

doi:10.3799/dqkx.2016.122

东秦岭中生代石瑶沟隐伏花岗岩年代学、 地球化学特征及地质意义

侯红星^{1,2}, 张德会¹, 张荣臻¹

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国人民武装警察部队黄金第二总队, 河北廊坊 065000

摘要:石瑶沟花岗岩是华北陆块南缘东秦岭熊耳山地区近年来发现的首个埋藏在地下,与钼矿化有关的隐伏花岗岩体。主要岩性为中—细粒黑云母二长花岗岩和斑状花岗岩,LA-ICP-MS锆石U-Pb定年结果显示其主体形成时期为 140.46 ± 0.59 Ma~ 136.53 ± 0.44 Ma,为早白垩世岩浆活动产物。石瑶沟花岗岩 $\text{SiO}_2 = 70.27\% \sim 73.22\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.71\% \sim 14.96\%$, $\text{MgO} = 0.23\% \sim 0.54\%$,全碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量(质量百分比)变化范围为6.43%~11.78%,显示高硅、富碱特征。里特曼指数(δ)变化范围为2.11~3.02,AR介于1.48~5.73之间,为钙碱性;ACNK值=0.95~1.01,属准铝质—过铝质I型花岗岩。岩体稀土总量($\sum \text{REE}$)变化于 $147 \times 10^{-6} \sim 322 \times 10^{-6}$,LREE/HREE比值变化于15.2~25.2, $\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}} = 19.1 \sim 50.5 \times 10^{-6}$,轻重稀土分馏程度较高,在球粒陨石标准化分配模式图上总体表现为轻稀土富集、左陡右平的右倾斜型。岩体Sr含量变化较大($133 \times 10^{-6} \sim 759 \times 10^{-6}$,平均 371×10^{-6}),Y、Yb含量($\text{Y} = 10.02 \times 10^{-6} \sim 18.80 \times 10^{-6}$,平均 12.57×10^{-6} ; $\text{Yb} = 1.16 \times 10^{-6} \sim 2.02 \times 10^{-6}$,平均 1.40×10^{-6})和Sr/Y比值(12.77~61.66,平均30.44)低,具中等—弱的负Eu异常($\delta\text{Eu} = 0.53 \sim 0.71$,平均0.62),反映岩浆发生过长石分离结晶作用。石瑶沟花岗岩 $I_{\text{sr}} = 0.70744 \sim 0.71384$, $\epsilon_{\text{sr}}(t) = 44.1 \sim 134.9$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -12.96 \sim -13.46$,其 $t_{\text{DM2}} = 2.00 \sim 2.01$ Ga,显示其与附近中生代合峪花岗岩基具同源性,岩浆源区包括南秦岭地块、扬子陆块以及部分太华群、熊耳群物质。综合石瑶沟隐伏花岗岩特征和区域地质演化,可得出结论:东秦岭地区在侏罗纪前的陆内俯冲体制下,南秦岭地块及扬子基底向华北陆块下俯冲碰撞使地壳加厚,侏罗纪—白垩纪之交的挤压向伸展转换过程中形成的减压增温环境,使该区中一下地壳岩石发生部分熔融,最终在早白垩世形成石瑶沟花岗岩。

关键词: 华北陆块南缘; 东秦岭; 石瑶沟隐伏花岗岩; 锆石U-Pb年龄; 地球化学; 钼矿。

中图分类号: P597; P581

文章编号: 1000-2383(2016)10-1665-18

收稿日期: 2016-01-14

The Chronology, Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Mesozoic Shiyaogou Hidden Granite at the East Qinling

Hou Hongxing^{1,2}, Zhang Dehui², Zhang Rongzheng¹

1. School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. No. 2 Gold Geological General Party of CAPF, Langfang 065000, China

Abstract: The Shiyaogou granite is related to the molybdenum mineralization hidden granite, which is found for the first time in the Xionger Mountain at the East Qinling, southern margin of North China landmass. The lithology of the granite is mainly medium-fine biotite monzogranite and porphyritic granite, and the LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results indicate that it was formed in the early Cretaceous(140.45 ± 0.75 Ma~ 136.64 ± 0.55 Ma). The geochemical data show that the granite is characterized by SiO_2 (70.27%~73.22%), Al_2O_3 (12.71%~14.96%), MgO (0.23%~0.54%), the total alkaline($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) ranging from 6.43% to 11.78wt%, which suggests that the granite has high silicon and rich alkali characteristics. The Rittmann Index(δ) ranges from 2.11 to 3.02, and AR ranges from 1.48 to 5.73, which shows the granite is calc-alkaline series. The A/CNK

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41373048);国土资源部公益性行业科研专项项目(No.201411024)。

作者简介:侯红星(1975—),男,地质工程师,在读博士研究生,主要从事区域地质调查及矿产地质勘查工作.E-mail: wjhjh@163.com

* 通讯作者:张德会,E-mail: zhangdehui@cugb.edu.cn

引用格式:侯红星,张德会,张荣臻,2016.东秦岭中生代石瑶沟隐伏花岗岩年代学、地球化学特征及地质意义.地球科学,41(10):1665~1682.

value is 0.95–1.01, and shows a Aluminum-peraluminous I-type granite characteristic. The Σ REE of the granite ranges from 147×10^{-6} to 322×10^{-6} , the ratio of LREE/HREE ranges from 15.2 to 25.2, and the value of $\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}}$ ranges from 19.10×10^{-6} to 50.50×10^{-6} . The chonrite standardized distribution pattern is characterized by enrichment of LREE in the right-dipping type with medium-weak negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.53 - 0.71$, average 0.62). The trace elements are characterized by the value of Sr ($133 \times 10^{-6} - 759 \times 10^{-6}$, average 371×10^{-6}), the low value of Y and Yb ($\text{Y} = 10.02 \times 10^{-6} - 18.80 \times 10^{-6}$, average 12.57×10^{-6} ; $\text{Yb} = 1.16 \times 10^{-6} - 2.02 \times 10^{-6}$, average 1.40×10^{-6}), and the lower ratio of Sr/Y ($12.77 - 61.66$, average 30.44). The geochemical characteristics reflect the granite melt experienced feldspar fractional crystallization in the magma. The initial isotopic Sr ratio ($I_{\text{sr}} = 0.70744 - 0.71384$), the initial epsilon Sr ($\epsilon_{\text{Sr}}(t) = 44.1 - 134.9$) and Nd ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -12.96$ to -13.46) disclose the Shiyaogou hidden granite has a magma homology with the Mesozoic Heyu granite. The Nd model ages (t_{DM2}) of the granites are concentrated in 2.00–2.01 Ga. All the isotopic data suggest the granite formed by the melting of the South Qinling and Yangtze block crystalline basement and with participation of Taihua and Xionger groups. The regional geology and geochemical characteristics suggest that the formation of the Shiyaogou granite experienced two stages: Before Jurassic, the crust of East Qinling thickened with the subduction-collision of South Qinling and Yangtze Block under the North China block; In the Jurassic and Cretaceous, when the extrusion environment changed to the extension condition, with the decompression and warming, partial melting of the middle-lower continental crust, finally formed the Shiyaogou granite in the Early Cretaceous.

Key words: Southern Margin of North China Landmass; East Qinling; The Shiyaogou Granite; Zircon U-Pb Age; geochemistry; Molybdenum ore.

0 引言

华北陆块南缘特殊的地质构造环境和成岩成矿地质背景吸引了大量国内外研究者(罗铭玖等,1991;陈衍和富士谷,1992;黄典豪,1994;Stein *et al.*,1997;Chen *et al.*,2000,2008;张正伟等,2001;毛景文,2003,2005;李永峰,2004,2005;陈衍景等,2006,2009;叶会寿等,2006;高昕宇等,2010;Mao *et al.*,2010;卢欣祥等,2011).三叠纪—白垩纪时期,华北陆块构造体制由挤压向伸展环境转换,出现了大面积岩浆活动和上升侵位(高昕宇等,2010),形成了东秦岭地区Mo-Au-Ag多金属成矿带.东秦岭地区大规模钼多金属成矿作用与该区广泛发育的中生代中酸性花岗岩关系密切,这些花岗质侵入岩体常常出露地表,容易被发现.石瑶沟隐伏花岗岩是武警黄金部队近年在东秦岭地区,栾川县北部马超营断裂带内开展金矿勘查时,通过钻探施工在地下发现的与钼矿化关系密切的隐伏花岗岩体.通过进一步勘查发现,矿床规模目前已达大型.关于东秦岭地区中生代花岗岩成岩成矿作用,以往研究均针对地表出露的侵入岩体,而对埋藏在地下的隐伏岩体研究较少.石瑶沟花岗岩体的发现和揭露为开展隐伏花岗岩成岩成矿作用提供了有利条件.笔者在石瑶沟矿区工作多年,见证了石瑶沟隐伏花岗岩的发现和勘查过程.在以往工作基础上,本文利用LA-ICP-MS法测定石瑶沟花岗岩主要岩性的锆石U-Pb年龄,以确定石瑶沟花岗岩的形成时代,并根据地球化学特征,讨论岩体成因及构造环境,以

期为深入认识华北陆块南缘中生代大规模岩浆活动、成矿作用规律及其与华北克拉通岩石圈减薄的成因联系提供新的线索,为东秦岭地区寻找到同类型的钼矿提供参考依据.

1 区域地质简况及岩相学特征

石瑶沟位于华北陆块南缘熊耳山地区栾川县北部(图1),东西向马超营断裂带与北东向石瑶沟—焦园断裂交汇夹持部位.研究区地层主要为中元古代熊耳群中酸性火山岩(形成年龄1 850~1 400 Ma,陈衍景等,2004),区域内燕山期花岗岩活动强烈,北部出露花山复式花岗岩基(105~160 Ma,范宏瑞等,1988;Chen *et al.*,2008;肖娥等,2012),东部出露合峪花岗岩基(127.2~148.2 Ma;李永峰,2005;唐克非和李建威,2009;高昕宇等,2010).研究区地表未见侵入岩出露,但通过钻探工程施工,深部见到厚度不等的花岗岩带侵入到熊耳群中酸性火山岩中,岩体顶部距离地表400~900 m,地表投影面积约0.24 km².

钻孔资料显示:石瑶沟隐伏花岗岩体整体向东侧倾,岩体顶部呈岩株、岩枝或岩脉侵入到上覆中元古代熊耳群安山岩、流纹岩和英安岩等围岩内,接触带及外侧围岩均发生不同程度的角岩化.高分辨率物探资料显示:研究区深部可能存在花岗岩基.石瑶沟岩体主体岩性为中—细粒黑云母二长化岩和斑状花岗岩,局部发育花岗细晶岩.岩石总体呈浅肉

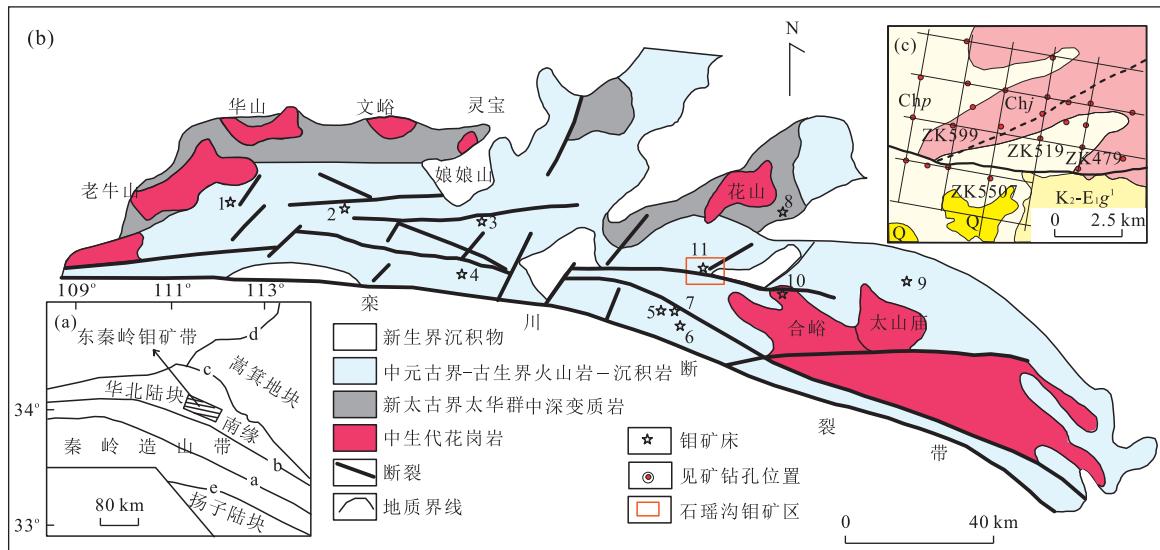


图 1 东秦岭钼成矿带及石瑶沟钼矿区地质

Fig.1 Simplified geological map of the East Qinling Molybdenum belt and Shiyaogou Mo deposit

图 a 中:a.商丹断裂带;b.栾川断裂带;c.三门峡—鲁山断裂带;d.太行山断裂带;e.南漳断裂带;图 b 中:1.金堆城钼矿;2.木龙沟铁(钼)矿;3.银家沟钼多金属硫铁矿;4.夜长坪钼矿;5.上房沟钼矿;6.南泥湖钼矿;7.三道庄钼矿;8.雷门沟钼矿;9.东沟钼矿;10.鱼池岭钼矿;11.石瑶沟钼矿;图 c 中:Chj.熊耳群焦园组;Chj.熊耳群坡前街组;K₂-E₁g¹.上白垩统第一系;Q.第四系;据叶会寿等(2006)略改

表 1 石瑶沟花岗岩主要岩性特征

Table 1 The mainly lithology of Shiyaogou granites

中—细粒黑云母二长花岗岩		斑状花岗岩	花岗细晶岩
颜色	灰白色—浅肉红色	浅肉红色—肉红色	鲜肉红色、浅红色
结构	似斑状结构,基质细粒花岗结构	多斑结构—基质细微晶结构	似斑状结构,基质细粒花岗结构
斑晶	斜长石:15%±;钾长石:30%~35%;石英:15%±	钾长石:25%;斜长石 25%;石英:10%;黑云母:3%~5%	斜长石:2%;钾长石:2%;石英:1%
矿物组合	斜长石:15%±;钾长石:5%~10%;石英:10%~15%;黑云母:3%~5%	钾长石:10%~15%;斜长石:10%;石英:10%;黑云母:2%~3%	斜长石:30%;钾长石:35%~40%;石英:25%;黑云母:3%~5%
基质	磁铁矿、磷灰石、锆石、榍石、褐帘石	磷灰石、锆石、褐帘石	磁铁矿、磷灰石、锆石、榍石
副矿物	绢云母、白云母、高岭土、绿泥石等	绢云母、白云母、高岭土、碳酸盐、石英、锡石等	绢云母、白云母、高岭土、硬石膏、绿泥石、不透明矿物、锡石等
次生矿物			
图	图 2a	图 2b	图 2c

红—鲜肉红色,似斑状、多斑结构,基质为细晶结构、细晶花岗结构,发育云英岩化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化、高岭土化等蚀变,副矿物主要有磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿等。另外,钻孔岩心常见不同岩性过渡带及大量花岗斑岩、花岗伟晶岩脉的穿叉,岩体内部、岩体与围岩接触部位局部发育角砾岩带,岩体形态比较复杂。钼矿化主要与斑状花岗岩相关,发育在岩体内外接触带及围岩中。石瑶沟隐伏花岗岩主要的岩石岩性特征见表 1、图 2。

2 样品及分析方法

主量和微量元素测试在河北省区域地质矿产

调查研究所实验室进行。主量元素测试用 X 射线荧光光谱法(XRF),用无水四硼酸锂、氟化锂、溴化锂和硝酸铵与自动火焰熔样机制样后,用 XRF 方法测定氧化物含量,分析精度优于 1%。微量元素测定用高分辨电感耦合等离子质谱法(ICP-MS),所用仪器为德国 Finnigan-MAT 公司生产的 ELEMENTI 离子体质谱仪(具体分析流程略),灵敏度(115In): $R = 300, > 1 \times 10^8 \text{ cps}/(\mu\text{g/mL})$; $R = 3000, > 1 \times 10^7 \text{ cps}/(\mu\text{g/mL})$; $R = 8000, > 1 \times 10^6 \text{ cps}/(\mu\text{g/mL})$; 检出限(²³⁸U): $< 10 \times 10^{-13} \text{ g/mL}$ 。仪器工作温度 20 °C, 工作相对湿度 30%, 分析相对误差小于 5%。锆石 U-Pb 测年在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行。锆石挑选在河北省廊坊区域地质调

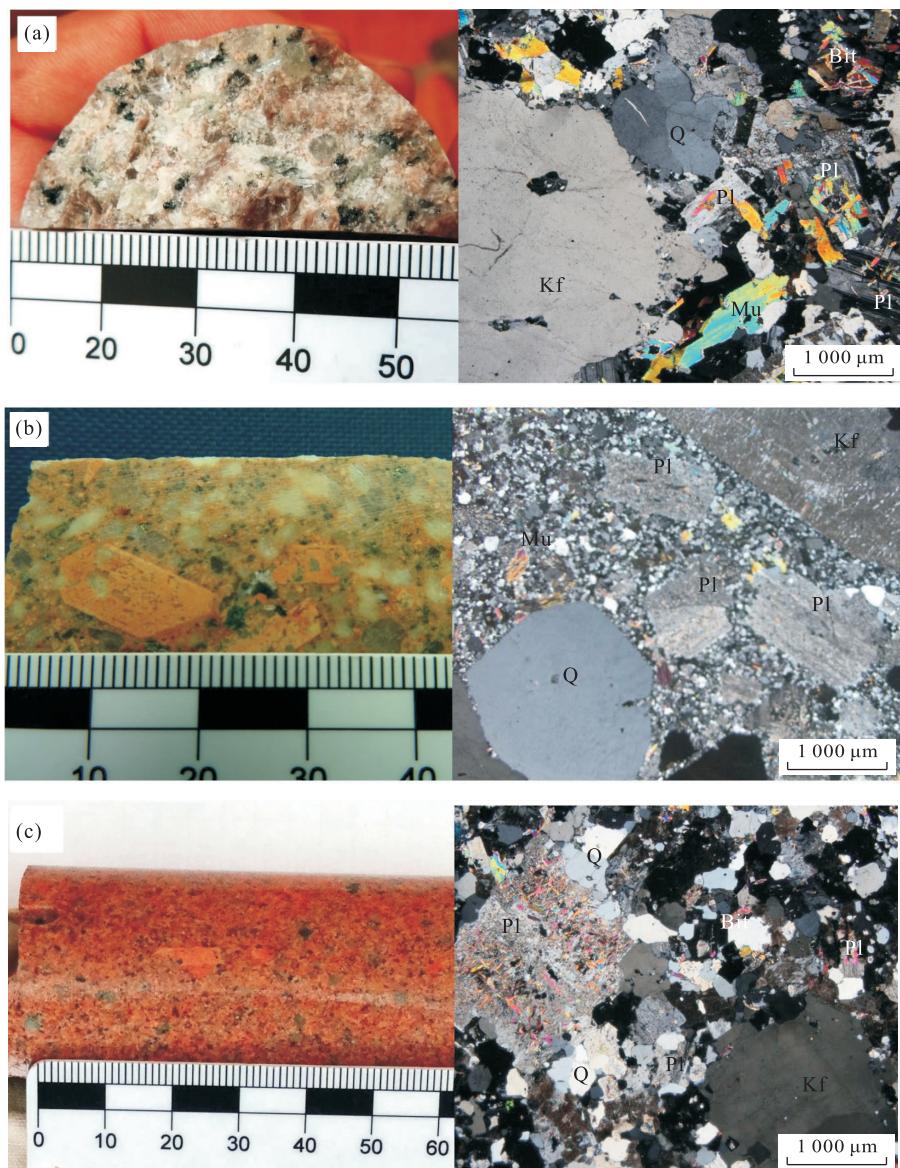


图 2 石瑶沟花岗岩体岩石及岩相学特征

Fig.2 Petrological and petrographical characteristics of the Shiyaogou granites

a. 中一细粒黑云母二长花岗岩(编号: ZK599,深度: 1 395 m); b. 斑状花岗岩(编号: ZK519,深度: 788 m); c. 花岗细晶岩(编号: ZK5507,深度: 1 490 m); Kp. 钾长石; Pl. 斜长石; Bit. 黑云母; Mu. 白云母; Sph. 楼石; Q. 石英; 均为正交偏光

查研究所实验室利用标准矿物分离技术分选完成。在双目镜下挑选表面平整光洁且具不同长宽比例、柱锥面特征和颜色的锆石。将这些锆石粘在双面胶上,用无色透明环氧树脂固定,待环氧树脂固化之后对其表面抛光至锆石中心。在原位分析之前,通过反射光和 CL 图像详细研究锆石的晶体形貌和内部结构特征,以选择同位素分析的最佳点。LA-ICP-MS U-Pb 分析采用 Agilent 公司 7500a 型 ICP-MS 进行测试,与 MicroLas 公司 GeoLas200 M 光学系统联机进行。激光束斑直径为 30 μm , 激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm 。实验中采用 He 气作为剥蚀物质的

载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化,采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式,每完成 4~5 个测点的样品测定,加测标样一次。在所测锆石样品分析 15~20 个点前后各测 2 次 NIST SRM610。锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标准物质,元素含量采用 NIST SRM610 作为外标, ^{29}Si 作为内标。详细分析步骤和数据处理方法参见文献(袁洪林等,2003)。锆石 U-Pb 同位素数据处理使用 GLITTER 4.0 软件(Jackson *et al.*, 2004)完成,之后按照 Andersen 的

方法,用 AM-ICP MS Common Lead Correct ion (ver 3.15)进行普通铅校正,U-Pb 谐和线图、加权平均年龄的计算以及绘图用 Isoplot 3.0 软件(Ludwig,1999)完成.Sr、Nd 同位素分析测试在中国地质大学(武汉)稳定同位素实验室进行.样品在超净岩石化学实验室分离提纯,经过加工后分离 Rb、Sr,在 TRITON 质谱计上完成 Sr 同位素测试.Sr 同位素的质量分馏校正采用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.119 4 标准化,NBS987 的测定值为:0.710 25±0.000 08,国家标准 GBW04411 的测定值为:⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.759 99±0.000 04,全过程本底为:Rb=3×10⁻¹¹,Sr=1.2×10⁻¹⁰.Nd 值测定采用聚四氟乙稀的密封 bomb 溶样,经过加工处理分离 Sm-Nd 后,使用 Neptune 型多接收电感耦合等离子质谱仪 MC-ICP-MS 测试.全过程本底为:Sm=3.0×10⁻¹¹,Nd=1.2×10⁻¹⁰.样品¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.721 900 标准化.标准样品 (BCR-2) 测定值为¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512 643±0.000 015 (2δ),仪器标准的测定值 JNd-1¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512 116±8.Sr、Nd 同位素分析精度高于 0.002%.详细的同位素分析试验流程及仪器分析情况见 Foland *et al.*(1991).

3 石瑶沟隐伏花岗岩形成时代

本文对石瑶沟隐伏花岗岩体 3 类主要岩性进行锆石 U-Pb 定年.样品分别为中一细粒黑云母二长花岗岩(样号 599-48,采自钻孔 ZK599 孔深 1 395 m 处岩心;地理坐标为:34°01'49"N,111°33'50"E)、斑状花岗岩(样号 519-40,采自钻孔 ZK519 孔深 788 m 处岩心;地理坐标为 34°01'47"N,111°34'05"E)、花岗细晶岩(样号 5507-8,采自钻孔 ZK5507 孔深 1 490 m 处岩心;地理坐标为:34°01'41"N,111°33'56"E).实物镜下锆石从无色透明到黄褐色,CL 图像(图 3)显示锆石绝大多数呈长柱状,部分呈短柱状,自形程度较好,粒径 50~200 μm,长宽比约 3.0:1.0~1.5:1.0,多数锆石具清楚的结晶环带,部分锆石内部存在不规则的残留核.锆石 Th、U 含量(表 2)以及 Th/U 比值(0.36~1.36)较高,具有典型的岩浆成因锆石特征(Williams *et al.*,1996; Hoskin and Blank,2000; Belousova *et al.*,2002).

对中一细粒黑云母二长花岗岩样品 599-48 锆石进行 25 个点次的分析,其中 1 个分析点²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 315 Ma,是继承性锆石(表 2),属海西期岩浆活动产物,13 个分析点²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄

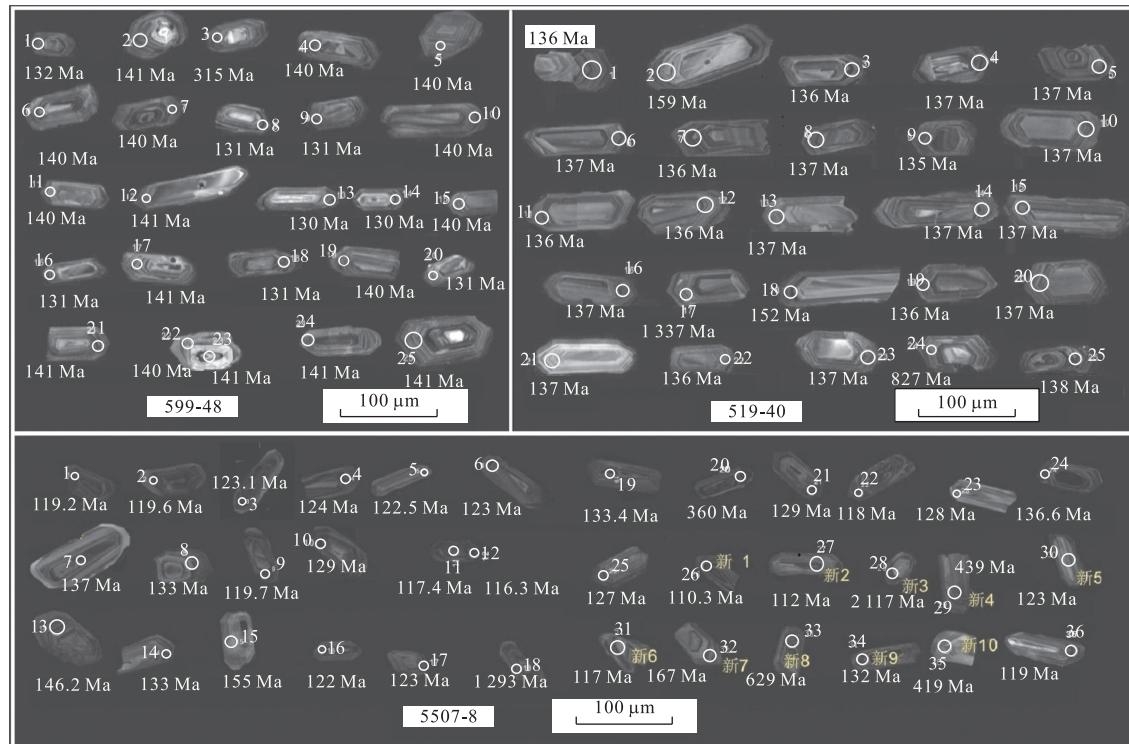


图 3 石瑶沟花岗岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig.3 CL images of zircons of Shiyaogou granites

表 2 石瑶沟花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb date for the Shiyaoogou granites

岩性	测点号	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	Th/U	同位素比值 $\pm 1\sigma$				年龄(Ma)							
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$					
					比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ				
599-48-01	756	1.294	0.58	0.05340	0.00110	0.15272	0.00276	0.02074	0.00012	346	144	2.4	132	0.8		
599-48-02	685	1.053	0.65	0.04953	0.00133	0.15084	0.00373	0.02209	0.00015	173	62	143	3.3	141	1.0	
599-48-03	463	1.073	0.43	0.09829	0.00146	0.67859	0.00761	0.05007	0.00027	1592	27	526	4.6	315	1.7	
599-48-04	623	984	0.63	0.04603	0.00356	0.13960	0.01051	0.02200	0.00036	0	176	133	9.4	140	2.3	
599-48-05	475	880	0.54	0.05021	0.00191	0.15248	0.00551	0.02203	0.00020	205	86	144	4.9	140	1.3	
599-48-06	684	1.108	0.62	0.04896	0.00176	0.14835	0.00504	0.02197	0.00019	146	82	141	4.5	140	1.2	
599-48-07	1.164	1.602	0.73	0.05348	0.00162	0.16208	0.00458	0.02198	0.00017	349	67	153	4.0	140	1.1	
黑	599-48-08	798	1.140	0.70	0.05770	0.00152	0.16322	0.00394	0.02051	0.00015	518	57	154	3.4	131	0.9
云	599-48-09	600	1.235	0.49	0.04987	0.00131	0.14092	0.00340	0.02049	0.00014	189	60	134	3.0	131	0.9
母	599-48-10	774	1.386	0.56	0.05025	0.00151	0.15252	0.00426	0.02201	0.00017	207	68	144	3.8	140	1.1
二	599-48-11	707	880	0.80	0.05784	0.00185	0.17522	0.00523	0.02197	0.00018	523	69	164	4.5	140	1.1
长	599-48-12	366	607	0.60	0.06179	0.00198	0.18823	0.00565	0.02209	0.00019	667	67	175	4.8	141	1.2
花	599-48-13	755	1.086	0.70	0.06774	0.00372	0.19060	0.01001	0.02041	0.00029	861	110	177	8.5	130	1.9
岗	599-48-14	1.121	1.732	0.65	0.04993	0.00100	0.14068	0.00245	0.02043	0.00012	192	46	134	2.2	130	0.7
岩	599-48-15	657	1.242	0.53	0.05009	0.00123	0.15196	0.00338	0.02200	0.00014	199	56	144	3.0	140	0.9
石	599-48-16	960	1.773	0.54	0.05152	0.00175	0.14558	0.00465	0.02049	0.00017	264	76	138	4.1	131	1.1
花	599-48-17	590	1.266	0.47	0.05000	0.00116	0.15236	0.00319	0.02210	0.00014	195	53	144	2.8	141	0.9
岗	599-48-18	1055	1.536	0.69	0.05619	0.00161	0.15880	0.00420	0.02050	0.00016	459	63	150	3.7	131	1.0
花	599-48-19	678	1.241	0.55	0.04751	0.00117	0.14402	0.00322	0.02199	0.00014	74	58	137	2.9	140	0.9
岩	599-48-20	573	1.406	0.41	0.05840	0.00261	0.16508	0.00704	0.02050	0.00023	545	95	155	6.1	131	1.4
花	599-48-21	899	1.409	0.64	0.04736	0.00600	0.14417	0.01785	0.02208	0.00061	67	277	137	15.8	141	3.8
岗	599-48-22	516	1.255	0.41	0.05048	0.00104	0.15296	0.00278	0.02198	0.00013	217	47	145	2.5	140	0.8
石	599-48-23	308	574	0.54	0.05116	0.00200	0.15553	0.00579	0.02205	0.00020	248	87	147	5.1	141	1.3
花	599-48-24	1.099	1.694	0.65	0.04866	0.00143	0.14783	0.00405	0.02203	0.00016	132	68	140	3.6	141	1.0
岗	599-48-25	657	1.325	0.50	0.04958	0.00162	0.15038	0.00464	0.02208	0.00018	176	74	143	4.1	141	1.1

续表 2

岩性	测点号	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	Th/U	同位素比值土 $\pm\sigma$						年龄(Ma)	
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
					比值	$\pm\sigma$	比值	$\pm\sigma$	比值	$\pm\sigma$		
斑状花岗岩	519-40-01	538	918	0.59	0.051 27	0.001 56	0.151 09	0.004 30	0.021 37	0.000 16	253	68
	519-40-02	333	400	0.83	0.047 69	0.001 41	0.164 32	0.004 54	0.024 99	0.000 18	83	70
	519-40-03	529	728	0.73	0.049 32	0.001 30	0.145 26	0.003 52	0.021 36	0.000 14	163	60
	519-40-04	1034	1471	0.70	0.057 15	0.001 39	0.169 26	0.003 74	0.021 48	0.000 14	497	53
	519-40-05	968	1491	0.65	0.058 00	0.001 02	0.171 64	0.002 52	0.021 46	0.000 12	530	38
	519-40-06	724	1164	0.62	0.050 48	0.001 15	0.149 55	0.003 06	0.021 48	0.000 13	217	52
	519-40-07	802	1071	0.75	0.047 10	0.001 04	0.138 63	0.002 73	0.021 35	0.000 13	54	52
	519-40-08	621	1163	0.53	0.048 88	0.001 07	0.144 70	0.002 84	0.021 47	0.000 13	142	51
	519-40-09	662	1021	0.65	0.051 15	0.001 15	0.149 44	0.003 01	0.021 19	0.000 13	248	51
	519-40-10	482	905	0.53	0.049 83	0.001 18	0.147 20	0.003 16	0.021 42	0.000 14	187	54
	519-40-11	501	857	0.59	0.050 06	0.001 27	0.147 18	0.003 43	0.021 32	0.000 14	198	58
	519-40-12	546	965	0.57	0.047 40	0.001 37	0.139 68	0.003 77	0.021 37	0.000 15	69	68
	519-40-13	296	675	0.44	0.049 85	0.001 38	0.147 19	0.003 76	0.021 41	0.000 15	188	63
	519-40-14	1246	1415	0.88	0.057 62	0.001 69	0.170 27	0.004 64	0.021 43	0.000 17	515	63
	519-40-15	582	829	0.70	0.047 00	0.001 52	0.139 00	0.004 22	0.021 45	0.000 17	49	76
	519-40-16	773	1521	0.51	0.058 18	0.001 36	0.172 40	0.003 64	0.021 49	0.000 14	536	51
	519-40-17	559	1036	0.54	0.047 68	0.001 63	0.137 16	0.004 42	0.020 86	0.000 17	83	80
	519-40-18	407	580	0.70	0.049 57	0.001 70	0.163 55	0.005 32	0.023 93	0.000 19	175	78
	519-40-19	542	958	0.57	0.048 30	0.001 62	0.142 17	0.004 51	0.021 35	0.000 17	114	77
	519-40-20	304	855	0.36	0.049 09	0.001 47	0.145 36	0.004 07	0.021 48	0.000 16	152	69
	519-40-21	157	351	0.45	0.049 53	0.001 89	0.146 44	0.005 33	0.021 44	0.000 19	173	87
	519-40-22	505	945	0.53	0.050 27	0.001 30	0.148 00	0.003 52	0.021 35	0.000 14	208	59
	519-40-23	390	681	0.57	0.049 46	0.001 72	0.146 48	0.004 83	0.021 48	0.000 18	170	79
	519-40-24	316	529	0.60	0.130 84	0.001 61	2.470 08	0.020 16	0.136 90	0.000 70	2109	21
	519-40-25	710	1196	0.59	0.049 30	0.001 16	0.146 87	0.003 12	0.021 60	0.000 14	162	54

续表 2

岩性	测点号	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$				$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$				$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$				年龄(Ma)	
					比值		1σ		$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		比值	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		比值	1σ	年龄	
																		1σ
花岗岩	5507-8-01	2179	2050	1.06	0.05864	0.00126	0.15130	0.00286	0.01866	0.00011	554	31	143	3	119	0.7		
	5507-8-02	1312	1323	0.99	0.04962	0.00158	0.12842	0.00383	0.01872	0.00015	55	123	3	120	0.9			
	5507-8-03	1150	1355	0.85	0.07023	0.00186	0.18714	0.00452	0.01928	0.00015	935	37	174	4	123	0.9		
	5507-8-04	956	1276	0.75	0.08456	0.00169	0.22691	0.00389	0.01942	0.00012	1305	24	208	3	124	0.8		
	5507-8-05	379	629	0.60	0.04605	0.00170	0.12176	0.00441	0.01918	0.00013	77	117	4	123	0.8			
	5507-8-06	520	809	0.64	0.05281	0.00244	0.14079	0.00622	0.01931	0.00021	321	81	134	6	123	1.0		
	5507-8-07	414	520	0.80	0.04980	0.00165	0.14720	0.00460	0.02142	0.00017	186	58	139	4	137	1.0		
	5507-8-08	723	979	0.74	0.05041	0.00114	0.14498	0.00293	0.02084	0.00013	214	35	137	3	133	0.8		
	5507-8-09	1841	1546	1.19	0.05181	0.00206	0.13388	0.00524	0.01874	0.00012	277	93	128	5	120	0.8		
	5507-8-10	1421	1439	0.99	0.04951	0.00133	0.13803	0.00342	0.02021	0.00014	172	45	131	3	129	0.9		
细晶	5507-8-11	1296	1684	0.77	0.05000	0.00251	0.12547	0.00623	0.01820	0.00013	195	116	120	6	116	0.8		
	5507-8-12	855	1164	0.73	0.06411	0.00234	0.16250	0.00579	0.01838	0.00015	745	79	153	5	117	0.9		
	5507-8-13	410	810	0.51	0.04965	0.00130	0.15692	0.00377	0.02294	0.00015	179	44	148	3	146	0.9		
	5507-8-14	144	318	0.45	0.05111	0.00215	0.16549	0.00680	0.02348	0.00020	246	99	155	6	150	1.0		
	5507-8-15	708	519	1.36	0.05089	0.00265	0.17005	0.00852	0.02426	0.00029	236	94	159	7	155	2.0		
	5507-8-16	870	1335	0.65	0.06459	0.00312	0.17009	0.00806	0.01910	0.00018	761	104	159	7	122	1.0		
	5507-8-17	675	877	0.77	0.05213	0.00378	0.13894	0.00997	0.01933	0.00022	291	167	132	9	123	1.0		
	5507-8-18	771	1024	0.75	0.04953	0.00368	0.13852	0.01023	0.02028	0.00017	173	169	132	9	129	1.0		
	5507-8-19	901	1530	0.59	0.04855	0.00144	0.14002	0.00405	0.02092	0.00013	126	71	133	4	133	0.8		
	5507-8-20	514	459	1.12	0.05513	0.00382	0.43598	0.02984	0.05736	0.00065	417	159	367	21	360	4.0		
晶屑	5507-8-21	1415	1514	0.93	0.04685	0.00213	0.13013	0.00579	0.02015	0.00019	41	99	124	5	129	1.0		
	5507-8-22	954	2144	0.44	0.05193	0.00247	0.13221	0.00618	0.01846	0.00017	282	112	126	6	118	1.0		
	5507-8-23	539	455	1.18	0.05335	0.00503	0.14798	0.01382	0.02012	0.00026	344	216	140	12	128	2.0		
	5507-8-24	1198	2033	0.59	0.06328	0.00106	0.18642	0.00255	0.02142	0.00012	718	20	174	2	137	0.8		
	5507-8-25	572	838	0.68	0.05111	0.00299	0.13980	0.00808	0.01984	0.00018	246	136	133	7	127	1.0		
	5507-8-26	1704	1779	0.96	0.05146	0.00323	0.12250	0.00761	0.01726	0.00016	262	145	117	7	110	1.0		
	5507-8-27	483	569	0.85	0.04627	0.00343	0.11227	0.00823	0.01760	0.00020	12	165	108	8	112	1.0		
	5507-8-28	171	756	0.23	0.13139	0.00136	5.41684	0.04758	0.23900	0.00164	2117	19	1888	8	1686	8.0		
	5507-8-29	215	214	1.00	0.05650	0.00337	0.54741	0.03160	0.07048	0.00106	472	101	443	21	439	6.0		
	5507-8-30	398	615	0.65	0.04611	0.00286	0.12234	0.00746	0.01924	0.00021	4	136	117	7	123	1.0		
花岗岩	5507-8-31	707	802	0.88	0.05698	0.00233	0.14402	0.00561	0.01839	0.00019	491	68	137	5	117	1.0		
	5507-8-32	738	914	0.81	0.05490	0.00241	0.19850	0.00834	0.02630	0.00029	408	74	184	7	167	2.0		
	5507-8-33	266	377	0.71	0.09394	0.00165	1.32472	0.01955	0.10256	0.00068	1507	18	857	9	629	4.0		
	5507-8-34	152	220	0.69	0.05068	0.00424	0.14436	0.01179	0.02071	0.00037	226	152	137	10	132	2.0		
	5507-8-35	128	201	0.64	0.05697	0.00253	0.52658	0.02251	0.06721	0.00077	490	74	430	15	419	5.0		
	5507-8-36	394	443	0.89	0.05749	0.00354	0.14695	0.00874	0.01859	0.00027	510	106	139	8	119	2.0		

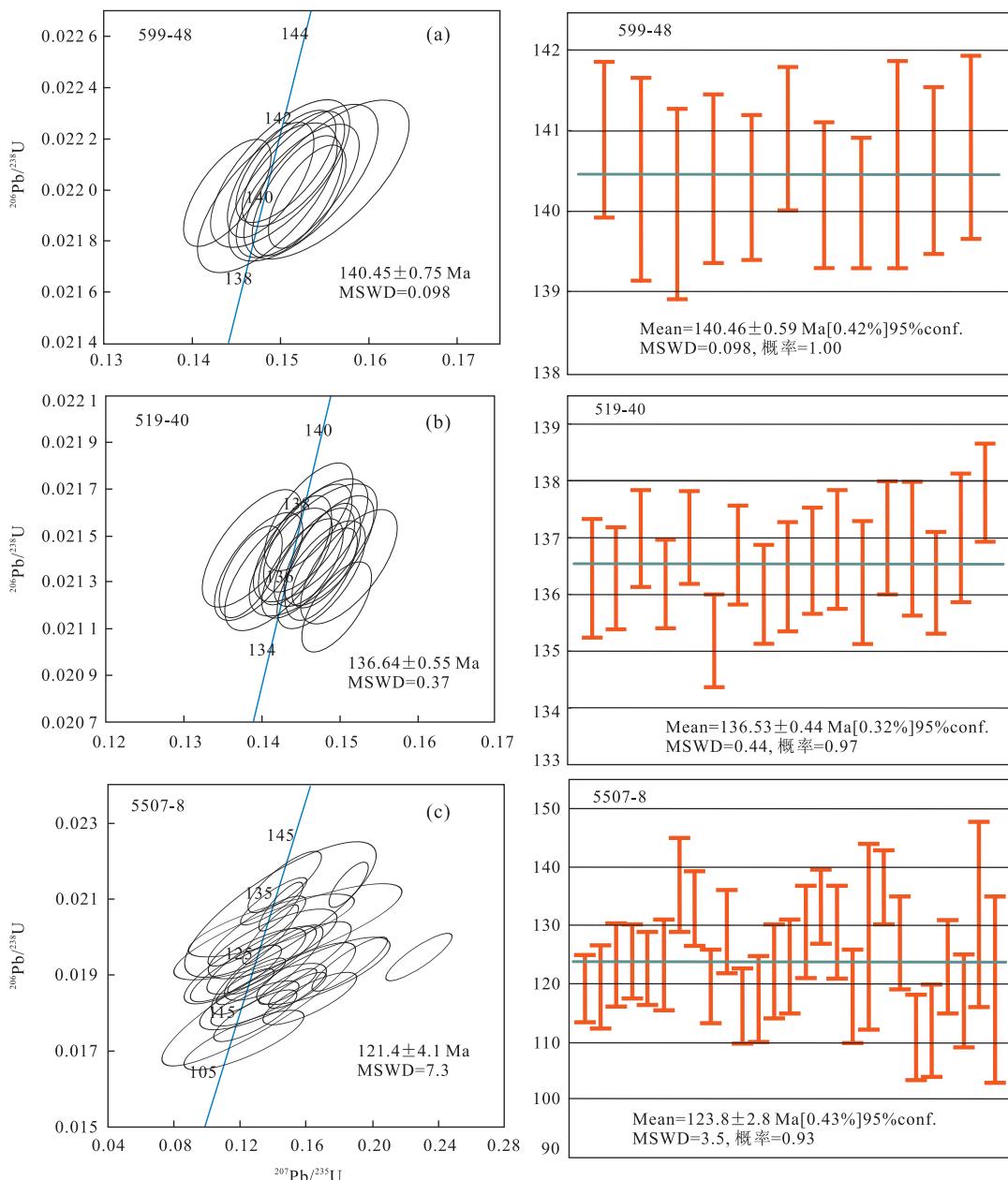


图 4 石瑶沟花岗岩锆石 LA-ICP-MS 年龄谐和图及加权平均年龄图

Fig.4 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordant and average weighted diagrams for Shiyaogou granites

偏离谐和线较远;其余 11 个点的分析值在锆石年龄谐和图上(图 4a)组成相关性较好的主锆石组,给出谐和年龄为 140.45 ± 0.75 Ma (MSWD=0.098),加权平均年龄为 140.46 ± 0.59 Ma (MSWD=0.098)。两者在误差范围内一致,可以代表黑云母二长花岗岩的结晶年龄。

对斑状花岗岩样品 519-40 进行 25 个点次的分析,其中 1 个分析点锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 827 Ma,是继承性锆石,为晋宁期岩浆侵入事件的记录,7 个偏离谐和线较远,其余 17 个有效点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 135~138 Ma(表 2),给出了谐和年龄为

136.64 ± 0.55 Ma (MSWD=0.37)(图 4b),加权平均年龄为 136.53 ± 0.44 Ma (MSWD=0.44)。加权平均年龄与谐和年龄在误差范围内一致,斑状花岗岩的结晶年龄为 136.53 ± 0.44 Ma (MSWD=0.44)。

对花岗细晶岩样品 5507-8 进行 36 个点次的分析(表 2),扣除 5 个继承性锆石(5507-8-20、5507-8-28、5507-8-29、5507-8-33 和 5507-8-35) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(439 Ma, 360 Ma, 2 117 Ma, 629 Ma 和 419 Ma, 为海西、加里东期以及古元古代嵩阳运动岩浆活动记录)记录和 4 个(5507-8-13、5507-8-14、5507-8-15 和 5507-8-32)偏离谐和线较远锆石记录

(146~167 Ma)后,其余 27 个有效点给出的谐和年龄为 121.4 ± 4.1 Ma(MSWD=7.3)(图 4c),加权平均年龄为 123.8 ± 2.8 Ma(MSWD=3.5)。加权平均年龄与谐和年龄在误差范围内一致,花岗细晶岩(脉)结晶年龄为 123.8 ± 2.8 Ma(MSWD=3.5)。

根据本次研究年龄测试结果,显示石瑶沟隐伏花岗岩形成于早白垩世。其中,中一细粒黑云母二长花岗岩结晶年龄 140.46 ± 0.59 Ma,与钼矿化关系密切的斑状花岗岩结晶年龄 136.53 ± 0.44 Ma,测得的花岗细晶岩形成年龄 123.8 ± 2.8 Ma,表明岩浆活动持续时间较长。

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素

根据手标本和镜下观察鉴定,选取石瑶沟隐伏花岗岩体 3 种主要岩性共 9 件样品进行主、微量元素

分析,分析结果列于表 3。岩体 SiO_2 含量变化范围为 70.27%~73.22%, Al_2O_3 变化于 12.71%~14.96%,显示高硅特征。 $\text{MgO}=0.23\%\sim 0.54\%$, $\text{Mg}^{\#}$ 值 [$100 \times \text{Mg}^{2+}/(\text{Fe}^{\text{T}} + \text{Mg}^{2+})$] 介于 11.99~17.56, Na_2O 含量介于 2.14%~4.34%, K_2O 含量介于 4.29%~7.44%,全碱含量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 介于 6.43%~11.78%,显示高碱特征。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 范围介于 1.04~3.48, Na_2O 含量均低于 K_2O 含量。里特曼指数 (δ) 变化范围为 2.11~3.02;AR 为 1.48~5.73,为钙碱性。在钾—硅判别图解中(图 5a),样品几乎都分布在钾玄岩系列,个别样品落入高钾钙碱性系列。 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 分子比 (ACNK 值) 0.95~1.01,平均 0.98,在 ANK-ACNK 图解中(图 5b),落入准铝质—过铝质线附近,具 I 型花岗岩特征。

4.2 微量元素

石瑶沟隐伏花岗岩微量元素球粒陨石标准化 REE 配分模式图及原始地幔标准化微量元素蛛网

表 3 石瑶沟花岗岩主量(质量百分比)、微量元素(10^{-6})分析

Table 3 Major element (%) and trace element (10^{-6}) compositions of Shiyagou granites

样号	中一细粒黑云母二长花岗岩				斑状花岗岩		花岗细晶岩		
	479-63	599-48	599-51	599-58	5507-10'	519-40	519-43	479-66	5507-8'
SiO_2	71.67	71.66	72.24	70.27	73.14	71.42	72.23	71.49	73.22
Al_2O_3	13.42	13.87	13.93	14.96	13.48	13.86	13.46	12.87	12.71
Fe_2O_3	1.38	0.68	0.97	1.22	1.08	0.72	0.94	1.11	1.00
FeO	0.66	0.73	0.78	0.97	0.84	0.87	0.74	0.94	0.39
MgO	0.47	0.27	0.38	0.44	0.40	0.35	0.35	0.54	0.23
CaO	1.36	1.39	1.37	1.71	1.49	1.45	1.27	1.31	0.91
Na_2O	2.84	3.30	3.72	4.34	3.70	3.10	3.06	2.35	2.14
K_2O	5.95	5.89	5.09	4.50	4.29	5.55	5.49	6.70	7.44
MnO	0.05	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05
P_2O_5	0.12	0.08	0.09	0.10	0.09	0.08	0.08	0.16	0.07
TiO_2	0.34	0.28	0.27	0.36	0.31	0.26	0.26	0.27	0.28
H_2O^+	0.66	0.62	0.37	0.36	0.38	0.59	0.71	0.66	0.51
H_2O^-	0.09	0.09	0.08	0.09	0.04	0.95	0.11	0.10	0.08
LOI	1.48	1.56	0.90	0.88	0.94	2.08	1.87	2.05	1.32
Total	99.75	99.78	99.80	99.80	99.81	99.79	99.80	99.82	99.76
$\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$	1.41	0.69	0.98	1.23	1.10	0.74	0.96	1.14	1.02
FeO ^T	1.93	1.36	1.66	2.09	1.84	1.55	1.63	1.99	1.32
DI	89.32	90.96	90.01	87.51	88.83	89.31	90.13	90.24	93.69
A/NK	1.21	1.18	1.20	1.25	1.26	1.25	1.23	1.16	1.10
A/CNK	0.99	0.97	0.99	0.99	1.00	1.01	1.01	0.95	0.96
$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	2.09	1.79	1.37	1.04	1.16	1.79	1.80	2.85	3.48
SI	4.18	2.45	3.47	3.88	3.91	3.34	3.34	4.61	2.04
AR	1.48	1.55	1.64	1.70	1.66	1.51	1.52	4.52	5.73
$\text{Mg}^{\#}$	16.12	13.29	15.12	14.26	14.64	15.25	14.60	17.56	11.99
δ	2.68	2.92	2.64	2.85	2.11	2.61	2.47	2.84	3.02
La	52.34	43.85	43.93	60.66	49.96	41.90	42.34	33.19	81.85
Ce	98.00	87.00	87.00	115.00	98.00	83.00	86.00	66.00	151.00
Pr	11.37	9.83	9.52	13.49	10.94	9.12	9.39	7.56	16.44
Nd	38.50	32.65	32.01	46.60	37.01	30.27	30.85	25.55	52.56
Sm	5.53	4.86	4.84	7.97	5.58	4.42	4.61	3.99	7.11
Eu	1.14	0.98	0.95	1.26	1.04	0.86	0.89	0.86	1.20
Gd	4.68	3.78	4.02	6.21	4.70	3.73	4.00	3.29	5.89

续表 3

样号	中—细粒黑云母二长花岗岩					斑状花岗岩		花岗细晶岩	
	479-63	599-48	599-51	599-58	5507-10'	519-40	519-43	479-66	5507-8'
Tb	0.62	0.47	0.51	0.86	0.60	0.50	0.53	0.45	0.64
Dy	2.72	2.17	2.33	3.90	2.72	2.24	2.50	2.07	2.57
Ho	0.45	0.36	0.39	0.67	0.45	0.41	0.45	0.37	0.42
Er	1.33	1.04	1.15	1.89	1.44	1.22	1.38	1.11	1.25
Tm	0.20	0.15	0.18	0.30	0.21	0.18	0.23	0.18	0.17
Yb	1.39	1.18	1.26	2.02	1.44	1.39	1.51	1.24	1.16
Lu	0.22	0.16	0.18	0.29	0.23	0.22	0.27	0.23	0.21
Σ REE	218	188	188	261	214	180	185	147	322
LREE	207	179	178	245	203	170	174	138	310
HREE	11.61	9.30	10.01	16.13	11.80	9.90	10.88	8.95	12.31
L/H	17.81	19.24	17.77	15.19	17.18	17.14	15.97	15.37	25.17
La _N /Yb _N	27.03	26.77	25.04	21.57	24.95	21.55	20.11	19.14	50.50
La _N /Sm _N	6.11	5.83	5.86	4.92	5.78	6.12	5.93	5.37	7.43
Gd _N /Lu _N	2.60	2.90	2.78	2.65	2.53	2.07	1.82	1.75	3.55
Eu/Eu*	0.67	0.67	0.64	0.53	0.60	0.63	0.62	0.71	0.55
Ce/Ce*	0.94	0.98	0.99	0.94	0.98	1.00	1.01	0.99	0.95
Rb	208	337	254	200	180	369	330	269	450
Ba	718	903	838	808	726	798	727	495	1059
Th	20.99	20.39	19.49	25.69	20.86	20.08	18.48	22.84	16.47
U	5.46	6.98	6.32	9.10	5.45	11.52	11.24	14.58	5.72
K	50 272	49 784	42 699	37 776	36 015	47 175	46 518	56 855	62 742
Nb	19.99	11.55	15.81	45.55	25.02	19.11	18.72	18.62	10.61
Ta	1.16	1.17	1.14	3.71	1.62	1.48	1.73	1.18	0.71
Pb	21.41	32.22	26	23.98	19.41	22.26	24.18	21.79	29.52
Sr	759.1	306	326.1	361.3	328.9	489.9	396	133	243.5
P	531	366	385	443	407	355	372	712	292
Zr	231	201	201	216	216	182	181	198	252
Hf	7.04	6.91	6.60	8.13	6.48	6.38	6.53	7.00	7.82
Ti	2 089	1 722	1 663	2 164	1 895	1 605	1 617	1 660	1 707
Y	12.31	10.02	11.03	18.80	13.37	11.21	12.26	10.41	12.29
Cs	4.02	4.81	3.78	4.05	2.66	7.12	6.22	4.77	5.37
Cu	56.8	48.2	8.0	7.1	5.9	22.5	37.5	303.3	17.5
Zn	31.2	133.6	55.3	56.1	42.8	40.0	36.1	33.6	41.9
Cr	16.1	16.0	17.0	17.4	18.8	16.3	15.4	15.9	17.3
Co	2.73	0.98	1.01	2.34	2.31	1.47	1.89	3.45	1.34
Ni	1.3	1.0	1.2	1.2	1.3	1.3	1.1	2.2	0.8
V	37.4	36.6	37.3	42.6	48.2	39.4	35.3	32.6	38.7
Sc	3.90	3.69	4.21	4.80	4.37	4.20	4.03	4.67	3.87
Mo	208	55	23	2	1	4	12	265	1
In	0.04	0.09	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.10	0.04
Sb	0.16	0.09	0.10	0.09	0.08	0.18	0.17	0.25	0.10
W	2.75	5.27	1.26	2.32	4.62	6.31	8.60	6.37	5.96
Tl	1.29	1.76	1.24	0.87	0.91	2.02	1.90	1.76	2.31
Bi	0.43	0.72	0.14	0.08	0.05	0.12	0.26	0.55	0.49
Rb/Sr	0.27	1.10	0.78	0.55	0.55	0.75	0.83	2.02	1.85
Sr/Y	61.66	30.55	29.55	19.22	24.61	43.72	32.31	12.77	19.81
T(℃)	938	922	923	931	931	911	911	921	948

注: $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 为全铁; A/CNK = $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$ 为摩尔数分数比; A/NK = $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为摩尔数分数比; $\text{Mg}^{\#} = 100 \times \text{Mg}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$; $\text{Eu/Eu}^* = 2\text{Eu}_{\text{N}}/(\text{Sm}_{\text{N}} + \text{Gd}_{\text{N}})$; $\text{Ce/Ce}^* = 2\text{Ce}_{\text{N}}/(\text{La}_{\text{N}} + \text{Pr}_{\text{N}})$; $\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}}$ 、 $\text{La}_{\text{N}}/\text{Sm}_{\text{N}}$ 、 $\text{Gd}_{\text{N}}/\text{Lu}_{\text{N}}$ 为球粒陨石标准化值, 标准化值引自 McDonough(1992); T_{Zr} 为锆石饱和温度, 计算公式为 $T_{\text{Zr}} = 12\ 900/[2.95 + 0.85M + \ln(496\ 000/\text{Zr}_{\text{melt}})]$, 式中 $M = (\text{Na} + \text{K} + 2\text{Ca})/(Al \times Si)$, Zr_{melt} 为熔体中 Zr 含量(Watson and Harrison, 1983).

图见图 6.微量元素特征显示石瑶沟隐伏花岗岩大离子亲石元素(large ion lithophile element, LILE) Rb、Ba、K、U、Th 等含量较高, 高场强元素(high field-strength element, HFSE) Nb、Ta、Hf、Zr、HREE 等含量较低, 在原始地幔标准化微量元素蛛

网图(图 6b)上总体呈现左高右低的右倾分配型式, 暗示它们可能来自同一岩浆源区.

石瑶沟花岗岩稀土总量(Σ REE)变化于 $147.0 \times 10^{-6} \sim 322.0 \times 10^{-6}$, 平均 211.0×10^{-6} , 低于世界花岗质岩石稀土平均含量(290.0×10^{-6} ,

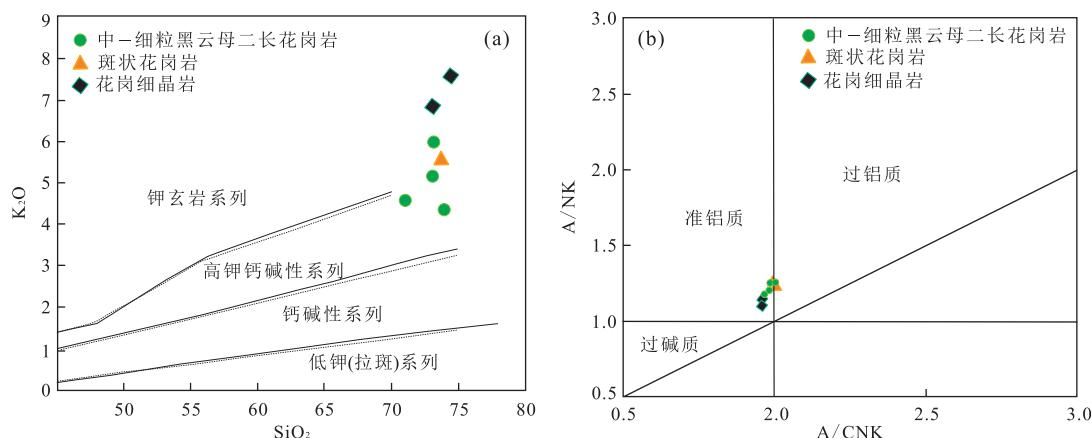
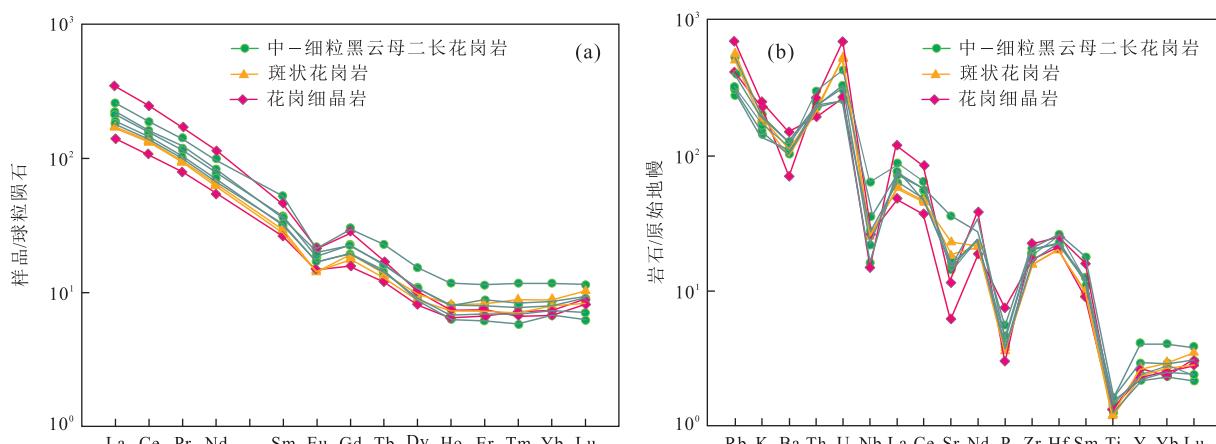
图 5 石瑶沟花岗岩 Na_2O - K_2O 和铝饱和指数Fig.5 Na_2O - K_2O and Al saturation index diagrams of Shiyaogou granites Na_2O - K_2O 据 Collins(1982); 铝饱和指数据 Maniar and Piccoli(1989)

图 6 石瑶沟钼矿花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized spider diagrams of granites from Shiyaogou Mo mine
原始地幔标准化值引自 McDonough(1992)

Taylor, 1985), 高于东秦岭花岗岩平均值 162.8×10^{-6} (张宏飞等, 1994). 随着岩浆演化, LREE 和 HREE 含量呈现增加的趋势. 岩体 HREE (介于 $8.95 \times 10^{-6} \sim 16.13 \times 10^{-6}$, 平均 11.37×10^{-6})、Y (介于 $10.02 \times 10^{-6} \sim 18.8 \times 10^{-6}$, 平均 12.57×10^{-6}) 和 Yb (介于 $1.16 \times 10^{-6} \sim 2.02 \times 10^{-6}$, 平均 1.39×10^{-6}) 含量较低, 轻重稀土分馏程度较高, LREE/HREE 比值变化于 $15.2 \sim 25.2$, 平均 17.9 ; $\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}} = 19.1 \times 10^{-6} \sim 50.5 \times 10^{-6}$, 平均值为 26.3×10^{-6} . 在球粒陨石标准化稀土元素分配模式图(图 6a)上, 所测岩石样品曲线相似近于平行, 总体表现为轻稀土富集、左陡右平的右倾斜型. δEu 变化范围为 $0.53 \sim 0.71$, 平均 0.62 , 具中等一弱的负 Eu 异常, 反映轻重稀土元素内部分馏情况的 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 平均值为 5.93 , 变化范围为 $4.92 \sim 7.43$, 而

$(\text{Gd}/\text{Lu})_{\text{N}}$ 比值平均为 2.52 , 变化于 $1.75 \sim 3.55$. δCe 变化范围 $0.94 \sim 1.01$, 平均 0.98 , 基本无异常.

4.3 Sr-Nd 同位素

石瑶沟隐伏花岗岩 5 件样品全岩 Sr-Nd 同位素分析结果(表 4)显示, $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 变化于 $44.1 \sim 134.9$. 按照 LA-ICP-MS 年代学测试结果, 进行同位素参数计算, 并对放射性成因 Sr 扣除后, 得到石瑶沟花岗岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值介于 $0.707445 \sim 0.713838$, 显示其为地壳来源的特征. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始比值较高 ($0.511855 \sim 0.511883$), $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值介于 $-12.96 \sim -13.46$, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值均为负值 ($-0.47 \sim -0.58$), 与太古宙后大陆地壳 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 平均值 (-0.4) (Mc Lennan and Hemming, 1992) 对比偏差较大, 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

表 4 石瑶沟花岗岩全岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 4 Whole-rock Sr-Nd isotope composition of Shiyaogou granites

样品号	样品名称	Rb	Sr	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	2σ	I_{sr}	$\epsilon_{\text{Sr}}(0)$	$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$
599-58	中一细粒黑云母二长花岗岩	200	361	0.710 7	1.604 76	0.000 006	0.707 531	88.4	45.4
5507-10		180	329	0.710 6	1.583 04	0.000 006	0.707 445	86.5	44.1
519-40	斑状花岗岩		369	490	0.717 4	2.181 20	0.000 007	0.713 168	182.9
519-43			330	396	0.718 5	2.416 56	0.000 006	0.713 838	134.9
5507-8	花岗细晶岩		450	244	0.720 0	5.356 30	0.000 005	0.710 589	220.4
样品号	样品名称	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$	$f_{\text{Sm/Nd}}$
599-58	中一细粒黑云母二长花岗岩	7.97	46.60	0.103 323	0.511 883	0.000 003	-13.06	2.00	-0.47
5507-10		5.58	37.01	0.091 190	0.511 877	0.000 004	-12.96	2.00	-0.54
519-40	斑状花岗岩		4.42	30.27	0.088 269	0.511 870	0.000 004	-13.10	2.00
519-43			4.61	30.85	0.090 312	0.511 864	0.000 004	-13.26	2.01
5507-8	花岗细晶岩		7.11	52.56	0.081 762	0.511 855	0.000 002	-13.46	2.01

岩石来说,为了最大限度的减少因地壳演化阶段内 Sm-Nd 分馏对 Nd 同位素模式年龄计算值产生的影响,本文采用两阶段 Nd 同位素模式年龄计算方法,计算结果显示石瑶沟隐伏花岗岩两阶段 Nd 同位素模式年龄 T_{DM2} 为 2.00~2.01 Ga.

5 讨论

5.1 岩石类型及成因

铝饱和指数 A/CNK 通常作为划分 I 型和 S 型花岗岩的标志。石瑶沟隐伏花岗岩 A/CNK [$\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 分子比] 值 = 0.95~1.01, 低于 1.10, 具有 I 型花岗岩特征。岩体轻重稀土元素强烈分馏, 低的 Y、Yb ($\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} < 2 \times 10^{-6}$) 和 Ti 含量, 暗示岩浆存在斜长石+角闪石+石榴石+金红石相的分离结晶或在源区残留(张旗等, 2006, 2007)。由于角闪石更加富集 MREE(葛小月等, 2002; 吴福元等, 2002), 石瑶沟花岗岩体 $\text{Ho}_{\text{N}} \approx \text{Yb}_{\text{N}}$, 稀土元素配分模式图中 MREE-HREE 曲线略显上凹, 表明角闪石是重要的残留相。由于 Sr 在石榴石、角闪石和单斜辉石中分配系数很小(分别为 0.015、0.058 和 0.200)(Drummond *et al.*, 1990), 而在斜长石中分配系数很大(杨进辉等, 2003), 石瑶沟花岗岩相对贫 Sr, 在 Sr-Yb 图上(图 7), 样品点大部分投影于张旗等(2006)归纳的低 Sr 低 Yb 花岗岩区域, 所以推断岩浆同时存在斜长石的分离结晶, 导致石瑶沟花岗岩 Sr 含量低且变化较大(133.0×10^{-6} ~ 759.1×10^{-6} , 平均 371.0×10^{-6})。

石瑶沟花岗岩与马超营断裂东部合峪花岗岩基地球化学特征相似, 都具有高钾钙碱性特征, 贫 Al_2O_3 , 富 K, 轻稀土富集、重稀土亏损, 低 Sr、Y、Yb

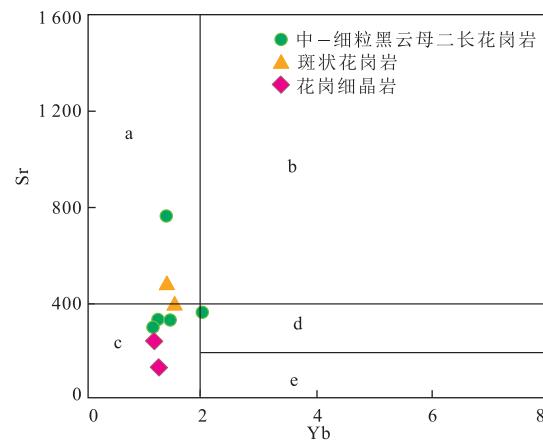


图 7 石瑶沟花岗岩 Sr-Yb 分类

Fig. 7 The classification of Shiyaogou granitoids on the basis of Sr and Yb contents

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; 据张旗等(2006)

含量, 具有明显或不明显的负 Eu 异常。高昕宇等(2010)对合峪花岗岩基年代学、岩石成因和成岩过程进行了详细研究, 合峪花岗岩基地球化学特征显示为其高钾钙碱性 I 型花岗岩, 低的 Sr、Y、Yb 含量, 弱负 Eu 异常, 暗示残留相可能由斜长石、辉石、角闪石、石榴石组成, 推断合峪花岗岩浆部分熔融压力约为 1 GPa, 形成于中等压力条件下的加厚地壳底部, 深度在 40~50 km 范围内, 为加厚基性下地壳麻粒岩相部分熔融形成。与合峪花岗岩基相比, 石瑶沟花岗岩 Yb、Y 含量稍偏高, 在 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}-\text{Yb}_{\text{N}}$ 图(图 8)上大部分投在斜长角闪岩演化线右侧, 处于经典岛弧岩石区; 在 Sr/Y-Y 的熔融曲线图(图 8)上, 大多数点投在榴闪岩部分熔融和斜长角闪岩部分熔融演化线之间, 说明石瑶沟花岗岩主要与角闪石、斜长石处于平衡, 也可能有少量石榴石残

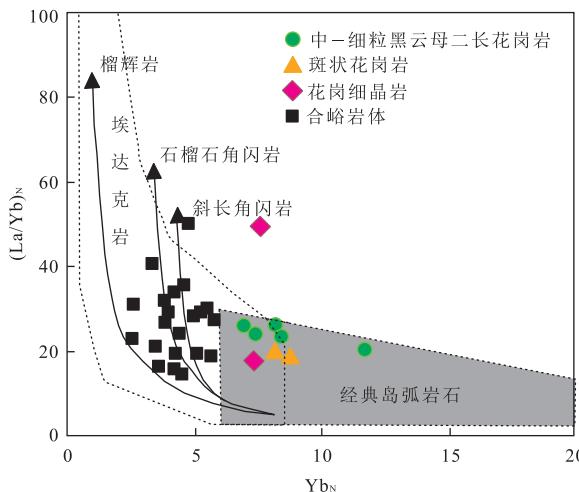
图 8 石瑶沟花岗岩 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - Yb_N 及 Sr/Y - Y 关系

Fig.8 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - Yb_N and Sr/Y - Y relationship for Shiyaogou granites
底图据 Defant and Drummond *et al.* (1990); 合峪花岗岩数据据高昕宇等(2010)

留,其岩浆形成深度比合峪花岗岩要浅.根据石瑶沟花岗岩中等一弱的负 Eu 异常,REE、Sr、Yb、Y 等元素的含量特征,通过与合峪岩体对比,推断石瑶沟花岗岩岩浆源区主要为角闪石、斜长石、辉石和部分石榴石残留,岩浆形成于加厚下地壳的中上部,深度为 30~40 km 左右,为角闪岩和部分麻粒岩发生部分熔融形成.

5.2 岩浆源区特征

石瑶沟隐伏花岗岩 3 种岩石样品具有较一致的稀土元素配分模式和微量元素分布曲线,暗示它们来自同一源区.石瑶沟花岗岩由下地壳角闪岩和麻粒岩部分熔融形成,推测其源区主要为华北陆块南缘的中一下地壳岩石.高昕宇等(2010)研究得出合峪花岗岩源区为南秦岭和扬子地块结晶基地、还混有部分熊耳群和太华群物质的结论.根据石瑶沟花岗岩 Sr-Nd 同位素特征,Nd 同位素二阶段模式年龄 T_{DM2} 为 2.00~2.01 Ga,明显低于太华群同位素年龄 2.80 Ga(周汉文等,1998),高于熊耳群同位素年龄 1.80~1.75 Ga(陈衍景等,2004; Zhao *et al.*, 2004),说明太华群或熊耳群不可能单独作为石瑶沟花岗岩的源区.较高的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始比值(0.511 855~0.511 883)和负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值、老的两阶段 Nd 模式年龄,均指示石瑶沟花岗岩主要来源于古老的地壳物质.在 Nd-Sr 同位素图解上(图 9),中细粒黑云母二长花岗岩和花岗细晶岩落到玄武岩区与陆壳源区之间的过渡源区范围,斑状花岗岩落入扬子上地壳源区范围,说明石瑶沟花岗岩主要源于地壳物质,可能有少量幔源物质的贡献.

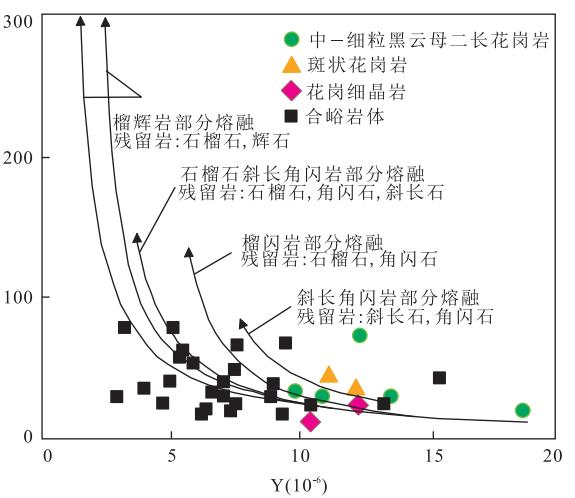


图 9 石瑶沟钼矿隐伏花岗(斑)岩 Nd-Sr 同位素组成
Fid.9 Isotopic plot of Nd-Sr for Shiyaogou granites
B源区.玄武岩源区;C源区.陆壳源区;BC源区.过渡源区;据张旗等(2008)

对比秦岭造山带不同构造块体结晶基底、盖层的 Nd 同位素组成与石瑶沟、合峪花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-11.2~-16.4)(高昕宇等,2010)演化趋势(图 10),显示石瑶沟、合峪花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 演化趋势与华北陆块南缘结晶基底太华群、熊耳群的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值相差较大,而与南秦岭及扬子地块具有较大的亲缘性.石瑶沟花岗岩与合峪岩体具有相似的 Nd 同位素组成,虽然缺少 Hf 同位素证据,但根据石瑶沟南部赤土店地区发育侵入于新元古宙栾川群南泥湖组地层中的辉长岩(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 147.5 Ma,包志伟等,2009),为同期岩浆活动相伴生的由幔源

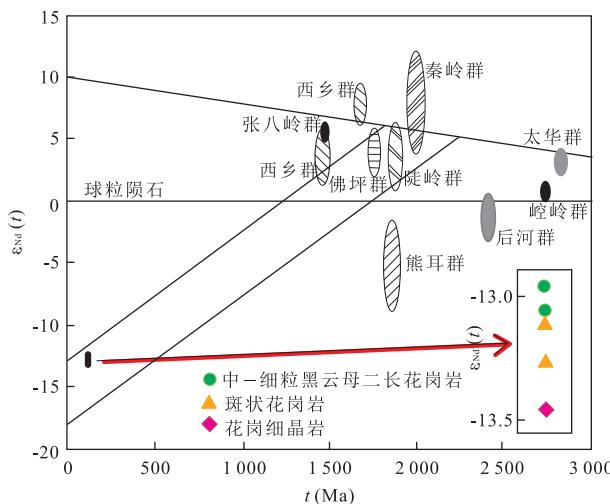


图 10 秦岭造山带构造块体结晶基底和盖层的 Nd 同位素组成

Fid.10 Nd isotopic composition of the Qinling orogenic belt
据高昕宇等(2010)

岩浆结晶分异后的基性端元(高昕宇等,2010),可以推断石瑶沟花岗岩源区主要为华北陆块南缘的中一下地壳岩石,源岩可能包括南秦岭及扬子地块结晶基地,且混有熊耳群、太华群物质。

另外,在石瑶沟隐伏花岗岩中发现的继承性锆石(图 2)表明,源区物质中除太华群结晶基底和熊耳群结晶基底外,还含有中一新元古代岩浆岩或火山岩,可能与扬子陆块新元古代强烈的构造运动有关,为扬子北缘中一新元古代火山岩和侵入岩类(高昕宇等,2010)。

5.3 构造动力学背景

Columbia 超大陆会聚之后,作为统一的大陆板块,华北克拉通在 1850~250 Ma 期间经历了陆缘裂解、增生和碰撞体制的构造作用(陈衍景等,2010),在中生代初期(245~235 Ma)发生全面的陆陆碰撞闭合。陈衍景(2010)认为秦岭地区在三叠纪(印支期)彻底实现了由海盆向大陆造山带的转变,秦岭古特提斯洋于 230~200 Ma 期间自东向西拉链式缝合,之后进入扬子陆块与华北—秦岭联合大陆之间的碰撞造山作用阶段。200~160 Ma 期间(早侏罗世—中侏罗世),南秦岭、扬子陆块逐步向华北陆块南缘下部俯冲(陆内俯冲),造成华北陆块南缘岩石圈强烈挤压缩短增厚(毛景文等,2003;石铨曾等,2004;Mao et al., 2008),至中侏罗世晚期,完成全面拼合(张国伟等,2001)。160~136 Ma(中侏罗世—早白垩世),中国东部在持续遭受南北向挤压的同时,受印支末期以来出现的特提斯—古太平洋板

块向古亚洲大陆下部消减,使中国东部构造逐步发展成为环太平洋构造一部分,开始发生区域构造体制转换(任纪舜,1991;赵越等,1994;毛景文等,2003;Mao et al., 2008),由陆内碰撞挤压机制转变为伸展构造机制。145 Ma 之后,持续的伸展作用使中国东部岩石圈开始出现拆沉减薄(高昕宇等,2010),130~110 Ma 期间快速减薄(毛景文等,2003;Mao et al., 2008)。因岩石圈减薄而形成的减压增温作用使地壳岩石发生熔融(Bird, 1978; Syverster, 1998),从而形成中国东部大规模的岩浆活动。

石瑶沟花岗岩主体结晶年龄在 140~136 Ma,对应着早白垩世华北陆块南缘岩石圈伸展减薄构造动力学背景。

6 结论

(1) 石瑶沟隐伏花岗岩主要岩性为中—细粒黑云母二长花岗岩、斑状花岗岩,局部发育花岗细晶岩,属高硅、富碱、富钾的准铝—过铝质 I 型花岗岩。

(2) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,中—细粒黑云母二长花岗岩结晶年龄为 140.46 ± 0.59 Ma, 斑状花岗岩结晶年龄为 136.53 ± 0.44 Ma, 花岗岩细晶岩结晶年龄为 123.80 ± 2.80 Ma, 石瑶沟隐伏花岗岩形成于早白垩世,且具有多期次活动特征。

(3) 结合区域构造演化和花岗岩岩石地球化学、同位素特征,本文认为石瑶沟隐伏花岗岩可能为加厚下地壳中下部受减压增温、幔源岩浆底侵等诱因发生熔融的产物,形成于华北陆块南缘岩石圈伸展减薄阶段。

致谢:在野外工作中得到黄金六支队邵志良高级工程师的大力支持;在成文过程中得到两位审稿人的细致评阅和中肯建议,在此一并表示衷心感谢。

References

- Bao, Z. W., Li, C. J., Qi, J. P., 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, E. A., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143 (5): 602—622. doi: 10.1007/

- s00410—002—0364—7
- Bird, P., 1978. Initiation of Intracontinental Subduction in the Himalayas. *J. Geophys. Res.*, 83(B10): 4975—4987. doi: 10.1029/JB083iB10p04975
- Chen Y. J., Fu S. G., 1992. Gold Mineralization in West Henan. Seismological Press, Beijing, 234 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y.J., Li C., Li Z., et al., 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 (Ser. D)*, 43(Suppl.): 82—94. doi: 10.1007/BF02911935
- Chen, Y.J., Li, J., Franco Pirajno, et al., 2004. Hydrothermal Metallogenesis Of The Shanggong Gold Deposit, East Qinling: Stud Ieson Ore Geology And Fluid Inclusion Geochemistry. *J. mineral Petrol.*, 24(3): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. J., Franco Pirajno, Qi, J. P., 2008. The Shanggong Gold Deposit, Eastern Qinling Orogen, China: Isotope Geochemistry and Implications for Ore Genesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33 (2008): 252—266. doi: 10.1016/j.jseaes.2007.12.002
- Chen, Y.J., Zhai, M.G., Jiang, S.Y., 2009. Significant Achievements and Open Issues in Study F Orogenesis and Metallogenesis Surrounding the North China Continent. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2695—2726 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y.J., 2010. Indosian Tectonic Setting, Magmatism and Metallogenesis in Qinling Orogen, Central China. *Geology in China*, 37(4): 854—865 (in Chinese with English abstract).
- Drummond, M.S., Defant, M.J., 1990. A Model for Trondhjemite-Tonalite-Dacite Genesis and Crustal Growth Via Slab Melting: Archean To Modern Comparison. *Journal of Geophysics Research*, 95(B13): 21503—21521. doi: 10.1029/JB095iB13p21503
- Fan, H.R., Xie, Y.H., Wang, Y.L., 1998. Fluid-Rock Interaction during Mineralization of the Shanggong Structure-Controlled Alteration-Type Gold Deposit in Western Henan Province, Central China. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 529—541 (in Chinese with English abstract).
- Foland, K.A., Allen, J.C., 1991. Magma Sources for Mesozoic Anorogenic Granites of the White Mountain Magma Series, New England, USA. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109 (2): 195—211. doi: 10.1007/BF00306479
- Gao, X.Y., Zhao, T.P., Yuan, Z.L., et al., 2010. Geochemistry and Petrogenesis of the Heyu Batholith in the Southern Margin of the North China Block. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3485—3506 (in Chinese with English abstract).
- Ge, X. Y., Li, X. H., Chen, Z. G., et al., 2002. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of the Yanshan High-Sr/Low-Y Intermediate Felsic Igneous Rocks from Eastern China: Constraints on Crustal Thickness of Eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 47(6): 47—480 (in Chinese).
- Hoskin, P. W. O., Ireland, T. R., 2000. Rare Earth Element Chemistry of Zircon and Its Use as A Provenance Indicator. *Geology*, 28 (7): 627—630. doi: 10.1130/0091—7613(2000)28<627:REECOZ>2.0.CO;2
- Huang, D.H., Wu, C.Y., Du, A.D., et al., 1994. Re-Os Isotope Age of Molybdenum Deposits in East Qinling and Their Significance. *Mineral Deposits*, 13 (3): 221—230 (in Chinese with English abstract).
- Jackson, S.E., Pearson, N.J., Griffin, W.L., et al., 2004. The Application of Laser Ablation Microprobe Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LAM-ICP-MS) To in Situ U-Pb Zircon Geochronology. *Chem. Geo.*, 211(1—2): 47—69. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.09.005
- Li, X.H., 1996. A Discussion on the Model and Isochron Ages of Sm-Nd Isotopic Systematic: Suitability and Limit at Ion. *Scientia Geologica Sinica*, 31(1): 97—104 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y.F., Wang, C.Q., Bai, F.J., et al., 2004. Re-Os Dating and Metallogenetic Tectonic Settings for Mo Deposits of East Qinling. *Mine and Geology*, 18 (6): 571—578 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y.F., Mao, J.W., Hu, H.B., et al., 2005. Geology, Distribution, Types and Tectonic Settings of Mesozoic Molybdenum Deposits in East Qinling Area. *Mineral Deposits*, 24(3): 292—304 (in Chinese with English abstract).
- Ludwing, K., 1999. Isoplot/Exversion 2.0: A Geochronological Tool Kit for Microsoft Excel Geochronology Center Berkeley, Special Publication.
- Lu, X. X., Luo, Z. H., Huang, F., et al., 2011. Mo Deposit Types and Mineralization Assemblage Characteristics in Qinling-Dabie Mountain Area. *Geology in China*, 38 (6): 1518—1535 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J.W., Xie, G.Q., Bierlein, F., et al., 2008. Tectonic Implications from Re-Os Dating of Mesozoic Molybdenum Deposits in the East Qinling-Dabie Orogenic Belt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 (18): 4607—4626. doi: 10.1016/j.gca.2008.06.027
- Mao, J. W., Zhang, Z. H., Yu, J. J., et al., 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)*, 33(4): 289—300 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Zhang, Z. H., et al., 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, J. W., Xie, G. Q., Pirajno, F., et al., 2010. Late Jurassic-Early Cretaceous Granitoid Magmatism in Eastern Qinling, Central-Eastern China: SHRIMP Zircon U-Pb Ages and Tectonic Implications. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57 (1): 51—78. doi: 10.1080/08120090903416203
- Mc-Lennan, S. M., Hemming, S., 1992. Samarium/Neodymium Elemental and Isotopic Systematics in Sedimentary Rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56(3): 887—898. doi: 10.1016/0016-7037(92)90034-G
- Ren, J. S., 1991. The Basic Characteristics of China Continental Lithosphere Structure. *Regional Geology of China*, 4: 289—293 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Q. Z., Wei, X. D., Li, M. L., et al., 2004. Nappe Structure and Extend Detachment Structure of the Northern Margin of the East Qin Ling Mountain, Henan Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Stein, H. J., Markey, R. J., Morgan, J. W., et al., 1997. Highly Precise and Accurate Re-Os Ages for Molybdenite from the East Qinling Molybdenum Belt, Shanxi Province, China. *Economic Geology*, 92 (7): 827—835. doi: 10.2113/gsecongeo.92.7—8.827
- Syverster, P. J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45 (1—4): 29—44. doi: 10.1016/S0024-4937(98)00024-3
- Tang, K. F., Li, J. W., 2009. Mineralization Characteristics, Metallogenetic Epoch and Ore Deposit Origin of Qianhe Gold Mine in Songxian, Henan Province. *Acta Mineralogica Sinica (Supplement)*, 72(S1): 148—149 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publication, Oxford.
- Watson, E. B., Harrison, T. M., 1983. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in A Variety of Crustal Magma Types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295—304. doi: 10.1016/0012-821X(83)90211-X
- Williams, I. S., Buick, A., Cartwright, I., 1996. An Extended Episode of Early Mesoproterozoic Metamorphic Fluid Flow in the Reynold Region, Central Australia. *Metamorphic Geol.*, 14 (14): 29—27. doi: 10.1111/j.1525-1314.1996.00029.x
- Wu, F. Y., Ge, W. C., Sun, D. Y., 2002. The Definition, Diacrimination of Adakites and Their Geological Role. In: Xiao, Q. H., Deng, J. F., Ma, D. Q. et al., Eds. *The Ways of Investigation on Granitoids*. Geological Publishing House, Beijing, 172—191 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, E., Hu, J., Zhang, Z. Z., et al., 2012. Petrogeochemistry, Zircon U-Pb Dating and Lu-Hf Isotopic Compositions of the Haoping and Jinshanmiao Granites from the Huashan Complex Batholith in Eastern Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (12): 4031—4046 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. F., Wang, Q., 2003. Tracing the Thinkening 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).
- Ye, H. S., Mao, J. W., Li, Y. F., et al., 2006. SHRIMP Zircon U-Pb and Molybdenum Re-Os dating for the Superlarge Donggou Porphyry Mo Deposit in East Qinling, China, and its Geological Implication. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1078—1088 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. L., Wu, F. Y., Gao, S., et al., 2003. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age and REE of Cenozoic Pluton in NE China. *Chinese Science Bulletin*, 48 (14): 1511—1520 (in Chinese).
- Zhang, G. W., Zhang, B. R., Yuan, X. C., et al., 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, H. F., Zhang, B. R., Ling, W. L., et al., 1997. Late Proterozoic Crustal Accretion of South Qinling: Nd Isotopic Study from Granitic Rock. *Geochimica*, 26(5): 16—23 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H. W., Zhong, Z. Q., Ling, W. L., et al., 1998. Sm-Nd Isochron for the Amphibolites with in Taihua Complex from Xiao Qinling Area, Western Henan and its Geological Implications. *Geochimica*, 27(4): 367—372 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Li, C. D., et al., 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., Pan, G. Q., Li, C. D., et al., 2007. Are Discrimination Diagrams Always Indicative of Correct Tectonic Set-

- tings of Granites? Some Crucial Questions on Granite Study(3). *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2683—2698 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. W., Zhu, B. Q., Chang, X. Y., et al., 2001. Petrogenetic-Metallogenetic Background and Time-Space Relation ship of the East Qinling Molybdenum Ore Belt, China. *Geological Journal of China Universities*, 7(3): 307—315 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y., Yang Z. Y., Ma X. H., 1994. Geotectonic Transition from Paleoasian System and Paleotethyan System To Paleopacific Active Continental Margin in Eastern Asia. *Scientia Geologica Sinica*, (2): 105—119 (in Chinese with English abstract).
- ### 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.
- 陈衍景,富士谷,1992.豫西金矿成矿规律.北京:地震出版社.
- 陈衍景,李超,张静,等,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 地球科学,30(增刊 1):64—72.
- 陈衍景,李晶,Franco Pirajno,等,2004.东秦岭上宫金矿流体成矿作用:矿床地质和包裹体研究.矿物岩石,24(3):1—12.
- 陈衍景,翟明国,蒋少涌,2009.华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题.岩石学报,25(11):2695—2726.
- 陈衍景,2010.秦岭印支期构造背景—岩浆活动及成矿作用.中国地质,37(4):854—865.
- 范宏瑞,谢奕汉,王英兰,1998.豫西上宫构造蚀变岩型金矿成矿过程中的流体—岩石反应.岩石学报,14(4):529—541.
- 高昕宇,赵太平,原振雷,等,2010.华北陆块南缘中生代合峪花岗岩的地球化学特征与成因.岩石学报,26(12):3485—3506.
- 葛小月,李献华,陈志刚,等,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.
- 黄典豪,吴澄宇,杜安道,等,1994.东秦岭地区钼矿床的铼—锇同位素年龄及其意义.矿床地质,13(3):221—230.
- 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.
- 李永峰,王春秋,白凤军,等,2004.东秦岭钼矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿动力学背景.矿产与地质,18(6):571—578.
- 李永峰,毛景文,胡华斌,等,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—304.
- 卢欣祥,罗照华,黄凡,等,2011.秦岭一大别山地区钼矿类型与矿化组合特征.中国地质,38(6):1518—1535.
- 罗铭玖,张辅民,董群英,等,1991.中国钼矿床.郑州:河南科学技术出版社.
- 毛景文,张作衡,余金杰,等,2003.华北及邻区中生代大规模成矿的地球化学背景:从金属矿床年龄预测得到启示.中国科学(D辑),33(4):289—300.
- 毛景文,谢桂青,张作衡,等,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.
- 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.
- 石铨曾,尉向东,李明立,等,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.
- 唐克非,李建威,2009.河南嵩县前河金矿矿化特征、成矿时代与矿床成因.矿物学报(增刊),136—137.
- 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.
- 肖娥,胡建,张遵忠,等,2012.东秦岭花山复式岩基中蒿坪与金山庙花岗岩体岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素组成.岩石学报,28(12):4031—4046.
- 叶会寿,毛景文,李永峰,等,2006.东秦岭东沟超大型斑岩钼矿 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—1088.
- 袁洪林,吴福元,高山,等,2003.东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析.科学通报,48(14):1511—1520.
- 张国伟,张本仁,袁学诚,等,2001.秦岭造山带与大陆动力学.北京:科学出版社.
- 周汉文,钟增球,凌文黎,等,1998.豫西小秦岭地区华杂岩斜长角闪岩 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义.地球化学,27(4):367—372.
- 张宏飞,骆庭川,李泽九,等,1994.东秦岭花岗岩类元素丰度及其地质意义.矿物岩石,14(4):1—8.张宏飞,张本仁,凌文黎,等,1997.南秦岭新元古代地壳增生事件:花岗质岩石钕模式年龄同位素示踪.地球化学,26(5):16—23.
- 张旗,王焰,李承东,等,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,潘国强,李承东,等,2007.花岗岩构造环境问题:关于花岗岩研究的思考之三.岩石学报,23(11):2683—2698.
- 张正伟,朱炳权,常向阳,等,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.
- 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,24(3):105—119.