

文章编号: 0258-7106(2010)01-0143-15

# 陕西洛南县石家湾钼矿相关花岗斑岩的年代学及 岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素制约\*

赵海杰<sup>1</sup>, 毛景文<sup>1\*\*</sup>, 叶会寿<sup>1</sup>, 侯可军<sup>1</sup>, 梁慧山<sup>2</sup>

(1 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;

2 九龙矿业有限公司, 陕西 商洛 726102)

**摘要** 石家湾钼矿床位于东秦岭钼成矿带的西部黄龙铺地区, 矿体主要分布于石家湾花岗斑岩外接触带的围岩中, 呈细脉-网脉浸染状产出, 属斑岩型矿床。花岗斑岩岩石呈斑状结构, 斑晶与基质成分相同, 主要矿物包括钾长石、石英、斜长石和黑云母。锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究表明, 花岗斑岩的年龄为 139.9~145.6 Ma, 加权平均年龄为  $(141.4 \pm 0.6) \text{Ma}$  (MSDW = 1.00), 侵位于早白垩世, 与辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄 138 Ma 相近。岩石地球化学分析表明, 石家湾花岗斑岩具有高硅 ( $w(\text{SiO}_2)$  70.52%~73.04%)、富碱 ( $w(\text{Na}_2\text{O}) + w(\text{K}_2\text{O})$  为 8.13%~9.12%)、准铝质特征 (A/CNK 为 0.99~1.13)、稀土元素总量中等偏低 ( $\sum \text{REE}$  为  $145.27 \times 10^{-6} \sim 156.97 \times 10^{-6}$ )、富集轻稀土元素 ( $\sum \text{LREE}$  为  $135.38 \times 10^{-6} \sim 145.97 \times 10^{-6}$ )、中等 Eu 亏损 ( $\delta \text{Eu}$  0.65~0.71)、标准化曲线呈右倾、微量元素以富集 Rb、Ba、U 而亏损 P、Ti、Ta、Nb 元素为特征。岩石具有较高的 Sr 初始比值 (0.7073~0.7077) 及较低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 (-14.8~-16.0), 与地壳的同位素组成特征相近。锆石 Hf 的原位分析表明,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值变化于 0.282056~0.282312 之间,  $\epsilon_{\text{Hf}}(141 \text{ Ma})$  值介于 -25.01~-15.97, 平均值为 -20.64, 极低的负值指示了岩浆源区以下地壳为主。此外, 矿石硫同位素和辉钼矿中 Re 的含量反映了源区地幔物质的混入。与区内金堆城花岗斑岩及老牛山花岗岩的地球化学特征对比表明, 石家湾花岗斑岩与它们两者可能来源于同源母岩浆, 均形成于地壳物质的部分熔融,  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{FeO}^{\text{T}}$  呈明显的负相关性, 说明岩浆演化过程中经历了一定程度的结晶分异作用。结合区域资料分析认为, 区内三叠世以来共发生过 3 次岩浆侵入活动, 每次都伴有不同程度的钼矿化作用, 并分别对应于东秦岭-大别地区 3 个中酸性岩浆活动和钼矿化的峰期。

**关键词** 地球化学; 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; 花岗斑岩; 石家湾

中图分类号: P618.65; P597

文献标志码: A

## Chronology and petrogenesis of Shijiawan granite porphyry in Shannxi Province: Constrains from zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions

ZHAO HaiJie<sup>1</sup>, MAO JingWen<sup>1</sup>, YE HuiShou<sup>1</sup>, HOU KeJun<sup>1</sup> and LIANG HuiShan<sup>2</sup>

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Kowloon Mining Co. Ltd., Shangluo 726102, Shaanxi, China)

### Abstract

The Shijiawan Mo deposit is located in Huanglongpu area of the East Qinling molybdenum belt, and its ore bodies mostly occur within the wall rocks at the exo-contact zone of Shijiawan granite porphyry. Rocks have por-

\* 本文得到中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(K0816)和全国危机矿山接替资源找矿项目(20089949、200841019)的联合资助  
第一作者简介 赵海杰,女,1982年生,在读博士,矿物学、岩石学、矿床学专业。

\*\*通讯作者 毛景文,男,1956年生,博士,研究员,从事矿床地质和地球化学研究。Email:jingwenmao@263.net

收稿日期 2009-12-01;改回日期 2009-12-15。李岩编辑。

phyritic textures. Phenocrysts and matrixes have similar minerals, mainly composed of potassic feldspar, quartz, plagioclase and biotite. The granite porphyry is characterized by the enrichment of silica ( $w(\text{SiO}_2) = 70.52\% \sim 73.04\%$ ) and alkali [ $w(\text{Na}_2\text{O}) + w(\text{K}_2\text{O}) = 8.13\% \sim 9.12\%$ ], and para-aluminous nature ( $A/\text{CNK} = 0.99 \sim 1.13$ ). The chondrite-normalized REE patterns have REE concentrations ranging from 145.27 to 156.97 ppm, LREE enrichment and weak negative Eu anomalies. They are depleted in P, Ti, Ta, Nb and rich in Rb, Ba, U in the primitive mantle-normalized spidergrams. They have high initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios ( $0.7073 \sim 0.7077$ ) and low  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values ( $-14.8 \sim -16.0$ ). Zircons from the granite porphyry have U-Pb ages of 139.9 to 145.6 Ma, with a weighted mean age of  $(141.4 \pm 0.6)$  Ma, suggesting that the intrusion was emplaced in Early Cretaceous, corresponding to 138 Ma Mo mineralization age obtained by the Re-Os method. Zircon in-situ analysis gives  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios ranging from 0.282056 to 0.282312, and the average  $\epsilon_{\text{Hf}}(141 \text{ Ma})$  of  $-20.64$ , indicating that their parental magma was mainly derived from the lower crust. This conclusion is consistent with the Sr, Nd isotopic results. In addition, sulfur isotopic analysis and Re content of molybdenites imply that there were some inputs from the mantle. In comparison of geochemical features with Laoniushan granite and Jinduicheng granite porphyry of the same area, Shijiawan may share a congenetic magmatic source with the others; they were all formed from the melts of the upper crust and underwent a strong crystal differentiation during the evolutionary process. Based on regional geological data, it can be concluded that this area have experienced three times of magmatic intrusion activities, which corresponded respectively to three times of Mo mineralization since Late Triassic.

**Key words:** geochemistry, U-Pb zircon dating, Hf isotope, granite porphyry, Shijiawan

石家湾钼矿床位于东秦岭钼成矿带的西部黄龙铺地区,地理坐标:  $34^\circ 20' 33'' \sim 34^\circ 21' 08'' \text{N}$ ,  $110^\circ 00' 59'' \sim 110^\circ 01' 50'' \text{E}$ ,距金城堆超大型斑岩钼矿床约 12 km,已探明钼储量达 14.3 万吨,Mo 平均品位 0.071% (许成等, 2009), 达大型规模。针对石家湾矿床的研究资料相对较少,仅限于地质特征(杜本臣等, 1986)、矿物组成(陈福根等, 1984)、成矿时代(黄典豪等, 1994)等方面。石家湾钼矿床赋矿岩体的侵位时代尚无准确的年龄数据,虽然据杜本臣等(1986)报道石家湾斑岩的同位素年龄为 124 Ma (K-Ar), 而黄典豪等(1994)测得与之有关矿床中辉钼矿的 Re-Os 年龄为 138 Ma, 赋矿岩体侵位年龄小于矿化年龄,由此可见该 K-Ar 年龄的可信度较低。随着近几年测年技术的迅速发展,加之准确的成岩年龄数据对于成矿作用及区域构造背景研究的重要性,有必要对该岩体的成岩年龄进行精测。本文拟通过对石家湾钾长花岗斑岩的地球化学、Hf 同位素组成分析及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄精测,来了解花岗斑岩的侵位年龄及形成机制,并进一步探讨成岩及成矿关系。

## 1 矿区地质

陕西洛南县黄龙铺地区石家湾钼矿床处于华北

陆块南缘华熊断隆区内,中元古界熊耳群火山岩,高山河组石英岩、石英砂岩在区内出露,并与太古界太华群片麻岩基底呈不整合接触(赵亨等, 1983)。该区域在地质历史期间曾受到过多次构造运动的影响,褶皱、断裂发育,形成近东西向为主体的构造格局。褶皱构造主要为黄龙铺背斜(板岔梁—蚂蚁山),其轴向近东西向,与区域构造线方向一致,北西向断裂发育(如图 1)。黄龙铺(大石沟)脉状碳酸岩型钼铅矿床位于黄龙铺背斜北东翼,石家湾钼矿床位于其南翼。区内侵入岩浆岩有老牛山二长花岗岩基和石家湾花岗斑岩,辉绿岩脉、碱性花岗斑岩沿北西向断裂多处出露。

石家湾矿床斑岩型钼矿体主要产于石家湾花岗斑岩体外接触带的围岩中,整个岩体均有不同程度的矿化。地表矿体围绕岩体呈环状分布(图 2),深部矿体与斑岩体展布方向一致,且随斑岩体产状的变化而变化(杜本臣等, 1986)。赋矿地层主要为高山河组石英砂岩,北段为熊耳群火山岩。成矿围岩蚀变具有面型蚀变的特征,且分带明显,自斑岩体向外,大致呈现出钾化→绢云母化→绿帘石→绿泥石化带。矿体主要赋存在钾长石化带和绢云母化带中(图 2)。矿化岩石包括石英砂岩、辉绿岩、花岗斑岩及少量火山岩,说明钼矿化与围岩性质关系不大,而与石家湾花岗斑岩关系密切。矿体及斑岩体的形态、

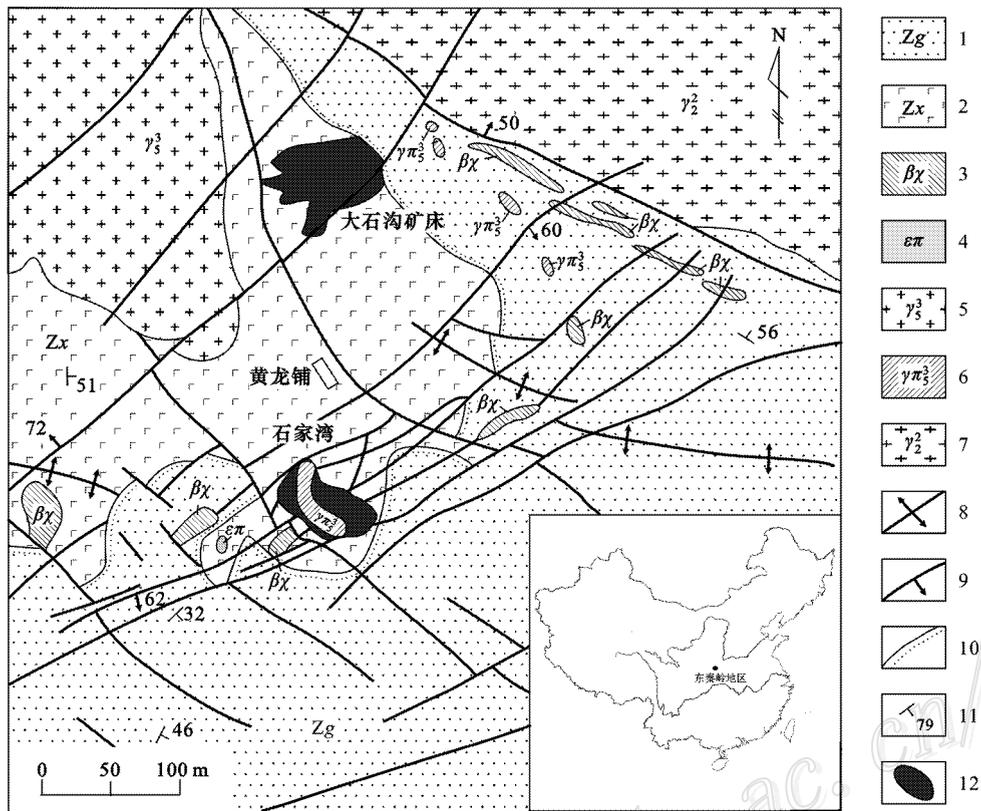


图 1 石家湾地区地质简图(底图据黄典豪等,1985 修改)

1—中元古界高山河组泥砂质板岩、变石英砂岩、石英岩；2—中元古界熊耳山群火山岩；3—辉绿岩；4—正长斑岩；5—老牛山花岗岩；6—花岗斑岩；7—片麻状花岗岩；8—背斜；9—断层；10—不整合界线；11—产状；12—钼矿体

Fig. 1 Geological sketch map of the Shijiawan Mo deposit

1—Argillo-arenaceous slate and quartzit; metaquartzose sandstone of Mesoproterozoic Gaoshanhe Group ;2—Volcanic rocks of Mesoproterozoic Xiong'er Group ;3—Diabase ;4—Syenite porphyry ;5—Laoniushan granite ;6—Granitic porphyry ;7—Gneissic granite ;8—Anticline ;9—Fault ;10—Unconformity ;11—Attitude ;12—Mo ore body

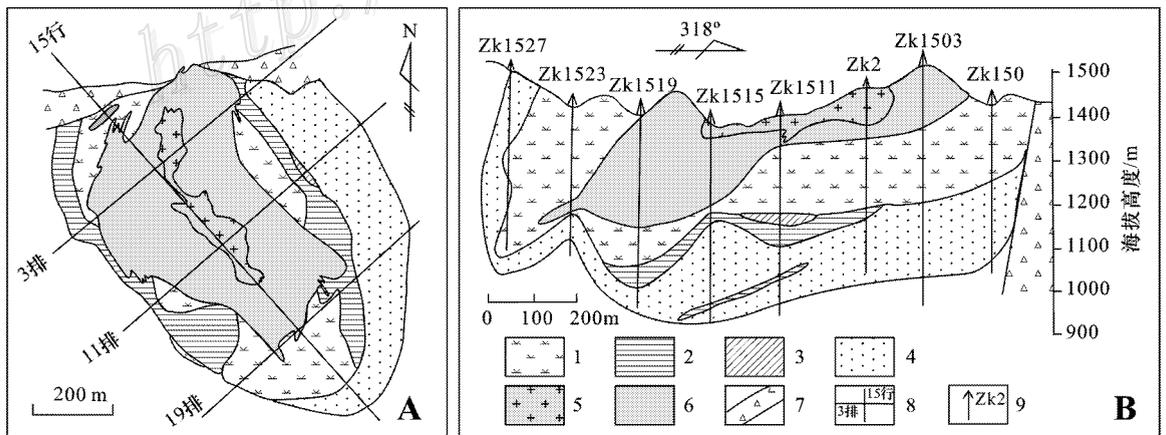


图 2 石家湾矿床斑岩型矿体蚀变分带(A)及剖面图(B)(修改自祝启明等,1989<sup>①</sup>、杜本臣等,1986)

1—钾化带；2—绢云母化带；3—泥化带；4—青磐岩化带；5—产于岩体中的矿体；6—产于围岩中的矿体；7—断层角砾岩；8—勘探线及编号；9—钻孔及编号

Fig. 2 Alteration zone (A) and cross section (B) of the Shijiawan ore deposit

1—Potassic zone ;2—Sericite zone ;3—Argillic zone ;4—Propylite zone ;5—Ore in rock body ;6—Ore in wall rock ;7—Fault breccia ;8—Exploratory line and its serial number ;9—Drill hole and its serial number

① 祝启明,李六权. 1989. 陕西省洛南县黄龙铺钼矿区详细普查地质报告. 陕西省地质矿产局第十三地质队.

产状,均受北西向断裂和黄龙铺背斜轴部控制。矿石构造以细脉浸染状和脉状为主,结构以叶片-鳞片状结构、聚片状结构为主。辉钼矿大多粒径细小,短径为1 mm,其晶体颗粒呈弯曲条片状、板条状、鳞片状和片状,集合体则以放射状、斑杂状和聚片状为主。矿物成分主要为石英、钾长石、辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿、黑云母、方解石和萤石。黄典豪等(1994)获得其辉钼矿 Re-Os 年龄为 138 Ma,钼矿化发生在早白垩世。

## 2 岩体地质

石家湾斑岩体位于老牛山岩基东侧凸出部位,出露长 600 m,宽 30~130 m,呈扁豆状,面积约 0.06 km<sup>2</sup>,沿北西向断裂侵入于熊耳群火山岩和高山河组沉积岩中。尽管前人描述石家湾斑岩体为多次侵入的复式岩体,即第一次岩浆侵入的产物为黑云母花岗闪长斑岩,它呈残留体零星出露于岩体的边部和内部,第二次侵入的是二长花岗斑岩,为岩体的主体,第三次侵入的是钾长花岗斑岩(杜本臣等,1986),但目前在矿区地表及浅部仅见到与钼矿关系密切的钾长花岗斑岩。

钾长花岗斑岩呈淡肉红色,块状构造,斑状结构,斑晶含量约占 5%~8%,主要为钾长石(2%~4%)、石英(1%~2%)及少量斜长石(1%)和黑云母(1%),斑晶粒径 0.3~1.5 mm。基质成分与斑晶一致,分别为钾长石(50%)、石英(15%~20%)、斜长石(8%~10%)和黑云母(3%)。石英粒度均匀,粒径约 0.15 mm,呈他形充填。部分钾长石表面发生泥化现象而混浊,斜长石出现绢云母化(图 3),但可见其聚片双晶。副矿物有磁铁矿、磷灰石、榍石等。

## 3 样品采集与处理分析

用于测年的钾长花岗斑岩样品采自洛南县九龙矿业公司石家湾钼矿区。本次在矿区不同位置采得 2 件样品(取样点位置:Sjw-1 为 34°20′53.9″N,110°01′27.0″E;Sjw-2 为 34°20′50.1″N,110°01′23.8″E)。室内从样品中分选出单颗粒锆石,然后挑选晶形完好、具有代表性的锆石颗粒,与标准锆石(TEM)一起粘贴在环氧树脂表面,再进行抛光镀金。镜下对锆石样品进行透射光和反射光显微照相,并用阴极发光扫描电镜进行图像分析,观察锆石形态特征,选出具有明显韵律环带结构且无裂纹的岩浆锆石

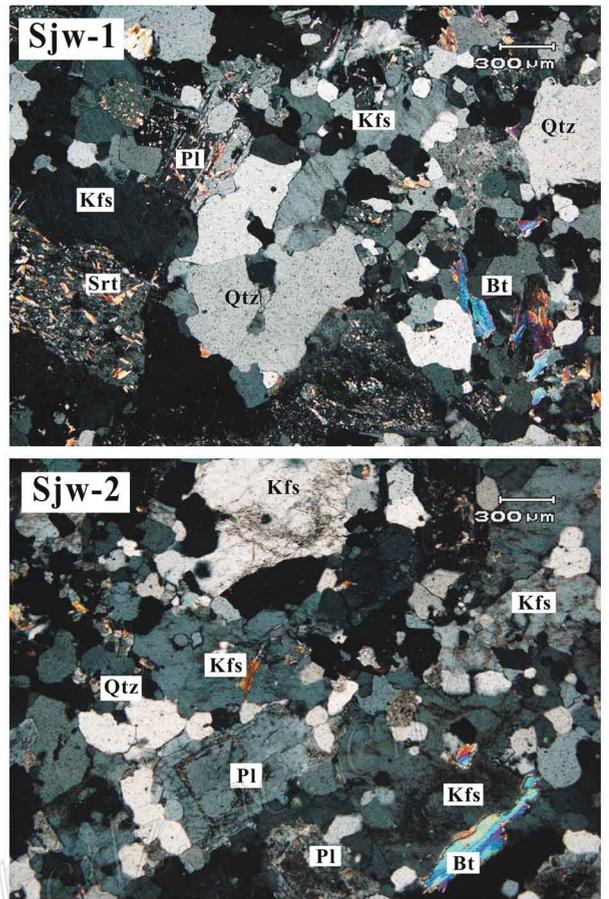


图 3 石家湾钾长花岗斑岩显微照片(正交偏光)

Qtz—石英; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Srt—绢云母

Fig. 3 Microstructure of granite porphyry from Shijiawan (crossed polarized light)

Qtz—Quartz; Kfs—K-feldspar; Pl—Plagioclase; Bt—Biotite; Srt—Sericite

(图 4)进行测试。

锆石激光剥蚀等离子体质谱 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素组成原位测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成,所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。锆石定年激光剥蚀所用斑束直径为 25 μm,频率为 10 Hz,能量密度约为 2.5 J/cm<sup>2</sup>,以 He 为载气。信号较小的<sup>207</sup>Pb、<sup>206</sup>Pb、<sup>204</sup>Pb(+<sup>204</sup>Hg)和<sup>202</sup>Hg 用离子计数器接收,<sup>208</sup>Pb、<sup>232</sup>Th、<sup>238</sup>U 信号用法拉第杯接收,实现了所有目标同位素信号的同时接收,且不同质量数的峰基本上都是平坦的,进而可以获得高精度的数据,均匀锆石颗粒<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb、<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U、<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U 的测试精度(2σ)均为 2% 左右,对锆石标准的定

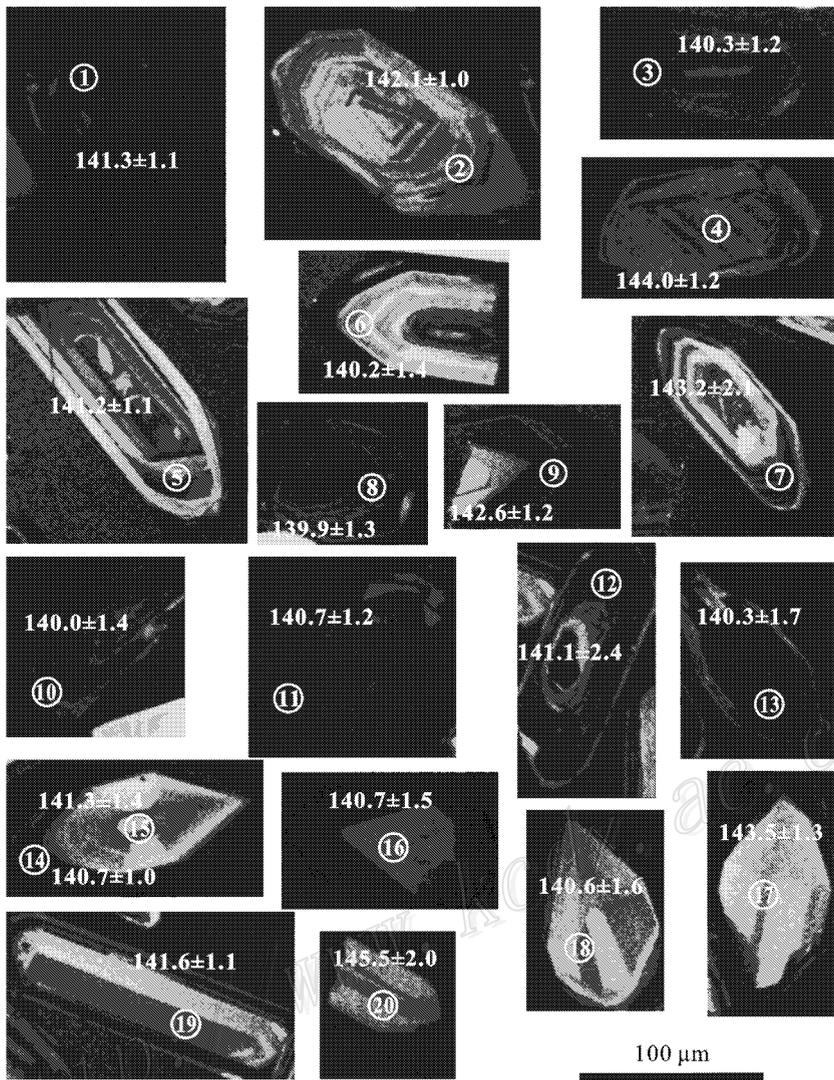


图 4 石家湾钾长花岗斑岩的锆石 CL 图像

Fig. 4 CL images of zircons from granite porphyry in Shijiawan

年精度和准确度在 1%( $2\sigma$ )左右。LA-MC-ICP-MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,数据分析前用锆石 GJ-1 进行调试仪器,使之达到最优状态,锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标,U、Th 含量以锆石 M127(U  $923 \times 10^{-6}$ , Th  $439 \times 10^{-6}$ , Th/U 0.475, Nasdala et al., 2008)为外标进行校正。在测试过程中每测定 5 个样品点后,重复测定 2 个锆石 GJ1 和一个锆石 Plesovice 进行校正,观察仪器的状态以保证测试精度。数据处理采用 ICPMSDataCal4.3 程序(Liu et al., 2008),测量过程中绝大多数分析点  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 500$ ,故不进行普通铅校正, $^{204}\text{Pb}$  由离子计数器检测, $^{204}\text{Pb}$  含量异常高的分析点可能受包体等普通 Pb 的影响,对  $^{204}\text{Pb}$  含量异常高的分析点

在计算时剔除,锆石年龄谱和图用 Isoplot 3.0 程序获得。详细实验测试过程可参见侯可军等(2009)。样品分析过程中,Plesovice 标样的分析结果为  $(337.0 \pm 2.3) \text{Ma}$  ( $n=4$ ,  $2\sigma$ , MSWD=0.088),对应的年龄推荐值为  $(337.13 \pm 0.37) \text{Ma}$  ( $2\sigma$ ) (Sláma et al., 2008),两者在误差范围内完全一致。

Hf 同位素激光束斑直径为  $55 \mu\text{m}$ ,激光剥蚀时间为 27 s,测定时采用锆石 GJ-1 做外标,其  $^{177}\text{Hf}/^{176}\text{Hf}$  的平均值为  $0.282008 \pm 2\sigma$ 。分析流程及校正参见侯可军等(2007)。测试时对标准锆石(GJ-1)共完成了 13 个点的测试, $^{177}\text{Hf}/^{176}\text{Hf}$  的变化范围介于  $0.281978 \sim 0.282027$ ,其平均值为 0.282008,与标准结果一致。

岩石地球化学分析样品经无污染破碎、磨碎 (>200目)制成分析样品,测试工作在国家地质实验测试中心进行。主量元素除 FeO、LOI 采用标准湿化学分析方法外,其他元素分析采用 XRF 方法完成,精度优于 5%。稀土和微量元素采用 ICP-MS 方法分析,含量  $>10 \times 10^{-6}$  的元素分析精度优于 5%,含量  $<10 \times 10^{-6}$  的元素分析精度优于 10%。样品的 Sr、Nd 同位素测试在核工业北京地质研究所完成,采用 ISOPROBE-T 热电离质谱仪,  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{143}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  比值通过 ICP-MS 方法测得 Rb、Sr、Sm、Nd 含量计算得到。

#### 4 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定结果

石家湾钾长花岗斑岩中挑选出的锆石为无色,部分略带浅黄色,颗粒晶形多为半自形-自形,呈短柱状或长柱状,长宽比多介于 1:2~1:3 之间。从 CL 图像看(图 4),锆石为典型的岩浆锆石,表现有清晰的振荡型岩浆生长环带。CL 图像中锆石颜色亮暗程度不一,说明其 U、Th 含量不同。LA-ICP-MS 法锆石测年数据见表 1,校正后的有效数据点共 20 个, S<sub>j</sub>2-14 和 S<sub>j</sub>2-15 为同一个锆石,分别为锆石边部及核部。从测试数据来看,CL 图像中亮暗程度不同的锆石的 U、Th、Pb 含量明显不同,亮色锆石元素含量值均低于暗色锆石。但亮色锆石的 Th/U 比值(0.97~1.60)明显高于暗色锆石(0.12~0.87),而锆石各测点的 U、Th 含量及 Th/U 比值与其年龄大小无相关性,所有锆石的 Th/U 比值均小于 0.1,说明这些锆石均为岩浆锆石(Hoskin et al., 2000)。锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值均集中在 140 Ma 左右(表 1)。鉴于普通铅的校正,对于大于 1 Ga 年龄的锆石用  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄合适,而对于年轻的锆石用  $^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄合适(Griffin et al., 2004),  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值范围介于(139.9±1.3)~(145.5±2.0)Ma,加权平均值为(141.44±0.59)Ma(MSWD=1),谐和图见图 5。因此,如按照 145 Ma 作为晚侏罗世与早白垩世的界限,石家湾钾长花岗斑岩的成岩时代应为早白垩世早期。

### 5 岩石地球化学测定结果

#### 5.1 主量元素特征

岩石地球化学测试结果见表 2,另外,本文还收

集了前人部分主量元素的测试结果。从表 2 可以看出,石家湾花岗岩具有高硅、富铝、富碱、低镁、贫钙的特征。 $\text{SiO}_2$ ( $w_B$ ,下同)为 70.52%~73.04%;全碱( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ )含量变化于 8.13%~9.12%之间, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值介于 1.28~1.70。 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 和  $\text{FeO}^T$ 的含量分别为 0.11%~0.81%、0.44%~1.81%和 0.69%~2.78%。 $\text{P}_2\text{O}_5$ 和  $\text{TiO}_2$ 的含量较低,分别为 0.069%~0.01%和 0.09%~0.25%,总体上属于高钾钙碱性系列。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 变化于 13.58%~14.71%, $A/\text{CNK}$ 为 0.99~1.13,平均为 1.08,属于准铝质花岗岩。石家湾斑岩体的  $\text{SiO}_2$ 含量与  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}^T$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 含量呈明显的负相关关系,且与老牛山花岗岩及金堆城花岗斑岩具有一致的氧化物含量范围及变化趋势(图 6),说明三者之间存在一定的联系。

#### 5.2 稀土元素与微量元素特征

石家湾花岗岩的稀土元素总量介于  $145.27 \times 10^{-6}$ ~ $156.97 \times 10^{-6}$ 之间,富集轻稀土元素( $\sum \text{LREE}$ 为  $135.3810^{-6}$ ~ $145.97 \times 10^{-6}$ ),轻重稀土元素分馏明显( $\sum \text{LREE}/\text{HREE}$ 为 15.74~15.90,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 20.23~23.06)(表 3);稀土元素配分模式右倾斜(图 7A), $\delta\text{Eu} = 0.65 \sim 0.71$ ,显示中等 Eu 负异常。对比老牛山花岗岩及金堆城花岗斑岩的稀土元素配分模式,发现 3 个岩体的稀土元素配分模式总体相似,轻重稀土元素分馏程度一致,都具有 Eu 的负异常。金堆城花岗斑岩的稀土元素含量普遍略低于老牛山花岗岩及石家湾钾长花岗斑岩,后两者的轻稀土元素含量相近,石家湾钾长花岗斑岩的重稀土元素含量介于两者之间(图 7A)。

从微量元素蛛网图(图 7B)上可知,石家湾钾长花岗斑岩富集 Rb、Ba、U 元素而亏损 P、Ti、Ta、Nb 元素。除个别元素的富集特征略有不同外(如 Ba、Ti),岩体与金堆城花岗斑岩和老牛山花岗岩具有相似的标准曲线(图 7)。

#### 5.3 Sr、Nd、Hf 同位素地球化学

表 4 列出了石家湾钾长花岗斑岩的 Sr、Nd 同位素组成。从表中可以看出岩石样品具有较高的 Sr 初始比值( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )为 0.7073~0.7077]及较低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-14.8~-16.0),与金堆城花岗斑岩、老牛山花岗岩 Sr、Nd 同位素组成接近。金堆城花岗斑岩( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )为 0.708~0.710, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -12.17~-13.11(焦建刚等,2008);采用最新的年龄数据 146 Ma 计算得到的老牛山花岗岩的( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )为 0.709, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -16.0(黄莹等,1990)。

表 1 石家湾钾长花岗斑岩 LA-ICP-MS U-Pb 钍石年龄测定结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of Shijiawan granite porphyry

点号	$w_B/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$				同位素比值				$t/\text{Ma}$					
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		
sj1-1	62	1612	2435	0.1485	0.00129	0.02215	0.000190	0.001297	0.00006	0.5939	127.9 ± 40	140.6 ± 1.1	141.3 ± 1.2	26.20 ± 1.2
sj1-2	13	335	571	0.04764	0.000294	0.00128	0.000159	0.001219	0.00008	0.7159	79.7 ± 15	138.7 ± 1.1	142.1 ± 1.0	24.62 ± 1.7
sj1-3	57	1375	2044	0.04946	0.000232	0.00147	0.000185	0.001396	0.00007	0.5881	168.6 ± 11	142.1 ± 1.3	140.3 ± 1.2	28.19 ± 1.4
sj1-4	13	228	667	0.04920	0.000261	0.00133	0.000195	0.001533	0.00013	1.2513	166.8 ± 11	144.7 ± 1.2	144.0 ± 1.2	30.97 ± 2.6
sj1-5	18	201	1246	0.04896	0.000233	0.00123	0.000169	0.001629	0.00013	2.6632	146.4 ± 17	141.5 ± 1.1	141.2 ± 1.1	32.90 ± 2.7
sj1-6	35	724	1830	0.04891	0.000185	0.00151	0.000227	0.001235	0.00008	1.0251	142.7 ± 23	140.3 ± 1.3	140.2 ± 1.4	24.95 ± 1.6
sj1-7	17	140	1206	0.04980	0.000242	0.00219	0.000333	0.002038	0.00018	3.7696	187.1 ± 11	145.4 ± 1.9	143.2 ± 2.1	41.16 ± 3.7
sj1-8	32	607	1910	0.04864	0.000161	0.00143	0.000213	0.001270	0.00010	1.4049	131.6 ± 7	139.4 ± 1.3	139.9 ± 1.3	25.66 ± 2.0
sj1-9	66	1163	3770	0.04949	0.000171	0.00129	0.000195	0.001599	0.00009	1.4310	172.3 ± 12	144.2 ± 1.1	142.6 ± 1.2	32.29 ± 1.9
sj1-10	67	1588	2933	0.05030	0.000255	0.00192	0.000219	0.001539	0.00009	0.8065	209.3 ± 11	144.2 ± 1.7	140.0 ± 1.4	31.09 ± 1.9
sj1-11	64	1360	3095	0.05093	0.000193	0.00145	0.000188	0.001601	0.00011	0.9916	239.0 ± 14	146.3 ± 1.3	140.7 ± 1.2	32.33 ± 2.1
sj2-12	50	1032	2246	0.04948	0.000197	0.00245	0.000384	0.001674	0.00011	0.9362	172.3 ± 14	142.7 ± 2.2	141.2 ± 2.4	33.81 ± 2.2
sj2-13	49	1069	2167	0.05294	0.000558	0.00356	0.000270	0.001449	0.00009	0.8664	327.8 ± 24	152.7 ± 3.1	140.3 ± 1.7	29.27 ± 1.8
sj2-14	21	462	958	0.04928	0.000226	0.00158	0.000226	0.001445	0.00010	0.8786	161.2 ± 11	142.4 ± 1.4	141.3 ± 1.4	29.19 ± 2.0
sj2-15	13	388	337	0.04909	0.000391	0.00168	0.000161	0.001402	0.00011	0.3719	153.8 ± 14	141.5 ± 1.5	140.7 ± 1.0	28.31 ± 2.3
sj1-16	6	139	143	0.05177	0.000685	0.00251	0.000233	0.001998	0.00019	0.4513	276.0 ± 25	148.4 ± 2.2	140.7 ± 1.5	40.34 ± 3.9
sj1-17	6	146	114	0.05147	0.000943	0.00299	0.000209	0.001825	0.00015	0.3217	261.2 ± 41	150.0 ± 2.7	143.5 ± 1.3	36.86 ± 2.9
sj2-18	14	436	273	0.05119	0.000527	0.00195	0.000257	0.001560	0.00010	0.2579	250.1 ± 19	146.4 ± 1.7	140.6 ± 1.6	31.50 ± 2.0
sj2-19	10	297	245	0.05235	0.000511	0.00181	0.000221	0.001506	0.00011	0.3557	301.9 ± 22	150.8 ± 1.3	141.6 ± 1.1	30.41 ± 2.1
sj2-20	5	120	138	0.05332	0.000812	0.00267	0.000325	0.002309	0.00021	0.4825	342.7 ± 33	156.5 ± 2.3	145.5 ± 2.0	46.61 ± 4.2

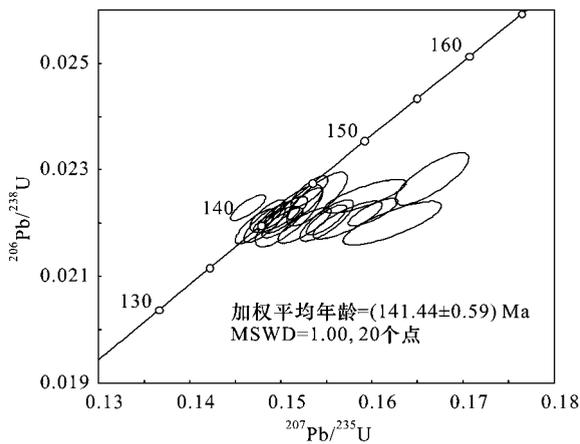


图5 石家湾钾长花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 Concordia plot of U-Pb result of granite porphyry from Shijiawan

表2 石家湾花岗斑岩的主元素分析结果

Table 2 Major element components of Shijiawan granite porphyry

成分	w <sub>B</sub> /%					
	钾长花岗岩		二长花岗斑岩		黑云母花岗闪长斑岩	
	Sjw-1	Sjw-2	1	8401	8402	2
SiO <sub>2</sub>	73.04	70.52	73.19	71.95	72.22	66.64
TiO <sub>2</sub>	0.19	0.22	0.09	0.23	0.25	0.48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.95	14.71	13.74	13.83	13.58	14.62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.85	1.15	0.46	1.37	1.61	3.26
FeO	0.57	1.02	0.28	1.27	1.34	1.39
MnO	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.06
MgO	0.34	0.54	0.11	0.76	0.81	1.15
CaO	0.71	1.81	0.44	1.44	1.45	1.21
Na <sub>2</sub> O	3.15	3.42	4.00	3.49	3.51	2.92
K <sub>2</sub> O	5.36	5.00	5.12	4.64	4.77	4.64
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.11	0.01	0.03	0.01	0.26
H <sub>2</sub> O	0.88	0.93	0.26	/	0.90	/
总和	99.51	99.51	99.51	99.04	100.48	96.63
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	8.51	8.42	9.12	8.13	8.28	10.25
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O*	1.70	1.46	1.28	1.33	1.36	1.59
FeO <sup>T</sup>	1.34	2.06	0.69	2.50	2.79	4.32
A/CNK*	1.13	1.03	1.06	1.03	1.00	1.21
资料来源	本文		①	聂凤军, 1989		①

\* 单位为 1% / “/”为未测

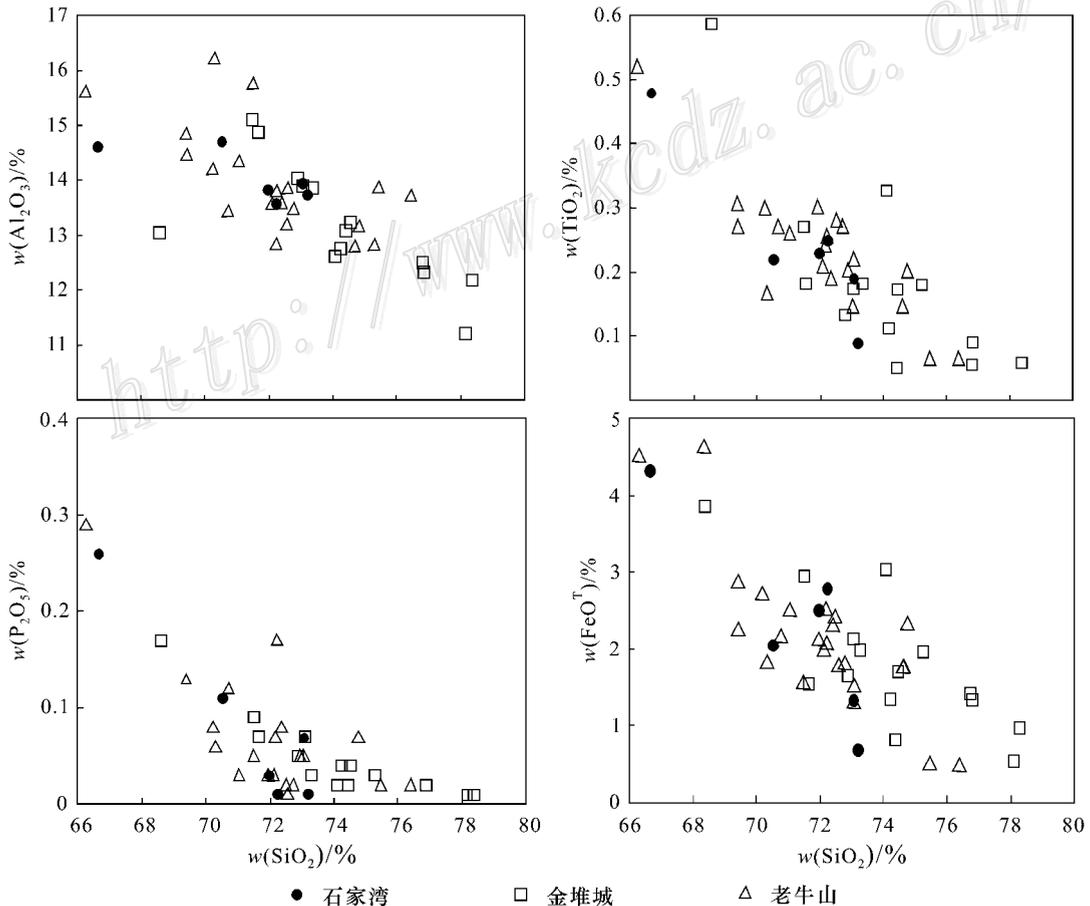


图6 石家湾花岗斑岩的 Harker 图解(金堆城花岗斑岩和老牛山花岗岩数据引自朱赖民等, 2008)

Fig. 6 Harker discrimination plot for granite porphyry from Shijiawan

说明三者具有非常接近的源区,且源区的贡献应以地壳物质为主。在锆石 La-ICP-MS 定年的基础上,对相同锆石颗粒进行了 Hf 同位素组成原位分析,结果列于表 5。由表 5 可以看出,17 个测点的 Hf 同位素组成较为一致,所有锆石的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值均小

表 3 石家湾钾长花岗斑岩的稀土元素及微量元素分析结果 ( $w_B/10^{-6}$ )

Table 3 REE and trace element analytical results ( $w_B/10^{-6}$ ) of Shijiawan granite porphyry

	Sjw-1	Sjw-2	元素	Sjw-1	Sjw-2
La	38.3	39.3	Sc	2.05	3.41
Ce	56	61.8	V	19.9	27.5
Pr	6.71	7.2	Cr	2.55	0.58
Nd	22.2	24.3	Co	1.25	2.24
Sm	3.5	3.87	Cu	4.72	4.61
Eu	0.66	0.78	Zn	29.9	28.7
Gd	2.55	2.6	Rb	149	144
Tb	0.45	0.45	Sr	294	638
Dy	2.08	2.3	Y	9.89	11
Ho	0.38	0.41	Zr	151	196
Er	1.1	1.25	Nb	31.1	31.6
Tm	0.17	0.2	Mo	395	12
Yb	1.12	1.31	Cs	2.66	2.12
Lu	0.16	0.2	Ba	1540	2131
$\Sigma\text{REE}$	135.38	145.97	Hf	5.01	6.26
LREE/HREE*	15.90	15.74	Ta	1.1	1.05
$(\text{La}/\text{Yb})_N^*$	23.06	20.23	Pb	29.7	32.8
$\delta\text{Eu}^*$	0.642	0.705	Th	13.7	15.5
$\delta\text{Ce}^*$	0.776	0.823	U	6.51	6.45

\* 单位为 1。

于 0.002,说明锆石形成后放射成因 Hf 的积累较少。岩体的  $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$  值介于  $-0.9499 \sim -0.9812$  之间,明显小于镁铁质地壳的  $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$  值 ( $-0.34$ , Amelin et al., 2000) 和硅铝质地壳的  $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$  值 ( $-0.72$ , Verwoort et al., 1996),故二阶段模式年龄更能反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间(或其源区物质在地壳的平均存留年龄),本文采用硅铝质大陆地壳的  $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$  计算岩体的初始  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  和  $t_{\text{DM1}}$  和  $t_{\text{DM2}}$ ,详细的计算方法见吴福元等(2007)。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值范围介于  $0.282056 \sim 0.282312$ ,平均为  $0.282187$ 。采用 141 Ma 经年龄校正后的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于  $-25.01 \sim -15.97$  之间,平均值为  $-20.64$ 。模式年龄和二阶段模式年龄  $t_{\text{DM2}}$  分别变化于  $1.33 \sim 1.68$  Ga 和  $1.70 \sim 2.16$  Ga 之间(表 5)。

## 6 讨论

### 6.1 岩石成因

石家湾花岗斑岩具高硅 ( $70.52\% \sim 73.04\%$ )、富钾 ( $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ )、准铝质 ( $A/\text{CNK}$  比值基本小于 1.1) 的特点,与 I 型花岗岩相似,而不同于 S 型花岗岩 (Chappell, 1999) ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) 值介于  $(0.7073 \sim 0.7077)$ ,初始 Sr 比值与 I 型花岗岩相近。随  $\text{SiO}_2$  含量的增高,样品的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{FeO}^T$  呈现出明显的降低趋势(图 4)表明岩浆在演化过程中经历了分离结晶作用。岩石的分异指数(DI)为  $86.7 \sim$

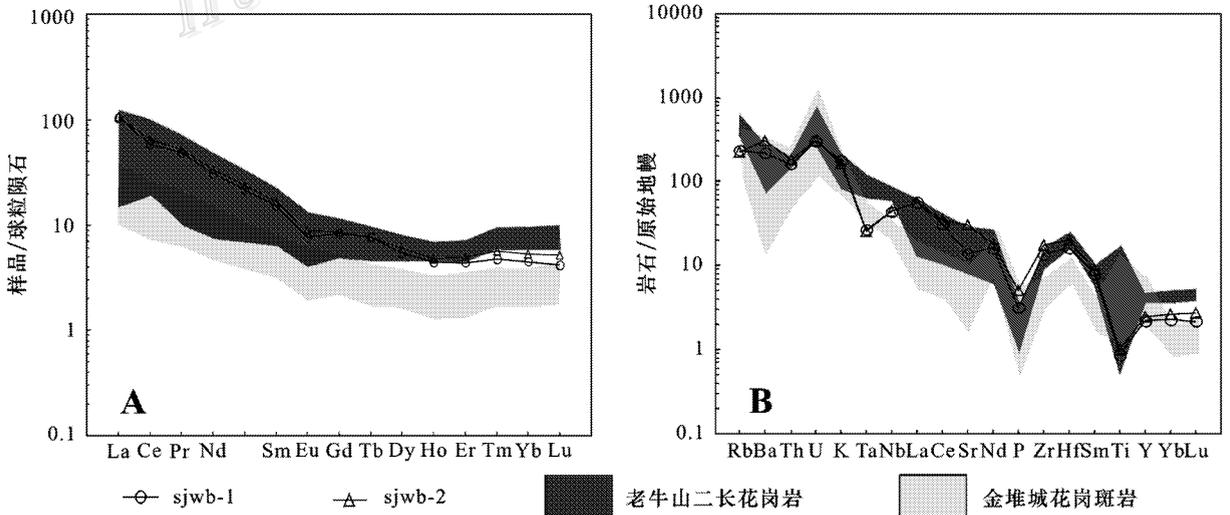


图 7 石家湾钾长花岗斑岩的稀土(A)与微量元素(B)配分曲线

A 标准数据采用 Boynton, 1984; B 标准化数值采用 Sun et al., 1989

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (A) and primitive mantle normalized trace element diagrams (B)

表4 石家湾钾长花岗斑岩的Sr、Nd、Pb同位素分析结果

Table 4 Sr and Nd isotope composition of granite porphyry from Shijiawan

样号	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$2\sigma$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$	$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$
sjwb-1	0.09532	0.511727	0.000006	0.5116	-16.0	1.46618	0.71021	0.000011	0.70727	4.12074
sjwb-2	0.09629	0.511788	0.000013	0.5117	-14.8	0.65297	0.70899	0.000009	0.70768	4.70545
LN-2*	0.09304	0.511721	0.000007	0.5116	-16.0	1.01200	0.71073	0.000013	0.70863	6.06294

\* LN-2 为老牛山花岗岩,数据引自黄萱等(1990)。

$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{CHUR}} = 0.7045$ ,  $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_{\text{CHUR}} = 0.0827$ ,  $(^{143}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.51238$ ,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.5116$ ;  $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11}/\text{a}$ ,  $\lambda_{\text{Sm}} = 6.5 \times 10^{-12}/\text{a}$ 。CHUR:原始球粒陨石均一储库。

表5 石家湾花岗斑岩锆石Lu-Hf同位素原位分析结果

Table 5 ICP-MS in-situ zircon Lu-Hf isotopic analytical results of Shijiawan granite porphyry

样号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$t/\text{Ma}$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$t_{\text{DMI}}$	$t_{\text{DM2}}$
Sj1-1	0.040662	0.001040	0.282056	0.000021	141.3	-25.31	-25.015	-0.9687	1684.77	2160.85
Sj1-2	0.044906	0.001322	0.282243	0.000017	142.1	-18.71	-18.411	-0.9602	1435.38	1827.12
Sj1-3	0.055484	0.001494	0.282277	0.000021	140.3	-17.50	-17.206	-0.9550	1393.57	1765.72
Sj1-4	0.041225	0.001238	0.282068	0.000017	144.0	-24.88	-24.578	-0.9627	1676.49	2138.89
Sj1-5	0.040489	0.001088	0.282312	0.000021	141.2	-16.27	-15.974	-0.9672	1330.06	1703.74
Sj1-6	0.034336	0.000823	0.282189	0.000024	143.5	-20.62	-20.310	-0.9752	1491.33	1923.86
Sj1-7	0.053077	0.001663	0.282083	0.000020	140.2	-24.35	-24.061	-0.9499	1674.45	2111.90
Sj1-8	0.049399	0.001284	0.282111	0.000019	143.2	-23.39	-23.089	-0.9613	1619.55	2063.70
Sj1-9	0.041870	0.001340	0.282228	0.000019	139.4	-19.25	-18.954	-0.9596	1457.41	1854.29
Sj1-10	0.043934	0.001352	0.282223	0.000016	142.6	-19.41	-19.112	-0.9593	1464.47	1862.64
Sj2-12	0.043093	0.001315	0.282268	0.000032	140.7	-17.83	-17.536	-0.9604	1400.19	1782.68
SJ2-14	0.040145	0.001237	0.282135	0.000024	141.2	-22.54	-22.242	-0.9627	1583.88	2020.77
SJ2-15	0.050086	0.001610	0.282126	0.000031	140.3	-22.86	-22.566	-0.9515	1612.44	2036.62
Sj1-16	0.035409	0.001022	0.282238	0.000027	140.6	-18.87	-18.576	-0.9692	1430.48	1835.57
Sj1-17	0.044476	0.001434	0.282151	0.000025	145.5	-21.95	-21.642	-0.9568	1568.63	1990.75
Sj2-18	0.024591	0.000623	0.282085	0.000035	141.6	-24.28	-23.975	-0.9812	1626.20	2108.95
Sj2-19	0.038669	0.000933	0.282263	0.000037	141.3	-18.01	-17.709	-0.9719	1393.11	1791.86

Hf同位素分析过程中采用的标准值为球粒陨石( $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ ) $_{\text{CHUR}} = 0.0332$ , ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ) $_{\text{CHUR}} = 0.0282772$ (Blichert-Toft et al., 1997); 亏损地幔( $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ ) $_{\text{DM}} = 0.0384$ , ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ) $_{\text{DM}} = 0.28323$ (Griffin et al., 2000); Lu衰变常数 $\lambda_{\text{Lu}} = 1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$ (吴福元等, 2007)。

96.7, 指示岩浆的分异程度高。微量元素P、Ti、Eu等元素的亏损,氧化物 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{TiO}_2$ 与 $\text{SiO}_2$ 呈明显的负相关性说明了存在磷灰石及钛铁矿等矿物的分离结晶(李昌年, 1992)。

石家湾花岗斑岩与区内老牛山花岗岩及金堆城花岗斑岩的主要组分具有一致性的演化趋势(图6), 稀土元素及微量元素配分曲线也较为相似(图7), 说明三者具有相似的岩石成因。广泛被接受的观点认为东秦岭与早白垩世早期钼成矿作用有关的I型花岗岩是经部分熔融形成的(黄典豪等, 1984; 罗铭玖等, 1991)。在La-La/Sm图解上, 石家湾花岗斑岩与区内老牛山花岗岩及金堆城花岗斑岩均投点于东秦岭含钼斑岩体的范围内, 部分熔融曲线附近(图8), 说明石家湾花岗斑岩与东秦岭含钼斑岩体具有相同的成岩方式。

## 6.2 岩浆源区示踪

石家湾花岗斑岩具高的Sr初始比值(0.7073~0.7077)及较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-14.8~-16.0), 说明其源区的贡献应以下地壳物质为主(图9)。区内金堆城花岗斑岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为0.708~0.710,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-12.17~-13.11(焦建刚等, 2008); 老牛山花岗岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为0.7055~0.7084(陈衍景等, 2000)。据罗铭玖等(1991)报道, 东秦岭花岗斑岩岩体的该值范围为0.7034~0.7080, 因此, 石家湾岩体与上述两岩体甚至东秦岭花岗斑岩体Sr初始比值相近(图9), 表明成因的密切关系与成岩物质的同源性。不同源区的岩浆具有明显的不相容元素比值, 石家湾花岗岩中的Rb/Sr值为0.2, 等于中部地壳的Rb/Sr比值(0.2~0.4)。此外, Ba/Th比值介于112~137(地壳为124), Th/Nb值为

0.44~0.49(地壳为 0.44), Rb/Nb 为 4.6~4.8(地壳为 4.7)(杨学明等, 2000), 这些比值同样暗示了石家湾花岗岩的地壳来源。

对岩浆锆石 Hf 同位素研究发现, 不同地球化学储源库的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  同位素组成明显不同, 如球粒

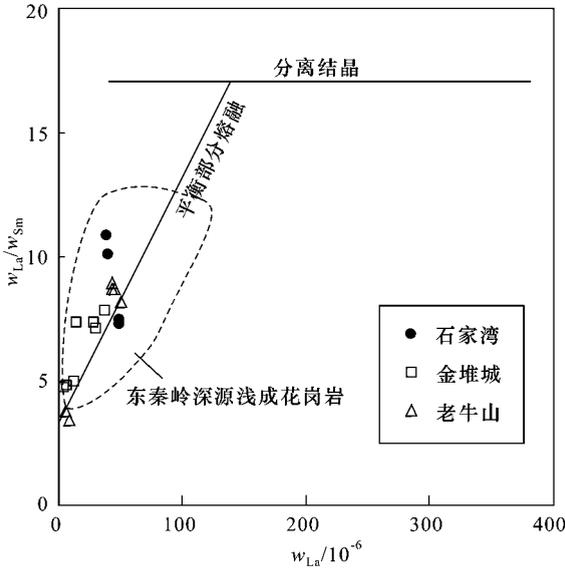


图 8 石家湾花岗斑岩的  $w_{\text{La}}/w_{\text{Sm}}-w_{\text{La}}$  图解(虚线据卢欣祥等 2002; 底图据 Allegre et al., 1977)

Fig. 8 The  $w_{\text{La}}/w_{\text{Sm}}$  vs  $w_{\text{La}}$  plot of Shijiawan granite porphyry (dash line after Lu et al., 2002; base map after Allegre et al., 1977)

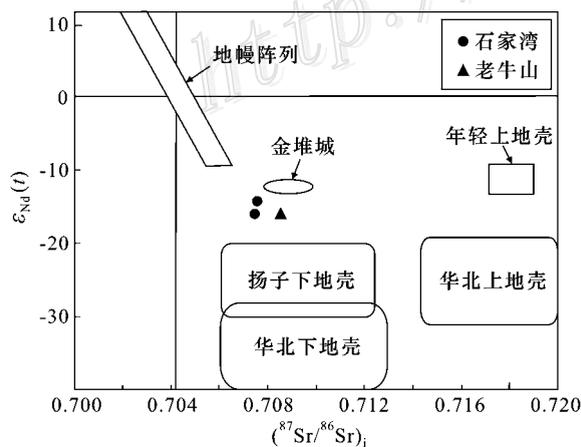


图 9 石家湾花岗斑岩的全岩 Sr-Nd 同位素组成特征(华北上地壳和下地壳范围引自 Jahn et al., 1999; 扬子下地壳引自 Chen et al., 2001)

Fig. 9 Sr and Nd isotopic compositions of granite porphyry (Limits of North China upper crust and lower crust after Jahn et al., 1999; Yangtze lower crust after Chen et al., 2001)

陨石和亏损地幔的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值较大 ( $\geq 0.282772$ ),  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为零或正值, 而富集地幔及地壳的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值较小,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为负(吴福元等, 2007)。因此, Hf 同位素示踪研究已经广泛地应用于对一些重要地球化学储库的源区判别(陈懋弘等, 2009; 杨进辉等, 2007)。石家湾钾长花岗斑岩体锆石的 Hf 同位素组成具有较低的  $\epsilon_{\text{Hf}}(-25.02 \sim -15.97)$  表明其为壳源成因(图 10), 与全岩的 Sr、Nd 同位素结果吻合。东秦岭中生代花岗岩类亦具有相近的源区物质组成特征, 如南泥湖和上房沟岩体的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  为  $-12.7 \sim -15.5$ (包志伟等, 2009), 花山花岗岩体(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $(135.7 \pm 3.4)$  Ma) 的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  为  $-11.6 \sim -18.3$ , 合峪岩体(锆石 LA-ICP-MS 年龄为  $(134.5 \pm 1.5)$  Ma) 的锆石钍同位素  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为  $-10.9 \sim -16.3$ (郭波等, 2009)。这些数据表明石家湾及东秦岭中生代花岗质岩浆的相同的地壳源区。

斑岩型矿床的成矿物质来源与成岩岩浆的来源具有很大程度的相似性, 但尽管上述岩体同位素给出了石家湾、金堆城花岗斑岩的壳源为主的信息, 而矿石中成矿物质来源研究发现源区成分并不单一。辉钼矿中 Re 的含量可以作为成矿物质来源的参考

依据之一(Mao et al., 1999; Stein et al., 1997), 石家

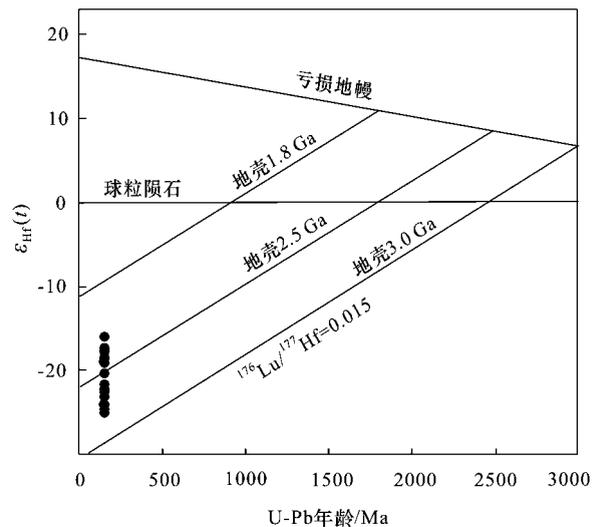


图 10 石家湾花岗斑岩锆石初始 Hf 同位素组成(亏损地幔演化线根据 Nowell et al., 1998)

Fig. 10 Zircon Hf isotopic features and histogram of Hf isotopic composition diagram of granite porphyry from Shijiawan (evolutionary line of depleted mantle after Nowell et al., 1998)

湾辉钼矿为  $10.17 \times 10^{-6}$ ; 金堆城斑岩型辉钼矿的 Re 含量范围为  $12.19 \times 10^{-6} \sim 19.17 \times 10^{-6}$ , 平均  $16.13 \times 10^{-6}$  (黄典豪等, 1994), 反映其为壳幔混合来源, 但以地壳物质为主。石家湾岩体的  $\delta^{34}\text{S}$  为  $1.9\text{‰} \sim 5.1\text{‰}$  (薛祖雷等, 1984), 矿石中该值介于  $1.0\text{‰} \sim 2.5\text{‰}$ , 平均值为  $1.63\text{‰}$  (罗铭玖等, 1991), 位于岩浆流体来源范围之内 ( $-3\text{‰} \sim 7\text{‰}$ , Ohmoto, 1986)。这些说明石家湾斑岩壳源为主的源区混有幔源成分。

目前, 关于包括石家湾等花岗斑岩体及其相关钼矿床的幔源物质来源问题, 还存在较小的争论, 一种是花岗斑岩来源于已为地壳组成部分的幔源物质, 既太华群变质岩的原岩——中基性火山岩 (罗铭玖等, 1991; 薛祖雷等, 1984); 另一种认为燕山期中中国东部基性岩浆底侵, 下地壳物质被加热而部分熔融, 发生壳幔交换, 生成岩浆 (卢欣祥等, 2002), 幔源物质来自底侵的基性岩浆。越来越多的证据支持中国东部岩浆底侵事件的存在, 及早白垩世区内处于碰撞后的陆内伸展环境。因此, 本文认为与区内金堆城和老牛山花岗岩一致, 石家湾花岗岩来源于地壳物质的部分熔融, 且混有幔源成分, 而幔源物质很可能来自底侵的基性岩浆。

### 6.3 岩浆作用与成矿作用

石家湾斑岩钼矿赋存在花岗斑岩外接触带, 并围绕花岗斑岩产出, 矿体与岩体空间关系密切, 说明斑岩体为成矿岩体。从早期到晚期, 成矿元素 Mo、Cu、Zn、Pb 含量剧增, 晚期钾长花岗斑岩中 Mo 和 Cu 含量是早期黑云石英闪长岩的相应元素的 20.93 和 5.54 倍<sup>①</sup>。本文通过 ICP-MS 锆石 U-Pb 测年法得到比较集中的同位素年龄值, 加权平均值为  $141.44 \text{ Ma}$  ( $\text{MSDW} = 1.0$ ), 可代表钾长花岗岩的侵位时代, 其与辉钼矿的 Re-Os 年龄 [ $(138 \pm 8) \text{ Ma}$ ] (黄典豪等, 1994) 相近, 表明钼矿化是岩体侵位后的产物。朱赖民等 (2008) 采用 LA-ICP-MS 法测得金堆城含钼斑岩与老牛山黑云二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为  $(140.95 \pm 0.45) \text{ Ma}$  和  $(146.35 \pm 0.55) \text{ Ma}$ , 与石家湾钾长花岗斑岩的年龄相近, 结合相似的地球化学特征, 说明三者很可能为同期同源岩浆活动的产物。

综合黄龙铺地区的成岩及成矿作用, 可以鉴别出区内共发生过 3 期岩浆侵入事件, 每次都伴有不

同程度的钼矿化作用。岩浆侵入及矿化作用从早到晚依次为: ①三叠纪地幔来源的碳酸岩, 年龄约  $220 \text{ Ma}$  (黄典豪等, 1994) 形成脉状碳酸岩型钼铅矿床, 如黄龙铺、桃园等; ②晚侏罗世-早白垩世形成壳幔混源 (I 型) 的石家湾、金堆城花岗斑岩和老牛山花岗岩, LA-ICP-MS 年龄为  $140 \sim 146 \text{ Ma}$ , 构成斑岩型钼矿床的成矿岩体, 如石家湾钼矿、金堆城钼矿, 该期也是东秦岭地区最主要的钼矿化期; ③早白垩世碱性花岗斑岩及辉绿岩脉, 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $129 \sim 131 \text{ Ma}$  (赵海杰等, 2010)。尽管后一期形成的中酸性岩体目前在黄龙铺地区还没发现钼矿化, 但是研究揭示, 在整个东秦岭地区, 于该年龄段侵位的花岗岩体存在钼矿化, 且形成矿床数量及规模也较为可观, 如鱼池岭超大型钼矿, 成矿年龄为  $131 \text{ Ma}$  (Re-Os) (周珂等, 2009); 雷门沟大型钼矿床, 成矿年龄为  $129 \sim 131 \text{ Ma}$  (Re-Os 法, 李永峰等, 2006)。毛景文等 (2005) 和 Mao 等 (2008) 总结提出, 在东秦岭-大别地区存在 3 个中酸性岩浆活动和钼矿化的峰期, 分别是  $233 \sim 221 \text{ Ma}$ ,  $148 \sim 138 \text{ Ma}$  和  $131 \sim 112 \text{ Ma}$ 。黄龙铺地区 3 期岩浆活动及相应的钼矿化事件正分别对应于此 3 个峰期。大量的研究资料揭示早白垩世东秦岭甚至是中国东部地区处于陆内伸展构造背景 (叶会寿等, 2006; Xie et al., 2006; 谢桂青等, 2007), 而广泛的岩浆侵入和相应的钼矿化作用正是拉张事件的产物。

## 7 结 论

(1) 石家湾钾长花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $(141.44 \pm 0.59) \text{ Ma}$ , 表明岩体侵位于早白垩世, 与斑岩型钼矿成矿时代一致。

(2) 石家湾钾长花岗斑岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$  介于  $0.7073 \sim 0.7077$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  变化于  $-14.8 \sim -16.0$ ,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值变化于  $0.282056 \sim 0.282312$  之间,  $\epsilon_{\text{Hf}}(141 \text{ Ma})$  值介于  $-25.01 \sim -15.97$  之间, 平均值为  $-20.64$ , 表明岩浆来源于下地壳。综合其他资料认为花岗斑岩以地壳物质为主的源区混有幔质成分。

(3) 石家湾花岗斑岩具有高硅 [ $\omega(\text{SiO}_2)$ ]  $70.52\% \sim 73.04\%$ 、富碱 [ $\omega(\text{K}_2\text{O}) + \omega(\text{Na}_2\text{O})$ ] 为  $8.13\% \sim 9.12\%$ 、准铝质 ( $A/\text{CNK} = 0.99 \sim 1.13$ ) 特点; 稀土标准化曲线呈右倾, 中等 Eu 的负异常 ( $\delta\text{Eu}$  为  $0.65$

① 祝启明, 李六权. 1989. 陕西省洛南县黄龙铺钼矿区详细普查地质报告. 陕西省地质矿产局第十三地质队.

~0.71), 微量元素以富集 Rb、Ba、U 元素而亏损 P、Ti、Ta、Nb 为特征, 属于 I 型花岗岩。主要氧化物与 SiO<sub>2</sub> 呈明显的负相关说明岩浆演化过程中存在磷灰石及钛铁矿等矿物的分离结晶, La-La/Sm 图解揭示部分熔融是其主要的成岩方式。

(4) 石家湾花岗斑岩与区内金堆城花岗斑岩及老牛山花岗岩具有相同的地球化学特征, 结合相近的 Sr、Nd 同位素组成特征, 说明这些含钼岩体可能来源于同源母岩浆。

志 谢 在野外工作期间得到洛南县九龙矿业有限公司技术人员, 以及寺耳金矿有限责任公司王建杰总工程师的大力支持与协助, 两位审稿人对本文提出了建设性的修改意见, 在此一并表示衷心感谢。

在翟裕生先生 80 华诞来临之际, 谨以此文向翟院士表达崇高的敬意!

## References

Allegre C J, Treuil M, Minster J F, Minster B and Albarede F. 1977. Systematic use of trace element in igneous process: Part I, fractional crystallization processes in volcanic suites [J]. *Contrib. Mineral. & Petrol.*, 60(1): 57-75.

Amelin Y, Lee D C and Halliday A N. 2000. Early-Middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 4205-4225.

Bao Z W, Zeng Q S, Zhao T P and Yuan Z L. 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).

Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and evolution of the mantle-crust system [J]. *Earth Planetary Science Letters*, 148: 243-258.

Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [A]. In: Henderson P, ed. *Rare earth element geochemistry* [C]. New York: Elsevier. 63-114.

Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites [J]. *Lithos*, 46: 535-551.

Chen F G, Du B C, Wu Q Z and Wang D X. 1984. Preliminary study on polymorphism of molybdenite from Shijiawan Mo deposit in Shaanxi Province [J]. *Geol. Shaanxi*, 2(2): 1-18 (in Chinese with English abstract).

Chen J F, Yan J, Xie Z, Xu X and Xing F. 2001. Nd and Sr isotopic

compositions of igneous rocks from the lower Yangtze region in eastern China: Constraints on sources [J]. *Phys. Chem. Earth*, 26: 719-731.

Chen M H, Zhang W, Yang Z X, Lu G, Hou K J and Liu J H. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb age and Hf isotopic composition of Baiceng ultrabasic dykes in Zhengfeng County, southwestern Guizhou Province [J]. *Mineral Deposits*, 28(3): 240-250 (in Chinese with English abstract).

Chen Y J, Li C, Zhang J, Li Z and Wang H H. 2000. Isotopic characters of Sr-O, rock forming mechanism and style of porphyry molybdenum deposit zone in Qinling [J]. *Science in China (Series D)*, 30 (Supp.): 65-72 (in Chinese).

Du B C, Chen F G, Wu Q Z and Wang D X. 1986. Geology of Shijiawan molybdenum deposit in Luonan County, Shaanxi Province [J]. *Geol. Shaanxi*, 4(2): 58-70 (in Chinese with English abstract).

Griffin W L, Belousova E A and Shee S R. 2004. Crustal evolution in the northern Yilarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircon [J]. *Precambrian Research*, 131(3-4): 231-282.

Guo B, Zhu L M, Li B and Gong H J. 2009. Zircon U-Pb ages and Hf isotope composition of the Huashan and Heyu granite in the southern margin of North China Craton, and its diagenetic geodynamic setting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 265-281 (in Chinese with English abstract).

Hoskin P W O and Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. *Metamorphic Geol.*, 18: 423-439.

Hou K J, Li Y H, Zou T R, Qu X M, Shi Y R and Xie G Q. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological application [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595-2604 (in Chinese with English abstract).

Hou K J, Li Y H and Tian Y Y. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS [J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481-492 (in Chinese with English abstract).

Huang D H, Nie F J, Wang Y C and Jiang X J. 1984. Lead isotopic composition and the source of metallogenetic materials research on molybdenum deposit of east Qinling [J]. *Mineral Deposits*, 3(4): 20-28 (in Chinese with English abstract).

Huang D H, Wang Y C and Nie F J. 1985. A new type of molybdenum deposit geological characteristics and metallogenetic mechanism of the Huanglongpu carbonatite vein-type of molybdenum (lead) deposit, Shaanxi [J]. *Acta Geologica Sinica*, 59(3): 241-257 (in Chinese with English abstract).

Huang D H, Wu C Y, Du A D and He H L. 1994. Re-Os isotope ages of molybdenum deposits in east Qinling and their significance [J]. *Mineral Deposits*, 13(3): 221-229 (in Chinese with English abstract).

Huang X and Wu R L. 1990. Nd-Sr isotopes of granitoids from Shaanxi Province and their significance for tectonic evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, (2): 1-11 (in Chinese with English abstract).

Jahn B M, Wu F Y, Lo C H and Tsai C H. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic in-

- trusions of the northern Dabie complex, central China[ J ]. *Chem. Geol.*, 157 : 119-146.
- Jiao J G, Yuan H C, Liu R P, Yan H Q, Suo T and Xu G. 2008. LA-ICP-MS dating and magma source of Laoniushan and Jinduicheng granite rockbody in Huaxian County, Shaanxi Province[ A ]. The 9th National Conference of Mineral Deposits, China[ C ]. Beijing: Geol. Pub. House. 461-462 ( in Chinese ).
- Li C N. 1992. Trace elements and petrology of igneous rocks[ M ]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 1-18 ( in Chinese ).
- Li Y F, Mao J W, Liu D Y, Wang Y B, Wang Z L, Wang Y T, Li X F, Zhang Z H and Guo B J. 2006. Shrimp zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the Leimengou porphyry molybdenum deposit, west Henan and its geological implication[ J ]. *Geol. Rev.*, 52 ( 1 ): 122-131 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Gunther D, Xu J, Gao C and Chen H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [ J ]. *Chem. Geol.*, 257 : 34-43.
- Lu X X, Yu Z P, Feng Y L, Wang Y T, Ma W F and Cui H F. 2002. Mineralization and tectonic setting of deep-hypabyssal granites in east Qinling mountain[ J ]. *Mineral Deposits*, 21 ( 2 ): 168-178 ( in Chinese with English abstract ).
- Luo M J, Zhang F M, Dong Q Y, Xu Y R, Li S M and Li K H. 1991. Molybdenum deposits in China[ M ]. Zhengzhou: Henan Sci. & Tech. Press. 452 ( in Chinese ).
- Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H and Du A D. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W( Mo ) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance[ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63 : 1815-1818.
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, Li X F, Wang Y T, Zhang C Q and Li Y F. 2005. Mesozoic large scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 21 ( 1 ): 169-188 ( in Chinese with English abstract ).
- Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, Qü W J, Du A D, Ye H S, Pirajno F, Li H M, Guo B J, Li Y F and Yang Z Q. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt [ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 72 : 4607-4626.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, Mattinson J M, Corfu F, Dor W, Kamo S L, Kennedy A K, Kronz A, Reiners P W, Frei D, Kosler J, Wan Y, Götze J, Häger T, Kröner A and Valley J. 2008. Zircon M257: A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[ J ]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32 : 247-265.
- Nie F J and Fan J T. 1989. REE elements geochemical research of molybdenum granite in Jinduicheng-Huanglongpu, Shaanxi Province [ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1 ( 8 ): 24-33 ( in Chinese with English abstract ).
- Nowell G M, Kempton P D, Noble S R, Fitton J G, Saunders A D, Mahoney J J and Taylor R N. 1998. High precision Hf isotope measurements of MORB and OIB by thermal ionization mass spectrometry: Insights into the depleted mantle[ J ]. *Chem. Geol.*, 149 : 211-233.
- Ohmoto H. 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits[ J ]. *Rev. Mineral.*, 16 : 491-556.
- Sláma J, Kosler J, Condon D J, Crowley J L, Gerdes A, Hanchar J M, Horstwood M S A, Morris G A, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett M N and Whitehouse M J. 2008. Plesovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[ J ]. *Chem. Geol.*, 249 : 1-35.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Du Andao and Sun Y. 1997. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt Shanxi Province, China[ J ]. *Econ. Geol.*, 92 : 827-835.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [ A ]. In: Saunders A D and Norry M J, ed. *Magmatism in ocean basins*[ C ]. London: Geol. Soc. London. Spec. Pub., 42 : 313-345.
- Vervoort J D, Pachel T J, Gehrels G E and Nutman A P. 1996. Constraints on early earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes[ J ]. *Nature*, 379 : 624-627.
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematic and their applications in petrology[ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 ( 2 ): 185-220 ( in Chinese with English abstract ).
- Xie G Q, Mao J W, Li R L, Zhou S D, Ye H S, Yan Q R and Zhang Z S. 2006. SHRIMP U-Pb zircon dating for volcanic rocks of the Dasi Formation in southeastern Hubei, middle-lower Yangtze River and its implication[ J ]. *Chinese Sci. Bull.*, 51 : 3000-3009.
- Xie G Q, Mao J W, Li R L, Ye H S, Zhang Y X, Wan Y S, Li H M, Gao J J and Zheng R F. 2007. SHRIMP zircon U-Pb dating for volcanic rocks of the Daying Formation in Baofeng basin in eastern Qinling, China, and its implications[ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 ( 10 ): 2387-2396 ( in Chinese with English abstract ).
- Xu C, Song W L, Qi L and Wang L J. 2009. Geochemical characteristics and tectonic setting of ore-bearing carbonatites in Huanglongpu Mo ore field[ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 25 ( 2 ): 422-430 ( in Chinese with English abstract ).
- Xue Z L, Wu X D, Wang Y C, Li Q and Fan Y M. 1984. A review on the genesis and metallogeny of the molybdenite-bearing granitoid at Jinduicheng, Shaanxi [ J ]. *Geol. Shaanxi*, 2 ( 2 ): 37-46 ( in Chinese with English abstract ).
- Yang J H, Wu F Y, Xie L W and Liu X M. 2007. Petrogenesis and tectonic implications of Kuangdonggou syenites in the Liaodong Peninsula, east North China Craton: Constraints from in situ zircon U-Pb ages and Hf isotopes[ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 ( 2 ): 263-276 ( in Chinese with English abstract ).
- Ye H S, Mao J W, Li Y F, Guo B J, Zhang C Q, Liu J, Yan Q R and Liu G Y. 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*, 80 ( 7 ): 1078-1087 ( in Chinese with English abstract ).

Zhao H, Zhu Q M, Zhu B Y, She X M and Zhang Q D. 1983. A discuss on the geological structure skeleton of Huanglongpu polymetallic Mo ore field [J]. Geol. Shaanxi, (3): 28-35 (in Chinese with English abstract).

Zhao H J, Mao J W, Ye H S, Xie G Q and Yang Z Q. 2010. Geochronology and geochemistry of the alkaline granite porphyry and diabase dikes in the Huanglongpu area of Shaanxi Province: Petrogenesis and their implications for tectonic environment [J]. Geol. China, 37(1): 12-27 (in Chinese with English abstract).

Zhou K, Ye H S, Mao J W, Ju W J, Zhou S F, Meng F and Gao Y L. 2009. Geological characteristics and molybdenites Re-Os isotopic dating of Yuchiling porphyry Mo deposit in western Henan Province [J]. Mineral Deposits, 28(2): 170-184 (in Chinese with English abstract).

Zhu L M, Zhang G W, Guo B and Li B. 2008. U-Pb (LA-ICP-MS) zircon dating for the large Jinduicheng porphyry Mo deposit in the east Qinling, China, and its metallogenic geodynamical setting [J]. Acta Geological Sinica, 82(2): 204-218 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 包志伟, 曾乔松, 赵太平, 原振雷. 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, 25(10): 2523-2536.
- 陈福根, 杜本臣, 武清周, 王鼎夏. 1984. 陕西石家湾钼矿床中辉钼矿多型初步研究 [J]. 陕西地质, 2(2): 1-18.
- 陈懋弘, 章伟, 杨宗喜, 陆刚, 侯可军, 刘建辉. 2009. 黔西南白层超基性岩墙锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成研究 [J]. 矿床地质, 28(3): 240-250.
- 陈衍景, 李超, 张静, 李震, 王海华. 2000. 秦岭钼矿带斑岩体锆石 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.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MS-ICPMS 锆石 Hf 同位素的分析方法及其地质应用 [J]. 岩石学报, 23(10): 2595-2604.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术 [J]. 矿床地质, 28(4): 481-492.
- 黄典豪, 聂凤军, 王义昌, 江秀杰. 1984. 东秦岭地区钼矿床铅同位素组成特征及其成矿物质来源初探 [J]. 矿床地质, 3(4): 20-28.
- 黄典豪, 王义昌, 聂凤军, 江秀杰. 1985. 一种新的钼矿床类型-陕西黄龙铺碳酸岩脉型钼(铅)矿床地质特征及成矿机制 [J]. 地质学报, 59(3): 241-257.
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 何红蓼. 1994. 东秦岭地区钼矿床的铼-钼同位素年龄及其意义 [J]. 矿床地质, 13(3): 221-230.
- 黄萱, 吴仁利. 1990. 陕西地区岩浆岩 Sr、Nd 同位素特征及其与大地构造发展的联系 [J]. 岩石学报, 2: 1-11.
- 焦建刚, 袁海潮, 刘瑞平, 闫海卿, 孙涛, 徐刚. 2008. 陕西华县老牛山和金堆城花岗岩体 LA-ICP-MS 定年与岩浆源区 [A]. 第九届全国矿床会议论文集 [C]. 北京: 地质出版社. 461-462.
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 1-189.
- 李永峰, 毛景文, 刘敦一, 王彦斌, 王志良, 王义天, 李晓峰, 张作衡, 郭保健. 2006. 豫西雷门沟斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 及辉钼矿 Re-Os 测年及其地质意义 [J]. 地质评论, 52(1): 122-131.
- 卢欣祥, 于在平, 冯有利, 王义天, 马维峰, 崔海峰. 2002. 东秦岭深源浅成型花岗岩的成矿作用及地质构造背景 [J]. 矿床地质, 21(2): 168-175.
- 罗铭玖, 张辅民, 董群英, 许永仁, 黎世美, 李昆华. 1991. 中国钼矿床 [M]. 郑州: 河南科技出版社. 1-452.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景 [J]. 岩石学报, 31(1): 169-188.
- 聂凤军, 樊建廷. 1989. 陕西金堆城-黄龙铺地区含钼花岗岩类稀土元素地球化学研究 [J]. 岩石矿物学杂志, (1): 24-32.
- 吴福元, 李献花, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. 岩石学报, 23(2): 185-220.
- 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 叶会寿, 张毅星, 万渝生, 李厚民, 高建京, 郑榕芬. 2007. 东秦岭宝丰盆地大营组火山岩 SHRIMP 定年及其意义 [J]. 岩石学报, 23: 2387-2396.
- 许成, 宋文磊, 漆亮, 王林均. 2009. 黄龙铺钼矿田含矿碳酸岩地球化学特征及其形成构造背景 [J]. 岩石学报, 25(2): 422-430.
- 薛祖雷, 吴向东, 王养苍, 李泉, 樊益民. 1984. 陕西金堆城地区含钼花岗岩类成因及成矿的讨论 [J]. 陕西地质, 2(2): 37-46.
- 杨进辉, 吴福元, 谢烈文, 柳小明. 2007. 辽东矿洞沟正长岩成因及其构造意义: 锆石原位微区 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约 [J]. 岩石学报, 23(2): 263-276.
- 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜, 译. Hugh. R. Rollison, 著. 2000. 岩石地球化学 [M]. 合肥: 中国科技大学出版社. 188 页.
- 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 郭保健, 张长青, 刘珺, 闫全人, 刘国印. 2006. 东秦岭东沟超大型斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义 [J]. 地质学报, 80(7): 1078-1087.
- 赵亨, 祝启明, 朱炳义, 余兴民, 张庆德. 1983. 论黄龙铺多金属钼矿田地质构造骨架 [J]. 陕西地质, (3): 28-35.
- 赵海杰, 毛景文, 叶会寿, 谢桂青, 杨宗喜. 2010. 陕西黄龙铺地区碱性花岗斑岩及辉绿岩的年代学与地球化学: 岩石成因及其构造环境示踪 [J]. 中国地质, 37(1): 12-27.
- 周珂, 叶会寿, 毛景文, 屈文俊, 周树峰, 孟芳, 高亚龙. 2009. 豫西鱼池岭斑岩型钼矿床地质特征及其辉钼矿铼-钼同位素年龄 [J]. 矿床地质, 28(2): 170-184.
- 朱赖民, 张国伟, 郭波, 李焱. 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): 204-218.