行锆石 U-Pb 定年,样品分别为 HY-4 大斑中粗粒黑云母二长花岗岩(地理坐标 $N33^{\circ}47'29''$, $E111^{\circ}47'53''$)、HY-14 中斑中粗粒黑云母二长花岗岩(地理坐标 $N33^{\circ}47'47''$, $E111^{\circ}55'24''$)、HY-74 含小斑细中粒黑云母二长花岗岩(地理坐标 $N33^{\circ}47'19''$, $E112^{\circ}03'34''$)和 HY-73 细粒黑云母正长花岗岩(地理坐标 $N33^{\circ}48'43''$, $E112^{\circ}02'09''$)。锆石颜色从无色透明到黄褐色,CI 图像显示锆石呈长柱状或短柱状(图 2),自形程度较好,粒径在 $50 \sim 150 \mu\text{m}$,长宽比约为 $2:1 \sim 4:1$ 。岩浆结晶环带清楚,部分锆石颗粒核部有残留的继承锆石。锆石 Th/U 比值较高($0.24 \sim 2.60$),均为岩浆成因(Hoskin and Black, 2000; Belousova *et al.*, 2002)。

对第一单元锆石样品 HY-4 进行了 17 点次的分析,15 个分析值给出了谐和年龄为 $135.4 \pm 5.4 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 3.8$) (图 3a),在误差范围内与郭波等(2009)年龄($134.5 \pm 1.5 \text{ Ma}$)吻合,另有两个分析点为核部锆石(HY-4-16、HY-4-24),其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$ 年龄分别为 1409 Ma 、 1201 Ma ,为继承性锆石(表 1)。

对第二单元锆石样品 HY-14 进行了 20 点次的分析, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄主要集中于 $140 \sim 150 \text{ Ma}$ (表 1),另有 HY-14-

01 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 790 Ma ,HY-14-06 和 HY-14-15 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$ 年龄分别为 1562 Ma 和 2065 Ma ,为继承性锆石。去掉 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 较高、偏离谐和线较远的 3 个数据点,根据 14 个分析点给出的谐和年龄为 $148.2 \pm 2.5 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 2.3$) (图 3b),可确定合峪花岗岩基第二单元结晶年龄或侵位时间为 148.2 Ma 左右。

对第四单元锆石样品 HY-74 进行了 20 点次的分析,定年数据得到两个集中区。一组 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据集中于 $134 \sim 150 \text{ Ma}$ (15 个分析点),谐和年龄为 $141.4 \pm 5.4 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 2.8$) (图 3c),代表合峪花岗岩基第四单元侵位时间,另一组 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据集中于 $155 \sim 187 \text{ Ma}$ (5 个分析点),可能为捕获的锆石年龄。

对第六单元锆石样品 HY-73 进行了 20 点次的分析,去掉 5 个 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 较高、偏离谐和线较远的数据点,其余 15 个数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围较集中,为 $130 \sim 150 \text{ Ma}$,谐和年龄为 $135.3 \pm 4.9 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 4.1$) (图 3d),HY-73-08、HY-73-18 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 668 Ma 、 569 Ma ,可能为继承锆石。可确定合峪花岗岩基第六单元结晶年龄或最终侵位时

表2 合峪花岗岩基主量(wt%)、微量及稀土元素($\times 10^{-6}$)分析表Table 2 Major (wt%), trace and rare earth ($\times 10^{-6}$) element concentrations of the Heyu batholith

单元 样品号	1							2						
	HY-22	HY-34	HY-38	HY-39	HY-40	HY-59	HY-60	HY-10	HY-14	HY-16	HY-19	HY-33	HY-41	
SiO ₂	72.68	73.64	72.73	71.79	72.53	70.67	69.78	69.37	69.60	67.16	67.33	75.27	71.63	
TiO ₂	0.35	0.25	0.31	0.25	0.29	0.30	0.38	0.35	0.32	0.51	0.56	0.22	0.18	
Al ₂ O ₃	14.39	13.71	14.00	14.85	14.34	15.15	15.22	15.71	15.30	15.90	15.92	13.29	15.54	
Fe ₂ O ₃ ^T	2.74	2.11	2.56	2.02	2.30	2.23	2.62	2.82	2.07	3.85	4.19	1.69	1.53	
K ₂ O	3.65	4.12	3.43	4.73	3.95	4.62	4.94	4.31	4.77	3.66	3.50	3.77	5.00	
MnO	0.06	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.06	0.05	0.05	0.09	0.12	0.04	0.04	
MgO	0.79	0.62	0.56	0.47	0.45	0.54	0.62	0.74	0.52	1.02	1.12	0.49	0.38	
CaO	1.59	1.40	1.67	1.26	1.44	1.42	1.67	1.55	1.50	2.52	1.77	1.18	1.05	
Na ₂ O	3.99	3.99	4.53	4.43	4.51	4.82	4.44	4.79	4.23	4.90	4.99	4.00	4.55	
P ₂ O ₅	0.15	0.09	0.12	0.09	0.12	0.14	0.16	0.19	0.15	0.24	0.32	0.07	0.05	
LOI	0.61	0.60	0.69	0.60	0.84	0.67	0.60	1.71	1.17	0.30	1.62	0.61	0.86	
Total	99.96	99.98	99.97	99.94	99.96	99.92	99.89	99.88	99.75	99.84	99.83	100.02	99.94	
Na ₂ O/K ₂ O	1.09	0.97	1.32	0.94	1.14	1.04	0.90	1.11	0.89	1.34	1.43	1.06	0.91	
Mg [#]	36.3	36.8	30.2	31.5	27.9	32.4	31.9	34.2	36.9	34.4	34.6	36.5	33.0	
ANK	1.32	1.24	1.25	1.19	1.23	1.30	1.13	1.25	1.26	1.32	1.33	1.25	1.20	
ACNK	1.04	1.01	0.98	1.01	1.00	1.06	0.94	1.02	1.03	0.96	1.05	1.04	1.05	
Cs	3.37	4.75	2.64	2.28	2.54	2.35	2.75	0.92	0.81	1.84	1.60	4.05	1.77	
Rb	88.7	102	82.7	110	108	154	87.6	60.9	176	49.5	33.4	117	109	
Ba	545	544	1030	1949	1242	1895	2131	1842	2214	2195	1660	543	1778	
Th	19.5	16.5	29.9	20.8	25.9	31.2	19.8	13.4	32.0	16.6	19.8	13.0	12.1	
U	2.24	2.17	6.53	3.87	3.98	46.0	4.06	1.65	4.70	2.10	4.90	1.73	1.73	
Nb	31.1	29.9	47.5	36.9	45.9	33.8	39.7	36.0	37.3	41.8	120	34.4	27.7	
Ta	2.28	2.34	3.09	2.35	3.00	1.90	2.27	2.21	2.09	2.44	8.26	2.77	1.67	
Sr	168	133	371	402	286	657	507	247	848	654	468	102	254	
Y	9.29	6.34	7.46	5.07	6.94	9.57	7.57	10.4	15.1	15.4	17.3	6.10	3.21	
Zr	127	110	116	97.6	126	143	143	139	118	119	129	124	86.4	
Hf	3.96	3.84	3.79	3.05	3.98	3.79	3.44	3.43	2.45	2.90	3.92	4.16	2.66	
Rb/Sr	0.53	0.77	0.22	0.27	0.38	0.23	0.17	0.25	0.21	0.08	0.07	1.15	0.43	
Sr/Y	18.1	21.0	49.7	79.3	41.2	68.7	67.0	23.8	56.3	42.5	27.1	16.7	79.1	
La	25.1	15.4	38.4	25.0	34.3	55.6	38.4	36.4	69.1	61.4	44.9	15.6	13.6	
Ce	38.2	29.2	77.9	46.8	61.3	96.8	72.0	58.8	122	102	92.3	26.3	30.1	
Pr	4.87	3.21	7.64	5.45	7.37	9.69	8.12	6.56	11.8	11.9	11.3	3.19	3.26	
Nd	17.1	11.4	25.6	19.0	25.0	31.3	28.1	22.1	39.2	40.3	41.9	11.3	11.4	
Sm	2.94	2.02	3.84	2.82	3.81	4.47	4.25	3.30	5.63	6.36	7.41	1.88	1.86	
Eu	0.61	0.44	0.82	0.69	0.79	1.11	0.98	0.84	1.19	1.42	1.52	0.38	0.44	
Gd	2.06	1.40	2.64	1.79	2.30	2.79	2.62	2.40	3.46	4.24	4.80	1.33	1.22	
Tb	0.31	0.20	0.34	0.26	0.35	0.39	0.37	0.33	0.50	0.59	0.70	0.20	0.17	
Dy	1.57	1.08	1.71	1.28	1.65	1.72	1.77	1.69	2.35	2.80	3.42	0.97	0.79	
Ho	0.30	0.22	0.32	0.23	0.31	0.32	0.32	0.32	0.42	0.51	0.69	0.19	0.14	
Er	0.92	0.64	0.97	0.70	0.90	0.87	0.93	0.94	1.18	1.52	2.08	0.63	0.46	
Tm	0.13	0.10	0.13	0.10	0.12	0.12	0.12	0.14	0.17	0.21	0.31	0.09	0.06	
Yb	0.96	0.76	0.92	0.66	0.85	0.80	0.78	0.90	1.07	1.30	2.16	0.71	0.43	
Lu	0.13	0.13	0.13	0.11	0.13	0.12	0.11	0.12	0.15	0.18	0.33	0.12	0.07	
ΣREE	105	72.5	169	110	146	216	167	145	274	250	231	68.9	67.2	
LREE	88.8	61.6	154	99.7	133	199	152	128	249	223	199	58.6	60.7	
HREE	15.7	10.9	14.6	10.2	13.6	16.7	14.6	17.2	9.30	26.7	31.8	10.3	6.55	
LREE/HREE	5.67	5.67	10.5	9.78	9.81	11.9	10.4	7.43	26.8	8.35	6.26	5.67	9.27	
(La/Yb) _N	18.8	14.5	30.0	27.2	29.0	49.9	35.3	29.0	46.4	33.9	14.9	15.8	22.7	
δEu	0.72	0.76	0.75	0.88	0.75	0.89	0.83	0.87	0.76	0.79	0.73	0.70	0.84	
T(°C)	732	719	715	705	723	719	708	727	704	719	733	699	732	

续表 2

Continued Table 2

单元 样品号	2		3				4		6				
	HY-43	HY-44	HY-24	HY-28	HY-31	HY-42	HY-45	HY-57	HY-48	HY-50	HY-51	HY-52	HY-53
SiO ₂	72.91	71.35	72.00	71.80	72.37	71.62	71.07	73.28	74.77	71.86	72.65	71.82	75.43
TiO ₂	0.25	0.27	0.28	0.31	0.29	0.25	0.32	0.23	0.15	0.21	0.23	0.21	0.13
Al ₂ O ₃	14.39	14.97	14.81	14.81	14.64	15.04	14.98	14.36	13.77	15.00	14.45	15.11	13.74
Fe ₂ O ₃ ^T	1.95	2.12	2.37	2.21	2.04	2.22	2.66	2.08	1.49	2.20	1.91	2.15	1.38
K ₂ O	4.83	4.49	4.44	4.19	4.41	4.66	4.32	4.15	4.37	4.63	4.37	4.56	4.11
MnO	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.07	0.06	0.04	0.03	0.06	0.05	0.06	0.02
MgO	0.45	0.45	0.66	0.71	0.63	0.56	0.58	0.42	0.27	0.37	0.39	0.38	0.26
CaO	1.09	1.17	1.32	1.56	1.40	0.94	1.39	1.33	1.03	1.13	1.16	0.92	0.79
Na ₂ O	3.96	4.99	3.89	4.18	4.04	4.49	4.42	4.00	4.12	4.40	4.70	4.64	4.13
P ₂ O ₅	0.10	0.09	0.11	0.11	0.10	0.09	0.12	0.08	0.04	0.07	0.07	0.07	0.03
LOI	1.01	1.49	0.64	0.49	0.41	0.74	0.61	0.61	0.44	0.53	0.50	0.52	0.57
Total	99.96	99.93	99.93	99.94	99.95	99.93	99.91	99.97	100.01	99.93	99.96	99.93	100.02
Na ₂ O/K ₂ O	0.82	1.11	0.88	1.00	0.92	0.96	1.02	0.96	0.94	0.95	1.08	1.02	1.00
Mg [#]	31.4	29.6	35.5	38.9	37.9	33.3	30.2	28.6	26.4	25.0	28.8	25.9	27.2
ANK	1.22	1.14	1.32	1.30	1.28	1.21	1.25	1.17	1.20	1.22	1.16	1.20	1.22
ACNK	1.05	0.98	1.09	1.04	1.05	1.06	1.03	0.98	1.03	1.05	0.99	1.06	1.08
Cs	0.55	0.45	1.69	2.06	2.19	1.61	3.39	1.89	1.66	1.85	1.85	3.02	1.56
Rb	75.0	61.8	94.5	69.2	77.1	89.8	79.6	69.0	103	98.0	97.2	109	116
Ba	1649	2088	1585	1114	1178	1724	1821	1735	909	1885	1317	1981	594
Th	18.6	18.6	12.1	10.8	10.7	15.2	23.8	10.8	16.7	17.0	10.4	13.9	17.4
U	2.24	1.51	1.83	1.82	1.91	2.42	2.08	1.18	2.88	1.62	1.95	1.77	4.98
Nb	36.1	33.9	24.2	27.2	26.1	34.0	45.7	32.5	26.8	40.3	37.7	35.5	37.0
Ta	2.48	2.23	1.66	2.19	2.05	1.96	3.21	2.12	1.81	2.34	2.39	2.27	3.32
Sr	229	338	264	211	208	322	349	193	138	358	152	316	120
Y	6.60	5.43	8.81	7.00	4.95	5.85	13.3	7.47	3.97	8.95	7.30	5.38	4.63
Zr	95.1	90.0	101	98.3	96.0	91.5	126	132	64.2	73.1	92.3	88.5	96.8
Hf	2.57	2.07	3.21	3.14	3.30	2.42	3.21	3.34	1.80	2.15	2.35	2.36	3.07
Rb/Sr	0.33	0.18	0.36	0.33	0.37	0.28	0.23	0.36	0.75	0.27	0.64	0.34	0.97
Sr/Y	34.7	62.3	30.0	30.1	42.0	55.0	26.2	25.8	34.8	40.0	20.8	58.7	25.9
La	34.1	28.7	23.3	19.4	17.2	32.4	55.5	27.0	19.5	37.4	25.5	32.3	14.0
Ce	54.9	51.5	43.5	34.2	32.6	57.1	105	43.9	35.6	72.6	41.2	61.3	26.8
Pr	6.57	5.68	5.19	4.20	4.06	6.46	11.7	5.45	4.05	8.23	4.97	6.81	2.92
Nd	21.7	18.9	18.9	15.2	14.6	21.6	39.1	18.0	13.2	28.4	16.7	22.5	9.53
Sm	3.30	2.81	3.10	2.62	2.54	3.08	5.58	2.83	2.00	4.41	2.58	3.33	1.63
Eu	0.69	0.63	0.80	0.61	0.53	0.68	0.97	0.59	0.37	0.94	0.46	0.63	0.26
Gd	2.12	1.84	2.19	1.83	1.70	2.04	3.48	1.79	1.31	2.74	1.72	2.03	1.05
Tb	0.29	0.26	0.32	0.27	0.24	0.26	0.50	0.26	0.18	0.40	0.23	0.27	0.17
Dy	1.44	1.27	1.65	1.31	1.19	1.21	2.43	1.26	0.88	2.04	1.20	1.23	0.88
Ho	0.27	0.25	0.30	0.25	0.23	0.22	0.51	0.24	0.16	0.39	0.24	0.21	0.18
Er	0.77	0.69	0.86	0.72	0.61	0.68	1.56	0.74	0.46	1.10	0.74	0.62	0.54
Tm	0.11	0.10	0.14	0.11	0.08	0.08	0.24	0.10	0.06	0.15	0.10	0.08	0.08
Yb	0.72	0.65	0.86	0.71	0.58	0.57	1.73	0.68	0.45	0.98	0.75	0.55	0.61
Lu	0.11	0.09	0.13	0.10	0.08	0.08	0.27	0.11	0.06	0.14	0.12	0.08	0.09
∑REE	134	119	110	88.5	81.1	132	242	110	82.2	169	104	137	63.4
LREE	121	108	94.7	76.2	71.5	121	218	97.8	74.7	152	91.4	127	55.1
HREE	12.4	10.6	15.3	12.3	9.66	11.0	24.0	12.6	7.53	16.9	12.4	17.2	8.23
LREE/HREE	9.73	10.2	6.21	6.19	7.40	11.0	9.07	7.73	9.92	9.00	7.37	7.37	6.69
(La/Yb) _N	34.0	31.7	19.4	19.6	21.2	40.7	23.0	28.5	31.1	27.4	24.4	42.2	16.4
δEu	0.75	0.80	0.89	0.81	0.73	0.78	0.63	0.75	0.66	0.77	0.63	0.69	0.57
T(°C)	712	691	720	710	711	705	726	745	727	682	688	697	701

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 为球粒陨石标准化值, 标准化值引自 Sun and McDonough (1989); T 为锆石饱和温度, T_{Zr} = 12900 / [2.95 + 0.85M + ln(496000/Zrmet)], M = (Na + K + 2Ca) / (Al × Si), Zrmet 为锆含量 (Watson and Harrison, 1983)

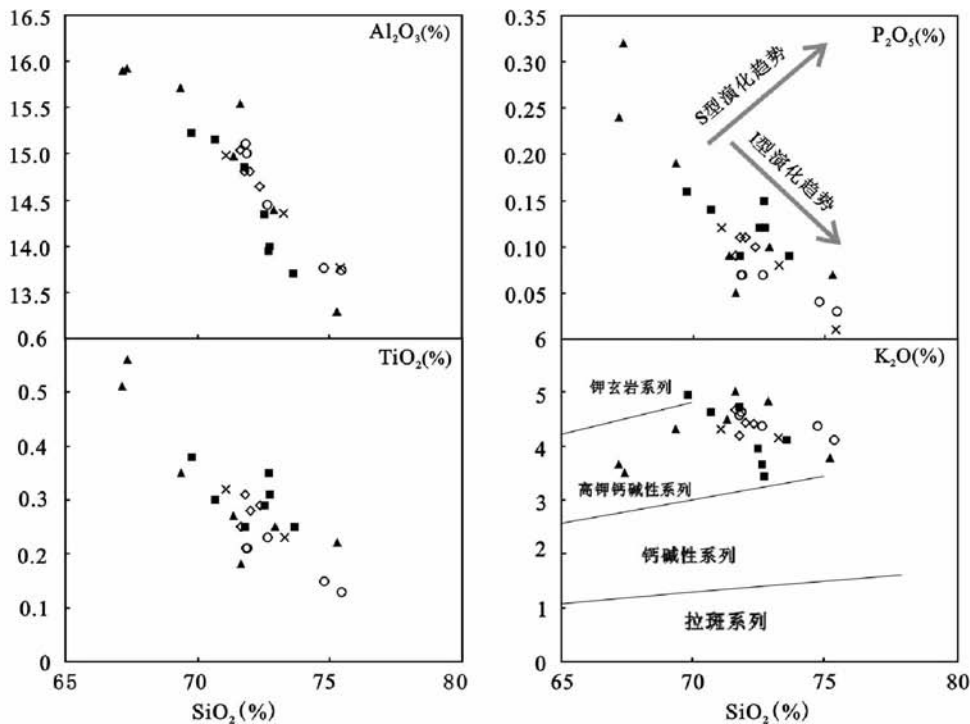


图4 合峪花岗岩基中部分主化学成分和比值与 SiO_2 的相关性

■-合峪花岗岩基第一单元; ▲-合峪花岗岩基第二单元; ◇-合峪花岗岩基第三单元; ×-合峪花岗岩基第四单元; ○-合峪花岗岩基第六单元

Fig. 4 Correlation of SiO_2 with some other major elements and ratios for Heyu batholith

■-the first unit of Heyu batholith; ▲-the second unit of Heyu batholith; ◇-the third unit of Heyu batholith; ×-the forth unit of Heyu batholith; ○-the sixth unit of Heyu batholith

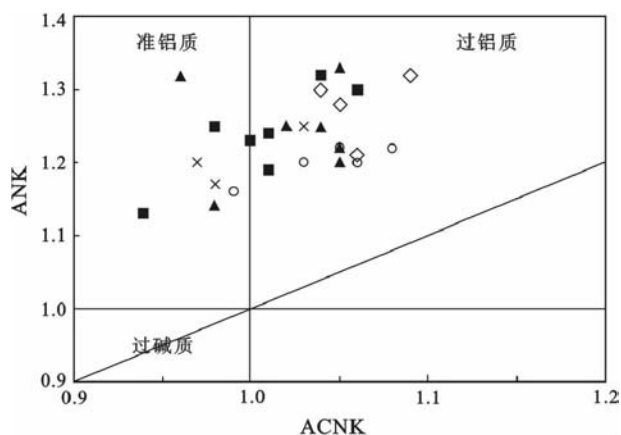


图5 合峪花岗岩基 ANK-ACNK 图解

样品符号同图4

Fig. 5 ANK-ACNK Diagram of the Heyu batholith

Symbol is as Fig. 4

间为 135.3Ma 左右。

根据本次测试的年龄结果,合峪花岗岩基时空分布关系复杂,在误差范围内第二单元到第六单元年龄呈现由老到新的趋势,而第一单元年龄较新与岩浆侵位末期单元年龄相似。

5 岩石地球化学特征

5.1 主量元素

研究区样品的主量元素分析结果列于表 2。 SiO_2 变化于 67.16% ~ 75.43% 之间, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.29\% \sim 15.92\%$, $\text{MgO} = 0.26\% \sim 1.12\%$, $\text{Mg}^\# [\text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{\text{T}}) \times 100, \text{FeO}^{\text{T}}$ 为 Fe^{2+}] 较低, 介于 25.0 ~ 38.9。岩体碱含量较高, Na_2O 和 K_2O 分别为 3.89% ~ 4.99% 和 3.43% ~ 5.00%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 总量普遍大于 8%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 0.88 ~ 1.43。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中(图 4), 样品大部分落入高钾钙碱性系列, 个别样品落入钾玄岩系列区域。ACNK ($\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 分子比) = 0.94 ~ 1.09, 均 < 1.1。在 ANK-ACNK 图解(图 5)中, 各单元均为准铝质-弱过铝质花岗岩。从图 4 可以看到, SiO_2 含量随各单元年龄由老到新, 从第二单元向第六单元有增加趋势, 显示出环形岩基由外到内酸性增加趋势; Al_2O_3 、 TiO_2 、 P_2O_5 显示出与 SiO_2 大致的负相关关系, 且由第二单元到第六单元依次降低。通常随着结晶分异剩余岩浆中的 TFMM 组分是逐渐降低的(于津海等, 2007)。合峪花岗岩基的 TFMM [$\text{TiO}_2 + \text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} + \text{MnO}(\%)$] 总量与少数主量元素含量和比值也显示某些相关性(图 6), TFMM 与全岩的

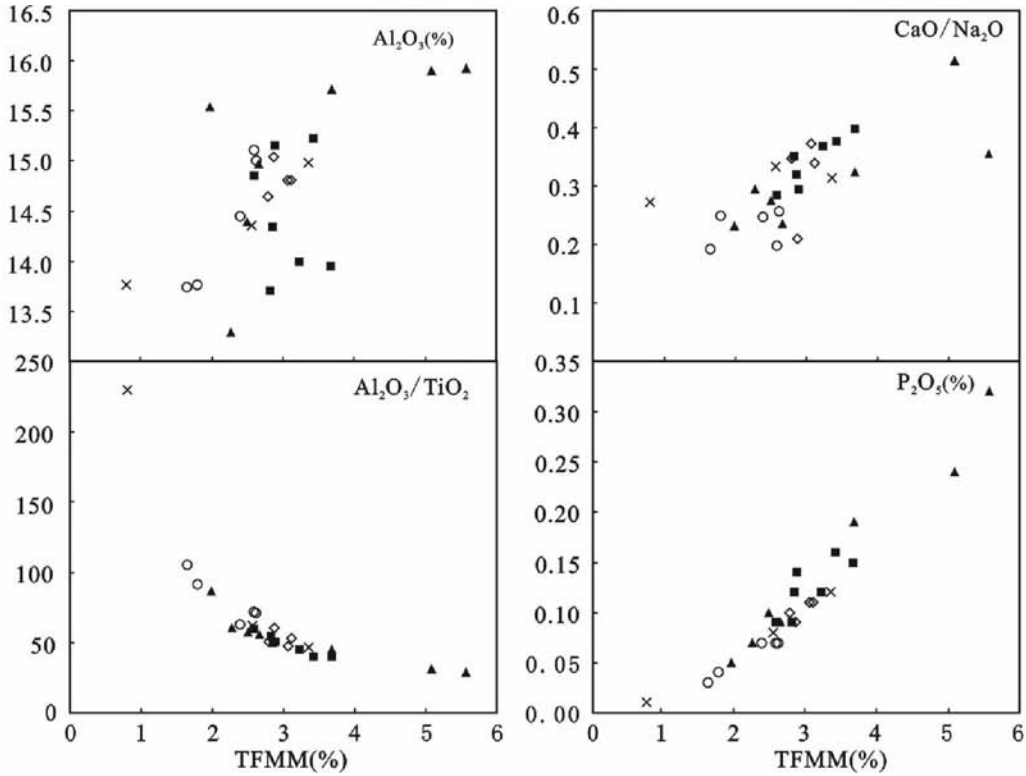


图6 合峪花岗岩基中部分主化学成分和比值与 TFMM 的相关性

样品符号同图4

Fig.6 Correlation of TFMM with some other major elements and ratios for Heyu batholith

Symbol is as Fig. 4

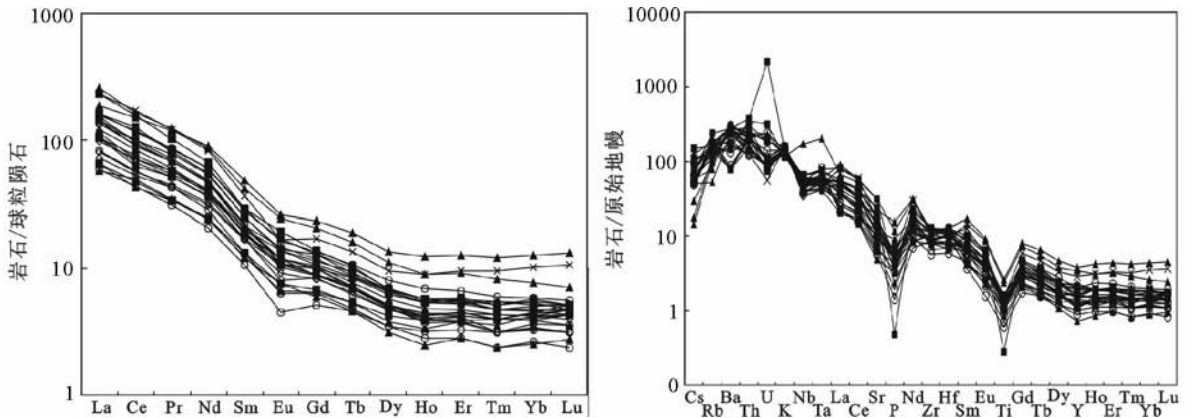


图7 合峪花岗岩基球粒陨石标准化 REE 配分模式图及原始地幔标准化微量元素蛛网图(球粒陨石标准化值和 PM 标准值据 Sun and McDonough, 1989)

样品符号同图4

Fig.7 Chondrite-normalized REE and PM-normalised incompatible element spider pattern of Heyu batholith (chondrite and PM values after Sun and McDonough, 1989)

Symbol is as Fig. 4

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值呈明显负相关,与 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 有弱的正相关,且 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值与 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值均表现出随各单元由老到新依次降低的趋势(图6)。

5.2 微量元素

REE 配分型式图及微量元素蛛网图见图7。

表3 合峪花岗岩基 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Whole-rock Rb-Sr and Sm-Nd isotopic compositions of the Heyu batholith

样品号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	I_{Sr}	$\varepsilon_{\text{Sr}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$
HY10	60.9	247	0.5945	0.709091	0.000018	0.7078	65.2	49.9
HY19	33.4	468	0.1725	0.709334	0.000017	0.7090	68.6	65.9
HY28	69.2	211	0.7926	0.708774	0.000013	0.7071	60.7	40.0
HY38	82.7	371	0.5388	0.709854	0.000018	0.7088	76.0	63.6
HY41	109	254	1.0369	0.710126	0.000016	0.7079	79.9	51.3
HY45	79.6	349	0.5505	0.709538	0.000017	0.7084	71.5	58.2
HY53	116	120	2.3496	0.711734	0.000016	0.7072	102.7	40.8
HY60	87.6	507	0.4173	0.709388	0.000014	0.7086	69.4	60.3
样品号	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$
HY10	3.30	22.1	0.0948	0.511781	0.000007	-14.8	2.14	-0.52
HY19	7.41	41.9	0.1122	0.511715	0.000007	-16.4	2.27	-0.43
HY28	2.62	15.2	0.1092	0.511982	0.000009	-11.2	1.85	-0.44
HY38	3.84	25.6	0.0951	0.511745	0.000007	-15.7	2.20	-0.52
HY41	1.86	11.4	0.1036	0.511719	0.000007	-16.2	2.25	-0.47
HY45	5.58	39.1	0.0907	0.511795	0.000011	-14.5	2.11	-0.54
HY53	1.63	9.53	0.1086	0.511835	0.000008	-14.1	2.08	-0.45
HY60	4.25	28.1	0.0959	0.511721	0.000008	-16.1	2.24	-0.51

稀土总量为 $63.4 \times 10^{-6} \sim 274 \times 10^{-6}$ 。在球粒陨石标准化稀土分布模式图上(图7),各样品曲线相似,近于平行,曲线平滑右倾,均为轻稀土富集、重稀土亏损($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 14.5 \times 10^{-6} \sim 49.9 \times 10^{-6}$, 平均值 27.2×10^{-6}), 铕弱亏损($\delta\text{Eu} = 0.57 \sim 0.89$, 平均 0.76)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图7),岩石的 Sr 含量变化于 $102 \times 10^{-6} \sim 848 \times 10^{-6}$, 平均 290×10^{-6} 。Y 和 Yb 的丰度分别变化于 $3.21 \times 10^{-6} \sim 17.3 \times 10^{-6}$ (平均 7.58×10^{-6}) 和 $0.43 \times 10^{-6} \sim 2.16 \times 10^{-6}$ (平均 0.82×10^{-6})。Sr/Y 比值低(16.7 ~ 79.3, 平均 40.8)。

6 同位素地球化学特征

6.1 Sr 同位素特征

由表3可以看出,合峪花岗岩基的 $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ 变化范围较大,介于 40.8 ~ 65.9 之间。具有中等锶初始比值(I_{Sr}), 介于 0.7071 ~ 0.7090 之间,具有以地壳来源为主的特征。

6.2 Nd 同位素特征

合峪花岗岩基的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始比值较高(0.511715 ~ 0.511982); $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -16.4 \sim -11.2$, 均为负值。 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值均为负值,变化于 -0.43 ~ -0.54 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,用单阶段模式计算 Nd 同位素模式年龄会产生较大的偏差(李献华, 1996)。对于花岗岩这样主要由地壳部分熔融的岩石来说,为了最大限度减少因地壳演化阶段内 Sm-Nd 分馏对 Nd 模式年龄计算值产生的影响,本文采用两阶段 Nd 模式年龄计算方法。 t_{DM2} 年龄于 1.85 ~ 2.27Ga 之间,老的 Nd 两阶段模式年龄和负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,指示合峪花岗岩基主

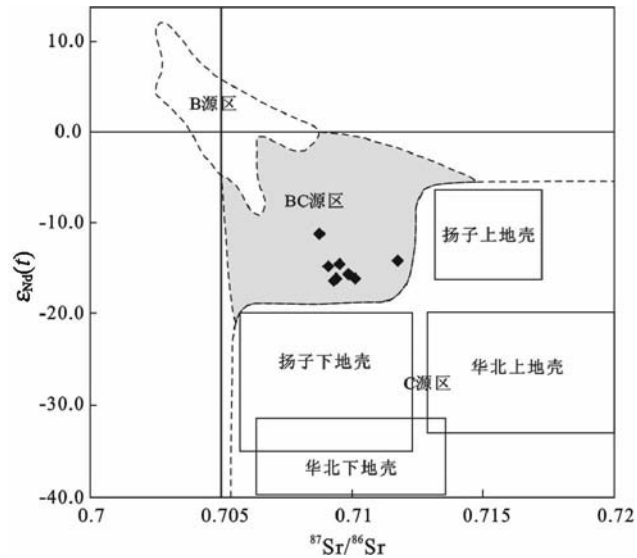


图8 合峪花岗岩基 Nd-Sr 同位素图解(据张旗等,2008)

B 源区-玄武岩源区;C 源区-陆壳源区;BC 源区-过渡源区

Fig. 8 Isotopic plot of Nd-Sr for the Heyu batholith (after Zhang *et al.*, 2008)

B-basalt derived; C-continent derived; BC-transition area

要来源于古老的地壳物质。在 Nd-Sr 同位素图解(图8)上,各个单元的投影点落在玄武岩源区与陆壳源区之间的过渡源区范围内,源岩可能有少量幔源岩浆的贡献。

6.3 锆石 Hf 同位素

选取 3 个已测年的 HY-14、HY-74、HY-73 样品进行了锆石原位 Hf 同位素分析(表4)。分析表明,合峪花岗岩基普遍

表4 合峪花岗岩基 LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素原位分析测试结果

Table 4 LA-MC-ICP-MS zircon Hf isotopic compositions of the Heyu batholith

样品号	t_{Ma}	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1}	t_{DM2}
HY-14 01	790	0.013476	0.000515	0.281575	-42.32	-24.54	2317	2768
HY-14 02	145	0.021425	0.000845	0.282120	-23.04	-19.95	1587	2006
HY-14 03	144	0.022027	0.000882	0.282114	-23.26	-20.07	1597	2016
HY-14 04	158	0.021103	0.000898	0.282110	-23.42	-20.02	1604	2021
HY-14 05	143	0.014069	0.000607	0.282143	-22.24	-19.06	1546	1963
HY-14 06	1362	0.019433	0.000693	0.281435	-47.27	-16.32	2518	2840
HY-14 07	140	0.024790	0.000927	0.282096	-23.91	-20.61	1625	2047
HY-14 08	151	0.016979	0.000652	0.282101	-23.72	-20.25	1606	2034
HY-14 09	145	0.020476	0.001037	0.282187	-20.68	-17.39	1502	1884
HY-14 10	146	0.026096	0.001144	0.282172	-21.22	-17.94	1528	1912
HY-14 11	150	0.024147	0.001095	0.282192	-20.50	-17.20	1497	1875
HY-14 12	145	0.016617	0.000674	0.282152	-21.92	-18.63	1537	1946
HY-14 13	150	0.018972	0.000805	0.282115	-23.23	-19.89	1593	2012
HY-14 14	149	0.021934	0.001001	0.282169	-21.32	-18.10	1526	1917
HY-14 15	1076	0.023126	0.000902	0.281494	-45.20	-21.93	2451	2846
HY-14 16	148	0.012523	0.000578	0.282139	-22.38	-19.19	1550	1970
HY-14 17	146	0.017744	0.000721	0.282146	-22.14	-18.81	1547	1957
HY-14 18	150	0.018279	0.000769	0.282156	-21.79	-18.23	1535	1936
HY-14 19	147	0.032499	0.001134	0.282105	-23.60	-20.34	2317	2033
HY-14 20	147	0.021701	0.000965	0.282148	-22.05	-18.77	1553	1954
HY-74 01	140	0.039532	0.001393	0.282125	-22.87	-19.39	1604	1994
HY-74 02	148	0.072372	0.002622	0.282208	-19.94	-16.55	2317	1851
HY-74 03	143	0.039778	0.001560	0.282168	-21.37	-18.40	1551	1925
HY-74 04	141	0.048902	0.001786	0.282232	-19.11	-16.27	1469	1813
HY-74 05	135	0.022681	0.000915	0.282347	-15.04	-11.99	1275	1601
HY-74 06	150	0.073615	0.002621	0.282291	-17.02	-14.39	1417	1712
HY-74 07	128	0.026239	0.001053	0.282203	-20.11	-16.95	1480	1857
HY-74 08	137	0.030442	0.001255	0.281684	-38.48	-24.33	2212	2638
HY-74 09	140	0.031102	0.001270	0.282241	-18.79	-15.91	1437	1795
HY-74 10	140	0.029768	0.001182	0.282108	-23.49	-20.66	1619	2033
HY-74 11	134	0.031171	0.001337	0.282115	-23.25	-20.18	1616	2018
HY-74 12	162	0.015741	0.000743	0.282217	-19.64	-16.69	1450	1835
HY-74 13	160	0.027993	0.001173	0.282198	-20.30	-17.27	1492	1869
HY-74 14	187	0.021130	0.000840	0.282444	-11.59	-8.43	1137	1424
HY-74 15	155	0.035713	0.001480	0.282177	-21.05	-18.08	1535	1909
HY-74 16	144	0.014995	0.000551	0.282504	-9.49	-5.25	1046	1301
HY-74 17	140	0.026085	0.001154	0.282241	-18.79	-15.83	1432	1793
HY-74 18	137	0.047520	0.001921	0.282014	-26.79	-15.00	1784	2092
HY-74 19	146	0.020365	0.000912	0.282186	-20.73	-17.86	1500	1892
HY-74 20	157	0.029979	0.001163	0.281964	-28.56	-25.39	1818	2284
HY-73 01	166	0.034299	0.001356	0.282218	-19.60	-16.66	1472	1835
HY-73 02	168	0.027186	0.001182	0.282203	-20.14	-17.01	1487	1859
HY-73 03	142	0.033909	0.001360	0.282220	-19.50	-16.50	1468	1830
HY-73 04	137	0.025342	0.001007	0.282185	-20.74	-17.75	1504	1891
HY-73 05	143	0.045270	0.001808	0.282234	-19.03	-16.23	1467	1810
HY-73 06	130	0.026943	0.001019	0.282214	-19.73	-16.55	1464	1838
HY-73 07	149	0.045044	0.001785	0.282221	-19.48	-16.83	1484	1834
HY-73 08	668	0.021302	0.000797	0.282174	-21.14	-18.21	1511	1912
HY-73 09	137	0.018793	0.000723	0.282219	-19.55	-16.55	1446	1830
HY-73 10	134	0.024932	0.000961	0.282156	-21.78	-18.80	1543	1944
HY-73 11	146	0.017827	0.000762	0.282221	-19.49	-16.62	1445	1829
HY-73 12	138	0.015188	0.000579	0.282160	-21.64	-18.15	1522	1929
HY-73 13	143	0.044715	0.001605	0.282093	-24.01	-20.68	1658	2054
HY-73 14	148	0.033878	0.001406	0.282288	-17.11	-13.19	1375	1697
HY-73 15	142	0.030579	0.001186	0.282207	-20.00	-16.72	1481	1850
HY-73 16	196	0.025299	0.001157	0.282172	-21.20	-18.16	1528	1914
HY-73 17	140	0.029611	0.001136	0.282240	-18.80	-15.84	1432	1794
HY-73 18	569	0.026027	0.001049	0.282266	-17.88	-14.97	1392	1748
HY-73 19	135	0.051672	0.001852	0.282145	-22.18	-19.16	1595	1966
HY-73 20	150	0.045553	0.001536	0.282181	-20.89	-17.61	1531	1897

注:表中 锆石 Hf 同位素组成的计算参数为: ^{176}Lu 衰变常数 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}$ (Söderlund *et al.*, 2004); 球粒陨石和亏损地幔的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分别为 0.03321、0.282772、0.03842、0.28325 (Blichert-Toft and Albarede, 1997; Griffin *et al.*, 2000); 上地壳 $f_{\text{Lu/Hf}} = -0.72$ (Vervoort *et al.*, 1996)

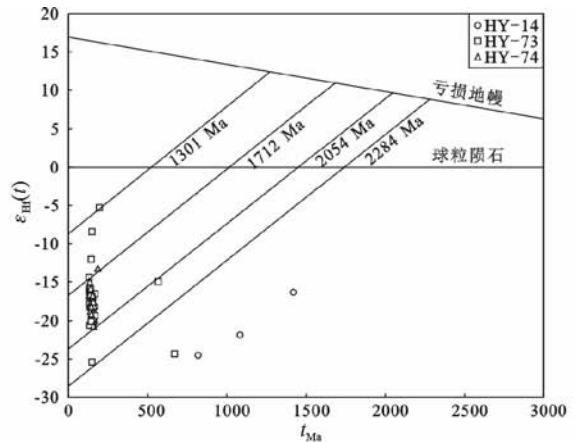
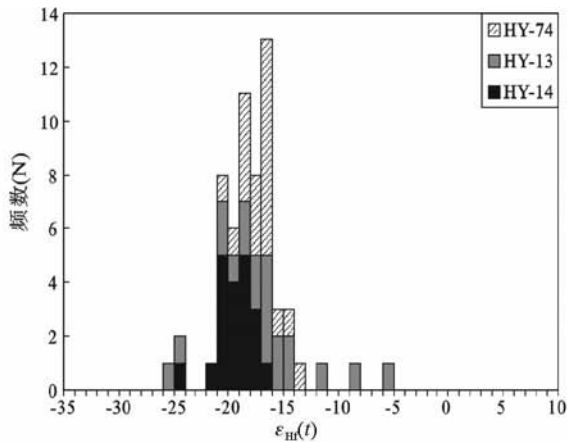


图9 合峪花岗岩基锆石 Hf 同位素组成及合峪花岗岩基 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解

Fig. 9 Zircon Hf isotopic compositions and plots of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. age for the Heyu batholith

具有较低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值(0.281435 ~ 0.282504)和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值(0.00052 ~ 0.00262)。60个测点的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于-25.39 ~ -5.25之间(图9),去除继承锆石和岩浆捕获锆石的数据,主要集中于-11.99 ~ -20.68之间。测得的 t_{DM1} 年龄介于1046 ~ 2518Ma之间,主要集中于1046 ~ 1818Ma,其中继承锆石 HY14-01、HY14-06、HY14-15、HY-73-08 和 HY-73-18 的 t_{DM1} 年龄较高,分别为2317Ma、2518Ma、2451Ma、2212Ma 和 1784Ma。由于锆石的 Lu/Hf 比($f_{\text{Lu/Hf}} = -0.97 \sim -0.98$)显著小于大陆地壳,因此二阶段模式年龄更能真实反映其源区物质从亏损地幔被抽取的地壳平均存留年龄。 t_{DM2} 年龄介于1301 ~ 2846Ma之间,主要集中于1712 ~ 2054Ma,继承锆石 HY14-01、HY14-06、HY14-15、HY-73-08 和 HY-73-18 的 t_{DM2} 年龄较高,与新生岩浆锆石有明显差别,分别为2768Ma、2840Ma、2846Ma、2638Ma 和 2092Ma。图9中,样品的原位 Hf 同位素分析数据点均投影于球粒陨石 Hf 同位素演化线之下,低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和古老的 Hf 模式年龄表明,合峪花岗岩基主要来源于地壳物质。

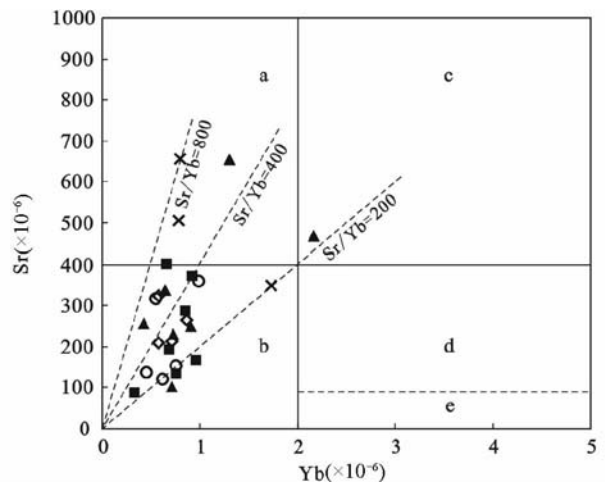


图10 花岗岩 Sr-Yb 分类图(据张旗等,2006)

a-埃达克岩;b-低 Sr 低 Y 型花岗岩;c-高 Sr 高 Y 型花岗岩;d-低 Sr 高 Y 型花岗岩;e-极低 Sr 高 Y 型花岗岩. 样品符号同图4

Fig. 10 The classification of granitoids on the basis of Sr and Yb contents (after Zhang *et al.*, 2006)

a-adakite;b-low Sr and low Y type granitoid;c-high Sr and high Y granitoid;d-low Sr and high Y granitoid;e-extremely low Sr and high Y granitoid. symbol is as Fig. 4

7 讨论

7.1 岩石成因

合峪花岗岩基的 ACNK ($\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 分子比) = 0.94 ~ 1.09, 均 < 1.1, 具有 I 型花岗岩的特征。实验研究表明, P_2O_5 在弱过铝质和强过铝质岩浆中随 SiO_2 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; 李献华等,2007)。在 P_2O_5 随 SiO_2 变化的图解(图4)上,数据点总体沿 I 型演化趋势分布,即 P_2O_5 与 SiO_2 含量呈负相关关系。表明合峪花岗岩为高钾钙碱性的 I 型花岗岩。

根据微量元素、稀土元素的分析,合峪花岗岩基岩石的 Y 和 Yb 含量较低, Sr 含量平均 290×10^{-6} , 较埃达克质岩 ($\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$) 偏低,在 Sr-Yb 图中(图10),样品点大部

分投影于张旗等(2006)归纳出的低 Sr 低 Y 花岗岩区域。合峪花岗岩基具有低的 HREE、Y、Yb 的含量,表明源区有石榴石存在(Xiong *et al.*, 2005)。在 REE 图中(图7),HREE 具平坦的分布形式, $\text{Ho}_N \approx \text{Yb}_N$,因为角闪岩更加富集 MREE(葛小月等,2002; 吴福元等,2002),暗示角闪石也是重要的残留相。岩石较埃达克质岩石贫 Al 和 Sr,有弱负 Eu 异常,说明岩浆发生过的斜长石分离结晶作用,使 Sr 含量变化较大($102 \times 10^{-6} \sim 848 \times 10^{-6}$)。

合峪花岗岩基与美国东部新英格兰 Bronson 山奥陶纪的低 Sr 长英质片麻岩(原岩主要为花岗闪长岩和英云闪长岩)

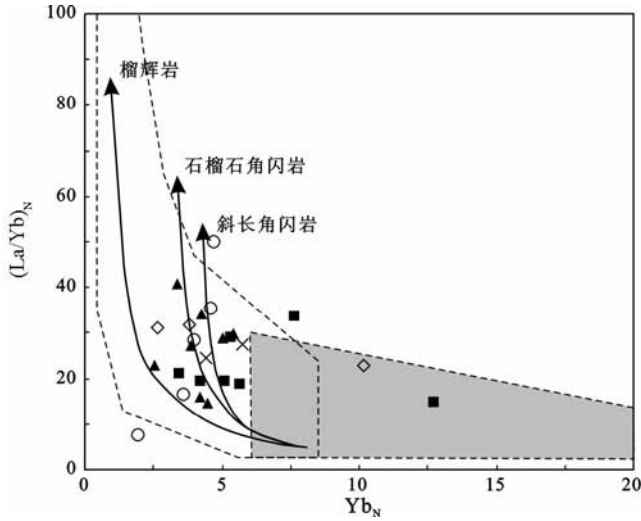


图 11 合峪花岗岩基 $(La/Yb)_N$ - Yb_N 及 Sr/Y - Y 图解 (据 Defant and Drummond *et al.*, 1990)

样品符号同图 4

Fig. 11 $(La/Yb)_N$ - Yb_N diagram Sr/Y - Y diagram for the Heyu batholith (after Defant and Drummond *et al.*, 1990)

Symbol is as Fig. 4

(Hollocher *et al.*, 2002) 及李承东等(2004) 报道的冀北花岗岩的地球化学特征类似。它们均具为高钾钙碱性岩, 贫 Al_2O_3 , 富 K、Na, 轻稀土富集, 重稀土亏损, 低 Sr、低 Y 和 Yb, 且均有明显或不明显的 Eu 负异常。但 Bronson 山的低 Sr 花岗岩及冀北低 Sr 低 Y 花岗岩的 Y 和 Yb 含量及 Eu 负异常略高于合峪花岗岩基。模拟计算表明, Bronson 山的低 Sr 花岗岩可能是镁铁质下地壳部分熔融形成的, 留下的残余相由斜长石-辉石-角闪石组成, 无榴辉岩和石榴石, 推算的压力 < 10 kbar (Hollocher *et al.*, 2002)。李承东等(2004) 根据冀北花岗岩中 Y、Yb 含量低, 相当于埃达克质岩, 但 Sr 较埃达克质岩低的地球化学特征, 推测冀北花岗岩可能是含斜长石-角闪石-石榴石-辉石的高压麻粒岩在较高的压力下部分熔融形成的。

合峪花岗岩基 Y、Yb 含量较以上两个岩体更低, 在 $(La/Yb)_N$ - Yb_N 图中 (图 11), 合峪花岗岩基的投点大部分位于石榴石角闪岩和斜长角闪岩部分熔融演化线附近, 仍然处于典型埃达克质岩分布区内 (Xiong *et al.*, 2005); 在 Sr/Y - Y 的熔融曲线图中 (图 11), 样品投点大多数落在榴辉岩和斜长角闪岩演化线之间, 说明合峪花岗岩基仍与石榴石处于平衡, 也具有深源的特点, 形成于加厚地壳的底部, 推测残留相可能由斜长石、辉石、角闪石、石榴石组成。根据 Eu 负异常较弱, Y、Yb 含量非常低, 推测残留相主要以石榴石、角闪石、辉石为主, 但下地壳 H_2O 含量低, 脱水熔融条件下斜长石可以稳定在较高压力下, 斜长石也有少量残留。推算合峪花岗岩岩浆部分熔融压力约为 1 GPa, 压力下限与埃达克岩一致, 形成深度可能 > 40 km, 在 40 ~ 50 km 范围, 为中等压力下形成。

Hildreth (1991) 曾利用 Rb/Y - Nb/Y 图解来判明岩石物

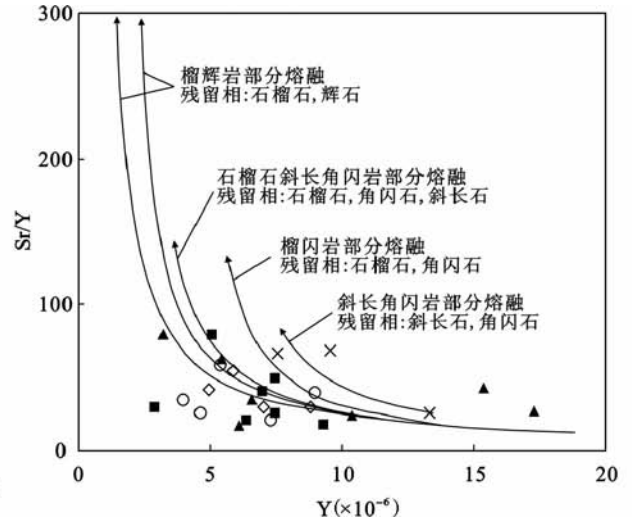


图 12 合峪花岗岩基的 Nb/Y - Rb/Y 图解 (据 Hildreth, 1991)

Fig. 12 Nb/Y - Rb/Y diagram of Heyu batholith (after Hildreth, 1991)

质来源或受混染程度。据他的研究, Rb/Nb 比值有从地幔岩石向上地壳岩石增高的趋势: 平均洋脊玄武岩 (N-MORB) 的 Rb/Nb 比值为 0.36, 平均下地壳的 Rb/Nb 比值为 0.88, 平均上地壳的 Rb/Nb 比值为 4.5 (图 12)。合峪花岗岩基 Rb/Y 和 Nb/Y 值变化范围很大 ($Rb/Y = 1.93 \sim 33.96$, $Nb/Y = 2.71 \sim 8.63$), 其投影点在图中样品全落入地壳演化区域 (图 12)。因此, 合峪花岗岩基形成时的地壳厚度虽然小于典型的我国东部埃达克岩形成的地壳厚度, 但也属于加厚下地壳产生的花岗岩, 为基性下地壳麻粒岩相部分熔融形成。

7.2 合峪花岗岩基的成岩过程

合峪花岗岩基经历了六次侵位形成,除第五、六单元为规模较小的岩脉外,前四单元侵入岩规模较大。根据本文所测多个单元的年龄,由第二单元至第六单元年龄由老到新。其主要矿物成分结构也显示了相似性和递变规律,即从早到晚斑晶粒度及基质粒度逐渐变细。化学成分上也显示, SiO_2 含量随各单元年龄由老到新,从第二单元向第六单元有大致增加的趋势,显示出环形岩体由外到内的较弱的酸性增加趋势。其它主量元素显示出与 SiO_2 大致的负相关关系,如 Al_2O_3 、 TiO_2 、 P_2O_5 均显示出由第二单元到第六单元依次降低的趋势。作为合峪花岗岩基最老的单元,第二单元具有最高的TFMM及最低的 SiO_2 含量,说明岩浆是由较大程度的部分熔融产生。深部岩浆房如果有不同性质的岩浆共存,它们共用一个通道上升,如果控制岩浆侵位的构造活动具有继承性,在同样的条件下,偏中性的岩浆由于粘性较低、温度较高将优先侵位,随后才是偏酸性的岩浆(张旗等,2008)。合峪花岗岩基呈环状分布,内部单元较外部单元偏酸性可能与岩浆的黏性有关。

按照目前的实验模拟和理论计算的结果(Pitcher, 1997; Petford *et al.*, 2000; Glazner *et al.*, 2004),单个侵入体从岩浆形成到锆石 U-Pb 同位素体系封闭时间不超过 1Ma。源区的不均一性、地壳部分熔融程度的差异(耐熔矿物进入熔体的程度不同,熔体成分也就不同)、同化混染、可能发生的岩浆混合(外来岩浆的注入)及岩浆结晶分异等都会使岩石成分发生变化(王涛,2000;罗照华等,2002)。根据林强等(1999)对于地壳岩石失水熔融的实验研究,随着部分熔融程度的增加,熔体体系成分由基性向酸性,由富钾向富钠,由强碱性向碱性、亚碱性演化;而熔融压力的增大使熔体富钠和铝,差应力使熔体富硅,熔融时间越长使熔体越富集硅、越贫碱。以上这些条件的改变,均能影响熔体成分的改变。此外,吴福元(1993)认为熔体成分不仅受温度、压力控制,而且受周围矿物相的制约,也就是说熔体的成分也直接受控于矿物的边界条件,因此块状岩石的熔融作用是在一个整体不平衡而局部平衡的局部体系中进行的,故其熔融成分的变化较为复杂。合峪花岗岩基为多期次侵位,各单元间有一定的年龄间隔说明这些单元不是同批岩浆结晶形成的,其成分变化可能是从源区上升的不同批次岩浆沿同一岩浆通道先后侵入就位,部分熔融程度、温压条件及矿物边界条件的不同造成其地球化学特征的规律性变化,这些变化并非岩浆分异结晶产物所致。

合峪花岗岩基各单元间的差别还表现为岩石结构的变化,从第一单元到第六单元结构依次为大斑多斑的似斑状结构、含斑结构、中粒结构、细粒结构等。斑晶的晶出往往是在低于液相线温度,即过冷状态下结晶。Swanson(1977)、Fenn(1977)、Dowty(1980)等对花岗质熔体中矿物的结晶、生长进行了大量的实验岩石学工作。Swanson(1977)利用合成花岗

闪长岩 + 6.5% H_2O 的实验,在熔体温度较高时,其过冷度也较高,钾长石的成核密度与斜长石成核密度相仿,但钾长石的生长速度远大于斜长石的生长速度,这与合峪花岗岩基中出现钾长石斑晶,而不是斜长石斑晶的特征是一致的。随着温度的降低,约 600℃ 时,过冷度 $\Delta T \approx 350^\circ\text{C}$,即花岗质岩浆在共结点温度时,钾长石、斜长石、石英生长速度相近,但成核密度大,因此花岗岩基质中的钾长石、斜长石和石英结晶均在岩浆演化的较晚期结晶成较细的颗粒。岩体的第一、二单元常见中粗粒和似斑状结构,应为中深成侵位,因为中深成相多为较大侵入体,侵位较深,冷却速度慢(常丽华等,2009)。浅成相多为岩株、岩脉,由于侵位浅,冷却速度快,常见细粒结构、细斑状结构(常丽华等,2009),与合峪花岗岩基呈岩株及岩脉状产出的三到六单元特征相似。

以上特征表明,由第二单元至第六单元岩浆侵位深度从早到晚逐渐变浅。第二单元熔融的岩浆侵位在深部,由于具有高的温度而不断同化其上部地壳物质,进而依次形成其它单元。第一单元虽然是合峪花岗岩基中较晚形成的,但它的地球化学特征大多介于其它单元之间。由于其多呈粗粒含巨斑,显示其深层侵位的缓慢冷却过程,与其它单元不一致的成分变化,可能归因于源区成分或部分熔融程度的不同,应为更深部岩浆房中岩浆沿岩体外侧向上侵位形成,侵位深度较第二单元更深,所以呈巨斑粗粒的结构。

7.3 物质来源

由成因分析推测,合峪花岗岩基的源区主要为华北陆块南缘的中-下地壳岩石。前人曾根据合峪花岗岩基的稀土配分形式与太华群及熊耳群一致,推断合峪花岗岩基主要是太华群部分熔融的产物,另有熊耳群的加入(核工业北京地质研究院,1996^①;王志光等,1997;李永峰,2005)。结合合峪花岗岩基同位素特征,Nd 同位素二阶段模式年龄为 1.85 ~ 2.27Ga,锆石 Hf 同位素的二阶段模式年龄为 1.71 ~ 2.05Ga,二者基本吻合。然而,外方山地区结晶基底太华群的同位素年龄大都大于 2.5Ga(Kröner,1988;Sun *et al.*, 1994;薛良伟,1995;周汉文等,1998),明显大于本区花岗岩 Nd、Hf 二阶段模式年龄,熊耳群的形成时代是 1.80 ~ 1.75Ga 之间(Zhao *et al.*, 2004),在合峪花岗岩基 Nd、Hf 二阶段模式年龄跨度范围内,但大于 Nd、Hf 二阶段模式年龄最小值。根据太华群中岩浆锆石的 Hf 同位素(Diwu *et al.*, 2007),郭波等(2009)计算得到太华群锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t = 134\text{Ma})$ 值为 -40 左右,明显比本文所测合峪花岗岩基的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值小,说明太华群不可能单独作为合峪岩体的源区。熊耳群的 Nd 同位素研究表明(张本仁等,2002),合峪岩体形成年龄的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t = 134\text{Ma})$ 值为 -25 左右(郭波等,2009),明显比合峪岩体的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值小。因此,本区花岗岩源岩如为一定比例的太华群和熊耳群,

① 核工业北京地质研究院(核工业中南三〇八大队). 1996. 德亭金矿田矿化特征与再扩展方向

表5 秦岭造山带构造块体结晶基底好盖层的 Nd、Hf 同位素组成

Table 5 Nd and Hf isotopic composition of the Qinling orogenic belt

构造单元	地层	样品数	年代 (Ma)	$\varepsilon_{Nd}(t)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	Nd 同位素数据来源
华北南缘	太华群	15	2841	2.7 ~ 3.6	6.4 ~ 7.6	薛良伟等(1995)、周汉文等(1998)
	熊耳群	16	1950 ~ 1750	-3.8 ~ -9	-0.7 ~ -8.0	Zhao <i>et al.</i> (2002)
北秦岭	秦岭群	35	1987	4.6 ~ 11.3	9.0 ~ 18.0	张宗清等(1994)
南秦岭	陡岭群	11	1876	1.1 ~ 5.7	4.3 ~ 10.5	沈浩等(1997)、张宏飞等(1997)
	佛坪群	2	1751	2.6 ~ 4.9	6.3 ~ 9.4	张宏飞等(1997)
	崆岭群	10	2740	0.59 ~ 0.85	3.6 ~ 4.0	凌文黎等(1998)
扬子地块	张八岭群	4	1450	5.0 ~ 6.1	9.5 ~ 11.0	李曙光等(1994)
	后河群	4	2400	-0.3 ~ -2.8	-0.9 ~ 2.4	
	西乡群	7	1668	6.6 ~ 8.8	11.7 ~ 14.6	凌文黎(1996)
		3	1451	1.8 ~ 5.0	5.2 ~ 9.5	

$\varepsilon_{Hf}(t)$ 按照公式 $\varepsilon_{Hf}(t) = 1.34\varepsilon_{Nd}(t) + 2.82$ (Vervoort *et al.*, 1999) 计算得到

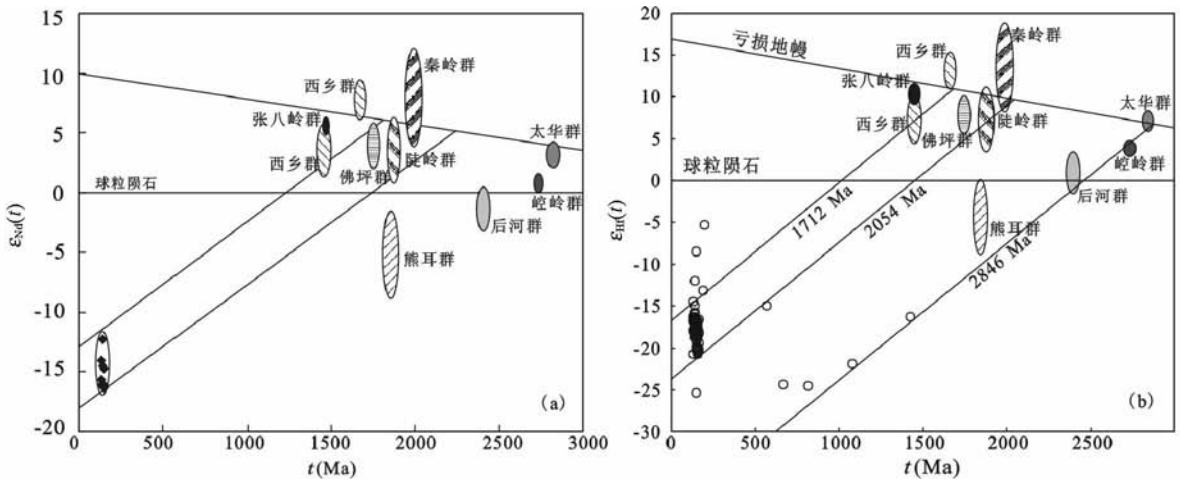


图13 秦岭造山带构造块体结晶基底和盖层的 Nd、Hf 同位素组成

Fig. 13 Nd and Hf isotopic composition of the Qinling orogenic belt

那么应有更年轻的地壳物质混入。

表5为秦岭造山带构造块体结晶基底、盖层的 Nd、Hf 同位素组成。与合峪花岗岩基 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 演化趋势对比显示(图13a), 合峪花岗岩基的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值演化趋势与华北陆块南缘结晶基底太华群及熊耳群的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值相差较大, 而与南秦岭及扬子地块具有较大的亲缘性。因为缺少对秦岭造山带各构造块体结晶基底 Hf 同位素的研究, 本文利用 Vervoort *et al.* (1999) 的地壳 Lu-Hf 和 Sm-Nd 同位素系统相关公式 ($\varepsilon_{Hf}(t) = 1.34\varepsilon_{Nd}(t) + 2.82$) 计算出的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值, 与合峪花岗岩基的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 对比发现(图13b), 二者演化范围与 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值对比结果相似, 也说明合峪花岗岩基的源岩可能包括南秦岭及扬子地块结晶基底。另外, 合峪花岗岩基的继承锆石 Hf 同位素显示出与熊耳群及太华群一致的演化趋势(图13b), 说明合峪花岗岩基不是单一源区, 应包括南秦岭和扬子地块结晶基底, 还混有部分熊耳群及太华群物质。复杂源区的岩浆不同批次侵位可以造成岩体成分变化 (Coleman *et al.*, 2004; 吴福元等, 2007), 这也是导致合峪花岗岩基各单元成分变化的重要因素。

从 Hf 同位素的结果看, 在 144Ma 左右, 得到了一个测点 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值较高 ($\varepsilon_{Hf}(t) = -5.25$), 可能代表下地壳源区有少量地幔物质加入。但幔源基性岩浆只有在发生充分的演化之后, 才能显著地缩小它与酸性岩浆之间巨大的温差、粘度差和密度差, 从而产生有效的混合作用; 而相对“原始”的幔源基性岩浆则很难与壳源熔体发生大规模的混合作用 (Neves and Vauchez, 1995)。因此, 源岩中混入的幔源岩浆为长期富集的岩石圈地幔物质。合峪花岗岩基以西的栾川赤土店地区发育数条侵入于新元古宙栾川群南泥湖组地层中的北西-北西西走向的辉长岩, 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 147.5Ma (包志伟等, 2009), 与合峪花岗岩基第二单元属同期岩浆岩浆事件, 可能为幔源岩浆结晶分异后的基性端元。

此外, 合峪花岗岩基中的样品中 7 个继承锆石年龄 569 ~ 1362Ma, 表明源区物质中含有中-新元古代岩浆岩或火山岩, 其中新元古代继承锆石可能与扬子陆块新元古代强烈的构造运动有关, 为扬子北缘中-新元古代火山岩和侵入岩类。

7.4 构造环境

张国伟等(1996)认为秦岭全面的陆陆碰撞闭合发生在中生代初期,即 245 ~ 235Ma,碰撞阶段早期发生陆内俯冲(石铨曾等,2004),岩石圈强烈挤压缩短增厚,在华北陆块南缘形成自北而南逆冲推覆的洛南-栾川逆冲推覆构造系(张国伟等,2001),扬子陆块携同南秦岭逐步向华北陆块南缘之下俯冲,直至中侏罗世晚期,两者的全面拼合过程才完成(张国伟等,2001)。至中侏罗纪-早白垩纪(约 163 ~ 136Ma),区域构造体制发生转换(任纪舜,1991;赵越等,1994),碰撞后强烈增厚的地壳开始趋于伸展减薄。岩石圈减薄可能开始于 145Ma,130 ~ 110Ma 是快速减薄的时期(毛景文等,2003;吴福元和孙德有,1999;吴福元等,2000)。合峪花岗岩基的形成年龄正对应于中侏罗纪至早白垩纪由挤压增厚向伸展减薄转换的阶段。岩石圈减薄可以使地壳岩石因减压而熔融(Bird,1978;Sylverster,1998),然而没有深部地幔物质或热源的供给,单纯增厚地壳的减压熔融只能形成小规模的岩体,缺少足够的热量不可能形成大规模的岩浆活动(Roberts and Clements,1993;Sylverster,1998)。因此,对于合峪花岗岩基的形成可能有来自深部热源的供给才能促使基性下地壳发生部分熔融。

关于下地壳部分熔融,目前有两种机制:幔源岩浆底侵提供热源使下地壳发生部分熔融(Fan *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2002;路凤香等,2006)或下地壳和岩石圈地幔一起拆沉进入软流圈地幔发生部分熔融(吴福元等,2003;邓晋福和莫宣学,1994)。由于幔源岩浆底侵作用是岩浆从地壳底部直接向上运移的,不与地幔橄榄岩发生交代,不会引起 MgO 含量和 $Mg^{\#}$ 值的升高(许继峰和王强,2003)。而拆沉的榴辉岩板片进入软流圈地幔后被加热,经部分熔融作用形成花岗质岩浆,由于岩浆在上升途中必然要经过因上涌而覆盖在拆沉榴辉岩板片之上的地幔软流圈并与地幔橄榄岩发生混合,会导致其 MgO 含量和 $Mg^{\#}$ 值的增高(许继峰和王强,2003)。合峪花岗岩基具有较低的 MgO 和 $Mg^{\#}$ 值(25.0 ~ 38.9),在 MgO-SiO₂ 图解(图 14)中,合峪花岗岩基的成分点均落入增厚下地壳熔融形成的埃达克质岩和变玄武岩或榴辉岩熔体区域内,与拆沉下地壳熔融形成的埃达克质岩差别较大。此外,负的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 和 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 说明岩浆不存在幔源岩浆的大量参与。因此,合峪花岗岩基是幔源岩浆底侵下地壳部分熔融形成的。底侵地幔可能不仅仅有热的贡献,还有少量的物质贡献。

中侏罗纪至中白垩纪,华北陆块南缘发育大量中酸性侵入岩,可分为 3 个主要时间段: 156Ma(毛景文等,2005)、140 ~ 125Ma(毛景文等,2005;周红升等,2008;郭波等,2009)、120 ~ 100Ma(叶会寿等,2006;周红升等,2008)。早期 156Ma 左右产出的中酸性侵入岩多具有高 Sr、Ba 含量,属于埃达克质岩,代表地壳已经增厚(张旗等,2008),中国东部地壳增厚范围可能在此期间最大。140 ~ 125Ma 为中酸性岩浆最发育

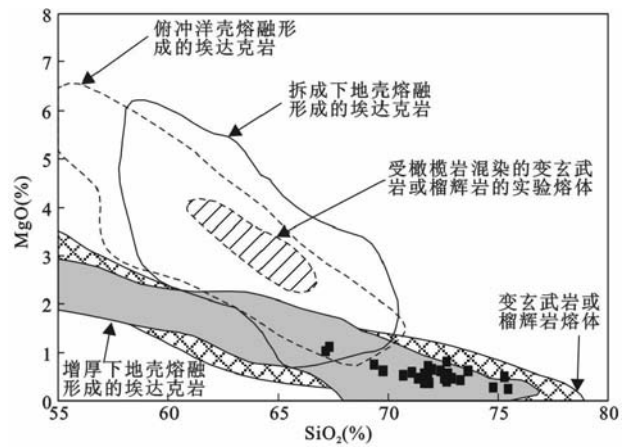


图 14 合峪花岗岩基 MgO-SiO₂ 图解(据 Wang *et al.*, 2006, 2007)

Fig. 14 MgO vs. SiO₂ diagram of Heyu batholith (after Wang *et al.*, 2006, 2007)

的时期,这些中酸性岩体主要为埃达克质岩体,个别岩体具有较典型埃达克质岩低 Sr、Y 含量,代表华北陆块南缘地壳由加压增厚向伸展减薄转换。120 ~ 100Ma 的中酸性侵入岩主要为 A 型花岗岩,标志着增厚地壳开始全面减薄。综上所述,华北陆块南缘岩石圈厚度约于 156Ma 时达到最大(毛景文等,2005;张旗等 2008),其后开始趋于减薄。

板块的碰撞是一个深部会聚、上部陆-陆收敛的复杂物理化学过程,往往需要持续 50 ~ 70Ma,甚至可以到 100Ma 左右(Royden, 1993;张国伟等,1996)。扬子陆块北缘和南秦岭自古生代早期就开始向华北陆块南缘之下俯冲,增厚的岩石圈可能因为太平洋板块俯冲或其他动力学机制触发中国东部构造体制大转折,导致华北陆块南部-秦岭造山带岩石圈在上涌软流圈的热传导“烘烤”使岩石圈最底部物质发生软化,逐层剥蚀上覆岩石圈。当直接与下地壳接触时,幔源岩浆的热烘烤作用,使下地壳熔融岩浆上升形成中酸性侵入岩。特别是沿栾川断裂等深大断裂软流圈上涌最强烈,相应热侵蚀作用也最为活跃,从而造成岩石圈的减薄(Xu *et al.*, 2008;Zheng *et al.*, 2006, 2007)。在 144Ma 左右,底侵作用已经开始($\varepsilon_{Hf}(t=144Ma) = -5.25$,有地幔物质加入)。而合峪花岗岩基正是形成于增厚地壳已减薄趋于正常地壳厚度时。

8 结论

(1) 合峪花岗岩基形成时间是 148.2Ma 至 135.3Ma,岩性为黑云母二长花岗岩,属富硅的准铝质-弱过铝质高钾钙碱性系列,其 $Mg^{\#}$ 较低,含碱量较高,具有弱的负 Eu 异常,轻稀土富集,重稀土亏损,属于低 Sr 低 Yb 花岗岩,是加厚下地壳熔融的产物,形成深度 > 40km,可能在 40 ~ 50km 范围,略

小于中国东部典型的 C 型埃达克质岩。

(2) 合峪花岗岩基为不同批次岩浆多期次侵位形成,其地球化学特征的变化主要与部分熔融程度、温压条件的不同有关,此外复杂源区组成也是造成地球化学特征变化的重要因素。岩体侵位深度由第二单元至第六单元从早到晚逐渐变浅,分布在岩体最外围的大斑中粗粒黑云母二长花岗岩单元为更深处岩浆房中岩浆沿岩体外侧向上侵位形成,侵位深度较第二单元更深,所以呈巨斑粗粒的结构。

(3) 同位素数据显示合峪花岗岩源岩主要包括南秦岭及扬子地块结晶基底,还混有少量熊耳群和太华群物质,为南秦岭及扬子地块结晶基底俯冲到华北陆块下,幔源岩浆对上覆岩石圈进行侵蚀,提供热源使下地壳熔融形成。

致谢 徐勇航和陈伟博士在野外样品采集过程中给予帮助,成文后承蒙包志伟博士提出宝贵意见,在此一并致以诚挚的谢意。

References

- Bao ZW, Li CJ and Qi JP. 2009. SHRIMP zircon U-Pb age of the gabbro dyke in the Luanchuan Pb-Zn-Ag orefield, East Qinling orogen and its constraint on mineralization time. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (11): 2951–2956 (in Chinese with English abstract)
- Belousova EA, Griffin WL, O'Reilly SY and Fisher NI. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143 (5): 602–622
- Bird P. 1978. Initiation of intracontinental subduction in the Himalayas. *J. Geophys. Res.*, 83(B10): 4975–4987
- Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and evolution of the mantle-crust system. *Earth Planetary Science Letters*, 148: 243–258
- Chang LH, Cao L and Gao FH. 2009. *Igneous Identification Guide*. Beijing: Geological Publishing House, 12 (in Chinese)
- Chappell BW. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46 (3): 535–551
- Chen YJ, Guo GJ and Li X. 1998. Metallogenic geodynamic background of Mesozoic gold deposits in granite-greenstone terrains of North China Craton. *Science in China (Series D)*, 41(2): 113–120
- 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(Suppl.): 82–94
- Chen YJ, Priajno F, Lai Y and Li C. 2004. Metallogenic time and tectonic setting of the Jiadong gold province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 20 (4): 907–922 (in Chinese with English abstract)
- Chu NC, Taylor RN, Chavagnac V, Nesbitt RW, Boella RM, Milton JA, German CR, Bayon G and Burton K. 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1567–1574
- Coleman DS, Gray W and Glazner AF. 2004. Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: Geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne intrusive suite, California. *Geology*, 32(5): 433–436
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some moder arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347 (18): 662–665
- Deng JF and Mo XX. 1994. Lithosphere root/derooting and activation of the east China continent. *Geoscience*, 8(3): 349–356 (in Chinese with English abstract)
- Diwu CR, Sun Y, Lin CL, Liu XM and Wang HL. 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of Yiyang TTG gneisses from Henan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (2): 253–262
- Dowty E. 1980. Crystal growth and nucleation theory and the numerical simulation of igneous crystallization. In: Hargraves RB (ed.). *Physics of Magmatic Processes*. New Jersey: Princeton University Press, 419–485
- Fan WM, Guo F, Wang YJ, Lin G and Zhang M. 2001. Post-orogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in eastern China. *Physics and Chemistry of Earth (A)*, 26: 733–746.
- Fenn PM. 1977. The nucleation and growth of alkali feldspars from hydrous melts. *Can. Miner.*, 15: 135–161
- 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)
- Glazner AF, Bartley JM, Coleman DS, Gray W and Taylor RZ. 2004. Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chambers? *GSA Today*, 14(4/5): 4–11
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, Achterbergh EV, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICPMS analyses of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147
- Guo B, Zhu LM, Li B, Gong JH and Wang JQ. 2009. Zircon U-Pb age and Hf isotope composition of the Huashan and Heyu granite plutons at the southern margin of North China Craton: Implications for geodynamic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 265–281 (in Chinese with English abstract)
- Guo F, Fan WM, Wang YJ and Lin G. 2001. Late Mesozoic mafic intrusive complexes in North China Block: Constraints on the nature of subcontinental lithospheric mantle. *Physics and Chemistry of the Earth and Geodesy*, 26(9–10): 759–771
- Han YG, Zhang SH, Franco P and Zhang YH. 2007. Evolution of the Mesozoic granite in the Xiong'er-shan-Waifangshan region, western Henan Province, China, and its tectonic implication. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 253–265
- Hildreth W, Halliday AN and Chirstiansen RL. 1991. Isotopic and chemical evidence concerning the genesis and contamination of basaltic and rhyolitic magma beneath the Yellowstone plateau volcanic field. *Journal of Petrology*, 32(1): 63–138
- Hollocher K, Bull J and Robinson P. 2002. Geochemistry of the metamorphosed Ordovician Taconian magmatic arc, Bronson Hill anticlinorium, western New England. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27(1–3): 5–45
- Hoskin PWO and Black LP. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423–439
- 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(1–2): 47–69
- Kröner A, Compston W, Zhang GW, Guo AI and Todt W. 1988. Age and tectonic setting of Late Archaean greenstone-gneisses terrain in Henan Province, China, as revealed by single-grain zircon dating. *Geology*, 16(3): 211–215
- Li CD, Zhang Q, Miao LC and Meng XF. 2004. Mesozoic high-Sr, low-

- Y and low-Sr, low-Y types granitoids in the northern Hebei Province: Geochemistry and petrogenesis and its relation to mineralization of gold deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 269 – 284 (in Chinese with English abstract)
- Li SG, Liu DL, Chen YZ and Zhang ZQ. 1994. Nd isotopic compositions of continental crust in the northern margin of Yangtze block and its tectonic implications. *Geochimica*, 23 (Suppl.): 10 – 17 (in Chinese with English abstract)
- Li XH. 1996. A discussion on the model and isochron ages of Sm-Nd isotopic systematic: Suitability and limitation. *Scientia Geologica Sinica*, 31(1): 97 – 104 (in Chinese with English abstract)
- 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 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 YF. 2005. The temporal-spatial evolution of Mesozoic granitoids in Xiong'ershan area and their relationship to molybdenum-gold mineralization. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geoscience (in Chinese with English summary)
- 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)
- Lin Q, Ge WC, Ma R, Sun DY, Wu FY and Yin CX. 1999. Experimental research on water loss melting of crustal rocks. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29(3): 209 – 214 (in Chinese with English abstract)
- Ling WL. 1996. Isotopic geochronology and crustal growth of Proterozoic basement along the northern margin of Yangtze Craton; Houhe Group and Xixiang Group. *Earth Science*, 21(5): 491 – 494 (in Chinese with English abstract)
- Ling WL, Gao S, Zheng HF, Zhou L and Zhao ZB. 1998. An Sm-Nd isotopic study of the Archean Kongling complex in the Huangling area of the Yangtze craton. *Chinese Sci. Bull.*, 43(14): 86 – 89 (in Chinese)
- Lu FX, Zheng JP, Shao JA, Zhang RS, Chen RS, Chen MH and Yu CM. 2006. Asthenospheric upwelling and lithospheric thinning in Late Cretaceous-Cenozoic in eastern North China. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 86 – 92 (in Chinese with English abstract)
- Lu XX, Yu ZP, Feng YL, Wang YT, Ma WF and Cui HF. 2002. Mineralization and tectonic setting of deep-hypabyssal granites in East Qinling Mountain. *Mineral Deposits*, 21(2): 169 – 178 (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
- Luo MJ, Li SM and Lu XX. 2000. The Main Mineral Mineralization and Metallogenic Series, Henan Province. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 335 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Ma D, Zhuang WM *et al.* 2002. Magmatism and regional petrology. In: Xiao QH, Deng JF and Ma DQ *et al.* (eds.). *The Ways of Investigation on Granitoids*. Beijing: Geological Publishing House, 212 – 256 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Zhang ZH, YU JJ, Wang YT and Niu BG. 2003. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas: Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits. *Science in China (Series D)*, 46(8): 838 – 851
- Mao JW, Xie GQ, Zhang ZH, Li XF, Wang YT, Zhang CQ and Li YF. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169 – 188 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Hu RZ and Chen YC. 2006. Large-scale Ore-forming Events and Large Ore Dense Areas. Vol. 1. Beijing: Geological Publishing House, 533 (in Chinese with English abstract)
- McLennan SM and Hemming S. 1992. Samarium/neodymium elemental and isotopic systematics in sedimentary rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56(3): 887 – 898
- Neves SP and Vauchez A. 1995. Successive mixing and mingling of magmas in a plutonic complex of Northeast Brazil. *Lithos*, 34(4): 275 – 299
- Petford N, Cruden AR, McCaffrey KJW and Vigneresse JL. 2000. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. *Nature*, 408: 669 – 673
- Pitcher WS. 1997. *The Nature and Origin of Granite*. 2nd Edition. London: Chapman & Hall
- Qi L, Hu J and Gregoire DC. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 51(3): 507 – 513
- Ren JS. 1991. The basic characteristics of China continental lithosphere structure. *Regional Geology of China*, 4: 289 – 293 (in Chinese with English abstract)
- Roberts MP and Clements JD. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids. *Geology*, 21(9): 825 – 828
- Royden LH. 1993. The tectonic expression of slab pull at continental convergent boundaries. *Tectonics*, 12(2): 303 – 325
- Shang RJ and Yan Z. 1988. *Qinling-Dabashan Granite*. Wuhan: China University of Geoscience Publishing House, 1 – 224 (in Chinese)
- Shen H, Zhang ZQ and Liu DY. 1997. Sm-Nd, Rb-Sr, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of the Douling metamorphic complex from eastern Qinling Orogenic Belt. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(3): 248 – 254 (in Chinese with English abstract)
- Shi QZ, Wei XD, Li ML and Pang JQ. 2004. Nappe Structure and Extend Detachment Structure of the Northern Margin of the East Qinling Mountain, Henan Province. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 109 (in Chinese with English abstract)
- Söderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The ^{176}Lu constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3–4): 311 – 324
- 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, Shaanxi Province, China. *Economic Geology*, 92(7–8): 827 – 835
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders SD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Ocean Basins*. Geol. Soc. London. Spec. Pub., 42: 313 – 345
- Sun Y, Yu ZP and Kröner A. 1994. Geochemistry and single zircon geochronology of Archean TTG gneisses in the Taihua high-grade terrain, Lushan area, central China. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 10(3/4): 227 – 2233
- Swanson SE. 1977. Relation of nucleation and crystal-growth rate to development of granitic textures. *American Mineralogist*, 62: 966 – 978
- Syverster PJ. 1998. Post-collisional peraluminous granites. *Lithos*, 45(1–4): 29 – 44
- Vervoort JD, Pachel PJ, Gehrels GE and Nutman AP. 1996. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes. *Nature*, 379: 624 – 627
- Vervoort JD, Pachel PJ, Blichert-Toft J and Albarede F. 1999. Relationships between Lu-Hf and Sm-Nd isotopic systems in the global sedimentary system. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(1–2): 79 – 99
- Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Zhao ZH, Jian P, Xiong XL, Bao ZW, Li CF and Bai ZH. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and

- shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 89(3-4): 424-446
- Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Zhao ZH, Jian P and Zi F. 2007. Partial melting of thickened or delaminated lower crust in the middle of eastern China; Implications for Cu-Au mineralization. *The Journal of Geology*, 115(2): 149-161
- Wang T. 2000. Origin of hybrid granitoids and the implications for continental dynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 161-168 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZG, Cui H and Xu ML. 1997. The Tectonic Evolution and Mineralization in the South Margin of North China Block. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1-296 (in Chinese with English abstract)
- Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and compositional effects in variety of crustal magma types. *Earth Planet. Sci. Lett.* 64(2): 295-304
- Wu FY. 1993. Partly System and the Melting Sequence of the Granite Melting. Changchun: Jilin Scientific and Technology Press (in Chinese with English abstract)
- Wu FY and Sun DY. 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in eastern China. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29(4): 313-318 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Sun DY, Zhang GL and Ren XW. 2000. Deep geodynamics of Yanshan Movement. *Geological Journal of China Universities*, 6(3): 379-388 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Ge WC and Sun DY. 2002. The definition, diacrimination of adakites and their geological role. In: Xiao QH, Deng JF, Ma DQ *et al.* (des.). *The Ways of Investigation on Granitoids*. Beijing: Geological Publishing House, 172-191 (in Chinese with English abstract)
- 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(3-4): 241-273
- Wu FY, Ge WC, Sun DY and Guo CL. 2003. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 51-60 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Lin JQ, Wilde SA, Zhang XO and Yang JH. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1-2): 103-119
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chem. Geol.*, 234(1-2): 105-126
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238 (in Chinese with English abstract)
- Xie LW, Zhang YB, Zhang HH, Sun JF and Wu FY. 2008. Zircon/baddeleyite U-Pb and Lu-Hf isotope and trace element composition simultaneous in situ determination. *Chinese Science Bulletin*, 53(2): 220-228 (in Chinese)
- Xiong XL, Adam J and Green TH. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. *Chemical Geology*, 218(3-4): 339-359
- Xu JF and Wang Q. 2003. Tracing the thickening process of continental crust through studying adakitic rocks: Evidence from volcanic rocks in the north Tibet. *Earth Science Frontiers*, 10: 401-406 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG, Huang XL, Ma JL, Wang YB, Iizuka Y, Xu JF, Wang Q and Wu XY. 2004. Crust-mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China Craton; Constraints from SHIMP zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147(6): 750-767
- Xu YG, Blusztajn J, Ma JL, Suzuki K, Liu JF and Hart SR. 2008. Late Archean to Early Proterozoic lithospheric mantle beneath the western North China craton: Sr-Nd-Os isotopes of peridotite xenoliths from Yangyuan and Fansi. *Lithos*, 102(1-2): 25-42
- Xue LW, Yuan ZL, Zhang YS and Qiang LZ. 1995. The Sm-Nd isotope age of Taihua Group in the Lushan area and their implications. *Geochemica*, 24 (Suppl.): 92-97 (in Chinese with English abstract)
- Yan CH. 2004. The Internal Structure of Pb-Zn-Ag Ore-forming System in the East Qingling Orogenic Belt. Beijing: Geological Publishing House, 1-144 (in Chinese)
- Ye HS, Mao JW, Li YF, Guo BJ, Zhang CQ, Liu WJ, Yan QR and Liu GY. 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*, 70(8): 1078-1087 (in Chinese with English abstract)
- Yu JH, Wang LJ, Wang XL, Qiu JS and Zhao L. 2007. Geochemistry and geochronology of the Fucheng complex in the southeastern Jiangxi Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1441-1456 (in Chinese with English abstract)
- Zhang BR, Gao S and Zhang HF. 2002. Geochemistry of Qinling Orogenic Belt. Beijing: Science Press, 1-187 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Guo AL, Liu FT, Xiao QH and Meng QR. 1996. Three-dimensional architecture and dynamic analysis of the Qinling Orogenic Belt. *Science in China (Series D)*, 26(Suppl): 1-6 (in Chinese)
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC and Xiao QH. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press, 1-87 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Zhang BR, Ling WL, Gao S and Ouyang JP. 1997. Late Proterozoic crustal accretion of South Qingling: Nd isotopic study from granitic rock. *Geochimica*, 26(5): 16-23 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Sun M, Zhou X H, Fan WM, Zhai MG and Yin JF. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China craton: Evidence from major, trace element, and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(2): 241-253
- Zhang Q, Wang Y, Li CD, Wang YL, Jin WJ and Jia XQ. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249-2269 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Xiong XL and Li CD. 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity. Beijing: China Land Press, 107-129 (in Chinese)
- Zhang ZQ, Liu DY and Fu GM. 1994. Isotope Chronology Research of North Qinling. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Zhang ZQ, Zhang GW and Tang SH. 2002. Isotope Chronology of South Qinling. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- 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)
- Zhao TP, Zhou MF, Zhai MG and Xia B. 2002. Paleoproterozoic rift-related volcanism of the Xiong'er Group, North China craton: Implications for the breakup of Columbia. *International Geology Review*, 44(4): 336-351
- Zhao TP, Zhai MG, Xia B, Li HM, Zhang YX and Wan YS. 2004. Study on the zircon SHRIMP ages of the Xiong'er Group volcanic rocks: Constraint on the starting time of covering strata in the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 9(23): 2495-2502

- Zhao Y, Yang ZY and Ma XH. 1994. Geotectonic transition from paleoasian system and paleoethyan system to paleopacific active continental margin in eastern Asia. *Scientia Geologica Sinica*, (2): 105–119 (in Chinese with English abstract)
- Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SY, Yang JS, Li TF, Zhang M, Zhang RY and Liou JG. 2006. Mineral chemistry of peridotites from Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic lithosphere: Constraints on mantle evolution beneath eastern China. *J. Petrol.*, 47(11): 2233–2256
- Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SYO, Yu CM, Zhang HF, Pearson N and Zhang M. 2007. Mechanism and timing of lithospheric modification and replacement beneath the eastern North China Craton: Peridotitic xenoliths from the 100Ma Fuxin basalts and a regional synthesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(21): 5203–5225
- Zhou HS, Ma CQ, Zhang C, Chen L, Zhang JY and She ZB. 2008. Yanshanian aluminous A-type granitoids in the Chunshui of Biyang, south margin of North China Craton: Implications from petrology, geochronology and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 49–64 (in Chinese with English abstract)
- Zhou HW, Zhong ZQ, Ling WL, Zhong GL and Xu XD. 1998. Sm-Nd isochron for the amphibolites within Taihua complex from Xiao Qinling area, western Henan and its geological implications. *Geochimica*, 27(4): 367–372 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XH, Yang JH and Zhang LC. 2002. Metallogensis of super large gold deposits in Jiaodong region and deep processes of subcontinental lithosphere beneath North China Craton in Mesozoic. *Science in China (Series D)*, 46 (Suppl.): 14–25
- 附中文参考文献**
- 包志伟, 李创举, 祁进平. 2009. 东秦岭栾川铅锌银矿田辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及成矿时代. *岩石学报*, 25(11): 2952–2956
- 常丽华, 曹林, 高福红. 2009. 火成岩鉴定手册. 北京: 地质出版社, 12
- 陈衍景, 郭光军, 李欣. 1998. 华北克拉通花岗岩绿岩地体中生代金矿床的成矿地球动力学背景. *中国科学(D辑)*, 28(1): 35–40
- 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: 64–72
- 陈衍景, Priajno F, 赖勇, 李超. 2004. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境. *岩石学报*, 20(4): 907–922
- 邓晋福, 莫宣学. 1994. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”. *现代地质*, 8: 349–356
- 葛小月, 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
- 郭波, 朱赖民, 李彝, 弓虎军, 王建其. 2009. 华北陆块南缘华山和合峪花岗岩岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成与成岩动力学背景. *岩石学报*, 25(2): 265–281
- 李承东, 张旗, 苗来成, 孟宪锋. 2004. 冀北中生代高 Sr 低 Y 和低 Sr 低 Y 型花岗岩: 地球化学、成因及其与成矿作用的关系. *岩石学报*, 20(2): 269–284
- 李曙光, 刘德良, 陈移之, 张宗清. 1994. 扬子陆块北缘地壳的钆同位素组成及其构造意义. *地球化学*, 23(增刊): 10–17
- 李献华. 1996. Sm-Nd 模式年龄和等时线年龄的适用性与局限性. *地质科学*, 31(1): 97–104
- 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. 2005. 豫西熊耳山地区中生代花岗岩类时空演化与钼(金)成矿作用. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学
- 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
- 林强, 葛文春, 马瑞, 孙德有, 吴福元, 尹成孝. 1999. 地壳岩石的失水熔融实验. *长春科技大学学报*, 29(3): 209–214
- 凌文黎. 1996. 扬子克拉通北缘元古宙基底同位素地质年代学和地壳增生历史: 后河群和西乡群. *地球科学*, 21(5): 491–494
- 凌文黎, 高山, 郑海飞, 周炼, 赵祖斌. 1998. 扬子克拉通黄陵地区崆岭杂岩 Sm-Nd 同位素年代学研究. *科学通报*, 43(1): 86–89
- 卢欣祥, 于在平, 冯有利, 王义天, 马维峰, 崔海峰. 2002. 东秦岭深源浅成型花岗岩的成矿作用及地质构造背景. *矿床地质*, 21(2): 169–178
- 路凤香, 郑建平, 邵济安, 张瑞生, 陈美华, 余淳梅. 2006. 华北东部中生代晚期-新生代软流圈上涌与岩石圈减薄. *地质学前沿*, 13(2): 86–92
- 罗铭玖, 黎世美, 卢欣祥. 2000. 河南省主要矿产的成矿作用及矿床成矿系列. 北京: 地质出版社, 1–355
- 罗照华, 马大铨, 庄文民等. 2002. 花岗岩浆作用与区域岩石学. 见: 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨主编. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 212–256
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球化学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示. *中国科学(D辑)*, 33(4): 289–299
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景. *岩石学报*, 21(1): 169–188
- 毛景文, 胡瑞忠, 陈毓川. 2006. 大规模成矿作用与大型矿集区. 上卷. 北京: 地质出版社, 533
- 任纪舜. 1991. 论中国大陆岩石圈构造的基本特征. *中国区域地质*, 4: 289–293
- 尚瑞钧, 严阵. 1988. 秦巴花岗岩. 武汉: 中国地质大学出版社, 1–224
- 沈浩, 张宗清, 刘敦一. 1997. 东秦岭陡岭群变质杂岩 Sm-Nd、Rb-Sr、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄. *地球学报*, 18(3): 248–254
- 石铨曾, 尉向东, 李明立, 庞继群. 2004. 河南省东秦岭山脉北缘的推覆构造及伸展拆离构造. 北京: 地质出版社, 1–109
- 王涛. 2000. 花岗岩混合成因研究及大陆动力学意义. *岩石学报*, 16(2): 161–168
- 王志光, 崔毫, 徐孟罗. 1997. 华北地块南缘地质构造演化与成矿. 北京: 冶金工业出版社, 1–296
- 吴福元. 1993. 花岗岩熔融的局部体系及熔融序列. 长春: 吉林科学技术出版社
- 吴福元, 孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. *长春科技大学学报*, 29(4): 313–318
- 吴福元, 孙德有, 张广良, 任向文. 2000. 论燕山运动的深部地球动力学本质. *高校地质学报*, 6(3): 379–388
- 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. 花岗岩研究思维与

- 方法. 北京: 地质出版社, 172 - 191
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 郭春丽. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. 地学前缘, 10(3): 51 - 60
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217 - 1238
- 谢烈文, 张艳斌, 张辉煌, 孙金凤, 吴福元. 2008. 锆石/斜锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素以及微量元素成分的同时原位测定. 科学通报, 53(2): 220 - 228
- 许继峰, 王强. 2003. Adakite 火成岩对大陆地壳增厚过程的指示: 以青藏北部火山岩为例. 地学前缘, 10(4): 401 - 406
- 薛良伟, 原振雷, 张萌树, 强立志. 1995. 鲁山太华群 Sm-Nd 同位素年龄及其意义. 地球化学, 24(增刊): 92 - 97
- 燕长海. 2004. 东秦岭铅锌银矿成矿系统内部结构. 北京: 地质出版社, 1 - 144
- 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铜矿床 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义. 地质学报, 70(8): 1078 - 1087
- 于津海, 王丽娟, 王孝磊, 邱检生, 赵蕾. 2007. 赣东南富城杂岩体的地球化学和年代学研究. 岩石学报, 23(6): 1441 - 1456
- 张本仁, 高山, 张宏飞. 2002. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1 - 187
- 张国伟, 郭安林, 刘福田, 肖庆辉, 孟庆任. 1996. 秦岭造山带三维结构及其动力学分析. 中国科学(D辑), 26(增刊): 1 - 6
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1 - 87
- 张宏飞, 张本仁, 凌文黎, 高山, 欧阳建平. 1997. 南秦岭新元古代地壳增生事件: 花岗质岩石钨模式年龄同位素示踪. 地球化学, 26(5): 16 - 23
- 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义. 岩石学报, 22(9): 2249 - 2269
- 张旗, 王焰, 熊小林, 李承东. 2008. 埃达克岩和花岗岩: 挑战和机遇. 北京: 中国大地出版社, 107 - 129
- 张正伟, 朱炳权, 常向阳, 强立志, 温明星. 2001. 东秦岭铜矿带成岩成矿背景及时空统一性. 高校地质学报, 7(3): 307 - 315
- 张宗清, 刘敦一, 付国民. 1994. 北秦岭变质地层同位素年代研究. 北京: 地质出版社, 1 - 191
- 张宗清, 张国伟, 唐素寒. 2002. 南秦岭变质地层同位素年代学. 北京: 地质出版社, 1 - 348
- 赵越, 杨振宇, 马醒华. 1994. 东亚大地构造发展的重要转折. 地质科学, (2): 105 - 119
- 周汉文, 钟增球, 凌文黎, 钟国楼, 徐启东. 1998. 豫西小秦岭地区太华杂岩斜长角闪岩 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义. 地球化学, 27(4): 367 - 372
- 周红升, 马昌前, 张超, 陈玲, 张金阳, 余振兵. 2008. 华北克拉通南缘泌阳春水燕山期铝质 A 型花岗岩类: 年代学、地球化学及其启示. 岩石学报, 24(1): 49 - 64
- 周新华, 杨进辉, 张连昌. 2002. 胶东超大型金矿的形成与中生代华北大陆岩石圈深部过程. 中国科学(D辑), 32(增刊): 11 - 20