

doi:10.3799/dqkx.2010.114

东秦岭金堆城花岗斑岩体的锆石 U-Pb 年龄、 物质来源及成矿机制

焦建刚^{1,2}, 汤中立¹, 钱壮志¹, 袁海潮³, 闫海卿¹, 孙涛¹, 徐刚¹, 李小东¹

1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054

2. 矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西西安 710054

3. 西北有色地质勘查局 712 总队, 陕西咸阳 712000

摘要: 通过 LA-ICP-MS 方法测得金堆城和老牛山花岗岩体中锆石 U-Pb 年龄分别为 143.7 ± 3.0 Ma 和 144.5 ± 4.4 Ma, 与金堆城钼矿床中辉钼矿的 Re-Os 年龄 139 ± 3.0 Ma 在误差范围内一致, 界定了金堆城成岩成矿时代为侏罗纪末—白垩纪初, 2 个岩体为同期岩浆事件的产物, 与燕山运动有关。金堆城岩体较老牛山岩体富 SiO_2 、 K_2O , 岩石地球化学数据显示 2 个岩体都具有一致的高硅、富碱、过铝质系列和钙碱性岩石系列特征; 高的 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 、低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 及 Pb 同位素图解证明 2 个岩体主要来自下地壳物质部分熔融, 可能有少量地幔物质加入。年代学与岩石地球化学数据证实老牛山岩体和金堆城岩体的岩浆源区与岩石成因相同, 推测老牛山岩体在深部发生分异演化, 为金堆城小岩体提供了大量的热液和矿物质, 从而出现了金堆城小岩体成大矿现象。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; 成矿机制; 花岗岩; 地球化学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2010)06-1011-12

收稿日期: 2009-11-15

Metallogenic Mechanism, Magma Source and Zircon U-Pb Age of Jinduicheng Granitic Porphyry, East Qinling

JIAO Jian-gang^{1,2}, TANG Zhong-li¹, QIAN Zhuang-zhi¹, YUAN Hai-chao³, YAN Hai-qing¹,
SUN Tao¹, XU Gang¹, LI Xiao-dong¹

1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China

3. 712 Team of Northwestern Geology Exploration Bureau for Nonferrous Metal Resources, Xianyang 712000, China

Abstract: Zircon U-Pb isotopic ages of Jinduicheng and Laoniushan granite are measured by LA-ICP-MS techniques, and we find that the mean ages are 143.7 ± 3.0 Ma and 144.5 ± 4.4 Ma respectively, which correspond to the molybdenite Re-Os age 139 ± 3.0 Ma of Jinduicheng molybdenite polymetallic deposit. It indicates that the diagenetic and metallogenic ages of Jinduicheng deposit are between Jurassic and Cretaceous, related with Yanshan movement. Granites in Jinduicheng are richer in SiO_2 , K_2O than those in Laoniushan. The geochemical data demonstrate that Jinduicheng and Laoniushan granites are both characterized with high Si, rich alkali, peraluminous rock series and the calcium alkaline rock series, which indicate that the rock-bodies belong to the continental crust granite; the high $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$, low $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$, and the Pb isotope values prove the main source of the rock-bodies is partial melting of lower continental-crust materials. The chronology and the litho-geochemical data confirm that Laoniushan and Jinduicheng granite are the same magma source area, and it is concluded that Laoniushan rock body has provided mass hydrothermal and mineral substance in depth for the small Jinduicheng rock body, which in turn led to the phenomenon of the Jinduicheng small rock body containing large ore deposit.

Key words: zircon U-Pb isotopic age; metallogenic mechanism; granite; geochemistry.

基金项目: 长安大学科技创新基础研究项目 (Nos. CHD2009JC044, CHD2010ZD005); 公益性行业科研专项 (Nos. 200911007-5, 201011058); 深部探测技术与试验研究专项 (SinoProbe-05-01).

作者简介: 焦建刚 (1976-), 男, 副教授, 从事矿床学及矿产勘查研究。E-mail: jiangang@chd.edu.cn

0 引言

位于华北板块南缘的东秦岭钼矿带,西起陕西省金堆城地区,东至河南省栾川南泥湖地区,呈北西走向分布,产出了金堆城、南泥湖、三道庄、上房沟、东沟等超大型钼矿床和雷门沟等 10 多个钼多金属矿床,钼金属储量达 3×10^6 t 以上,是中国最重要的钼矿分布区之一,也是仅次于美国西部 Climax-Henderson 斑岩钼矿带的全球第二大钼矿带(张正伟等,2001;李永锋等,2005)。此外,斑岩钼矿床内还伴有钨、铅、稀土、金和铀等元素的矿化,如南泥湖钼矿中伴生的钨达到超大型规模,其储量位居中国第二位(毛景文等,2005)。

东秦岭钼矿带中的钼矿成矿作用多与燕山期花岗岩斑岩体或斑状花岗岩有关,含矿斑岩体出露面积一般小于 1 km^2 。前人对矿带中一些含矿斑岩体进行了锆石 U-Pb 测年,典型的有南泥湖 $149.56 \pm 0.36 \text{ Ma}$ (包志伟等,2009)、上房沟 $135.38 \pm 0.39 \text{ Ma}$ (包志伟等,2009)、雷门沟 $136.2 \pm 1.5 \text{ Ma}$ (李永峰等,2006)、东沟 $112 \pm 1 \text{ Ma}$ (叶会寿等,2006)、金堆城 $140.95 \pm 0.45 \text{ Ma}$ (朱赖民等,2008);八里坡 $155.9 \pm 2.3 \text{ Ma}$ (焦建刚等,2009);同时对矿床中的辉钼矿开展了 Re-Os 同位素测年,典型的有金堆城 $139 \pm 3.0 \text{ Ma}$ (黄典豪等,1994)、南泥湖 $141.8 \pm 2.1 \text{ Ma}$ (李永峰等,2005)、三道庄 $145.0 \pm 2.2 \text{ Ma}$ (李永峰等,2005)、上房沟 $144.8 \pm 2.1 \text{ Ma}$ (李永峰等,2005)、雷门沟 $132.4 \pm 1.9 \text{ Ma}$ (李永峰等,2006)、东沟 $116 \pm 1.7 \text{ Ma}$ (叶会寿等,2006)、八里坡 $156.3 \pm 2.2 \text{ Ma}$ (焦建刚等,2009)。由此可见,东秦岭地区钼矿的成岩成矿时代存在一定的差异,可能与成矿的地球动力学背景有关(卢欣祥等,2002;毛景文等,2003)。

一般大型—超大型矿床对国家矿产资源总量起决定性作用。近年来,围绕超大型矿床的科学研究与深边部找矿有较大进展(成秋明等,2009;陈守余等,2009;徐启东等,2009)。金堆城超大型钼矿位于东秦岭钼矿带的西部边缘,成矿与花岗斑岩体关系密切,具有岩体小、成矿规模大的特征;但矿床的物质来源来自下地壳还是壳幔混源存在争议。朱赖民等(2008)获得金堆城岩体的成岩年龄和老牛山的成岩年龄分别为 $140.95 \pm 0.45 \text{ Ma}$ 和 $146.35 \pm 0.55 \text{ Ma}$,从岩石地球化学角度分析认为老牛山与金堆城同成因,但为何出现近 6 Ma 的差异却没有解释,也没有解释为何一个成矿一个没成矿。本研究

的年龄测试工作与朱赖民等(2008)同期,获得了金堆城斑岩体和老牛山岩体中锆石的 U-Pb 年龄,同时获得了金堆城岩体的岩石地球化学数据,并结合前人研究进展讨论了金堆城斑岩体和老牛山岩体的成因关系和成矿机制。

1 矿床地质

金堆城超大型钼多金属矿床位于陕西省华县境内,大地构造位置隶属于华北板块南缘东秦岭钼矿带,该矿床的成矿与花岗斑岩体密切相关,为典型的斑岩型钼矿床(图 1)。金堆城钼矿床中钼金属储量大于 $96 \times 10^4 \text{ t}$,钼平均品位 0.061%。矿体主要产于 NW-SE 走向的燕山期花岗斑岩内部,部分产于安山质火山岩中,呈巨大的连续扁豆体沿 $325^\circ \sim 145^\circ$ 方向延伸。矿体地表出露长约 1 600 m,深部控制长约 2 200 m,厚度约 600~700 m。矿石类型分为 3 种:花岗斑岩型、变安山岩型、板岩—石英岩型。矿石向围岩方向分叉尖灭,矿石钼品位中部富,向两侧、南东端逐渐降低而过渡为围岩。矿石主要为角岩结构与斑状结构,有用矿物(黄铁矿、辉钼矿)呈网脉状、脉状、浸染状构造;主要金属矿物为辉钼矿、黄铁矿,其次有磁铁矿、黄铜矿,再次为辉铋矿、方铅矿、闪锌矿、锡石;非金属矿物主要有石英、长石,其次为萤石、白云

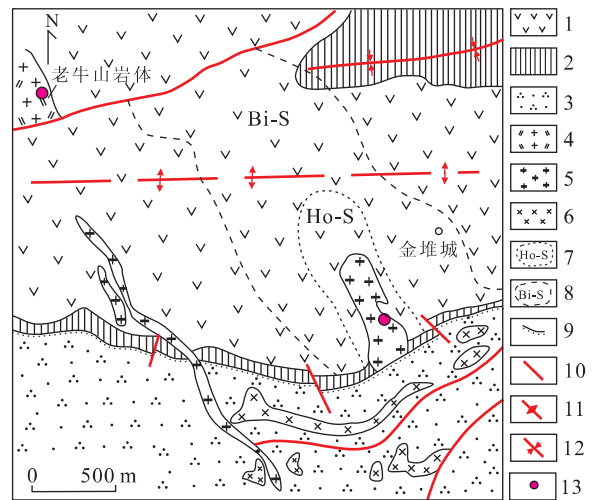


图 1 金堆城钼矿床地质(黄典豪等,1987)

Fig. 1 Geological map of Jinduicheng porphyry molybdenum deposit

1. 中元古界熊耳群火山岩; 2. 中元古界熊耳群板岩; 3. 中元古界高山河组石英砂岩; 4. 燕山期二长花岗岩; 5. 花岗斑岩; 6. 辉绿玢岩; 7. 角岩化; 8. 黑云母化; 9. 不整合接触界线; 10. 断层; 11. 背斜轴; 12. 向斜轴; 13. 采样位置

母、黑云母、绢云母、绿柱石、铁锂云母和方解石等,伴生有益元素有铜、硫、铼等,含量稳定均匀。

2 岩体地质

金堆城花岗斑岩体呈岩筒状,地表出露长 450 m±,宽 150 m±,面积约 0.067 km²;深部长 2 000 m±,宽 450 m±,面积约 0.35 km²。岩体北宽南窄,向北西延伸,侵入于中元古界熊耳群火山岩中(李永峰等,2005)。岩体普遍蚀变,蚀变类型常见的有绢云母化、云英岩化、泥化、硅化与钾长石化等。绢云母化花岗斑岩为肉红色,中粒斑状结构,主要矿物含量:钾长石为 45%,石英为 25%~30%,斜长石为 15%,白云母(绢云母)为 10%等。绢云母化花岗斑岩进一步蚀变形形成云英岩化花岗斑岩,二者为过渡关系;钾长石普遍高岭石化。围绕花岗斑岩体的围岩热变质强烈,可划分为黑云母化带、角岩化带,岩体边部有许多晚期的伟晶岩脉、石英脉穿切岩体。

矿区侵入岩比较发育,主要有金堆城、两岔沟、鲁家沟及碌碡沟花岗斑岩岩体,老牛山二长花岗岩岩体,还有元古代的中基性熔岩、辉绿岩脉。花岗斑岩走向约 330°,其中仅金堆城、两岔沟花岗斑岩岩体具有钼矿化,岩石呈肉红色,中粒斑状结构,斑晶为石英、正长石、斜长石,基质为正长石、石英和斜长石等;而鲁家沟与碌碡沟花岗斑岩岩石呈浅灰绿色,

斑状结构,斑晶为石英、正长石,基质为石英、叶腊石等。有学者从成矿相关性出发将二者分开,认为是两类花岗岩(王新,2001),但对其成因关系值得进一步探讨。

矿区北部有部分老牛山岩体出露,岩体可分为三相:细粒片麻状花岗岩相(产于岩体北部边缘)、中粒花岗岩相(岩体中部主体)、中粗粒斑状花岗岩(产于岩体南部及邻近矿区)。老牛山二长花岗岩岩体在岩相划分及时代确定上都有一定的争议(严阵等,1985;尚瑞钧等,1988),结合大陆动力学背景,我们倾向认为老牛山岩体主体为燕山期侵入的二长花岗岩,或者是复式岩体,有多期岩浆叠加事件。

3 样品采集与分析

样品采自金堆城露天采厂和邻近矿区的老牛山中粗粒斑状花岗岩相(图 1)。分别选择硫化物含量少而且新鲜的花岗斑岩样品 1 块,重约 1~2 kg,在陕西省地质调查院实验室进行无污染碎样到 60 目大小,然后在长安大学矿产资源与地质工程教育部重点实验室进行重选、磁选,最后进行双目镜下单颗粒锆石挑选。为确保无污染,锆石挑选过程由作者亲自完成。制靶和阴极发光照相过程在西北大学国家重点实验室完成,然后在长安大学实验室进行反射光和透射光照相,检查锆石的内部结构,结合阴极发

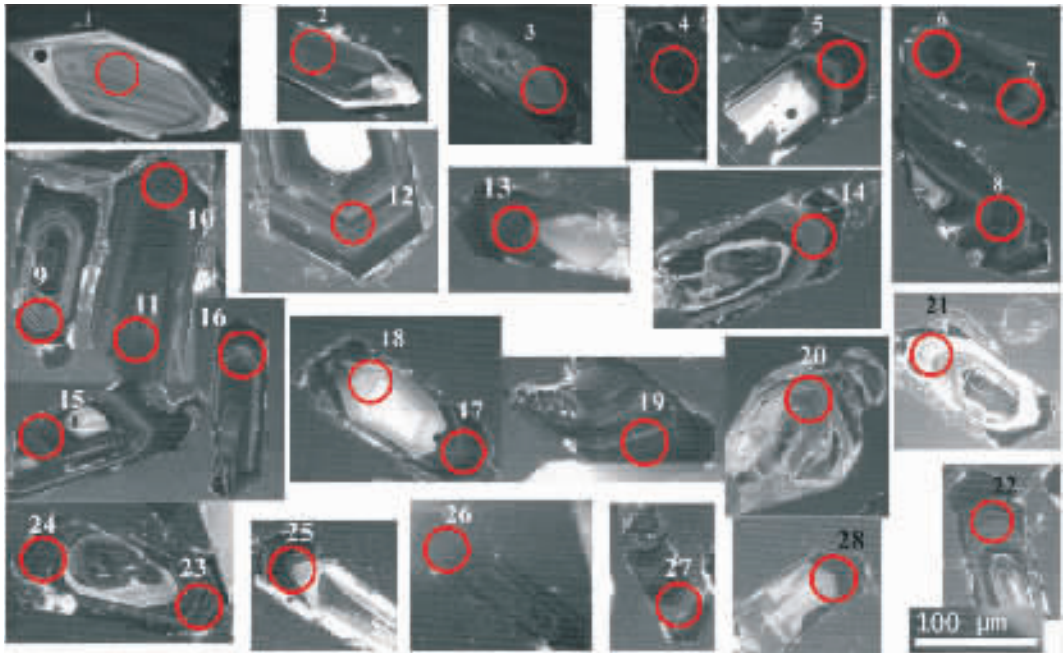


图 2 金堆城斑岩体样品阴极发光照片及分析点位置

Fig. 2 Cathode-luminescence photos of zircons from sample of Jinduicheng granitic porphyry



图 3 老牛山花岗岩体样品阴极发光照片及分析点位置

Fig. 3 Cathode-luminescence photos of zircons from sample of Laoniushan granite

光照片圈定环带清晰、自形、晶体完好的锆石用于年龄测定(图 2,图 3)。

本次样品锆石的阴极发光图像显示,锆石多呈港湾状,裂纹发育,一些锆石颗粒发育典型的韵律环带结构,反映了岩浆成因锆石的结构特点。长柱状锆石多数具有岩浆振荡环带结构,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定显示了年轻的结果。一些短柱状锆石或部分长柱状锆石虽然晶形较好,但阴极发光照片具有白色的图像或白色的亮边,可能为变质重结晶的结果(样品点 JDC27,谐和度差)。部分锆石颗粒中见不规则的内核,表明为继承锆石(样品点 JDC20)。

锆石的原位 U-Pb 年龄测定在西北大学国家重点实验室的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)上完成。其激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M,测试时激光束斑直径为 30 μm ,剥蚀深度 20~40 μm ,激光脉冲 10 Hz,能量 34~40 mJ;电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)系统为 Agilent7500a。锆石的同位素组成以锆石 91500 为外标进行校正,微量元素组成以玻璃标样 NIST610 做外标 SiO_2 含量为内标进行校正(Yuan *et al.*, 2004)。锆石微量和同位素数据采用 GLITTER 程序,普通铅校正采用 Andersen(2002)的方法,年龄计算使用 Isoplot(ver2.49)完成。

根据样品的测试结果(表 1),用金堆城岩体

(JDC)样品中 26 个点(除去 JDC20 与 JDC27 点)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据作图,在一致曲线图中,数据点成群分布(图 4),下交点值与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值都为 $143.7 \pm 3 \text{ Ma}$,Th/U 值集中于 0.18~0.49。值得注意的是,在所有测试的锆石中,JDC8、JDC10 和 JDC12 锆石韵律环带清晰稳定,没有裂纹而且颗粒大,测得比较可靠的年龄为 $141 \pm 2 \text{ Ma} \sim 145 \pm 2 \text{ Ma}$ 之间,而且 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄吻合,与谐和图中年龄加权平均值一致,代表了金堆城花岗斑岩的主要结晶期。与前人获得的金堆城钼矿床中辉钼矿的 Re-Os 年龄 $139 \pm 3.0 \text{ Ma}$ (黄典豪等,1994)在误差范围内一致,也与朱赖民等(2008)获得的锆石年龄 $140.95 \pm 0.45 \text{ Ma}$ 在误差范围内一致,显示成矿同时或略滞后于成岩,反映了金堆城矿床成岩成矿时代为侏罗纪末—白垩纪初,与燕山运动有关。

老牛山花岗岩(LN)样品中获得了 34 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据,Th/U 值集中于 0.19~1.03(表 2),具有岩浆成因锆石数据特征。在一致曲线图中,数据点成群分布(图 4),下交点值与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值都为 $144.5 \pm 4.4 \text{ Ma}$ 。值得注意的是,在所有测试的锆石中,LN06、LN07、LN29、LN34 锆石晶形完好,韵律环带清晰稳定,没有裂纹而且颗粒大,测得比较可靠的年龄为 $141 \pm 2 \text{ Ma} \sim 146 \pm 2 \text{ Ma}$ 之间;而且 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$

表 1 金堆城斑岩体中锆石 U-Pb 年龄测试结果

Table 1 U-Pb isotopic analyses for zircons from Jinduicheng granitic porphyry

样品 分析号	含量(μg/g)			Th/U	同位素比值			年龄(Ma)		
	²⁰⁶ Pb _c	²³² Th	²³⁸ U		²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁵ U	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U
JDC01	25.28	112.44	255.62	0.44	0.075 71±0.002 03	0.257 78±0.005 10	0.024 66±0.000 28	1 087±22	223±4	157±2
JDC02	65.04	217.27	510.79	0.43	0.055 89±0.002 26	0.176 21±0.006 84	0.022 87±0.000 27	448±92	165±6	146±2
JDC03	223.4	820.44	2 612.33	0.32	0.057 97±0.001 40	0.169 62±0.002 77	0.021 19±0.000 23	529±18	159±2	135±1
JDC04	233.04	803.61	2 942.89	0.27	0.050 62±0.001 72	0.143 94±0.004 62	0.020 62±0.000 23	224±81	137±4	132±1
JDC05	397.68	669.19	3 458.76	0.19	0.050 63±0.002 08	0.163 58±0.006 44	0.023 47±0.000 28	224±97	154±6	150±2
JDC06	389.15	2 567.6	4 167.88	0.62	0.073 96±0.003 08	0.230 19±0.009 16	0.022 57±0.000 27	1 040±86	210±8	144±2
JDC07	240.69	844.55	2 254.03	0.37	0.062 14±0.001 83	0.197 76±0.005 35	0.023 08±0.000 26	679±64	183±5	147±2
JDC08	340	1 173.59	3 877.4	0.30	0.050 32±0.001 13	0.153 02±0.003 0	0.022 05±0.000 24	210±53	145±3	141±2
JDC09	218.87	1 142.33	2 352.98	0.49	0.068 44±0.002 75	0.202 88±0.007 77	0.021 50±0.000 26	882±85	188±7	137±2
JDC10	323.87	880	3 538.32	0.25	0.048 06±0.001 01	0.150 64±0.001 83	0.022 72±0.000 24	102±13	142±2	145±2
JDC11	241.83	964.52	2 607.63	0.37	0.050 44±0.001 08	0.159 16±0.002 02	0.022 88±0.000 25	215±13	150±2	146±2
JDC12	297.08	1 048.08	3 294.53	0.32	0.047 69±0.001 01	0.149 36±0.001 85	0.022 72±0.000 24	84±13	141±2	145±2
JDC13	523.46	927.83	5 145.28	0.18	0.049 82±0.001 04	0.170 51±0.002 07	0.024 83±0.000 27	187±13	160±2	158±2
JDC14	68.79	311.05	632.44	0.49	0.052 13±0.001 47	0.176 60±0.003 91	0.024 57±0.000 28	291±30	165±3	156±2
JDC15	266.66	708.63	2 180.1	0.32	0.046 05±0.003 01	0.134 59±0.008 66	0.021 20±0.000 24	128±8	135±2	
JDC16	304.93	1 258.72	3 491.47	0.36	0.051 75±0.001 31	0.159 01±0.003 62	0.022 29±0.000 24	274±59	150±3	142±2
JDC17	96.5	398.1	869.25	0.46	0.049 94±0.002 55	0.159 03±0.007 89	0.023 09±0.000 28	192±118	150±7	147±2
JDC18	115.89	418.04	1 364.89	0.31	0.054 07±0.001 92	0.156 59±0.005 27	0.021 00±0.000 24	374±82	148±5	134±2
JDC19	279.15	1 644.11	3 008.51	0.55	0.048 35±0.001 03	0.154 63±0.002 03	0.023 22±0.000 25	116±14	146±2	148±2
JDC20	563.71	1 032.02	715	1.44	0.103 91±0.002 21	3.066 03±0.034 99	0.214 22±0.002 32	1 695±9	1 424±91	251±12
JDC21	118.2	298.18	1 264.17	0.24	0.061 16±0.001 80	0.194 13±0.005 24	0.023 02±0.000 27	645±65	180±4	147±2
JDC22	292.32	788.22	3 088.46	0.26	0.049 21±0.001 03	0.161 63±0.002 03	0.023 86±0.000 26	158±13	152±2	152±2
JDC23	200.65	733.94	2 202.5	0.33	0.056 28±0.002 29	0.165 93±0.006 45	0.021 38±0.000 25	464±92	156±6	136±2
JDC24	215.69	748.08	2 280.59	0.33	0.050 39±0.001 25	0.165 77±0.003 01	0.023 91±0.000 27	213±22	156±3	152±2
JDC25	236.81	658.58	2 493.39	0.26	0.059 84±0.002 19	0.182 75±0.006 34	0.022 15±0.000 26	598±81	170±5	141±2
JDC26	380.41	1 433.09	4 589.65	0.31	0.050 32±0.001 16	0.142 09±0.002 26	0.020 53±0.000 23	210±18	135±2	131±1
JDC27	829.18	1 389.39	4 403.29	0.32	0.104 04±0.036 15	0.255 15±0.088 08	0.017 79±0.000 71	1 697±774	231±71	114±4
JDC28	169.58	799.65	1 885.82	0.42	0.058 33±0.001 88	0.174 61±0.005 23	0.021 71±0.000 26	542±2	163±5	138±2

注:测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,2007.

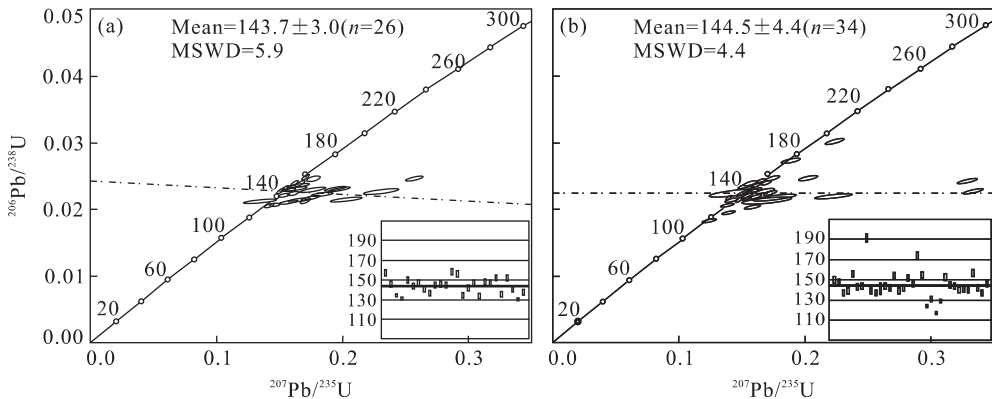


图 4 金堆城斑岩体(a)与老牛山花岗岩体(b)样品锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Concordia diagram of zircon U-Pb dating result from Jinduicheng granitic porphyry (a) and Laoniushan granite (b)

年龄吻合,与谐和图中加权平均年龄值一致,代表了老牛山花岗岩的主要结晶期;与朱赖民等(2008)获得的锆石年龄 146.35 ± 0.55 Ma 在误差范围内一致,反映了老牛山岩体的成岩时代与金堆城岩体在误差范围内一致,为侏罗纪末—白垩纪初,与燕山运动有关,形成于 140 Ma 左右的中国东部构造体制

大转换晚期的伸展环境(毛景文等,2003).

4 物质来源与成因探讨

前人详细研究了金堆城和老牛山花岗岩的常

表 2 老牛山花岗岩体中锆石 U-Pb 年龄测试结果

Table 2 U-Pb isotopic analyses for zircons from Laoniushan granite

样品 分析号	含量($\mu\text{g/g}$)			Th/U	同位素比值			年龄(Ma)		
	$^{206}\text{Pb}_c$	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ ($\pm 1\sigma$)	$^{207}\text{Pb}^*/^{205}\text{U}$ ($\pm 1\sigma$)	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ ($\pm 1\sigma$)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$
LN01	259.53	746.44	2 563.46	0.29	0.048 95 \pm 0.002 58	0.159 1 \pm 0.007 81	0.023 62 \pm 0.000 37	145 \pm 84	150 \pm 7	150 \pm 2
LN02	205.41	747.16	2 241.70	0.33	0.048 27 \pm 0.001 01	0.154 12 \pm 0.002 10	0.023 21 \pm 0.000 25	113 \pm 15	146 \pm 2	148 \pm 2
LN03	64.04	439.58	405.64	1.08	0.057 13 \pm 0.004 46	0.168 67 \pm 0.012 94	0.021 41 \pm 0.000 31	497 \pm 178	158 \pm 11	137 \pm 2
LN04	35.45	313.19	380.77	0.82	0.058 11 \pm 0.004 14	0.174 64 \pm 0.012 18	0.021 80 \pm 0.000 32	534 \pm 161	163 \pm 11	139 \pm 2
LN05	141.34	456.75	1 348.93	0.34	0.051 12 \pm 0.001 33	0.172 86 \pm 0.004 06	0.024 53 \pm 0.000 27	246 \pm 61	162 \pm 4	156 \pm 2
LN06	152.78	507.90	1 673.79	0.30	0.049 33 \pm 0.001 28	0.152 56 \pm 0.003 05	0.022 47 \pm 0.000 26	164 \pm 26	144 \pm 3	143 \pm 2
LN07	166.85	620.53	1 852.08	0.34	0.048 98 \pm 0.001 04	0.151 8 \pm 0.002 09	0.022 52 \pm 0.000 25	147 \pm 15	143 \pm 2	144 \pm 2
LN08	84.00	133.04	697.70	0.19	0.053 61 \pm 0.001 46	0.223 36 \pm 0.004 81	0.030 27 \pm 0.000 35	355 \pm 28	205 \pm 4	192 \pm 2
LN09	267.98	648.24	3 127.11	0.21	0.046 55 \pm 0.000 95	0.140 17 \pm 0.001 75	0.021 87 \pm 0.000 24	26 \pm 13	133 \pm 2	139 \pm 2
LN10	249.81	967.06	2 923.51	0.33	0.050 35 \pm 0.001 11	0.148 53 \pm 0.002 20	0.021 43 \pm 0.000 24	211 \pm 16	141 \pm 2	137 \pm 2
LN11	8.41	68.55	97.94	0.70	0.050 13 \pm 0.005 83	0.152 48 \pm 0.017 19	0.022 09 \pm 0.000 60	201 \pm 203	144 \pm 15	141 \pm 4
LN12	12.69	149.67	149.13	1.00	0.048 92 \pm 0.002 87	0.151 78 \pm 0.008 41	0.022 53 \pm 0.000 36	144 \pm 96	143 \pm 7	144 \pm 2
LN13	148.73	523.73	1 702.41	0.31	0.048 80 \pm 0.001 07	0.150 18 \pm 0.002 20	0.022 35 \pm 0.000 25	138 \pm 16	142 \pm 2	142 \pm 2
LN14	544.07	2 202.24	5 784.73	0.38	0.098 88 \pm 0.002 26	0.329 26 \pm 0.005 14	0.024 18 \pm 0.000 28	1 603 \pm 14	289 \pm 4	154 \pm 2
LN15	196.94	615.07	2 299.19	0.27	0.053 43 \pm 0.001 43	0.161 1 \pm 0.003 90	0.021 87 \pm 0.000 25	347 \pm 62	152 \pm 3	139 \pm 2
LN16	14.90	142.51	158.35	0.90	0.053 89 \pm 0.002 82	0.165 51 \pm 0.008 03	0.022 90 \pm 0.000 34	366 \pm 82	156 \pm 7	142 \pm 2
LN17	81.52	296.65	918.76	0.32	0.047 68 \pm 0.001 43	0.156 47 \pm 0.003 85	0.023 82 \pm 0.000 28	83 \pm 36	148 \pm 3	152 \pm 2
LN18	124.35	489.49	1 377.23	0.36	0.050 89 \pm 0.001 31	0.160 95 \pm 0.003 12	0.022 95 \pm 0.000 26	236 \pm 25	152 \pm 3	146 \pm 2
LN19	99.84	601.04	1 007.59	0.60	0.050 28 \pm 0.001 51	0.189 18 \pm 0.004 67	0.027 31 \pm 0.000 33	208 \pm 35	176 \pm 4	174 \pm 2
LN20	272.25	655.49	2 858.58	0.23	0.049 30 \pm 0.001 07	0.164 92 \pm 0.002 31	0.024 27 \pm 0.000 27	162 \pm 15	155 \pm 2	155 \pm 2
LN21	129.81	482.55	1 669.15	0.29	0.052 0 \pm 0.001 480	0.139 2 \pm 0.003 62	0.019 42 \pm 0.000 22	285 \pm 67	132 \pm 3	124 \pm 1
LN22	203.69	543.09	2 251.25	0.24	0.048 64 \pm 0.001 39	0.137 84 \pm 0.003 61	0.020 55 \pm 0.000 24	131 \pm 69	131 \pm 3	131 \pm 2
LN23	421.54	1 520.47	4 890.90	0.31	0.049 46 \pm 0.001 40	0.124 82 \pm 0.003 21	0.018 30 \pm 0.000 21	170 \pm 67	119 \pm 3	117 \pm 1
LN24	350.83	1 483.70	4 226.40	0.35	0.056 75 \pm 0.001 86	0.158 05 \pm 0.004 86	0.020 20 \pm 0.000 23	482 \pm 74	149 \pm 4	129 \pm 1
LN25	178.58	499.02	1 921.21	0.26	0.051 08 \pm 0.001 15	0.168 93 \pm 0.002 51	0.023 98 \pm 0.000 27	244 \pm 16	158 \pm 2	153 \pm 2
LN26	19.98	252.99	241.60	1.03	0.053 33 \pm 0.002 17	0.167 04 \pm 0.006 06	0.022 71 \pm 0.000 30	343 \pm 58	157 \pm 5	145 \pm 2
LN27	151.44	595.82	1 821.32	0.33	0.106 78 \pm 0.002 57	0.333 68 \pm 0.005 57	0.022 65 \pm 0.000 26	1745 \pm 15	292 \pm 4	144 \pm 2
LN28	224.36	765.31	2 567.54	0.30	0.073 19 \pm 0.003 70	0.221 83 \pm 0.010 81	0.021 98 \pm 0.000 29	1 019 \pm 105	203 \pm 9	140 \pm 2
LN29	178.80	529.43	2 066.07	0.26	0.050 60 \pm 0.001 43	0.154 38 \pm 0.003 98	0.022 13 \pm 0.000 26	223 \pm 67	146 \pm 3	141 \pm 2
LN30	228.01	629.00	2 668.90	0.24	0.050 25 \pm 0.001 18	0.152 29 \pm 0.003 13	0.021 98 \pm 0.000 25	206 \pm 56	144 \pm 3	140 \pm 2
LN31	172.70	790.02	1 758.06	0.45	0.059 61 \pm 0.001 63	0.202 58 \pm 0.004 99	0.024 65 \pm 0.000 29	589 \pm 61	187 \pm 4	157 \pm 2
LN32	174.74	695.94	2 082.87	0.34	0.049 58 \pm 0.001 57	0.152 61 \pm 0.004 49	0.022 32 \pm 0.000 26	175 \pm 76	144 \pm 4	142 \pm 2
LN33	201.07	560.36	2 449.34	0.23	0.048 32 \pm 0.001 56	0.142 8 \pm 0.004 30	0.021 44 \pm 0.000 25	115 \pm 75	136 \pm 4	137 \pm 2
LN34	389.79	1 604.77	4 408.44	0.36	0.049 03 \pm 0.001 07	0.155 33 \pm 0.002 09	0.022 93 \pm 0.000 25	149 \pm 4	147 \pm 2	146 \pm 2

注:测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,2007.

量、微量和稀土元素地球化学特征,认为 2 个岩体都形成于碰撞后环境,富集轻稀土,分馏明显,具有弱负钕异常,稀土与微量元素配分曲线一致变化,具有 Ti、P 亏损.微量元素图解显示岩体产于碰撞造山期后伸展构造环境. R1-R2 图中大部分样品点落在同造山和造山晚期 A 型花岗岩过渡区域,而在 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 图解中样品点分布于 I 型、S 型与 A 型过渡区,偏向于 A 型区域(聂凤军和樊建廷,1989;朱赖民等,2008;郭波等,2009).包志伟等(2009)研究东秦岭地区南泥湖钼矿时认为该岩体具有较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和较年轻的 Nd 模式年龄,表明其源岩应为年轻地壳物质在碰撞后伸展构造环境下部分熔融的产物并可能有少量年轻地幔物质的参与.岩体的成岩物质可能为扬子克拉通北缘(南秦岭)地壳物质向华北

克拉通 A 型俯冲并发生部分熔融的产物.东秦岭金堆城斑岩体可能具有类似的成岩成矿背景与特征.

通过对金堆城和老牛山花岗岩的地球化学特征研究发现(表 3),2 个岩体主量元素比较一致, SiO_2 含量为 70.31%~78.14%,全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)含量为 8.2~9.32, K_2O 含量均大于 Na_2O 含量, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 分子数比值介于 0.73~6.47, Al_2O_3 含量较高(11.18%~16.25%),具有高硅富碱的特征;铝饱和指数 ACNK 变化范围为 0.99~1.14,属过铝质系列;里特曼指数范围 $\delta=2.16\sim 2.93$,均小于 3.3,指示其属钙碱性岩石系列;镁指数较低($\text{Mg}^\# = 0.22\sim 0.27$).2 个岩体均具有高硅、富碱、过铝质系列和钙碱性岩石系列特征. $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图指示岩体属于大陆花岗岩(图 5),A/MF-C/MF 图中有 3 个样

表 3 金堆城花岗斑岩和老牛山花岗岩主量元素分析结果(%)

Table 3 Major element analysis result of Jinduicheng granitic porphyry and Laoniushan granite

岩体	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
金堆城花岗斑岩	JD-1	74.00	0.20	13.00	1.89	0.10	0.3	1.00	2.20	6.00
金堆城花岗斑岩	JD-10	73.20	0.15	12.60	2.09	0.09	0.37	1.08	1.63	6.61
金堆城花岗斑岩	L303 ^①	78.14	0.04	11.18	0.53	0.02	0.10	0.52	1.19	7.70
金堆城花岗斑岩	L401 ^①	74.22	0.11	12.71	1.34	0.04	0.21	0.98	1.23	7.58
金堆城花岗斑岩	L403 ^①	72.87	0.13	14.01	1.65	0.06	0.24	1.21	3.75	5.09
老牛山花岗岩	LN1	72.08	0.14	14.75	2.01	0.09	0.31	1.59	3.99	4.39
老牛山花岗岩	LN2	73.61	0.13	14.4	1.82	0.09	0.26	0.76	3.76	4.67
老牛山花岗岩	M601 ^②	75.46	0.06	13.91	0.50	0.01	0.07	0.48	3.55	5.77
老牛山花岗岩	M602 ^②	71.49	0.13	15.80	1.56	0.07	0.26	1.51	4.13	5.01
老牛山花岗岩	M615 ^②	76.39	0.06	13.74	0.46	0.03	0.08	0.59	3.90	4.59
老牛山花岗岩	M616 ^②	70.31	0.16	16.25	1.83	0.08	0.30	1.62	4.17	4.44

岩体	样品号	P ₂ O ₅	LOI	Total	δ	Na ₂ O+K ₂ O	K ₂ O/Na ₂ O	ACNK	ANK	Mg [#]
金堆城花岗斑岩	JD-1	0.00	1.50	100.00	2.17	8.20	1.80	1.08	1.28	0.24
金堆城花岗斑岩	JD-10	0.04	2.08	99.90	2.25	8.24	2.67	1.07	1.28	0.26
金堆城花岗斑岩	L303 ^①	0.01	0.68	99.99	2.25	8.89	6.47	0.99	1.08	0.27
金堆城花岗斑岩	L401 ^①	0.04	1.43	99.90	2.49	8.81	6.16	1.06	1.24	0.24
金堆城花岗斑岩	L403 ^①	0.05	1.10	100.00	2.62	8.84	1.36	1.01	1.20	0.22
老牛山花岗岩	LN1	0.06	0.75	100.16	2.42	8.38	0.73	1.04	1.30	0.24
老牛山花岗岩	LN2	0.05	0.63	100.18	2.32	8.43	0.82	1.14	1.28	0.22
老牛山花岗岩	M601 ^②	0.02	0.52	100.35	2.68	9.32	1.63	1.07	1.15	0.22
老牛山花岗岩	M602 ^②	0.05	0.32	100.33	2.93	9.14	1.21	1.06	1.29	0.25
老牛山花岗岩	M615 ^②	0.02	0.45	100.31	2.16	8.49	1.18	1.10	1.21	0.26
老牛山花岗岩	M616 ^②	0.06	0.60	99.82	2.71	8.61	1.06	1.11	1.39	0.25

注:西北大学大陆动力学国家重点实验室 XRF 法测定,①据王新(2001);②据朱赖民等(2008);Mg[#] = Mg/(Mg+Fe).

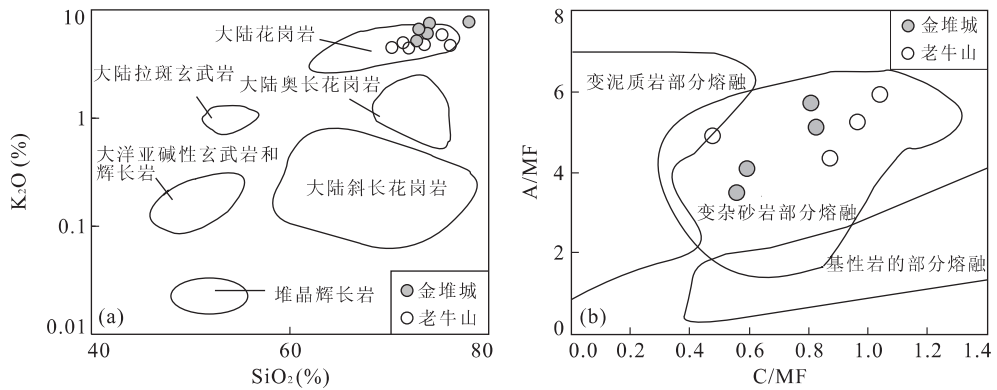


图 5 金堆城与老牛山岩体 SiO₂-K₂O 图解(a)与 A/MF-C/MF 图解(b)(肖庆辉等,2002)

Fig. 5 SiO₂-K₂O and A/MF-C/MF diagrams of Jinduicheng and Laoniushan granite

品点 A/MF 值大于 10,落在分类范围之外,其余样品点均指示原岩为变杂砂岩部分熔融(图 5).

本次研究补充测试了金堆城和老牛山花岗岩的 Nd、Sr 同位素(表 4,表 5). 金堆城岩体中样品的全岩 Sr-Nd 同位素组成,具有较高 ε_{Sr}(t) 正值, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i = 0.708 378 637 ~ 0.710 999 849, ε_{Sr}(t) = 57.43 ~ 94.65; 同时,样品具有较低 ε_{Nd}(t) 负值, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i = 0.511 746 898 ~ 0.511 828 860, ε_{Nd}(t) = -12.18 ~ -13.78. 高的 ε_{Sr}

(t) 值和低的 ε_{Nd}(t) 值证明岩体源区更接近陆壳改造型花岗岩 Sr-Nd 同位素组成的特征(徐克勤等, 1989), 反映岩浆源区主要为陆壳. 老牛山岩体中全岩和单矿物具有较高 ε_{Sr}(t) 正值, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i = 0.705 286 652 ~ 0.711 298 896, ε_{Sr}(t) = 54.900 ~ 98.915, 与金堆城岩体中样品的全岩 Sr 组成一致.

金堆城岩体样品 Pb 同位素组成数据(表 6), 为 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 17.563 7 ~ 17.969 3, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.4620 ~ 15.5295, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 37.8760 ~

表 4 金堆城斑岩体 Sr、Nd 同位素数据

Table 4 Nd and Sr isotopic data of Jinduicheng granitic porphyry

样品	Rb(10 ⁻⁶)	Sr(10 ⁻⁶)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Error(2s)	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	ε _{Sr} (143.7 Ma)
Q-JD-2	303.6	85.07	10.35	0.732 141	0.000 011	0.7109 998 49	94.65
Q-JD-1	303.9	51.86	17.01	0.743 934	0.000 011	0.709 188 977	68.94
Q-JD-3	288.6	130.82	6.39	0.721 431	0.000 011	0.708 378 637	57.43

样品	Sm(10 ⁻⁶)	Nd(10 ⁻⁶)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	Error(2s)	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	ε _{Nd} (143.7 Ma)
Q-JD-2	2.514	8.603	0.176 7	0.511 995	0.000 013	0.511 828 86	-12.18
Q-JD-1	2.376	12.27	0.117 1	0.511 857	0.000 013	0.511 746 898	-13.78
Q-JD-3	3.374	17.24	0.118 3	0.511 891	0.000 013	0.511 779 77	-13.14

测试单位:中国科学院地质与地球物理研究所,2007.

表 5 老牛山岩体 Sr 同位素数据

Table 5 Sr isotopic data of Laoniushan granite

样品	岩性	测定对象	Rb(10 ⁻⁶)	Sr(10 ⁻⁶)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	ε _{Sr} (144.5 Ma)
B20-1/1	花岗岩	全岩	0.481 82	0.345 79	1.393 4	0.713 29	0.710 427 947	86.54
B20-3/1	花岗岩	全岩	0.370 54	0.330 75	1.120 3	0.713 6	0.711 298 896	98.915
B20-3/3	花岗岩	全岩	0.002 089	0.183 76	0.011 367	0.705 31	0.705 286 652	13.55
B20-5/3	花岗岩	全岩	0.471 03	0.743 83	0.633 24	0.709 74	0.708 439 321	58.31
B20-5/5	花岗岩	全岩	0.525 13	0.552 92	0.949 73	0.710 15	0.708 199 248	54.90
B20-7/1	花岗岩	全岩	0.060 718	0.687 04	0.883 77	0.711 04	0.709 224 731	69.46
B20-7/1	花岗岩	长石	1.082 6	1.163 1	0.930 8	0.710 54	0.708 628 131	60.99
B20-7/1	花岗岩	云母	2.447 5	0.243 73	10.042	0.729 01	0.708 383 666	57.52
B20-7/1	花岗岩	云母	2.695 2	0.138 54	19.453 3	0.748 95	0.708 992 794	66.17

注:据尚瑞钧等(1988)数据重新计算初始值和 ε_{Sr}值.

表 6 金堆城斑岩体 Pb 同位素数据

Table 6 Pb isotopic data of Jinduicheng Granitic porphyry

原编号	岩石类型	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2σ	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2σ
Q-JD-1	全岩	17.724 9	0.007	15.529 5	0.007	38.089 7	0.008
Q-JD-2	全岩	17.696 4	0.009	15.527 9	0.011	38.098 9	0.014
Q-JD-3	全岩	17.969 3	0.009	15.502 9	0.01	38.108 9	0.012
JD-1	钾长石	17.563 7	0.006	15.471 3	0.006	37.918 8	0.007
JD-2	钾长石	17.594 1	0.009	15.462 0	0.01	37.895 7	0.012
JD-3	钾长石	17.594 0	0.008	15.462 0	0.008	37.876 0	0.01
JDC-18*	方铅矿	17.284		15.417		37.724	
JDC-19*	钾长石	17.536		15.434		37.680	
LN-20*	全岩	17.637		15.428		37.940	

测试单位:中国科学院地质与地球物理研究所,2007;带*样品引自黄典豪等(1984);L.N.老牛山,其他样品来自金堆城.

38.108 9,钾长石和全岩的 Pb 同位素比值基本一致.黄典豪等(1987)测定的金堆城方铅矿样品数据与本次测试的钾长石样品的 Pb 同位素数据相似,指示了矿床中成岩成矿物质为同源.老牛山岩体的钾长石 Pb 同位素数据与金堆城方铅矿和钾长石样品的 Pb 同位素数据一致(图 6,图 7),指示了两岩体具有同源性质.在 Pb 同位素比值图解中,所有样品点落在下地壳区间,或造山带和下地壳之间,证明岩浆源区主要是下地壳,可能有少量地幔物质的加入.

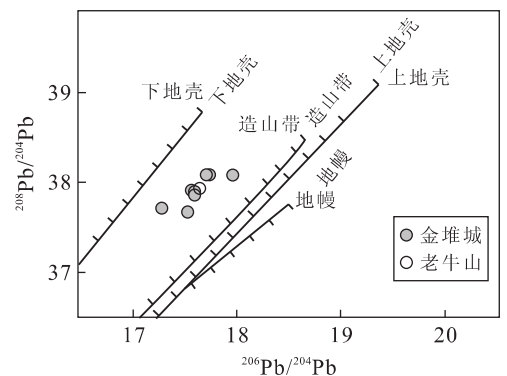


图 6 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 图(Zartman and Haines, 1988)

Fig. 6 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb diagram of the granite

5 成岩成矿动力学背景与成矿机制探讨

东亚构造体制开始发生重要转变时代在 160 ± 5 Ma 前,其主要标志是代表活动陆缘的增生杂岩带和火山弧的出现,以东西向燕山板内变形带为代表的南北向地壳缩短持续到 135 ± 1 Ma 前,而后开始逐渐被北北东向的表壳构造岩浆作用取代,说明燕山运动记录了东亚构造体制的转变(赵越等,1994). 侏罗纪—白垩纪是中国南北主应力场向东西主应力场构造体制大转折和东西向岩石圈大规模减薄作用所伴随的壳幔强烈作用阶段(张国伟等,2001). 金堆城钼矿床和整个东秦岭钼矿带的时空分布与形成机制正与这个阶段的伸展大陆动力学背景密切相关. 年代学数据显示,金堆城与老牛山岩体可能记录了 $135 \sim 160$ Ma 之间的岩浆事件,年龄峰值为 140 Ma 左右.

汤中立和李小虎(2006)研究认为:中酸性岩浆由于浮力作用或构造底辟作用,可以沿垂向或斜向上升,达到某一部位,这种侵入体常常是头部体积小,截面积也小,但是随着深度增加,截面积也逐渐变大,岩浆从深部到浅部,不可避免发生分离结晶作用. 由于深部和浅部显著的温压差,致使深部先结晶的较粗的矿物保存下来与浅部凝结的基质一起形成斑岩小岩体. 如安徽狮子山中酸性侵入体、陕西金堆城花岗斑岩体. 小岩体多处与整个岩体的头部(或浅部),这一部位正是岩浆气体挥发分、流体和矿物质聚集的最有利场所,也是成矿的中心部位. 如果围岩是碳酸盐岩,常发生夕卡岩化,如陕西木龙沟 Fe (Mo) 矿床;如果围岩是花岗质、细碧岩、凝灰岩等,则多发生钾化、硅化、绢云母化、粘土化、角岩化、青盘岩化等,同时伴以浸染状、细脉状或网脉状、脉状

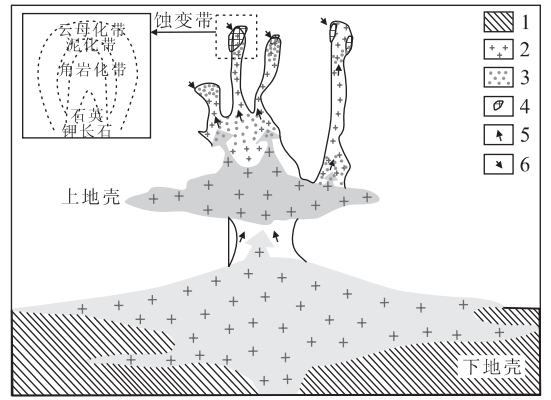


图 8 金堆城钼矿床成矿模式示意图

Fig. 8 Model sketch map of Jinduicheng Mo deposit
1. 下地壳物质; 2. 花岗岩; 3. 成矿元素(硫化物); 4. 矿体; 5. 气液物质转移方向; 6. 大气水运移方向

矿化,如陕西金堆城钼多金属矿床.

根据金堆城和老牛山岩体关系讨论和金堆城岩体成因研究,金堆城钼矿床作为酸性岩体中“小岩体成大矿”的典型例子,我们提出以下成矿模式(图 8).

燕山期,区域热事件(秦岭岩石圈不同程度减薄或扬子克拉通北缘(南秦岭)地壳物质向华北克拉通 A 型俯冲)导致金堆城地区下地壳物质发生部分熔融形成岩浆,可能有地幔物质的加入,钼等金属物质初始富集. 由于浮力作用或构造底辟作用,岩浆上升并发生强烈演化,岩浆中气体挥发分、流体等携带矿物质聚集到岩浆的头部(或浅部),形成强烈演化的矿化小岩体(富 SiO_2 、 K_2O),在经历高温岩浆热液和混合热液流体作用后钼矿物质进一步聚集,形成大型矿床——金堆城钼矿,大部分岩浆形成不含矿岩基——老牛山岩体. 根据这种成矿理论,本区今后寻找金堆城式的钼矿应当注重老牛山岩基附近的小侵入体.

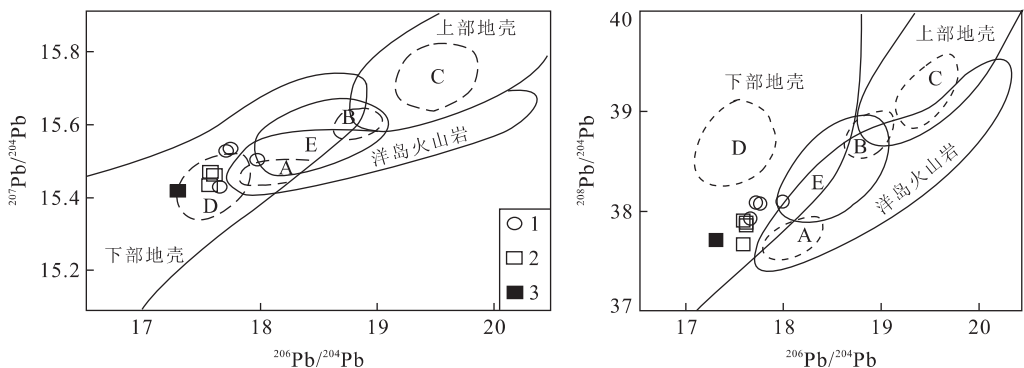


图 7 金堆城与老牛山岩体铅同位素及来源关系(底图据周作侠等,1993)

Fig. 7 Diagram showing Pb isotopic compositions and sources of the Granite in Jinduicheng and Laoniushan
A. 地幔; B. 造山带; C. 上地壳; D. 下地壳; E. 下岩石圈; 1. 全岩; 2. 钾长石; 3. 方铅矿(实线圈出了各区 80% 的投点,虚线圈出了可能的平均值)

6 结论

(1) 金堆城和老牛山花岗岩体单颗粒锆石 U-Pb 测年, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值分别为 $143.7 \pm 3 \text{ Ma}$ 和 $144.5 \pm 4.4 \text{ Ma}$, 代表了岩体的结晶年龄, 与金堆城矿床中辉钼矿的 Re-Os 年龄 $139 \pm 3.0 \text{ Ma}$ 下限值在误差范围内一致, 显示成矿同时或略滞后于成岩, 也反映了金堆城矿床成岩成矿时代为侏罗纪末—白垩纪初, 与燕山运动有关。金堆城和老牛山花岗岩体为同期岩浆活动产物, 可能记录了 135~160 Ma 之间的岩浆事件, 年龄峰值为 140 Ma 左右。

(2) 金堆城和老牛山花岗岩体样品的地球化学数据证明岩石为高硅、富碱、过铝质系列、钙碱性岩石系列特征, 高的 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 、低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值及 Pb 同位素比值图解证明岩体主要为下部地壳物质发生部分熔融形成, 可能有少量地幔物质的加入。

(3) 金堆城和老牛山花岗岩体成岩成矿年龄一致, 岩石地球化学数据特征相似, 暗示 2 个岩体的岩浆源区与岩石成因相同, 推测老牛山岩体在深部发生分异演化, 为金堆城小岩体提供了大量的热液和矿物质, 从而出现了金堆城小岩体成大矿现象。本区今后寻找金堆城式的钼矿应当注重老牛山岩基附近的小侵入体。

References

Andersen, T., 2002. Correction of common lead Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem. Geol.*, 192(1-2): 59-79. doi:10.1016/S0009-2541(02)00195-X

Bao, Z. W., Zeng, Q. S., Zhao, T. P., 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. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2523-2536 (in Chinese with English abstract).

Chen, S. Y., Zhao, P. D., Zhang, S. T., et al., 2009. Mineralizing multiformity and deep prospecting of Gejiu super Sn-Cu multi-metal deposit, Yunnan, China. *Earth Science—Journal of China University Geosciences*, 34(2): 319-324 (in Chinese with English abstract).

Cheng, Q. M., Zhao, P. D., Chen, J. G., et al., 2009. Application of singularity theory in prediction of tin and copper mineral deposits in Gejiu district, Yunnan, China: weak information extraction and mixing information decomposition. *Earth Science—Journal of China University Geosciences*, 34(2): 232-242 (in Chinese with English abstract).

Guo, B., Zhu, L. M., Li, B., et al., 2009. Isotopic and element geochemical study of Jinduicheng superlarge porphyry Mo deposit in East Qinling area. *Mineral Deposits*, 28(3): 265-281 (in Chinese with English abstract).

Huang, D. H., Nie, F. J., Wang, Y. C., et al., 1984. Lead isotope compositions of molybdenum deposits in East Qinling as applied to the problem of ore sources. *Mineral Deposits*, 3(4): 20-28 (in Chinese with English abstract).

Huang, D. H., Wu, C. Y., Du, A. D., et al., 1994. Re-Os isotope ages of molybdenum deposits in East Qinling and their significance. *Mineral Deposits*, 13(3): 221-230 (in Chinese with English abstract).

Huang, D. H., Wu, C. Y., Nie, F. J., 1987. Geological features and origin of the Jinduicheng porphyry molybdenum deposit, Shaanxi Province. *Mineral Deposits*, 6(3): 22-34 (in Chinese with English abstract).

Jiao, J. G., Yuan, H. C., He, K., et al., 2009. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the Balipo porphyry Mo deposit in East Qinling, China, and its geological implication. *Acta Geologica Sinica*, 83(8): 1159-1166 (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).

Li, Y. F., Mao, J. W., Liu, D. Y., et al., 2006. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os datings for the Leimengou porphyry molybdenum deposit, western Henan and its geological implication. *Geological Review*, 52(1): 122-131 (in Chinese with English abstract).

Lu, X. X., Yu, Z. P., Feng, Y. L., et al., 2002. Mineralization and tectonic setting of deep-hypabyssal granites in East Qinling Mountain. *Mineral Deposits*, 21(2): 168-178 (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., Zhang, Z. H., Yu, J. J., et al., 2003. The geodynamics setting of Mesozoic large-scale mineralization in North China: the revelation from accurate timing of metal deposits. *Science in China (Series D)*, 33(4): 289-299 (in Chinese).

Nie, F. J., Fan, J. T., 1989. A study on REE geochemistry of

- the molybdenum-bearing granites in the Jinduicheng-Huanglongpu area, Shaanxi. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 8(1): 22—33 (in Chinese with English abstract).
- Shang, R. J., Yan, Z., Huang, Y. Y., 1988. Granite in Qinling and Dabashan. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Tang, Z. L., Li, X. H., 2006. Small intrusions forming large deposits in two types of magma. *Mineral Deposits*, 25 (Suppl.): 35—38 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X., 2001. Identification of two porphyries in Jinduicheng molybdenum deposit (Dissertation). Northwest University, Xi'an, 1—56 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, Q. H., Deng, J. F., Ma, D. Q., et al., 2002. Granite research and methods of thinking. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Xu, K. Q., Zhu, J. C., Liu, C. S., et al., 1989. Genetic series and material sources of granitoids in South China. *Journal of Nanjing University (Geoscience Ed.)*, 25(3): 1—18 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q. D., Xia, Q. L., Cheng, Q. M., 2009. Tectono-magmatic evolution related to metallogenic system in Gejiu ore-concentration area, Southeast Yunnan of China. *Earth Science—Journal of China University Geosciences*, 34(2): 307—313 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Z., Xu, Q. C., Zhang, H. J., 1985. Granite in Shaanxi Province. Xi'an Communication University Press, Xi'an (in Chinese).
- Ye, H. S., Mao, J. W., Li, Y. F., et al., 2006. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the super-large 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., 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. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353—370. doi: 10. 1111/j. 1751—908X. 2004. tb00755. x
- Zartman, R. E., Haines, S. M., 1988. The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs—a case for bidirectional transport. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52: 1327—1339.
- Zhang, G. W., Zhang, B. R., Yuan, X. C., et al., 2001. Qinling belt and continental dynamics. Science Press, Beijing, 1—729 (in Chinese).
- Zhang, Z. W., Zhu, B. Q., Chang, X. Y., et al., 2001. Petrogenetic-metallogenetic background and time-space relationship of the East Qinling molybdenum ore belt, China. *Geological Journal of China University*, 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*, 29(2): 105—119 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z. X., Li, B. L., Guo, K. H., et al., 1993. Genesis of the gold (molybdenum) deposits in southern margin of the North China platform. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Zhu, L. M., Zhang, G. W., Guo, B., 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. *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. *岩石学报*, 25(10): 2523—2536.
- 陈守余, 赵鹏大, 张寿庭, 等, 2009. 个旧超大型锡铜多金属矿床成矿多样性与深部找矿. *地球科学—中国地质大学学报*, 34(2): 319—324.
- 成秋明, 赵鹏大, 陈建国, 等, 2009. 奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用: 成矿弱信息提取和复合信息分解. *地球科学—中国地质大学学报*, 34(2): 232—242.
- 郭波, 朱赖民, 李犇, 等, 2009. 东秦岭金堆城大型斑岩钼矿床同位素及元素地球化学研究. *矿床地质*, 28(3): 265—281.
- 黄典豪, 聂凤军, 王义昌, 等, 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. *矿床地质*, 3(4): 20—28.
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 等, 1994. 东秦岭地区钼矿床的铼—钷同位素年龄及其意义. *矿床地质*, 13(3): 221—230.
- 黄典豪, 吴澄宇, 聂凤军, 1987. 陕西金堆城斑岩钼矿床地质特征及成因探讨. *矿床地质*, 6(3): 22—34.
- 焦建刚, 袁海潮, 何克, 等, 2009. 陕西华县八里坡钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义. *地质学报*, 83(8): 1159—1166.
- 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.

- 李永峰,毛景文,刘敦一,等,2006. 豫西雷门沟斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 测年及其地质意义. 地质论评,52(1): 122-131.
- 卢欣祥,于在平,冯有利,等,2002. 东秦岭深源浅成型花岗岩的成矿作用及地质构造背景. 矿床地质,21(2): 168-178.
- 毛景文,谢桂青,张作衡,等,2005. 中国北方大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景. 岩石学报,21(1): 169-188.
- 毛景文,张作衡,余金杰,等,2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示. 中国科学(D辑),33(4): 289-299.
- 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. 岩石矿物学杂志,8(1): 22-33.
- 尚瑞钧,严阵,黄云玉,1988. 秦巴花岗岩. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 汤中立,李小虎,2006. 两类岩浆的小岩体成大矿. 第八届全国矿床会议论文集,25(增刊): 35-38.
- 王新,2001. 金堆城钼矿区两类斑岩的识别(硕士学位论文). 西安: 西北大学,1-56.
- 肖庆辉,邓晋福,马大全,等,2002. 花岗岩研究与思维方法. 北京: 地质出版社.
- 徐克勤,朱金初,刘昌实,等,1989. 华南花岗岩类的成因系列和物质来源. 南京大学学报(地球科学),25(3): 1-18.
- 徐启东,夏庆霖,成秋明,2009. 云南个旧矿集区区域构造—岩浆演化与锡铜多金属成矿系统. 地球科学——中国地质大学学报,34(2): 307-313.
- 严阵,许全成,张海军,1985. 陕西省花岗岩. 西安: 西安交通大学出版社.
- 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.
- 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,1-729.
- 张正伟,朱炳泉,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,29(2): 105-119.
- 周作侠,李秉伦,郭抗衡,等,1993. 华北地台南缘金(钼)矿床成因. 北京: 地震出版社.
- 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. 地质学报,82(2): 204-220.