

# 河南嵩县庙岭金矿区花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄、 岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素特征

李正远<sup>1</sup>, 叶会寿<sup>2</sup>, 曹 晶<sup>1</sup>, 张兴康<sup>1</sup>, 翟 雷<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 河南省地质矿产勘查开发局 第一地质矿产调查院, 河南 洛阳 471023)

**摘 要:** 河南嵩县庙岭金矿区地处华北陆块南缘熊耳山-外方山地区, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明, 庙岭金矿区花岗斑岩的成岩年龄为 157 Ma 左右。岩石地球化学数据显示岩石具有高硅, 富钾、铝而贫钠, 低铁、镁、钙的特征, SiO<sub>2</sub> 含量为 75.06%~77.66%, 全碱含量(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)为 7.05%~7.39%, 稀土元素总量较低, ΣREE=25.74×10<sup>-6</sup>~32.63×10<sup>-6</sup>, 轻重稀土元素分馏明显, LREE/HREE=6.74~9.53, Eu 具有中等的负异常, 微量元素富集 Rb、K、Pb 等大离子亲石元素和 Th、U, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素和 Ba、Sr。Pb 同位素分析结果显示庙岭金矿区花岗斑岩的 Pb 主要来自于下地壳, 全岩的 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub>=0.706 207~0.711 774, ε(Nd)<sub>t</sub> 值变化于 -19.0~-17.8 之间, t<sub>DM2</sub>=2.39~2.49 Ga。岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素组成特征显示庙岭金矿区花岗斑岩的源区物质主要来自于古老下地壳, 可能为太古宙太华群。

**关键词:** LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄, 岩石地球化学, Sr-Nd-Pb 同位素, 岩石成因, 庙岭金矿区

中图分类号: P588.13; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)03-0424-17

## Zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of the granite porphyry in the Miaoling gold deposit of Songxian County, Henan Province

LI Zheng-yuan<sup>1</sup>, YE Hui-shou<sup>2</sup>, CAO Jing<sup>1</sup>, ZHANG Xing-kang<sup>1</sup> and ZHAI Lei<sup>3</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. No. 1 Institute of Geological and Mineral Resources Survey of Henan, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** The Miaoling gold deposit is located in the Xiong'er-shan-Waifangshan area on the southern margin of the North China Craton. Zircon U-Pb LA-ICP-MS dating of the granite porphyry in the Miaoling gold deposit yielded an age of 157 Ma. Chemically, the granite porphyry is peraluminous and characterized by richness of silicon and alkaline, with SiO<sub>2</sub> equal to 75.06%~77.66% and Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O equal to 7.05%~7.39%, and deficiency of iron, magnesium and calcium. Its REE values are relatively low, being 25.74×10<sup>-6</sup>~32.63×10<sup>-6</sup>, and display a significant fractionation between LREES and HREES (LREE/HREE=6.74~9.53), with moderate negative anomalies of Eu (δEu=0.51~0.71). The trace elements are characterized by enrichment of large ion lithophile elements (Rb, K, Pb, and Th, U), and depletion of high-field strength elements (Nb, Ta, Ti

收稿日期: 2013-10-18; 修订日期: 2014-01-12

基金项目: 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室研究项目(ZS1308); 中国地质调查局地质调查项目(12120114035401, 1212011220869); 国家自然科学基金项目(41272104)

作者简介: 李正远(1988-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 157019112@qq.com; 通讯作者: 叶会寿(1964-), 男, 研究员, 矿床学专业, 长期从事矿床研究与资源勘查工作, E-mail: yehuishou@163.com。

and Ba, Sr). The whole rock Sr-Nd compositions of the granite porphyry have the data  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.706\ 207 \sim 0.711\ 774$  and  $\epsilon\text{Nd}(t) = -19.0 \sim -17.8$ , with Nd model ages in the range of 2.39~2.49 Ga. Plotting of lead isotopes of the granite porphyry on the  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  diagrams and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  versus  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  evolution curves show that the lead might have come from the crust source area. Geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic compositions suggest that the granite porphyry in the Miaoling gold deposit was derived from an ancient continental crust (probably the Archaean Taihua Group).

**Key words:** LA-ICP-MS zircon U-Pb age; geochemistry; Sr-Nd-Pb isotope; genesis of rocks; Miaoling gold deposit

众多研究成果表明,秦岭造山带是华北和扬子南北两大板块于印支期碰撞形成的(任纪舜,1984; Sengor,1985;李曙光等,1989;王清晨等,1989; Ames *et al.*,1993;张国伟等,1996,1997)。中生代构造岩浆事件在秦岭造山带有突出特征。近几年的 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石年代学研究表明,西秦岭地区广泛出露印支期侵入岩(孙卫东等,2000;张宏飞等,2005,2007;秦江锋等,2005;张成立等,2008;Wang *et al.*,2013),而东秦岭则主要出露燕山期侵入岩(叶会寿等,2006,2008;朱赖民等,2008;郭波等,2009;Mao *et al.*,2010;丁丽雪等,2010;王晓霞等,2011)。王晓霞等(2011)总结了秦岭地区的晚中生代年代学研究成果,把岩浆演化分为 160~130 Ma 和 120~100 Ma 两个阶段,期间形成的花岗岩主要出露于华北地块南缘和北秦岭地区。

华北陆块南缘的熊耳山-外方山地区广泛出露晚中生代侵入岩,侵入时代主要为晚侏罗世和早白垩世,表现为大面积出露的中酸性大岩基(如熊耳山地区的花山岩体、五丈山岩体等,外方山地区的合峪岩体、太山庙岩体等)及众多的小岩株(如雷门沟花岗岩、蒿坪沟花岗岩)(李永峰,2005)。该区侵入岩由于具巨大的成矿潜力及重要的构造背景而被国内外地质工作者广泛关注,研究工作取得了重要进展(李永峰等,2005;毛景文等,2005;叶会寿等,2006;Mao *et al.*,2008,2010,2011;王晓霞等,2011)。但是庙岭金矿区存在的花岗斑岩脉的岩石学及地球化学特征、成矿时代,其形成的大地构造环境及其与金矿成矿作用之间的关系以及其是否是成矿地质体,一直未查明。本文对庙岭金矿区的花岗斑岩开展了岩石学、地球化学、年代学及 Sr-Nd-Pb 同位素组成等研究,试图查明花岗斑岩的成因、形成构造环境及其与成矿的关系。

## 1 区域地质背景

华北板块南缘的熊耳山-外方山地区(图1)是秦岭造山带的北部边缘组成部分,区域构造线方向以近东西向为主,叠加了北东向构造。该区地层具有克拉通结晶基底和盖层的双层结构。结晶基底为新太古代花岗岩-绿岩,花岗岩由花岗质片麻岩系组成,绿岩由长英质片麻岩、硅线石榴片麻岩、石墨片麻岩、石英岩和斜长角闪岩等组成(叶会寿,2006)。盖层为中元古界长城系熊耳群火山岩系以及少量的官道口群滨海相陆源碎屑岩-镁质碳酸盐岩。该区断裂构造主要有近东西向马超营区域性断裂带,北东向旧县断裂、前河断裂、瑶沟断裂、红庄-焦园断裂以及由马超营断裂带引起的南北向次级断裂(胡正国等,1994a,1994b;王志光等,1997;张进江等,1998)。该区岩浆岩主要为新太古代中基性火山岩和花岗岩,中元古代熊耳期火山岩,三叠纪磨沟正长岩体,晚侏罗世五丈山花岗岩基,早白垩世花山花岗岩基、合峪花岗岩基、蒿坪沟花岗斑岩、雷门沟花岗斑岩及祁雨沟隐爆角砾岩体。张国伟等(1996)认为,该区主要经历了3期构造演化阶段:新太古代—古元古代前寒武纪结晶基底的形成演化阶段、新元古代—中三叠世以现代板块构造体制为基本特征的板块构造演化阶段和中新生代陆内造山作用与构造演化阶段。

## 2 岩相学特征

庙岭金矿区花岗斑岩脉侵位于中元古界熊耳群火山岩中(图2)。岩石呈灰白色,块状构造,斑状结构(图3b),斑晶含量约为20%~25%,主要为钾长石、石英和斜长石。其中钾长石(图3d、3f)呈自形—

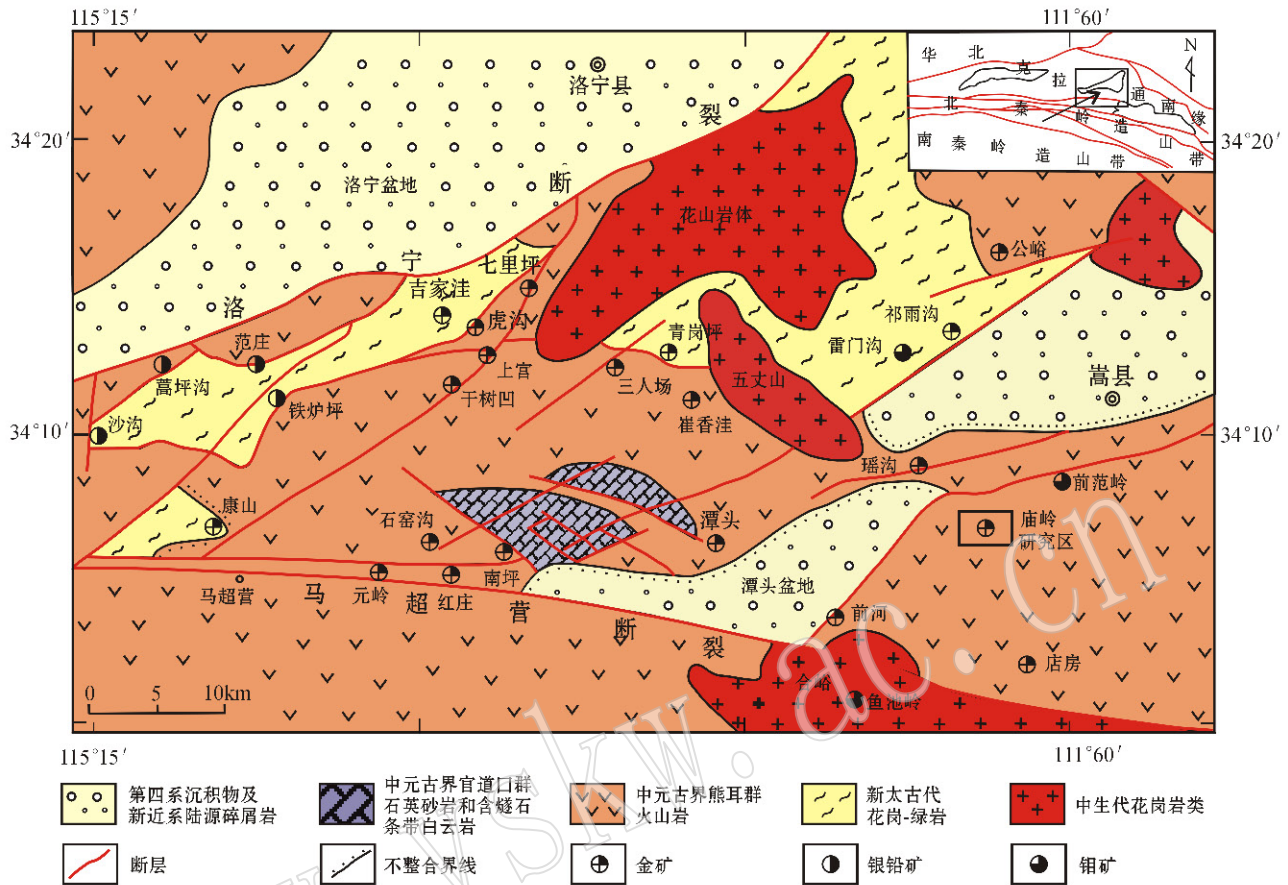


图 1 熊耳山-外方山地区区域地质简图(据程雷等, 2012)

Fig. 1 Sketch geological map of Xiong'er Mountain-Waifangshan area (modified after Zhai Lei *et al.*, 2012)

半自形板状, 粒径多为 1~3 mm, 最大可达 5 mm, 含量为 10%~15%, 表面有泥化; 石英(图 3c)多呈半自形-他形粒状, 部分石英颗粒被熔蚀, 呈港湾状, 粒径为 1~2 mm, 具波状消光, 含量 5%~10%; 斜长石呈自形-半自形板状、长柱状, 粒径较钾长石大, 多在 2~4 mm 之间, 最大者可达 6 mm, 含量为 3%~7%。基质主要为钾长石、斜长石、石英及少量黑云母(图 3e), 副矿物有磷灰石、磁铁矿、锆石等。

### 3 样品采集与分析方法

用于定年的样品分别采自庙岭金矿区西部白家凹地表出露的花岗斑岩脉(采样位置: N34°01'08", E111°54'24")及第 29 勘探线 ZK2913 中孔深 60 m 处岩心。锆石 U-Pb 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室的四级杆 ICP-MSE-lan6100DRC 进行测定。激光剥蚀系统为德国 Lambda Physik 公司生产的 Geolas 200M 深紫外(DUV)

193 nm ArF 准分子(excimer) 激光剥蚀系统, 分析所采用的激光束直径为 30  $\mu\text{m}$ , 剥蚀深度为 20~40  $\mu\text{m}$ 。实验中采用 He 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 NIST610 进行仪器最佳化调试。锆石年龄采用标准锆石 91500 作为外部标准物质, 元素含量采用 NIST610 作为外标。测试结果通过 Glitter 软件计算得出, 获得的数据采用 Andersen(2002)的方法进行同位素比值的校正, 并采用 Isoplot3.23v 进行最终的年龄计算和图表的绘制, 分析点的同位素比值和同位素年龄的误差(标准偏差)为 1 $\sigma$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄按 95% 的置信度给出, 详细分析参见文献(Yuan *et al.*, 2004)。

9 件样品用于岩石地球化学测试, 其中 2 件(BJA-B1、BJA-B2)采自白家凹出露于地表的花岗斑岩脉, 其余 7 件样品采自 ZK2913 中的岩心。样品经无污染破碎、磨碎(200 目以下)制成分析样品。主量元素、微量及稀土元素分析测试工作在中国地质科

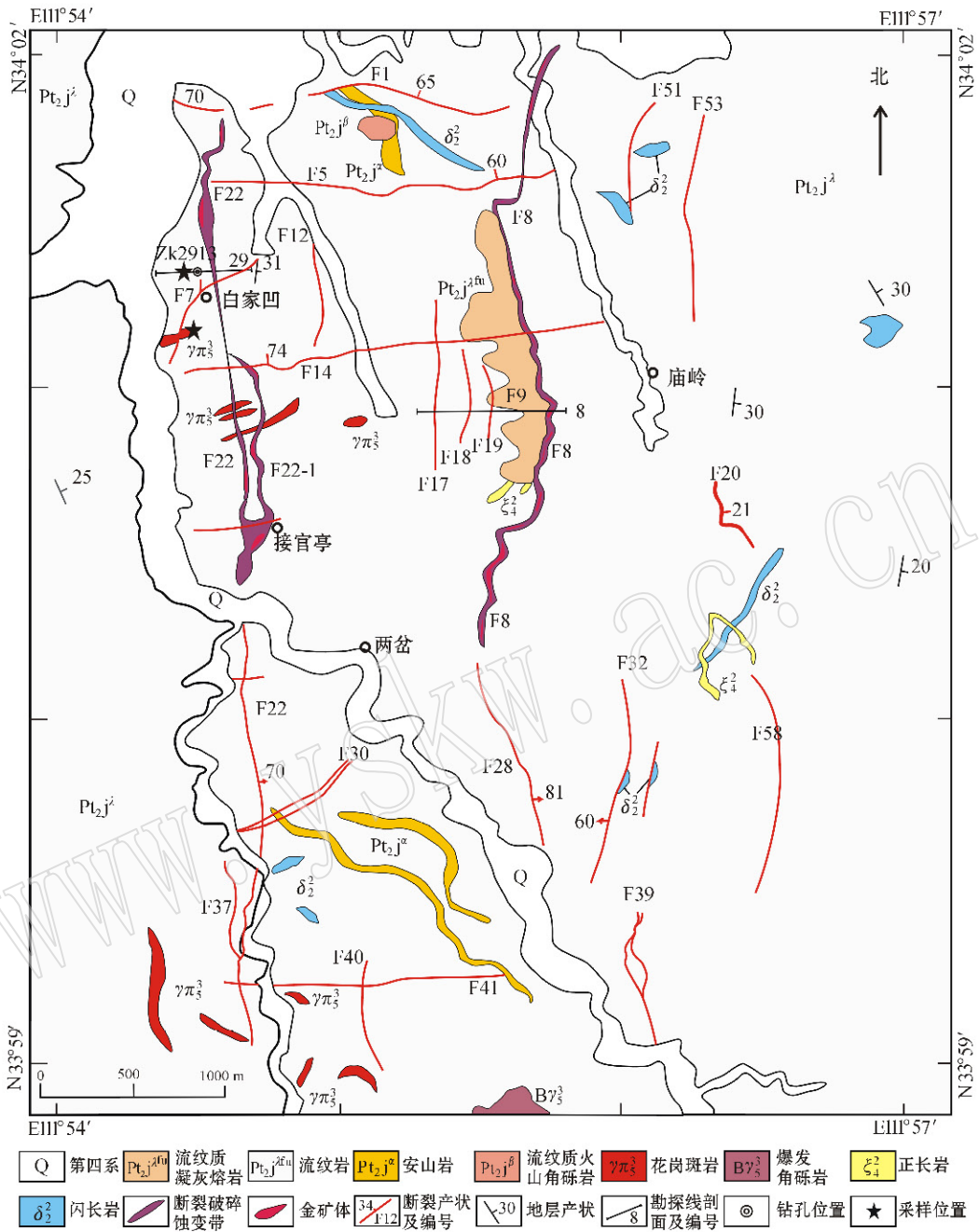


图2 庙岭金矿区地质简图[据翟雷等(2012) 略改]

Fig. 2 Sketch geological map of the Miaoling gold deposit (modified after Zhai Lei et al., 2012)

学院国家地质测试中心完成, 主量元素采用 X 射线荧光光谱法(XRF)完成, 精度优于 1%, 稀土和微量元素采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行分析, 精度优于 5%, 少数含量极少( $<10^{-8}$ )的元素分析精度优于 10%。

5 件岩心全岩分析粉末样的 Sr、Nd、Pb 同位素

测试工作在中国科学院壳幔物质与环境重点实验室进行。试验仪器为德国 Finnigan 公司生产, 型号为 MAT-262 的热电离质谱仪(TIMs)。Sr、Nd 同位素比值分别以  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$  和  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  为标准进行校正, Pb 同位素精度优于 0.02%。详细实验过程可参考(Shang et al., 2004)。



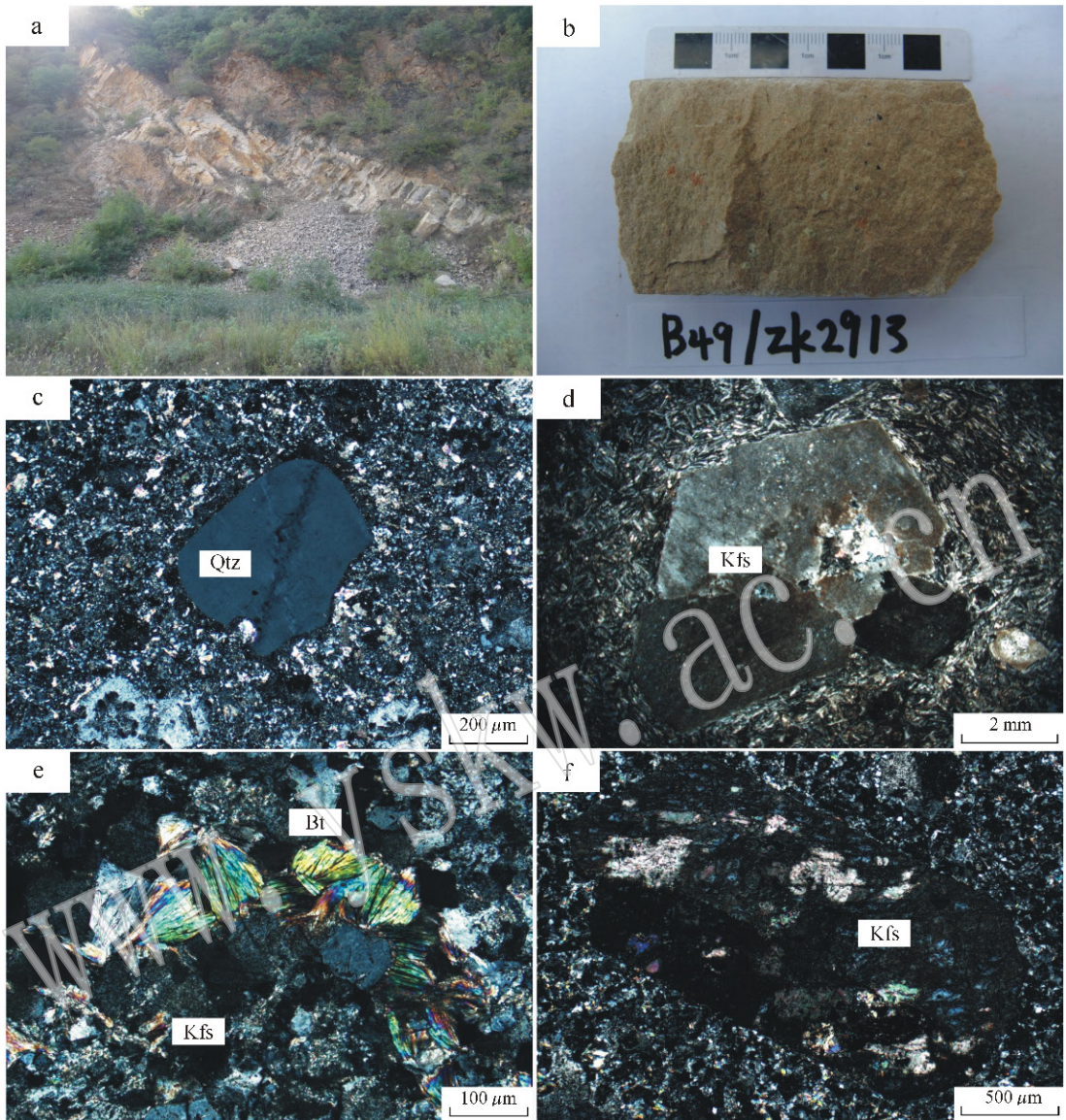


图3 庙岭金矿区花岗斑岩野外地质、手标本及岩相学特征照片

Fig. 3 Petrography and mineralogy of granite porphyry in the Miaoling gold deposit

a—花岗斑岩野外露头; b—花岗斑岩岩心样品; c—花岗斑岩中的石英斑晶(正交偏光); d—花岗斑岩中的钾长石斑晶(正交偏光);

e—花岗斑岩中的钾长石和黑云母(正交偏光); f—花岗斑岩中的钾长石斑晶(正交偏光); Qtz—石英; Kfs—钾长石; Bt—黑云母

a—field outcrop of granite porphyry; b—drilling core sample of granite porphyry; c—quartz in granite porphyry, crossed nicols; d—feldspar in granite porphyry, crossed nicols; e—feldspar and biotite in granite porphyry, crossed nicols; f—feldspar in granite porphyry, crossed nicols; Qtz—quartz; Kfs—potash feldspar; Bt—biotite

## 4 分析结果

### 4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

#### 4.1.1 锆石特征

庙岭金矿区花岗斑岩的锆石颜色较暗,自形程度较高,但部分锆石破碎严重,晶体呈短至长柱状,

长 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ ,宽 $50\sim 100\ \mu\text{m}$ ,长宽比为 $2:1\sim 4:1$ 。阴极发光(CL)图像(图4)显示,锆石晶形完好,具有明显的震荡韵律环带,表现为岩浆锆石的特征。锆石中U的含量为 $(124\sim 7\ 771)\times 10^{-6}$ ,Th含量为 $(69\sim 3\ 039)\times 10^{-6}$ ,Th/U比值为 $0.28\sim 1.7$ ,平均 $0.55$ ,大于 $0.4$ 。以上特征表明这些锆石均为岩浆锆石。

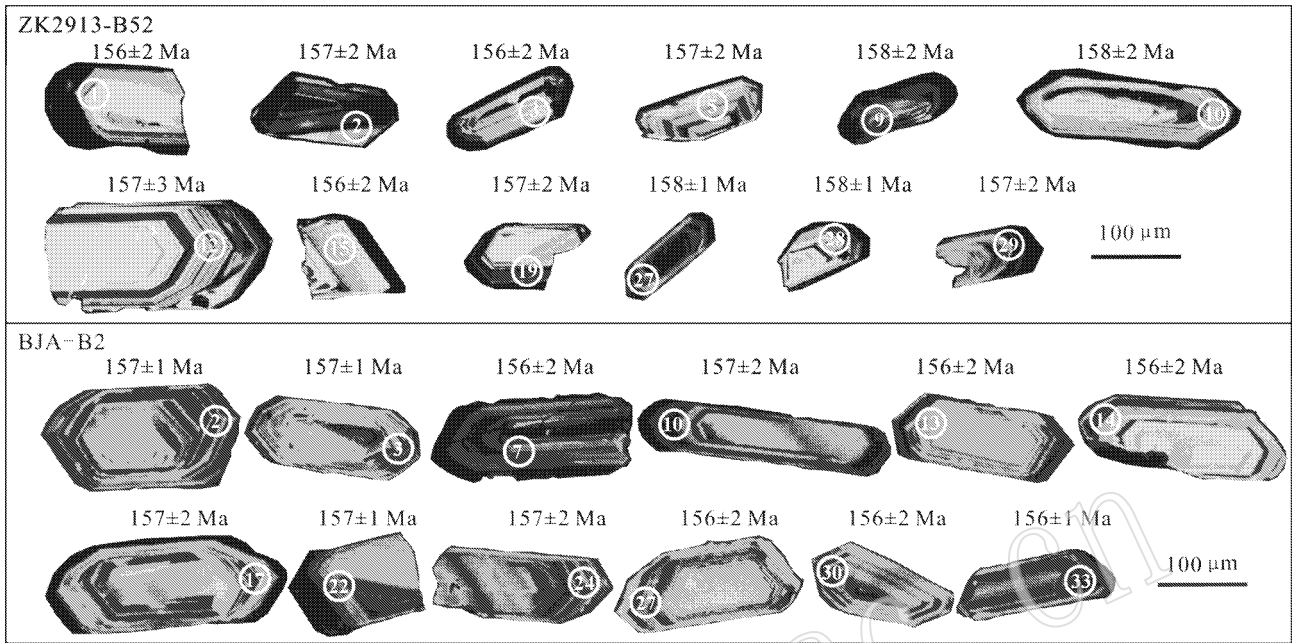


图 4 庙岭金矿区花岗斑岩锆石阴极发光图像

Fig. 4 Zircon CL images of granite porphyry in the Miaoling gold deposit

4.1.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析结果见表 1。用于 U-Pb 测年的 ZK2913-B52 样品中所测 30 个分析点,有 9 个点可能存在 Pb 丢失,谐和度较低,在谐和年龄和加权平均年龄计算中将舍弃这些点。剩余 21 个锆石年龄数据比较集中,均落在谐和线上或附近(图 5a),得到的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄加权平均值为 157 ± 2 Ma (2σ)。样品 BJA-B2 中所测 35 个点中有 10

个点出现不同程度沿不同方向偏离谐和线的情况,剩余 25 个点计算获得<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为 157 ± 1 Ma (2σ)(图 5b)。两个样品的测年结果说明庙岭金矿区花岗斑岩的形成年龄在 157 Ma 左右。

4.2 主量元素

庙岭金矿区花岗斑岩的主量元素分析结果列于表 2,以此为基础运用 Geokit 软件(路远发,2004)对数据进行了 CIPW 标准矿物计算(表 3)。标准矿物

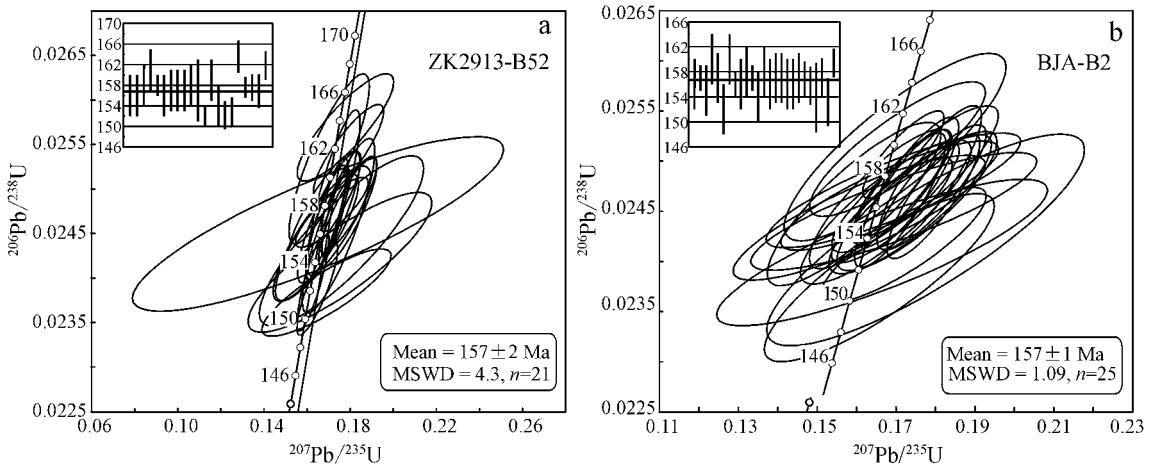


图 5 庙岭金矿区花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram of granite porphyry in the Miaoling gold deposit

表 1 庙岭金矿区花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of granite porphyry in the Miaoling gold deposit

样品点	$w_{\text{Pb}}/10^{-6}$			Th/U	同位素比值			同位素年龄/Ma		
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
样品 ZK2913-B52										
1	96	812	1 536	0.53	0.049 4 ± 0.002 8	0.166 87 ± 0.009 23	0.024 5 ± 0.000 31	167 ± 130	157 ± 8	156 ± 2
2	44	318	931	0.34	0.053 08 ± 0.002 63	0.174 56 ± 0.006 86	0.024 59 ± 0.000 4	332 ± 60	163 ± 6	157 ± 2
4	73	371	1 042	0.36	0.052 27 ± 0.004 7	0.176 01 ± 0.015 57	0.024 42 ± 0.000 39	297 ± 206	165 ± 13	156 ± 2
5	164	1 367	3 428	0.40	0.049 74 ± 0.001 16	0.169 26 ± 0.004 02	0.024 66 ± 0.000 28	183 ± 35	159 ± 3	157 ± 2
9	50	489	859	0.57	0.049 27 ± 0.002 11	0.168 03 ± 0.006 93	0.024 79 ± 0.000 26	161 ± 77	158 ± 6	158 ± 2
10	71	650	1 221	0.53	0.052 73 ± 0.001 68	0.178 87 ± 0.005 51	0.024 74 ± 0.000 25	317 ± 51	167 ± 5	158 ± 2
12	274	1 461	2 252	0.65	0.048 67 ± 0.010 39	0.165 12 ± 0.035 16	0.024 61 ± 0.000 4	132 ± 381	155 ± 31	157 ± 3
13	109	739	2 115	0.35	0.048 74 ± 0.002 3	0.170 26 ± 0.007 61	0.025 34 ± 0.000 39	135 ± 108	160 ± 7	161 ± 2
14	183	1 416	3 903	0.36	0.052 29 ± 0.001 67	0.178 99 ± 0.005 48	0.024 83 ± 0.000 22	298 ± 74	167 ± 5	158 ± 1
15	67	606	1 164	0.52	0.048 81 ± 0.002 41	0.164 57 ± 0.007 9	0.024 46 ± 0.000 29	139 ± 113	155 ± 7	156 ± 2
18	427	3 039	7 771	0.39	0.051 42 ± 0.003 75	0.169 03 ± 0.012 24	0.023 84 ± 0.000 2	260 ± 167	159 ± 11	152 ± 1
19	75	780	1 303	0.60	0.050 07 ± 0.001 73	0.170 11 ± 0.005 9	0.024 68 ± 0.000 3	198 ± 58	160 ± 5	157 ± 2
20	90	634	2 044	0.31	0.059 51 ± 0.009 14	0.172 32 ± 0.005 01	0.024 96 ± 0.000 38	586 ± 37	161 ± 4	159 ± 2
21	160	1 206	3 117	0.39	0.052 55 ± 0.005 27	0.175 23 ± 0.017 41	0.024 18 ± 0.000 32	310 ± 229	164 ± 15	154 ± 2
24	219	2 085	1 628	1.28	0.049 89 ± 0.000 99	0.164 74 ± 0.003 89	0.023 89 ± 0.000 21	191 ± 46	155 ± 3	152 ± 1
25	199	1 265	1 586	0.80	0.049 16 ± 0.000 67	0.162 68 ± 0.003 06	0.023 97 ± 0.000 23	154 ± 31	153 ± 3	153 ± 1
26	114	724	937	0.77	0.049 60 ± 0.002 31	0.177 79 ± 0.009 13	0.025 69 ± 0.000 25	176 ± 109	166 ± 8	164 ± 2
27	37	242	393	0.62	0.050 16 ± 0.001 97	0.171 47 ± 0.006 88	0.024 74 ± 0.000 16	211 ± 95	161 ± 6	158 ± 1
28	246	1 563	736	0.90	0.050 81 ± 0.000 74	0.173 20 ± 0.002 59	0.024 74 ± 0.000 21	232 ± 33	162 ± 2	158 ± 1
29	54	273	362	0.75	0.049 85 ± 0.001 16	0.168 95 ± 0.003 81	0.024 63 ± 0.000 26	187 ± 56	159 ± 3	157 ± 2
30	151	583	1 095	0.53	0.050 77 ± 0.001 73	0.179 22 ± 0.006 66	0.025 42 ± 0.000 22	232 ± 78	167 ± 6	162 ± 1
样品 BJ/A-B2										
2	127	1 418	1 481	0.96	0.050 79 ± 0.001 53	0.172 78 ± 0.005 23	0.024 7 ± 0.000 24	231 ± 52	162 ± 5	157 ± 1
3	30	245	538	0.45	0.050 42 ± 0.002 04	0.171 04 ± 0.006 73	0.024 6 ± 0.000 23	214 ± 96	160 ± 6	157 ± 1
4	34	214	570	0.38	0.052 06 ± 0.002 68	0.173 07 ± 0.008 75	0.024 11 ± 0.000 24	288 ± 121	162 ± 8	154 ± 2
5	66	382	1 234	0.31	0.048 09 ± 0.003 99	0.161 7 ± 0.013 31	0.024 39 ± 0.000 26	104 ± 187	152 ± 12	155 ± 2
7	14	100	293	0.34	0.052 15 ± 0.002 58	0.176 58 ± 0.008 47	0.024 56 ± 0.000 29	292 ± 116	165 ± 7	156 ± 2
8	37	255	737	0.35	0.049 59 ± 0.002 74	0.171 56 ± 0.009 27	0.025 09 ± 0.000 28	176 ± 126	161 ± 8	160 ± 2
9	118	967	2 262	0.43	0.053 56 ± 0.001 55	0.180 85 ± 0.004 9	0.024 61 ± 0.000 26	353 ± 42	169 ± 4	157 ± 2
10	17	124	133	0.37	0.049 27 ± 0.002 27	0.166 98 ± 0.007 43	0.024 58 ± 0.000 29	161 ± 107	157 ± 6	157 ± 2
12	18	118	418	0.28	0.053 27 ± 0.001 77	0.180 4 ± 0.005 75	0.024 7 ± 0.000 26	340 ± 53	168 ± 5	157 ± 2
13	66	442	873	0.51	0.047 41 ± 0.002 79	0.160 34 ± 0.009 16	0.024 53 ± 0.000 34	70 ± 130	151 ± 8	156 ± 2
14	25	213	404	0.53	0.049 99 ± 0.002 74	0.1685 4 ± 0.009 02	0.024 45 ± 0.000 3	194 ± 127	158 ± 8	156 ± 2
16	96	619	1 270	0.49	0.050 89 ± 0.003 78	0.166 87 ± 0.012 14	0.023 78 ± 0.000 35	236 ± 170	157 ± 11	152 ± 2
17	19	130	415	0.31	0.051 55 ± 0.001 59	0.174 73 ± 0.005 16	0.024 73 ± 0.000 28	266 ± 47	164 ± 4	157 ± 2
18	17	135	348	0.39	0.052 95 ± 0.002 5	0.179 06 ± 0.007 58	0.024 87 ± 0.000 27	327 ± 76	167 ± 7	158 ± 2
21	45	91	512	0.96	0.052 71 ± 0.001 55	0.179 76 ± 0.005 52	0.024 8 ± 0.000 3	316 ± 48	168 ± 5	158 ± 2
22	16	97	130	0.74	0.049 53 ± 0.003 19	0.169 55 ± 0.011 5	0.024 61 ± 0.000 23	172 ± 150	159 ± 10	157 ± 1
23	57	443	673	0.66	0.056 2 ± 0.004 9	0.178 84 ± 0.016 78	0.024 16 ± 0.000 44	461 ± 194	167 ± 14	154 ± 3
24	26	206	307	0.67	0.048 79 ± 0.003 33	0.170 49 ± 0.013 44	0.024 67 ± 0.000 24	200 ± 100	160 ± 12	157 ± 2
26	38	406	238	1.70	0.049 63 ± 0.004 99	0.167 61 ± 0.017 47	0.024 04 ± 0.000 3	176 ± 222	157 ± 15	153 ± 2
27	61	488	1 082	0.45	0.051 69 ± 0.002 61	0.174 85 ± 0.008 59	0.024 53 ± 0.000 29	272 ± 119	164 ± 7	156 ± 2
28	25	175	454	0.39	0.049 37 ± 0.003 47	0.170 94 ± 0.011 71	0.025 11 ± 0.000 39	165 ± 160	160 ± 10	160 ± 2
30	16	69	124	0.56	0.049 99 ± 0.004 3	0.170 61 ± 0.015 1	0.024 45 ± 0.000 24	195 ± 189	160 ± 13	156 ± 2
32	36	275	478	0.58	0.050 15 ± 0.001 18	0.173 06 ± 0.004 30	0.025 03 ± 0.000 18	211 ± 54	162 ± 4	159 ± 1
33	91	569	1 874	0.30	0.050 42 ± 0.001 95	0.170 1 ± 0.006 39	0.024 47 ± 0.000 22	214 ± 92	160 ± 6	156 ± 1
34	126	983	2 295	0.43	0.050 93 ± 0.001 46	0.172 26 ± 0.004 81	0.024 57 ± 0.000 28	238 ± 43	161 ± 4	156 ± 2

中含有刚玉(C)。岩石具有高硅、富碱、高钾的特征。 $\text{SiO}_2$  含量为 75.06% ~ 77.66%, 显著高于世界花岗岩的平均值 69.26% ~ 71.63% (Le Maitre, 1976);  $\text{K}_2\text{O}$  的含量为 6.95% ~ 7.27%,  $\text{Na}_2\text{O}$  的含量为

0.10% ~ 0.15%, 全碱含量( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ )为 7.05% ~ 7.39%;  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  的比值远大于 1, 明显地高于国内及世界同类岩石平均值(Le Maitre, 1976; 黎彤等, 1998), 显示了富碱高钾的特征。庙岭金矿区花

表 2 庙岭金矿区花岗斑岩主量元素( $w_B/\%$ )、微量和稀土元素( $w_B/10^{-6}$ )分析结果Table 2 Major( $w_B/\%$ ) and trace elements( $w_B/10^{-6}$ ) analyses of granite porphyry in the Miaoling gold deposit

样品	BJA-B1	BJA-B2	B49/ZK2913	B51/ZK2913	B52/ZK2913	B53/ZK2913	B53-1/ZK2913	B27/ZK2913	B25/ZK2913
SiO <sub>2</sub>	77.66	77.43	76.53	75.06	76.00	75.59	75.61	75.48	75.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.23	13.25	13.20	12.90	12.99	12.61	12.57	13.05	13.41
CaO	0.07	0.1	0.11	1.17	0.66	1.11	1.13	1.3	0.82
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.53	0.5	0.49	0.49	0.61	0.57	0.54	0.45	0.45
FeO	0.23	0.21	0.2	0.31	0.23	0.29	0.29	0.27	0.27
K <sub>2</sub> O	7.18	7.27	7.22	6.95	7.13	7.01	7.01	7	7.03
MgO	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12	0.16	0.18	0.12	0.15
MnO	0.04	0.02	0.02	0.06	0.03	0.05	0.05	0.07	0.05
Na <sub>2</sub> O	0.11	0.12	0.12	0.1	0.1	0.1	0.15	0.13	0.13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.05	0.06	0.05	0.06	0.04	0.05	0.06	0.07
LOI	1.27	1.3	2.41	2.15	1.69	2.03	2.03	2.23	1.91
TOTAL	100.51	100.38	100.48	99.37	99.63	99.57	99.62	100.17	99.37
$\delta$	1.53	1.59	1.61	1.55	1.58	1.55	1.57	1.57	1.60
FeO <sup>T</sup>	0.71	0.66	0.64	0.75	0.78	0.80	0.78	0.67	0.67
FeO <sup>T</sup> /MgO	6.43	5.50	5.83	6.26	6.49	5.02	4.31	5.62	4.50
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	7.29	7.39	7.34	7.05	7.23	7.11	7.16	7.13	7.16
A/CNK	1.63	1.60	1.60	1.31	1.43	1.29	1.27	1.28	1.44
DI	93.24	93.30	93.24	89.48	91.32	89.93	89.97	89.16	90.28
Sc	0.61	0.68	0.59	0.67	0.63	0.73	0.75	0.73	0.69
V	1.38	1.14	1.25	1.07	1.12	1.1	1.14	1.26	1.17
Cr	1.38	4.11	2.09	1.35	3.14	1.39	1.7	1.28	2.37
Co	0.18	0.21	0.23	0.3	0.28	0.32	0.33	0.23	0.26
Ni	0.59	2.21	1.71	1.18	3.09	1.17	1.35	1.26	1.39
Cu	28.9	11.4	1.89	35.5	6.31	16.8	10.6	1.88	5.78
Zn	279	249	203	322	268	303	290	201	305
Ga	19.6	18.3	18.5	18.5	19.1	19.6	18.9	18.8	19.7
Rb	13	301	314	306	301	300	292	330	338
Sr	5.48	10.1	41.5	37.1	17.9	24.4	31.7	35.5	30.7
Y	7.24	5.58	6.06	6.01	4.97	5.97	5.76	5.7	5.71
Zr	73.3	70.3	70.5	75.2	68.4	70.1	69.4	68.2	77
Nb	13.8	12.3	12.8	14.4	12.8	14.8	14.7	12.2	13.5
Mo	0.8	0.1	0.22	1.5	0.06	0.64	0.3	0.07	0.19
Cs	2.03	2.29	3.3	2.25	2.35	2.72	2.58	2.95	3.04
Ba	86.1	75.2	102	110	98.2	100	95.1	112	123
La	9.14	9.7	8.12	7.58	6.86	6.35	7.77	7.51	8.03
Ce	10.1	12.8	11.7	12.8	12.2	10.7	13.5	11.5	13.5
Pr	1.58	1.53	1.33	1.28	1.17	1.11	1.34	1.23	1.29
Nd	5.18	4.8	4.04	3.89	3.41	3.59	3.97	3.86	3.9
Sm	0.79	0.59	0.61	0.6	0.5	0.59	0.55	0.55	0.56
Eu	0.17	0.11	0.13	0.13	0.08	0.12	0.11	0.12	0.11
Gd	0.74	0.49	0.51	0.52	0.43	0.47	0.48	0.46	0.47
Tb	0.12	0.08	0.09	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08
Dy	0.8	0.56	0.6	0.61	0.51	0.59	0.58	0.56	0.54
Ho	0.19	0.15	0.15	0.15	0.13	0.15	0.14	0.14	0.14
Er	0.7	0.57	0.58	0.6	0.52	0.6	0.57	0.57	0.55
Tm	0.13	0.11	0.11	0.12	0.1	0.13	0.11	0.11	0.11
Yb	1.11	0.95	0.98	1	0.88	1.06	0.98	0.97	0.94
Lu	0.21	0.19	0.2	0.21	0.18	0.2	0.19	0.19	0.19
Hf	3.76	3.5	3.57	3.7	3.53	3.66	3.45	3.44	3.64
Ta	0.48	0.44	0.45	0.46	0.42	0.46	0.44	0.45	0.45
Pb	260	340	96.9	807	108	377	313	100	149
Th	11.6	11.4	10.8	11.1	11.1	11	10.3	10.4	11.4
U	2.19	2.68	3.57	6.51	1.97	2.23	2.5	3.35	5.22
ΣREE	30.96	32.63	29.15	29.57	27.04	25.74	30.37	27.84	30.41
LREE	26.96	29.53	25.93	26.28	24.22	22.46	27.24	24.77	27.39
HREE	4	3.1	3.22	3.29	2.82	3.28	3.13	3.07	3.02
(La/Yb) <sub>N</sub>	5.91	7.32	5.94	5.44	5.59	4.30	5.69	5.55	6.13
(La/Sm) <sub>N</sub>	7.47	10.61	8.59	8.16	8.86	6.95	9.12	8.81	9.26
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	0.55	0.43	0.43	0.43	0.40	0.37	0.41	0.39	0.41
δEu	0.67	0.61	0.69	0.69	0.51	0.67	0.64	0.71	0.64
δCe	0.60	0.73	0.79	0.92	0.97	0.91	0.94	0.84	0.93

注: A/CNK=(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/(CaO+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)摩尔分数比;里特曼指数 δ=(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>/(SiO<sub>2</sub>-43),球粒陨石、原始地幔数据来自 Sun 和 McDonough(1989)。



花岗斑岩的分异指数  $DI = 89.16 \sim 93.30$ , 平均为 91.10。花岗斑岩里特曼指数为 1.53~1.61, 属亚碱性系列。 $Al_2O_3$  的含量为 12.57%~13.41%, 铝饱和指数  $A/CNK$  介于 1.27~1.63。岩石显示异常的高钾低钠及过铝质的特征, 可能是产于矿区的岩脉受到晚期蚀变的影响, 这也引起了一系列的地球化学判别指标失灵, 因此在运用这些指标判别岩石的属性时还需要结合其他证据来讨论。

#### 4.3 稀土元素和微量元素

庙岭金矿区花岗斑岩的微量、稀土元素分析结果见表 2。从表中可以看出岩石的稀土元素总量较低,  $\Sigma REE$  为  $25.74 \times 10^{-6} \sim 32.63 \times 10^{-6}$ , 均低于国

内 S 型花岗岩稀土元素总量 ( $173.14 \times 10^{-6}$ ); 稀土元素配分图显示, 花岗斑岩轻、重稀土元素相对富集, 中稀土元素亏损, 具两端高、中间下凹的“V”字型模式(图 6a)。 $LREE/HREE = 6.74 \sim 9.53$ , 轻重稀土元素分馏明显 ( $La/Sm$ )<sub>N</sub> = 6.95~10.61, 轻稀土元素分馏程度高, 但  $(Gd/Yb)$ <sub>N</sub> = 0.37~0.55, 重稀土元素未显示分馏。Eu 呈中等的负异常,  $\delta Eu$  值为 0.51~0.71。

庙岭金矿区花岗斑岩的微量元素分析结果显示岩石富集 Rb、K、Pb 等大离子亲石元素和 Th、U, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素和 Ba、Sr, 显示典型弧岩浆岩的特征(图 6b)。

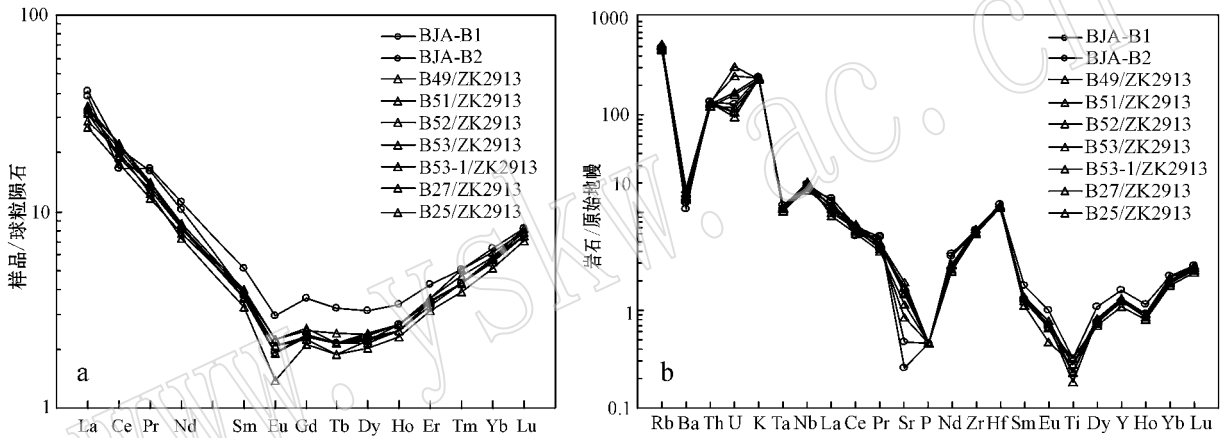


图 6 庙岭金矿区花岗斑岩稀土元素球粒陨石标准化蛛网图(a)和微量元素原始地幔标准化图解(b)(据 Sun 和 McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle normalized trace element spider diagrams of granite porphyry in the Miaoling gold deposit (after Sun and McDonough, 1989)

#### 4.4 Sr-Nd-Pb 同位素

庙岭金矿区花岗斑岩的 Sr、Nd 和 Pb 同位素分析结果见表 3。样品的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  及  $^{143}Nd/^{144}Nd$  值分别为 0.783 770~0.819 084 和 0.511 573~0.511 624 (其中样品 B49/ZK2913、B27/ZK2913 的 Rb-Sr 同位素值出现异常, 在此不用于讨论)。表 3 中以花岗斑岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 157 Ma 为结晶年龄计算得到的  $(^{87}Sr/^{86}Sr)$  介于 0.706 207~0.711 774 之间,  $Nd$  同位素初始比值 ( $^{143}Nd/^{144}Nd$ ) 介于 0.511 461~0.511 524 之间,  $\epsilon Nd(t)$  值介于 -19.0~-17.8 之间,  $Nd$  同位素二阶段亏损地幔模式年龄 ( $t_{DM2}$ ) 介于 2.39~2.49 Ga 之间。

铅同位素由于其质量大, 同位素间的相对质量差较小, 外界条件对其组成的影响很小, 故铅同位素组成具有明显的“指纹特征”(Zartman and Doe, 1981; Tosdal *et al.*, 1981), 而且花岗斑岩全岩的铅同位素组成代表岩石现今的铅同位素比值。由表 3 可知庙岭金矿区花岗斑岩具有相似的 Pb 同位素组成,  $^{206}Pb/^{204}Pb = 17.117 \sim 17.216$ ,  $^{207}Pb/^{204}Pb = 15.461 \sim 15.522$ ,  $^{208}Pb/^{204}Pb = 37.729 \sim 37.955$ 。在 Zartman 和 Doe (1981) 的铅构造模式图解(图 7)中, 庙岭金矿区花岗斑岩的 Pb 同位素组成的投影点相同, 均落在下地壳或其附近区域, 具有深源 Pb 的特征。

表 3 庙岭金矿区隐伏花岗斑岩 Sr-Nd-Pb 同位素分析结果

Table 3 Sr, Nd and Pb isotope compositions of granite porphyry in the Miaoling gold district

样品	B49/ZK2913	B52/ZK2913	B53/ZK2913	B27/ZK2913	B25/ZK2913
$\alpha(\text{Rb})/10^{-6}$		301	300		338
$\alpha(\text{Sr})/10^{-6}$		17.9	24.4		30.7
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$		50.446 068	36.346 317		32.175 950
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$		0.819 084	0.791 598		0.783 77
$2\sigma$		0.000 027	0.000 022		0.000 017
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$		0.706 207	0.710 270		0.711 774
$\alpha(\text{Sm})/10^{-6}$	0.61	0.5	0.59	0.55	0.56
$\alpha(\text{Nd})/10^{-6}$	4.04	3.41	3.59	3.86	3.9
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.098 9	0.094	0.109	0.096 8	0.095 1
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.511 624	0.511 597	0.511 573	0.511 618	0.511 622
$2\sigma$	0.000 015	0.000 017	0.000 016	0.000 011	0.000 016
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})$	0.511 522	0.511 500	0.511 461	0.511 518	0.511 524
$\epsilon(\text{Nd}(t))$	-17.8	-18.3	-19.0	-17.9	-17.8
$t_{\text{DM}/\text{Ma}}$	2 022	1 974	2 290	1 994	1 960
$t_{\text{DM}2}/\text{Ma}$	2 392	2 427	2 489	2 398	2 389
$\alpha(\text{Th})/10^{-6}$	10.8	11.1	11	10.4	11.4
$\alpha(\text{U})/10^{-6}$	3.57	1.97	2.23	3.35	5.22
$\alpha(\text{Pb})/10^{-6}$	96.9	108	377	100	149
U/Th	0.33	0.18	0.20	0.32	0.46
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	17.216	17.142	17.117	17.136	17.139
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.522	15.477	15.481	15.471	15.461
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	37.955	37.790	37.786	37.755	37.729
$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$	17.151	17.110	17.107	17.077	17.078
$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$	15.518	15.475	15.481	15.469	15.458
$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$	37.893	37.733	37.770	37.698	37.687

## 5 讨论

### 5.1 岩石成因

一直以来,对于分异的花岗岩的成因类型判别都比较困难,因为强烈的分异作用产生的化学成分的差异遮盖了原岩的化学组成,使得一些岩石成因类型的判别参数处于一个模棱两可的重叠范围之内,不能有效区别岩石的成因类型。庙岭金矿区花岗斑岩具有较高的  $\text{SiO}_2$  含量,介于 75.06% ~ 77.66% 之间,具有较高的分异指数( $\text{DI} = 89.16 \sim 93.30$ ),应属于高分异的花岗岩。

岩石的 Ga 的含量较高,介于  $(18.3 \sim 19.7) \times 10^{-6}$  之间,  $\text{Ga} \times 10^4/\text{Al}$  值介于 2.61 ~ 2.94 之间,均超过 Whalen 等(1987)厘定的 A 型花岗岩的 Ga 的下限值( $\text{Ga} \times 10^4/\text{Al} = 2.6$ ),且全碱含量较高,介于 7.05% ~ 7.39% 之间,这些特征指示庙岭金矿区花岗斑岩可能为 A 型花岗岩。但岩石的稀土元素总量较低,介于  $(25.74 \sim 32.63) \times 10^{-6}$  之间,不符合 A 型花岗岩稀土元素含量高的特点,此外岩石的 Zr、Nb、Ce、Y 等高场强元素含量也较典型的 A 型花岗岩低,

四者之和介于  $(97.6 \sim 109.71) \times 10^{-6}$  之间,低于厘定的 A 型花岗岩的下限值( $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y} > 350 \times 10^{-6}$ )。Whalen 等(1987)指出高分异的花岗岩( $\text{SiO}_2 > 74\%$ )也具有某些 A 型花岗岩的特征,如高 Ga、高碱等特征,这使得很难将高分异的花岗岩从 A 型花岗岩中区分出来。但通过 A 型花岗岩  $\text{FeO}^T + \text{MgO} - \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$  (图 8a)和  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO} - \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$  判别图解(图 8b)同样可以有效地把高分异型花岗岩从 A 型花岗岩中区别出来,在该图解上庙岭金矿区花岗斑岩投影点落于分异花岗岩中范围内(FG) (Whalen *et al.*, 1987),属于高分异型花岗岩。

庙岭金矿区花岗斑岩可能受到矿区热液的影响,计算获得的 A/CNK 值已经失去其判别意义,不再是一个有效区分 I、S 型花岗岩的标志,使用时还需结合其他证据。庙岭金矿区花岗斑岩 Sr 的初始比值( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )介于 0.706 207 ~ 0.711 774 之间,更接近于下地壳成因 Pb 同位素组成的投影点均落在下地壳区域,说明庙岭地区花岗斑岩的源区应是下地壳。综合以上地球化学证据认为庙岭金矿区花岗斑岩应为高分异的 I 型花岗岩。

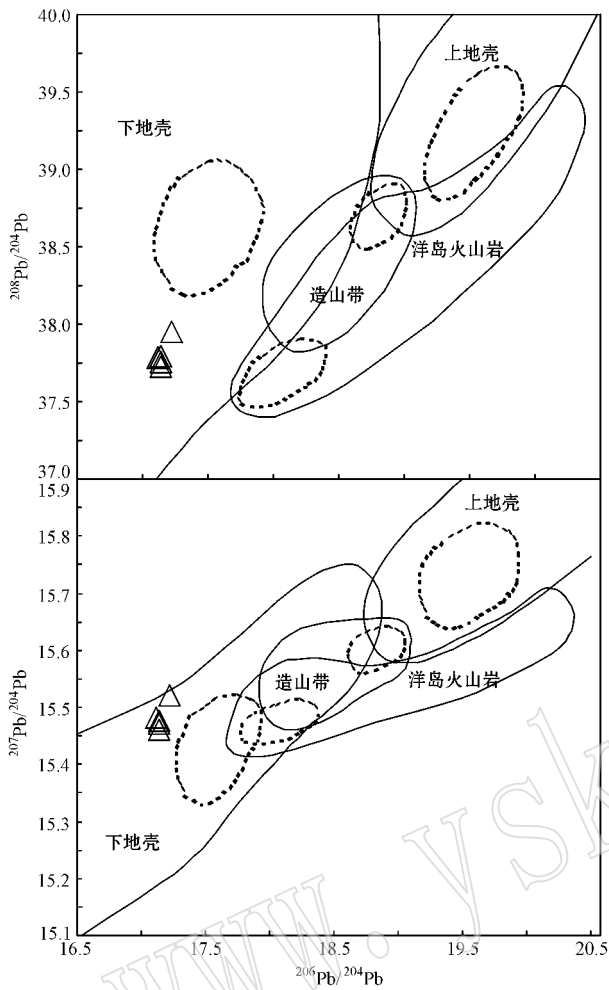


图 7 Pb 同位素源区图(据 Zartman 和 Doe, 1981)

Fig. 7 Plots of lead ratios for defining different geological members of granite porphyry in the Miaoling gold deposit (after Zartman and Doe, 1981)

岩石具有低的 CaO、Sr 含量以及低的 Sr/Y, Eu 呈较弱亏损, 稀土元素配分模式整体呈中间低两端高的下凹模式, 这些地球化学特征指示岩石来源于残留相富集斜长石、角闪石而亏损石榴子石的部分熔融岩浆( Beard and Lofgren, 1991; Wolf and Wylie, 1994; Rapp and Watson, 1995; Springer and Seck, 1997), 可能指示母岩浆熔融的深度较浅, 部分熔融作用发生在伸展拉伸环境。

## 5.2 花岗斑岩源区

庙岭金矿区花岗斑岩元素地球化学具有明显的陆壳元素地球化学特征。SiO<sub>2</sub> 含量高, CaO、MgO、(FeO)<sup>T</sup> 以及相容元素 Cr、Co、Ni 含量较低, 同时富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损高场强元素。在 Pb 同位素源区判别图解(图 7)上, 铅同位素特征

更接近下地壳成岩。此外, 岩石具有中等略高的 Sr 初始比值 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) = (0.7062 07 ~ 0.711 774), 其 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) 值落在大陆增长线和“玄武岩源区”之间, 靠近玄武岩源区(图 9a),  $\epsilon\text{Nd}(t)$  值介于 (-17.8 ~ -19.0) 和古老的 Nd 二阶段模式年龄 (2.39 ~ 2.49) Ga 这些特征都指示了其成岩物质来源于古老的下地壳。在  $\epsilon\text{Nd}(t)$ - $t$  图解上, 庙岭金矿区花岗斑岩数据投点与华北地块太古宙地壳范围一致(图 9b)。此外, 时毓等(2011)对太华群岩石形成时代的研究表明, 太华群中斜长角闪片岩、片麻岩的年龄主要集中于 2.50 ~ 2.28 Ga 和 2.84 ~ 2.54 Ga 两个时间段。庙岭金矿区花岗斑岩的 Nd 同位素的二阶段模式年龄  $t_{\text{DM2}} = 2.39 \sim 2.49$  Ga, 与太华群斜长角闪片岩、片麻岩的年龄相当, 说明太华群可能为庙岭金矿区花岗斑岩的源岩, 这也与该区域石宝沟、南泥湖、八里坡、上房沟等岩体的源区认识一致, 均以古老地壳物质为主(毛景文等, 2005; 包志伟等, 2009; 李洪英等, 2011; 杨阳等, 2012)。

## 5.3 成岩构造环境

秦岭造山带是华北板块与扬子板块长期汇聚形成的复合造山带(Mattauer *et al.*, 1985; Kröner *et al.*, 1993; Meng and Zhang, 1999; 张国伟等, 2001; 李永峰, 2005)。华北与扬子板块完全对接的时限介于 238 ~ 218 Ma 之间(李曙光等, 1989, 1997; Ames *et al.*, 1993, 1996; Chen *et al.*, 1995; Chavagnotz and Jahn, 1996; Rowley *et al.*, 1997), 自燕山期开始转入陆内演化或陆内造山阶段, 开始统一大陆的地质演化过程, 表现为两大板块碰撞造山后陆内伸展的地球动力学背景(Meng and Zhang, 2000; 张国伟等, 2001; 王义天等, 2002; 戴宝章等, 2009)。自印支末期以来, 中国东部在持续遭受南北向挤压的同时, 又出现古太平洋板块向古亚洲大陆下消减, 并逐步发展成为环太平洋构造的一部分(任纪舜等, 1991, 2000), 一般认为这一地球动力学调整的整个过程时限在 163 至 136 Ma 期间(zhang *et al.*, 1996; 任纪舜等, 1998; 牛宝贵等, 2003; 李忠等, 2003; 毛景文等, 2005)。

庙岭金矿区花岗斑岩的 LA-ICP-MS 锆石年龄为 157 Ma, 与该区域内其他岩体的形成时代一致, 如五丈山岩体的 SHRIMP 锆石年龄为  $157 \pm 1$  Ma (李永峰, 2005), 南泥湖斑岩体的 SHRIMP 锆石年龄为  $158 \pm 3$  Ma, 上房沟斑岩体的 SHRIMP 锆石年龄为  $158 \pm 3$  Ma (毛景文等, 2005), 石宝沟花岗岩的

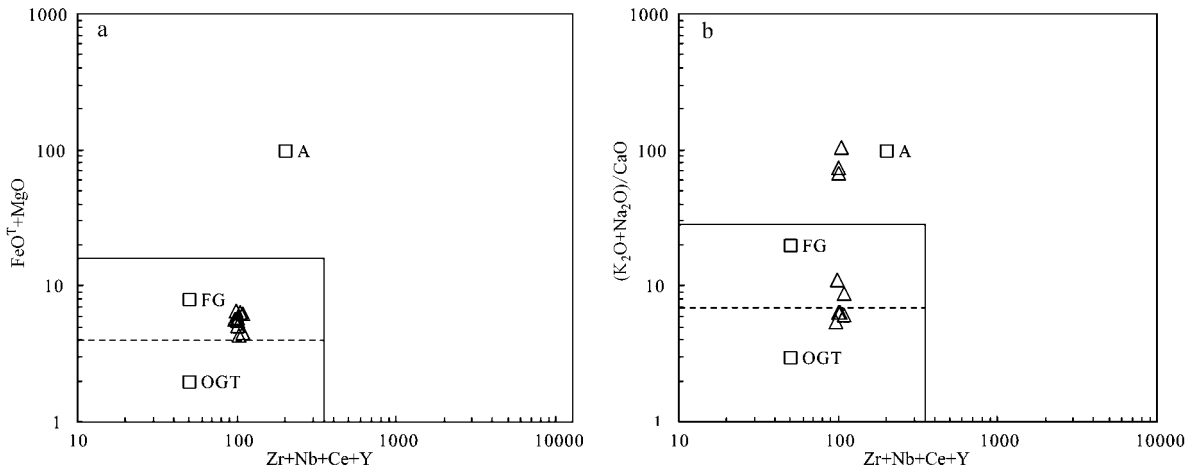


图 8 庙岭金矿区花岗斑岩  $FeO^T + MgO - Zr + Nb + Ce + Y$  判别图 (a) 和  $(Na_2O + K_2O) / CaO - Zr + Nb + Ce + Y$  判别图 (b) (据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 8 Discrimination diagrams of  $(FeO^T + MgO)$  versus  $(Zr + Nb + Ce + Y)$  (a) and  $(Na_2O + K_2O) / CaO$  versus  $(Zr + Nb + Ce + Y)$  (b) of granite porphyry in the Miaoling gold deposit (after whalen *et al.*, 1987)  
 FG—分异的花岗岩, OGT—非分异的 I、S 和 M 型花岗岩  
 FG—differentiated felsic granites; OGT—undifferentiated M-, I- and S-type granites

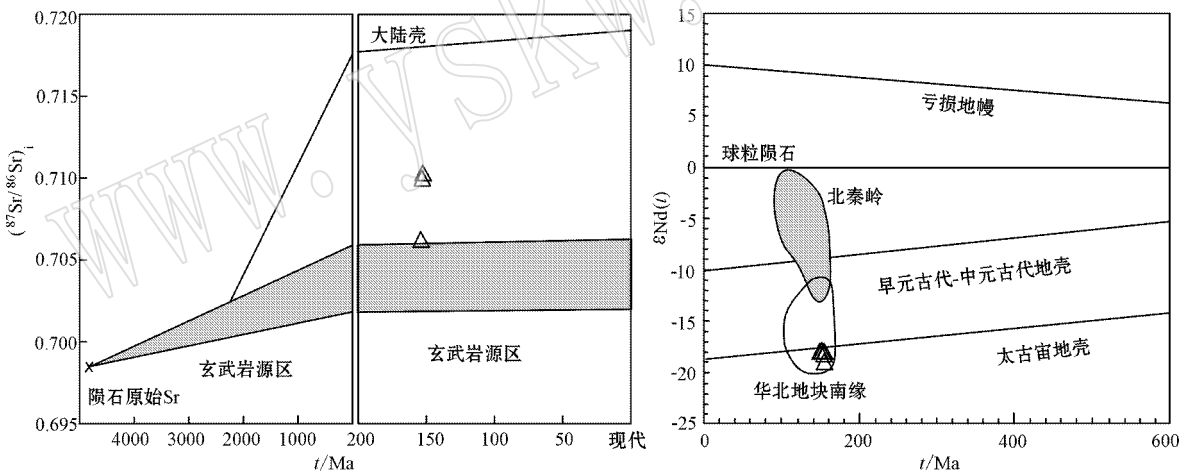


图 9 庙岭金矿区花岗斑岩  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i - t$  和  $\epsilon Nd(t) - t$  图解 (据韩吟文等, 2004; 王晓霞等, 2011)

Fig. 9  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i - t$  and  $\epsilon Nd(t) - t$  diagrams of granite porphyry in the Miaoling gold deposit (after Han Yinwen *et al.*, 2004; Wang Xiaoxia *et al.*, 2011)

LA-ICP-MS 的锆石年龄均为 157 Ma 左右(杨阳等, 2012), 八里坡花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄为  $155 \pm 1$  Ma (李洪英等, 2011), 可见庙岭金矿区花岗斑岩与五丈山、南泥湖、石宝沟、上房沟、八里坡等岩体属于同时代的花岗岩, 均形成于晚侏罗世。翟雷等 (2012) 测得庙岭金矿钾长石  $^{40}Ar-^{39}Ar$  等时线年龄为  $117 \pm 2$  Ma, 与矿区花岗斑岩成岩年龄存在 40 Ma 的时差, 说明庙岭地区花岗斑岩与成矿并无直接关系。

岩石的稀土元素特征也表明其可能形成于残留丰富集角闪石而亏损石榴子石的下地壳部分熔融, 岩石实验学证据表明这种部分熔融的深度较浅 ( $< 35km$ ) (Beard and Lofgren, 1991; Wolf and Wyllie, 1994; Rapp and Watson, 1995; Springer and Seck, 1997), 表明庙岭金矿区花岗斑岩可能形成于伸展的环境。同时, 庙岭金矿区花岗斑岩 Rb、Th、K 富集, 强烈富集 Pb、Ba 具有相对明显的亏损, Zr、Hf、Ta、



Nb 含量较高(图 6),具有伸展环境下花岗岩微量元素特征,符合花岗岩形成的构造环境判别图解(图

10)的结果,表明庙岭金矿区花岗斑岩形成于伸展环境。

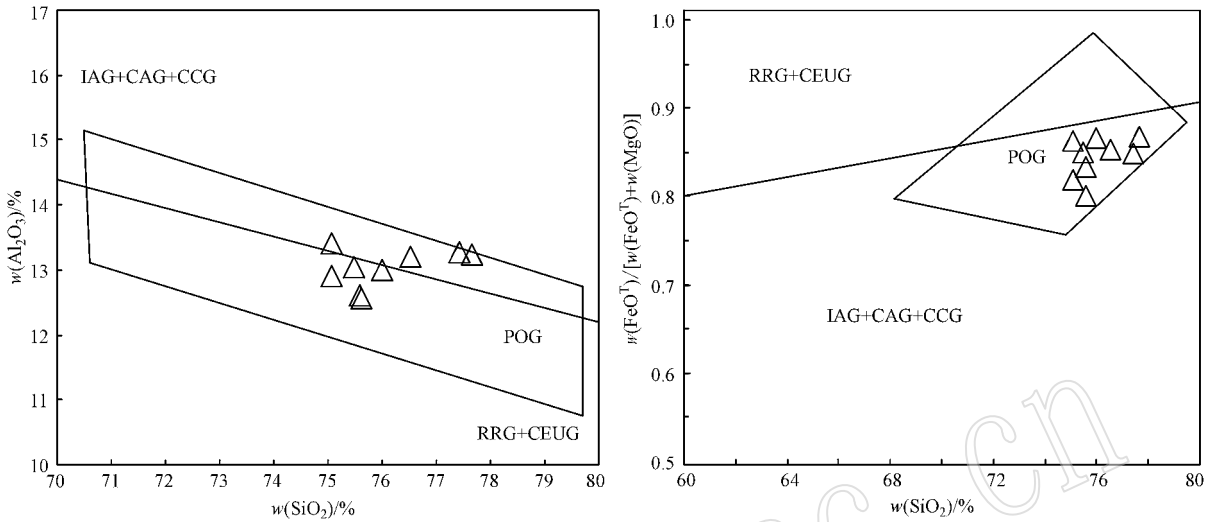


图 10 花岗岩形成的构造环境判别图(据 Pearce 等, 1984; Maniar 和 Piccoli, 1989)

Fig. 10 Diagrams for discrimination of structural environments of granite porphyry in the Miaoling gold deposit (after Pearce *et al.*, 1984; Maniar and Piccoli, 1989)

IAG—岛弧花岗岩; CAG—大陆弧花岗岩类; CCG—大陆碰撞花岗岩类; POG—后碰撞造山花岗岩类; RRG—与裂谷有关的花岗岩; CEUG—大陆的造陆抬升花岗岩类

IAG—*island-arc granitoids*; CAG—*continental arc*; CCG—*continental collision granite*; POG—*post-orogenic granite*; RRG—*rift-related granite*; CEUG—*continental epeirogenetic uplift granite*

综上所述,庙岭地区花岗斑岩与区域上如南泥湖、石宝沟、上房沟、八里坡等岩体属于同时代的花岗岩,由下地壳发生部分熔融形成,产生于古太平洋板块向欧亚板块俯冲的弧后陆缘伸展环境。

## 6 结论

(1) 庙岭金矿区花岗斑岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 157 Ma, 形成于晚侏罗世。

(2) 岩石地球化学及同位素特征表明庙岭金矿区花岗斑岩应属于高分异 I 型花岗岩, 是古老下地壳部分熔融的产物, 源区可能是新太古代结晶基底。

(3) 庙岭金矿区花岗斑岩与区域上如五丈山、南泥湖、石宝沟、上房沟、八里坡等岩体属于同时代的花岗岩, 均形成于晚侏罗世, 对应于古太平洋板块向欧亚板块俯冲的弧后陆缘伸展环境。

致谢 国家地质测试中心马天芳研究员在地球化学分析中给予了大力帮助, 审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见, 在此表示衷心感谢!

## References

- Ames L, Tilton G R and Zhou G. 1993. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites[J]. *Geology*, 21: 339~343.
- Ames L, Zhou G and Xiong B. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implication for collision of the Sino-Korean cratons, central China[J]. *Tectonics*, 15: 472~489.
- Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ [J]. *Chem. Geol.*, 192(1/2): 59~79.
- Beard J S and Lofgren G E. 1991. Dehydration melting and water saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6.9 kbar[J]. *Journal of Petrology*, 32: 365~401.
- Bao Zhiwei, Zeng Qiaosong, Zhao Taiping, *et al.* 2009. Geochemistry and petrogenesis of the ore-related Nannihu and Shangfanggou granite Porphyries from east Qinling belt and their constraints on the molybdenum mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2523~2536(in Chinese with English abstract).

- Chen J, Xie Z, Liu S, *et al.* 1995. Cooling age of Dabie orogen, China, determined by  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  and fission track techniques[J]. *Science in China(B)*, 38: 749~757.
- Chavagnat N O and Jahn B M. 1996. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling complex, Dabie mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implication[J]. *Chemical Geology*, 133: 29~51.
- Dai Baozhang, Jiang Shaoyong and Wang Xiaolei. 2009. Petrogenesis of the granitic porphyry related to the giant molybdenum deposit in Donggou, Henan Province, China: Constraints from petrogeochemistry, zircon U-Pb chronology and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2889~2901 (in Chinese with English abstract).
- Ding Lixue, Ma Changqian, Li Jianwei, *et al.* 2010. LA-ICPMS zircon U-Pb ages of the Lantian and Muhuguan granitoid plutons, southern margin of the North China craton: Implications for tectonic setting[J]. *Geochimica*, 39(5): 401~413 (in Chinese with English abstract).
- Guo Bo, Zhu Laimin, Li Ben, *et al.* 2009. Isotopic and element geochemical study of Jinduicheng superlarge porphyry Mo deposit in East Qinling area[J]. *Mineral Deposits*, 28(3): 265~281 (in Chinese with English abstract).
- Han Yinwen and Ma Zhendong. 2004. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 181~296 (in Chinese).
- Hu Zhengguo and Qian Zhuangzhi. 1994b. A new idea of geological tectonics in the xiaoqinling region[J]. *Geological Review*, 40(4): 289~295 (in Chinese with English abstract).
- Hu Zhengguo, Qian Zhuangzhi, Yan Guangmin, *et al.* 1994a. Detachment-Metamorphic Tectonics and the Gold Deposit in the Small Qinling Mountain[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 6~18, 102~182 (in Chinese).
- Kröner A, Zhang G W, Zhuo D W, *et al.* 1993. Granites in the Tongbai area, Qinling belt, China: Geochemistry, petrology, single-zircon geochronology and implications for the tectonic evolution of Eastern Asia[J]. *Tectonics*, 12(1): 245~255.
- Le Maitre R W. 1976. The chemical variability of some common igneous rocks[J]. *Petrology*, 17(4): 589~637.
- Li Hongying, Mao Jingwen, Wang Xiaoxia, *et al.* 2011. Sr, Nd, Pb isotopic characteristics of granite in Jinduicheng area and their geological significance[J]. *Geology in China*, 38(6): 1536~1550 (in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang, Hart S R, Zheng Shuanggen, *et al.* 1989. The evidence of Sm-Nd isotopic age for the collision of North China craton and Southern China craton[J]. *Science in China, Ser. B*, 19(3): 312~319 (in Chinese).
- Li Tong, Yuan Huaiyu and Wu Shengxi. 1998. On the average chemical composition of granitoids in China and the world[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 22(1): 24~29 (in Chinese with English abstract).
- Li Yongfeng. 2005. The Temporal-Spatial Evolution of Mesozoic Granitoids in the Xiong'er Area and Their Relationships to Molybdenum-Gold Mineralization[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Li Yongfeng, Mao Jingwen, Hu Huabin, *et al.* 2005. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic molybdenum deposits in East Qinling area[J]. *Mineral Deposits*, 3: 292~304 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhong, Liu Shaofeng, Zhang Jinfang, *et al.* 2003. Typical basin-fill sequences and basin migration in Yanshan, North China: response to Mesozoic tectonic transition[J]. *Science in China(D)*, 33(10): 931~940 (in Chinese).
- Mattauer M, Matte P, Malavielle J, *et al.* 1985. Tectonics of the Qinling belt: Build up and evolution of eastern Asia[J]. *Nature*, 317: 496~500.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635~643.
- Mao Jingwen, Pirajno F, Xiang J F, *et al.* 2011. Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt: Characteristics and tectonic settings[J]. *Ore Geology Reviews*, 43: 264~293.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Bierlein F, *et al.* 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 4607~4626.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Pirajno F, *et al.* 2010. Late Jurassic-Early Cretaceous granitoid magmatism in Eastern Qinling, central-eastern China: SHRIMP zircon U-Pb age and tectonic implications[J]. *Aust. J. Earth Sci.*, 57(1): 51~78.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, *et al.* 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1: 171~190 (in Chinese with English abstract).
- Meng Q R and Zhang G W. 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation[J]. *Geology*, 27: 1~96.
- Meng Q R and Zhang G W. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, Central China[J]. *Tectonophysics*, 323(3~4): 183~196.

- Niu Baogui, He Zhengjun, Song Biao, *et al.* 2003. SHRIMP ages of Zhangjiakou group volcanic rocks and their geological significances [J]. *Regional Geology of China*, 22(2): 140~141 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong and Li Yongfei. 2005. Petrogenesis and geological significance of Yangba granodiorites from Bikou area, Northern margin of Yangtze Plate [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 697~710 (in Chinese with English abstract).
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8~32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling [J]. *Journal of Petrology*, 36(4): 891~931.
- Ren Jishun. 1984. The Indosinian orogeny and its significance in the tectonic evolution of China [J]. *Institute of Geology, CAGS*, 9: 31~44 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun. 1991. The basic characteristics of the tectonic evolution of the continental lithosphere in China [J]. *Regional Geology of China*, 4: 289~293 (in Chinese).
- Ren Jishun, Niu Baogui and He Zhengjun. 1998. Tectonic framework and geodynamic evolution of eastern China [A]. Ren Jishun and Yang Weiran. *Composition, Structure, Evolution and Environment of Continental Lithosphere of China* [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Rowley D B, Xue F, Turker R D, *et al.* 1997. Age of ultrahigh pressure metamorphism and protolith of orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U-Pb zircon geochemistry [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 151: 191~203.
- Sengor A M C. 1985. East Asia tectonic collage [J]. *Nature*, 318: 16~17.
- Shang C K, Statir M, Siebel W, *et al.* 2004. TTG magmatism in the Congo craton; a view from major and trace element geochemistry, Rb-Sr and Sm-Nd systematics: case of the Sangmelima region, Ntem complex, southern Cameroon [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 40(1~2): 61~79.
- Shi Yu, Yu Jinhai, Xu Xisheng, *et al.* 2011. U-Pb ages and Hf isotope compositions of zircons of Taihua Group in Xiaoqinling area, Shaanxi Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 3095~3108 (in Chinese with English abstract).
- Springer W and Seck H A. 1997. Partial fusion of basic granulites at 5 to 15 kbar: implications for the origin of TTG magma [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127(1): 30~45.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D. *Magmatism in Ocean Basins* [C]. Geological Society Publication, 42: 313~345.
- Sun Weidong, Li Shuguang, Chen Yadong, *et al.* 2000. Zircon U-Pb dating of granitoids from South Qinling, Central China and their geological significance [J]. *Geochemistry*, 29(3): 209~216 (in Chinese with English abstract).
- Tosdal R M, Cline J S, Mark F C, *et al.* 1981. Lead in the Gschell-Turquoise Ridge Carlin-Type gold deposits from the perspective of potential igneous and sedimentary rock sources in northern Nevada: Implications for fluid and metal sources [J]. *Economic Geology*, 98: 1189~1211.
- Wang Qingchen, Sun Shu, Li Jiliang, *et al.* 1989. The tectonic evolution of the Qinling mountain belt [J]. *Chinese Journal of Geology*, (2): 129~143 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Qi Qiuju, *et al.* 2011. Temporal-spatial variations, origin and their tectonic significance of the Late Mesozoic granites in the Qinling, Central China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1573~1593 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia, Wang Tao and Zhang Chengli. 2013. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling Orogen, China: Constraints on orogenic processes [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 129~151.
- Wang Yitian and Mao Jingwen. 2002. Mineralization in the post-collisional orogenic extensional regime: A case study of the Xiaoqinling gold deposit clustering area [J]. *Geological Bulletin of China*, 21(8~9): 562~566 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhiguang, Cui Hao and Xu Mengluo. 1997. *Tectonic Evolution and Metallogeny in the South of the North China Craton* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Publishing House (in Chinese).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407~419.
- Wolf M B and Wyllie P J. 1994. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115(4): 369~383.
- Yang Yang, Wang Xiaoxia, Ke Changhui, *et al.* 2012. Zircon U-Pb age, geochemistry and Hf isotopic compositions of Shibaogou granitoid pluton in the Nannihu ore district, western Henan Province [J]. *Geology in China*, 39(6): 1525~1542 (in Chinese with English abstract).
- Ye Huishou. 2006. *The Mesozoic Tectonic Evolution and Pb-Zn-Ag Metallogeny in the South Margin of North China Craton* [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese).

- Ye Huishou, Mao Jingwen, Li Yongfeng, *et al.* 2006. SHRIMP Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Dating for the Superlarge Donggou Porphyry Mo Deposit in East Qinling, China and Its Geological Implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 7: 1078~1088 (in Chinese with English abstract).
- Ye Huishou, Mao Jingwen, Xu Lingang, *et al.* 2008. SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Geochemistry of the Taishanmiao Aluminous A-type Granite in Western Henan Province [J]. *Geological Review*, 54(5): 699~711 (in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, *et al.* 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353~370.
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics—the model [J]. *Tectonophysics*, 75(1): 135~162.
- Zhai Lei, Ye Huishou, Zhou Ke, *et al.* 2012. Geological characteristics and K-feldspar  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating of the Miaoling gold deposit in Songxian County, Henan Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 31(4): 569~576 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Wang Tao and Wang Xiaoxia. 2008. Origin and tectonic setting of the Early Mesozoic granitoids in Qinling orogenic belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 304~316 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Meng Qingren, Liu Shaofeng, *et al.* 1997. Huge intra-continental subduction zone at south margin of North China block and present 3-D lithospheric framework of the Qinling orogenic belt [J]. *Geological Journal of Universities*, 3(2): 129~143 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Meng Qingren, Yu Zaiping, *et al.* 1996. The process and its dynamic characteristics of the Qinling Mountains orogenic belt orogenic [J]. *Science in China (D)*, 26(3): 193~200 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, *et al.* 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 1~80 (in Chinese).
- Zhang Hongfei, Jin Lanlan, Zhang Li, *et al.* 2005. The limiting of the west Qinling Mountains granitoid geochemical and Pb-Sr-Nd isotope constitution to the basement properties and tectonic attributes [J]. *Science in China (D)*, 35(10): 914~926 (in Chinese).
- Zhang Hongfei, Xiao Long, Zhang Li, *et al.* 2007. The geochemical and Pb-Sr-Nd isotopic composition of the Bikou block Indosinian granitoids in the northwest margin of Yangtze block: Petrogenesis and geodynamic setting limits [J]. *Science in China (D)*, 35(10): 914~926 (in Chinese).
- Zhang Jinjiang, Zheng Yadong and Liu Shuwen. 1998. Tectonic Characteristics, Mechanism and Evolution of the Small Qinling Mountain [M]. Beijing: Maritime Press, 17~63 (in Chinese).
- Zhu Laimin, Zhang Guowei, Guo Bo, *et al.* 2008. U-Pb (LA-ICP-MS) zircon dating for the large Jinduicheng porphyry Mo deposit in the East Qinling, China, and its metallogenetic geodynamical setting [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(2): 204~220 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 包志伟, 曾乔松, 赵太平, 等. 2009. 东秦岭钼矿带南泥湖-上房沟花岗斑岩成因及其对钼成矿作用的制约 [J]. *岩石学报*, 10: 2523~2536.
- 戴宝章, 蒋少涌, 王孝磊. 2009. 河南东沟钼矿花岗斑岩成因: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约 [J]. *岩石学报*, 25(11): 2887~2899.
- 丁丽雪, 马昌前, 李建威, 等. 2010. 华北克拉通南缘蓝田和牧护关花岗岩体: LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义 [J]. *地球化学*, 39(5): 401~413.
- 郭波, 朱赖民, 李, 等. 2009. 华北陆块南缘华山和合峪花岗岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成与成岩动力学背景 [J]. *岩石学报*, 25(2): 265~281.
- 韩吟文, 马振东. 2004. *地球化学* [M]. 北京: 地质出版社, 181~296.
- 胡正国, 钱壮志. 1994b. 小秦岭地质构造新认识 [J]. *地质论评*, 40(4): 289~295.
- 胡正国, 钱壮志, 闫广民, 等. 1994a. 小秦岭拆离-变质杂岩核构造与金矿 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 6~18, 102~182.
- 黎彤, 袁怀雨, 吴胜昔. 1998. 中国花岗岩类和世界花岗岩类平均化学成分的对比如研究 [J]. *大地构造与成矿学*, 22(1): 24~29.
- 李洪英, 毛景文, 王晓霞, 等. 2011. 陕西金堆城钼矿区花岗岩 Sr、Nd、Pb 同位素特征及其地质意义 [J]. *中国地质*, 38(6): 1536~1550.
- 李曙光, Hart S R, 郑双根, 等. 1989. 中国华北、华南陆块碰撞时代的 Sm-Nd 同位素年龄证据 [J]. *中国科学 (B 辑)*, 19(3): 312~319.
- 李曙光, 李惠民, 陈移之, 等. 1997. 大别山-苏鲁地体超高压变质年代学——锆石 U-Pb 同位素体系 [J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 3: 200~206.
- 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 [D]. 中国地质大学(北京).
- 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 [J]. *矿床地质*, 3: 292~304.



- 李忠,刘少峰,张金芳,王清晨. 2003. 燕山典型盆地充填序列及迁移特征:对中国东部构造转折的响应[J]. 中国科学(D辑), 33(10):931-940.
- 路远发. 2004. Geokit:一个用VBA构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 33(5):459-464.
- 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[J]. 岩石学报, 21(1):171-190.
- 牛宝贵,和政军,宋彪,等. 2003. 张家口群火山岩 SHRIMP 定年及其重大意义[J]. 地质通报, 22(2):140-141.
- 秦江锋,赖绍聪,李永飞. 2005. 扬子板块北缘碧口地区阳坝花岗岩长岩体成因研究及其地质意义[J]. 岩石学报, 21(3):697-710.
- 任纪舜. 1984. 印支运动及其在中国大地构造演化中的意义[J]. 中国地质科学院地质研究所刊, 9:31-44.
- 任纪舜. 1991. 论中国大陆岩石圈构造的基本特征[J]. 中国区域地质, 4:289-293.
- 任纪舜,牛宝贵,和政军,等. 1998. 中国东部的构造格局和动力演化[A]. 任纪舜,杨巍然. 中国东部岩石圈结构与构造岩浆演化[C]. 北京:原子能出版社,1-12.
- 任纪舜,王作勋,陈炳蔚,等. 2000. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明[M]. 北京:地质出版社,1-38.
- 时毓,于津海,徐夕生,等. 2011. 陕西小秦岭地区太华群的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 27(10):3095-3108.
- 孙卫东,李曙光,Chen Yadong,等. 2000. 南秦岭花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地球化学, 29(3):209-216.
- 王清晨,孙枢,李继亮,等. 1989. 秦岭的大地构造演化[J]. 地质科学, (2):129-142.
- 王晓霞,王涛,齐秋菊,等. 2011. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及其构造意义[J]. 岩石学报, 27(6):1573-1593.
- 王义天,毛景文. 2002. 碰撞造山作用期后伸展体制下的成矿作用——以小秦岭金矿集中区为例[J]. 地质通报, 21(8-9):562-566.
- 王志光,崔毫,徐孟罗. 1997. 华北地块南缘地质构造演化与成矿[M]. 北京:冶金工业出版社.
- 杨阳,王晓霞,柯昌辉,等. 2012. 豫西南泥湖矿集区石宝沟花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及 Hf 同位素组成[J]. 中国地质, 39(6):1525-1542.
- 叶会寿. 2006. 华北陆块南缘中生代构造演化与铅锌银成矿作用[D]. 北京:中国地质科学院.
- 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[J]. 地质学报, 7:1078-1088.
- 叶会寿,毛景文,徐林刚,等. 2008. 豫西太山庙铝质 A 型花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征[J]. 地质论评, 54(5):699-711.
- 翟雷,叶会寿,周珂,等. 2012. 河南嵩县庙岭金矿矿床地这特征与钾长石<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar定年[J]. 地质通报, 31(4):569-576.
- 张成立,王涛,王晓霞. 2008. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境[J]. 高校地质学报, 14(3):304-316.
- 张国伟,孟庆任,刘少峰,等. 1997. 华北地块南部巨型陆内俯冲带与秦岭造山带岩石圈现今三维结构[J]. 高校地质学报, 3(2):129-143.
- 张国伟,孟庆任,于在平,等. 1996a. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. 中国科学(D辑), 26(3):193-200.
- 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,1-806.
- 张宏飞,靳兰兰,张利,等. 2005. 西秦岭花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成对基底性质及其构造属性的限制[J]. 中国科学(D辑), 35(10):914-926.
- 张宏飞,肖龙,张利,等. 2007. 扬子陆块西北缘碧口块体印支期花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成:限制岩石成因及其动力学背景[J]. 中国科学(D辑), 37(4):460-470.
- 张进江,郑亚东,刘树文. 1998. 小秦岭变质核杂岩的构造特征、形成机制及构造演化[M]. 北京:海洋出版社,17-63.
- 朱赖民,张国伟,郭波,等. 2008. 东秦岭金堆城大型斑岩钼矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿动力学背景[J]. 地质学报, 82(2):204-220.