



大别山姚冲花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及地质意义

刘清泉^{1,2,3,4}, 邵拥军^{1,2}, 张智慧³, 张宇^{1,2}, 李冰³, 张驰³

- (1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
3. 河南省有色金属矿产探测工程技术研究中心, 郑州 450016;
4. 河南省有色金属地质勘查总院, 郑州 450052)

摘要: 姚冲斑岩型钼矿床位于东秦岭-大别山钼成矿带, 矿体产于花岗岩外接触带大别片麻杂岩中。矿体下部的隐伏岩体岩性主要为二长花岗岩和花岗斑岩。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明: 二长花岗岩和花岗斑岩的侵位年龄分别为 (139.6 ± 2.0) Ma 和 (139.8 ± 2.2) Ma, 形成于晚侏罗世-早白垩世。锆石 Hf 同位素分析结果表明: 姚冲钼矿区花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围为 $-30 \sim -22.8$, 位于地幔演化线之下, t_{DM2} 值范围为 $2.21 \sim 2.60$ Ga, 表明其源于扬子板块北缘的古老地壳, 其组成类似于扬子板块北缘 TTG 型岩浆岩。姚冲钼矿床形成于晚侏罗世-早白垩世构造体制从挤压收缩向区域性伸展的大转换阶段, 扬子板块拆沉作用导致软流圈上涌, 诱发加厚下地壳部分熔融产生的花岗质岩浆, 为姚冲钼矿床成岩成矿作用提供了物质来源。

关键词: 大别山; 姚冲钼矿床; LA-ICP-MS 锆石; U-Pb 年龄; Hf 同位素

中图分类号: P618

文献标志码: A

Zircon U-Pb ages, Hf isotope characteristics and its implication of granite from Yaochong, Dabie Orogen, China

LIU Qing-quan^{1,2,3,4}, SHAO Yong-jun^{1,2}, ZHANG Zhi-hui³, ZHANG Yu^{1,2}, LI Bing³, ZHANG Chi³

- (1. Key Laboratory of Nonferrous Metal Ore Forecast, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info physics, Central South University, Changsha 410083, China;
3. Non-Ferrous Mineral Exploration Engineering Research Center of Henan Province, Zhengzhou 450016, China;
4. Henan Institute of Geological Exploration for Non-ferrous Metal, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Yaochong Mo deposit is located at Qinling-Dabie metallogenic belt, the deposit is produced in Dabie metamorphic complex at the exocontact zone. Yaochong concealed stock consists of the monzogranite and granite porphyry, which yield LA-ICP-MS zircon U-Pb ages (139.6 ± 2.0) Ma and (139.8 ± 2.2) Ma, respectively, indicating that Yaochong granite was formed at the Late Jurassic-Early Cretaceous magmatism. According to zircon Hf isotope analyses, the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of the granite range from -30 to -22.8 , which is located below the depleted mantle line. The t_{DM2} values range from 2.21 Ga to 2.60 Ga, which indicates the granite was formed from the lower crust of Yangtze Block. The component of the granite porphyry is similar to Neoproterozoic TTG magmatic rocks. The mineralization of Yaochong Mo deposit was formed in the Late Jurassic-Early Cretaceous period of the transformation of tectonic regime. The granitic magma was derived from the partial melting of ancient crust triggered by asthenosphere upwelling, which probably provides diagenesis and ore-forming material of Yaochong Mo deposit.

Key words: Northern Dabie Mountain; Yaochong Mo deposit; LA-ICP-MS zircon; U-Pb age; Hf isotope

基金项目: 中国地质调查局地质矿产调查评价专项(12120113091200); 国土资源公益性行业科研专项 (20111107-2); 河南省有色金属地质矿产局科技创新项目(ysdk2012-6)

收稿日期: 2014-05-27; 修订日期: 2014-12-11

通信作者: 邵拥军, 教授, 博士; 电话: 13973149482; E-mail: shaoyongjun@126.com

姚冲钼矿床位于秦岭-大别造山带东部,大别山北麓的河南省新县戴嘴镇,是河南省有色金属地质勘查总院在秦岭-大别山成矿带发现的一斑岩型钼矿床,目前控制规模为中型^[1]。大别山钼矿带在2000年之前,仅发现了母山、肖畈、大银尖等几个中小型钼矿床(点)。近年来,随着该地区勘查投入大幅度增加,相继发现了汤家坪大型钼矿床和千鹅冲、沙坪沟等超大型矿床,同时还发现了一大批中小型矿床,与东秦岭钼成矿带相连,构成了中国最大的钼矿省,探明钼资源储量约 5×10^6 t^[2]。

国内研究人员对姚冲钼矿的成矿时代、成矿流体和成矿物质来源等进行了研究^[3-5],钻探工程已经验证深部存在隐伏岩体,且与矿体具有密切的空间关系。本文作者对姚冲钼矿床隐伏花岗岩开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素研究,揭示成矿岩体的侵入年龄,探讨成岩岩浆的起源,讨论成岩成矿的地球动力学背景。

1 成矿地质背景

大别造山带夹持于扬子板块向华北板块俯冲碰撞的过渡地带,呈东宽西窄的楔形地质体(图1),是扬子板块向华北板块俯冲碰撞的产物^[6-10]。造山带东端被郯庐断裂截切,西段通过南阳盆地与秦岭造山带连接。

大别造山带自北而南大体划分4个构造单元:北淮阳构造带、北大别变质杂岩带、南大别变质核杂岩带和宿松变质杂岩带^[11-12]。大别山北麓地区包括北淮阳构造带和北大别变质杂岩带两部分(图1)。以北西西向桐柏-商城断裂为界,北侧为北淮阳构造带,南侧为北大别变质杂岩带。在大别山北麓地区,构造格架表现为近东西向与近南北向两组构造相互交织形成的网格状构造系统。区域性北西西向断裂主要有龟山-梅山断裂(简称龟-梅断裂)、桐柏-商城断裂(简称桐-商断裂),近南北向断裂主要有涩港断裂、新县断裂和商城-麻城断裂等。大别山北麓地区地层系统由北淮阳构造带北亚带、北淮阳构造带南亚带和桐柏-大别变质核杂岩隆起亚带3个部分组成。

北淮阳构造带北亚带分布于栾川-明港韧性剪切带(F_1)以南,龟-梅韧性剪切带(F_2)以北,该带是在华北板块统一基底上,经过元古宇裂谷以及早古生代活动大陆边缘演化、加里东-印支期板块俯冲碰撞造山和中新生代推覆构造作用而形成的一个规模大、多期次的变质变形构造岩浆带。出露地层主要为秦岭岩群、寒武系和石炭系。

北淮阳构造带南亚带分布于龟-梅断裂带和定远-八里畈断裂之间,出露的地层为中元古界龟山岩组(Pt_2g)中基性火山岩、泥砂质碎屑岩沉积建造、中元古界汴湾组(Pt_{2+3h})中基性火山岩-陆源碎屑岩沉积建造,奥陶系下统-震旦系肖家庙组($Z-O_{1x}$)泥砂质碎屑

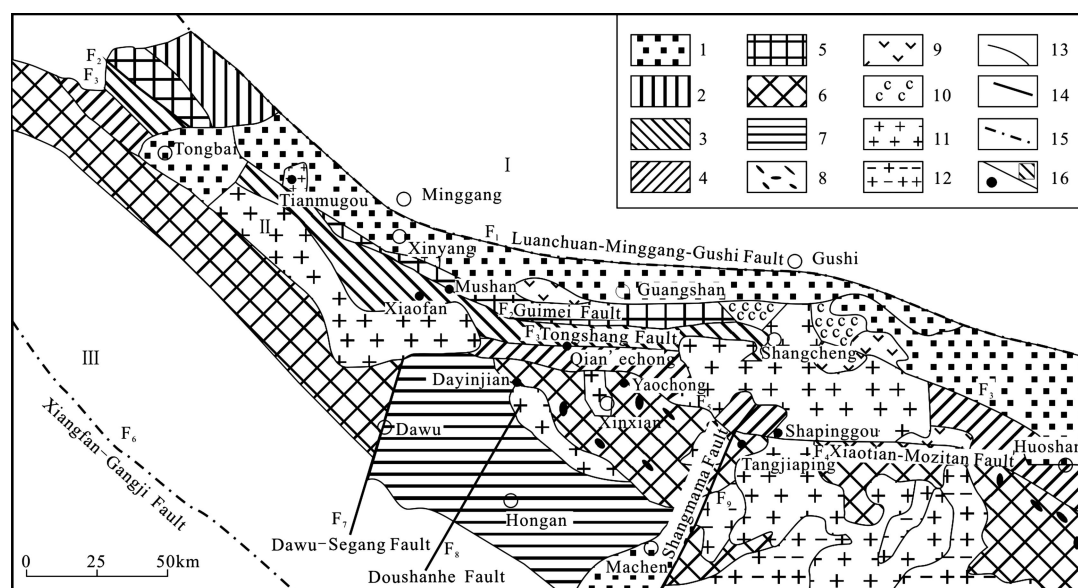


图1 大别造山带地质略图^[5]

Fig. 1 Geological sketch map of Dabie orogenic belt^[5]: 1—Mesozoic-Cenozoic strata (K-E); 2—Erlangping Group (Pt_3-Pz); 3—Guishanyan Formation (Pt_{2g}), Nanwan Formation (D_n); 4—Xiaojiamiao Rock Formation ($Z-O_{1x}$); 5—Qinling Rock Group (Pt_{2qn}); 6—Tongbei-Dabie metamorphic complex (Ar_3-Pt_1); 7—Hong'an Rock Group (Pt_3); 8—Eclogite; 9—Cretaceous volcanic rock (K); 10—Carboniferous; 11—Yanshanian granite; 12—Granite of Jinning Stage; 13—Geological boundary; 14—Faulted zone and its serial number; 15—Boundary of Dabie orogenic belt; 16—Molybdenum deposit; I—North China block; II—Dabie orogenic belt; III—Yangtze block

岩夹碳酸盐岩沉积建造、古生界定远组(Pz_{1-2d})基性火山岩及酸性火山碎屑岩沉积建造和泥盆系南湾组(D_n)陆源碎屑岩沉积建造。

桐柏-大别变质核杂岩隆起亚带分布于定远-八里贩韧性剪切带以南,出露的地层为大别片麻杂岩(PtDog)和大别岩群(ArDb)。大别片麻杂岩(PtDog)是一套经强烈变形变质的杂岩体,主要岩石类型为二长花岗质片麻岩、云英闪长质片麻岩和黑云斜长片麻岩等;大别岩群(ArDb)呈透镜状、似层状形式零星分布于变质深成岩系中,主要岩石类型为角闪黑云二长片麻岩、斜长角闪片麻岩和白云石英片岩等。

区内岩浆活动比较强烈,总体表现为岩浆作用时间的长期性,岩浆作用方式、产出状态的多样性以及时空的强烈差异性^[13],主要表现为大量中酸性花岗岩、陆相火山岩和少量基性-超基性岩密切共生,构成喷发-侵入岩浆岩系列。

元古代岩浆活动以喷发为主,主要为中元古界龟山岩组和汴湾岩组中的中基性火山岩,侵入活动较弱,规模较小,主要呈脉状、透镜状和似层状的小岩株产出,岩性以辉长岩为主,主要分布于大别变质杂岩中。

古生代岩浆岩以基性和中性侵入岩为主,基性岩主要为辉长岩,分布于信阳柳林至新县王母观一带的桐柏-商城断裂带中,不连续,中性岩主要为闪长岩、石英闪长岩和石英二长岩等,分布于龟-梅断裂北侧的光山马贩-文殊寺一带,岩石蚀变强烈,具片理化,呈岩株状和透镜状产出。其中,马贩一带的闪长岩体同位素年龄为(463.5±3.4) Ma(颗粒级锆石 U-Pb 年龄)^[14]。

中生代岩浆活动相当强烈,尤其是燕山期岩浆岩十分发育,以中酸性侵入岩占主要地位,研究区内出露有3个花岗岩体,自西向东分别为灵山岩体、新县岩体和商城岩体,沿桐-商断裂分布。区内中酸性小侵入体数量众多,如汤家坪岩体、大银尖岩体、母山岩体和亮山岩体等,这些小岩体是研究区内钼矿床的主要成矿母岩^[15-16]。

2 矿床地质特征

姚冲钼矿床位于大别山北麓河南省新县戴嘴镇,处于桐柏-商城断裂带南侧(见图2)。区内出露地层为

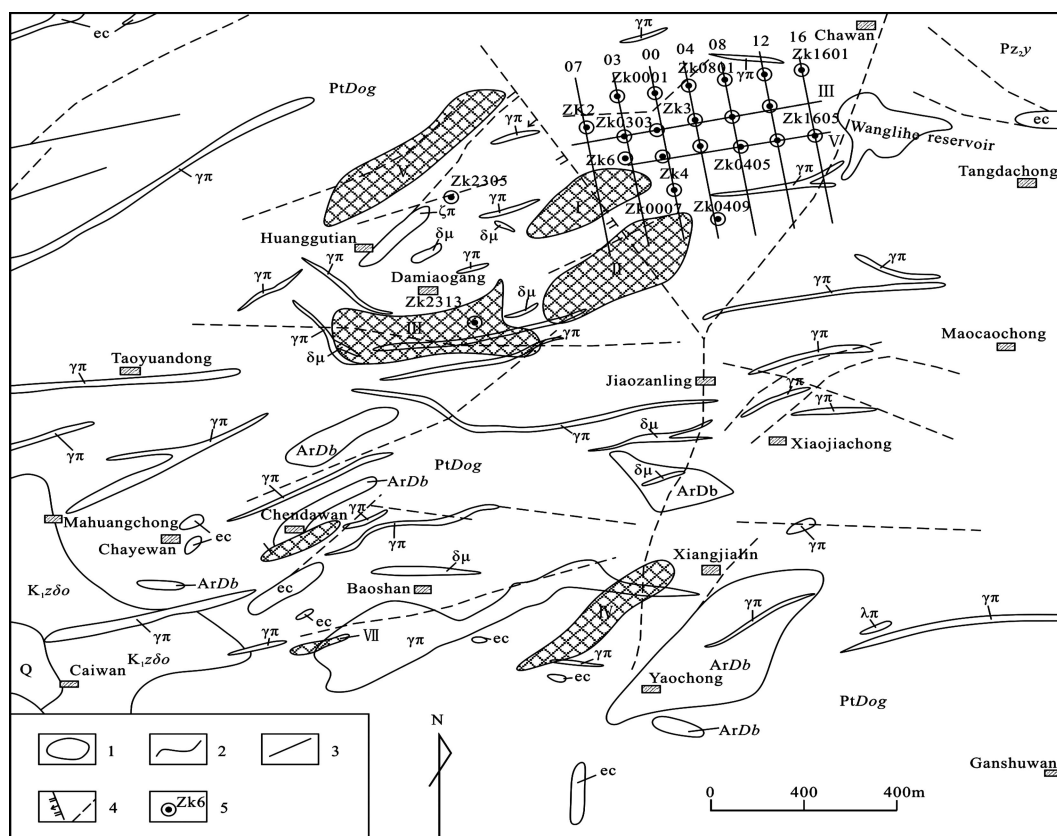


图2 大别山北麓姚冲矿区地质略图^[5]

Fig. 2 Simplified geological map of Yaochong Mo district^[5]: Q—Quaternary; PtDog—Dabie gneissic complex; ArDb—Archean Dabie Group-complex (biotite plagioclase gneiss); K₁zδo—Early Cretaceous Zhouwan independent unit (quartz diorite); Pz₂γ—Late Paleozoic garnet-bearing granite; ec—Garnet-amphibolite and plagioclase amphibole gneiss; λπ—Granite dikes; γπ—Granite porphyry dikes; ζπ—Syenite porphyry dikes; δμ—Diorite porphyrite dikes; 1—Lodes and their numbers; 2—Geological boundary; 3—Unidentified faults; 4—Concealed normal faults / unidentified faults; 5—Bore holes and their numbers

元古界大别片麻杂岩和第四系。

大别片麻杂岩的岩性主要为黑云斜长片麻岩、含榴白云斜长片麻岩和斜长角闪(片)岩等。区内构造较复杂,主要表现为一些小断裂构造,其中斑岩体及外接触带中节理裂隙广泛发育,为钼矿床的形成提供了良好的运移通道和容矿空间,是矿区的主要赋矿构造。矿区内酸性岩脉出露较多,主要为花岗斑岩脉和花岗岩岩脉出露,多呈北东向和近东西向展布, ZK0403 得以验证这些岩脉在深部汇聚成大的花岗岩体,说明隐伏岩体的存在。

钼矿体呈不规则状、透镜状及似层状(见图 3),赋存于花岗岩体(脉)外接触带的中元古界片麻岩中,钼矿体东西长 960 m,南北宽 800 m,矿体最大厚度 62.53 m,平均厚度 28.19 m,钼平均品位 0.062%,钼矿资源量达中型规模^[1]。矿石类型主要为浸染状、细脉—网脉状、薄膜状和角砾状矿石,矿石矿物有辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿和方铅矿等,脉石矿物有石英、钾长石、斜长石、黑云母、绿泥石、绿帘石和萤石等。矿石结构主要为自形—半自形鳞片状结构、交代结构和填隙结构,矿石构造主要有浸染状、细脉状和网脉状构造(见图 4)。围岩蚀变类型主要为硅化、钾长石化、

绢云母化、绿泥石化、绿帘石化、方解石化、高岭土化和萤石化等,蚀变常呈叠加特征,其中硅化、钾长石化和绢云母化与钼矿化关系最为密切。

3 实验

本次研究样品 ZK0403-8 和 ZK0403-16 分别采自 ZK0403 钻孔 1125 m 和 986 m 处。样品 ZK0403-8 为二长花岗岩,二长花岗岩为似斑状结构,块状构造(见图 4(a)),斑晶主要为石英(体积分数 15%~25%)、条纹长石(5%~10%)和微斜长石(5%~10%),基质主要为石英、微斜长石、条纹长石、斜长石和黑云母,基质质量分数为 55%~70%,副矿物主要有磁铁矿、锆石、磷灰石等。

样品 ZK0403-16 为花岗斑岩,花岗斑岩为斑状结构,块状构造(见图 4(b)),斑晶含量为 35%~45%,主要为石英(35%~45%)、斜长石(35%~40%)、条纹长石(10%~25%)和少量黑云母,基质含量为 55%~65%,矿物成份同斑晶,副矿物主要有磁铁矿、锆石、磷灰石等。

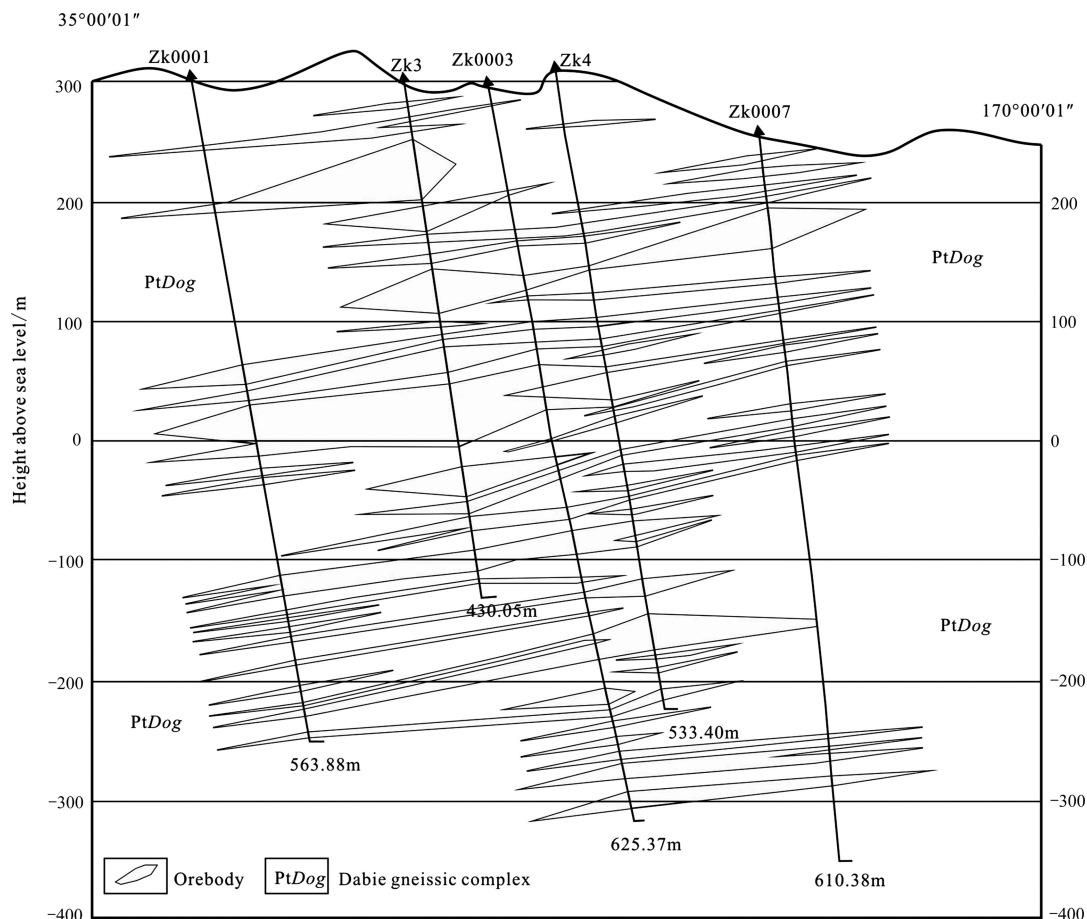


图 3 姚冲钼矿床 00 横勘探线剖面简图^[5]

Fig. 3 Profile for exploration line No.00 in Yaochong Mo deposit^[5]

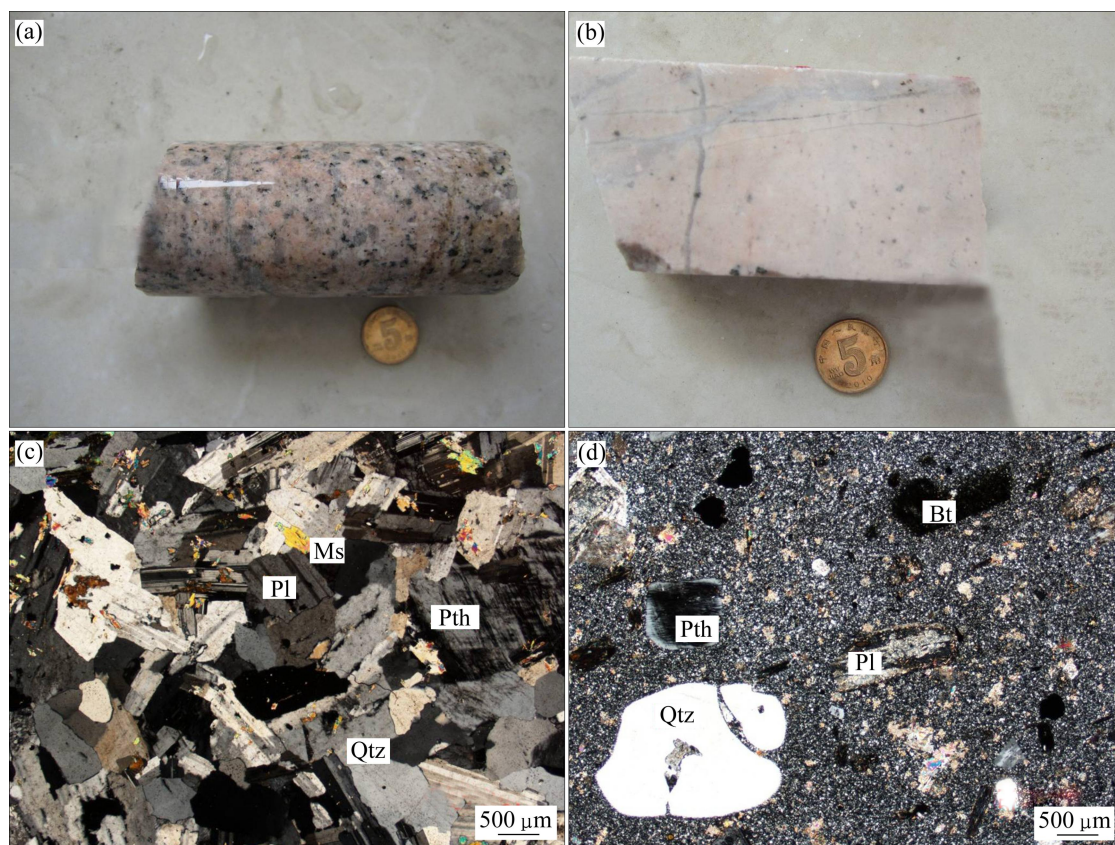


图4 花岗岩岩相学特征

Fig. 4 Petrography of granite porphyry: (a) Specimen of monzogranite; (b) Specimen of granite porphyry; (c) Texture of monzogranite (cross-polarized light); (d) Texture of granite porphyry (cross-polarized light). Qtz—Quartz; Bt—Biotite; Pth—Perthite; Pl—Plagioclase; Ms—Muscovite

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年在中国冶金地质总局山东局测试中心实验室完成。样品取自钻孔中的新鲜岩石, 锆石分选在廊坊峰泽源岩矿检测技术有限公司完成, 锆石阴极发光(CL)照相在 JEOL-JXA-8100 电子探针仪上完成, 加速电压 15 kV, 束电流为 2×10^{-8} A。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年采用的仪器型号为 Thermo Xseries 2, 配置 Coherent 公司生产的 COMPex Pro CO2F Geolas 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统, 分析过程激光束斑直径为 30 μm, 频率为 8 Hz, 能量密度为 8.5 J/cm², 剥蚀时间为 110 s(30 s 空白信号, 55 s 剥蚀时间, 25 s 吹扫残留信号时间)。详细实验原理及测试方法见文献[17]。数据处理使用 ICPMSDataCal 程序^[18], 同位素比值计算、年龄和误差, 以及普通铅校正采用 ANDERSEN^[19]提出的方法, 年龄计算和图解采用 ISOPLOT 程序^[20]。

原位微区锆石 Hf 同位素比值测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用激光剥蚀多接收杯等离子体质谱(LA-MC-ICP-

MS)完成, 激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, MC-ICP-MS 为 Neptune Plus。分析时, 使用氦气作为载气, 采用单点剥蚀模式, 激光波长 193 nm, 斑束固定为 44 μm, 激光输出能量密度为 5.3 J/cm², 使用锆石国际标样 95100 作为参考物质, 分析点与 U-Pb 同位素定年为同一位置或相近位置。详细仪器操作条件和分析方法可参照文献[21]。测试分析过程中标样 95100 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分析结果介于 $0.282289 \pm 0.000010 \sim 0.282319 \pm 0.000013$, 平均值为 0.282303 ± 0.000012 , 与推荐值基本一致(0.282302 ± 0.000008)^[22]。数据处理使用软件 ICPMSDataCal^[18]。

4 结果与分析

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

剔除几个测试异常点后, 本次测试样品的锆石 U-Pb 同位素年龄测试结果如表 1 所列。样品中的锆石

表 1 姚冲二长花岗岩(ZK0403-8)和花岗斑岩(ZK0403-16) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for monzogranite(ZK0403-8) and granite porphyry(ZK0403-16) from Yaochong Mo deposit

Analytical position	$w/10^{-6}$		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		Age/Ma					
	^{232}Th	^{238}U		1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ
ZK0403-8-01	1425	2417	0.59	0.0516	0.0013	0.1528	0.0046	0.0215	0.0005	0.0072	0.0002	144	4	137	3	145	5
ZK0403-8-03	485	971	0.50	0.0564	0.0020	0.1678	0.0081	0.0213	0.0006	0.0077	0.0003	157	7	136	4	155	7
ZK0403-8-04	118	109	1.09	0.0540	0.0036	0.1531	0.0093	0.0217	0.0005	0.0063	0.0003	145	8	138	3	127	6
ZK0403-8-05	668	975	0.69	0.0529	0.0014	0.1557	0.0046	0.0213	0.0003	0.0067	0.0002	147	4	136	2	135	4
ZK0403-8-08	125	180	0.69	0.0537	0.0028	0.1584	0.0076	0.0223	0.0004	0.0077	0.0003	149	7	142	2	156	6
ZK0403-8-09	868	959	0.90	0.0541	0.0029	0.1623	0.0114	0.0215	0.0008	0.0072	0.0003	153	10	137	5	144	7
ZK0403-8-10	229	337	0.68	0.0549	0.0036	0.1670	0.0134	0.0219	0.0008	0.0076	0.0005	157	12	140	5	154	11
ZK0403-8-12	573	927	0.62	0.0506	0.0015	0.1553	0.0049	0.0221	0.0004	0.0078	0.0003	147	4	141	2	157	5
ZK0403-8-13	759	773	0.98	0.0478	0.0015	0.1417	0.0049	0.0215	0.0004	0.0067	0.0002	135	4	137	2	134	4
ZK0403-8-14	546	878	0.62	0.0499	0.0014	0.1504	0.0044	0.0218	0.0003	0.0074	0.0002	142	4	139	2	149	5
ZK0403-8-15	161	272	0.59	0.0585	0.0055	0.1733	0.0179	0.0216	0.0006	0.0092	0.0008	162	15	138	4	186	15
ZK0403-8-16	1314	1981	0.66	0.0508	0.0012	0.1518	0.0049	0.0214	0.0004	0.0065	0.0002	143	4	137	2	132	4
ZK0403-8-17	307	473	0.65	0.0500	0.0023	0.1497	0.0061	0.0222	0.0003	0.0069	0.0003	142	5	142	2	139	5
ZK0403-8-18	634	1234	0.51	0.0500	0.0022	0.1491	0.0079	0.0215	0.0005	0.0070	0.0003	141	7	137	3	142	6
ZK0403-8-19	221	326	0.68	0.0531	0.0023	0.1529	0.0067	0.0214	0.0004	0.0071	0.0003	144	6	136	2	142	5
ZK0403-8-20	882	1121	0.79	0.0495	0.0013	0.1513	0.0042	0.0222	0.0003	0.0072	0.0002	143	4	142	2	144	5
ZK0403-8-22	742	1017	0.73	0.0501	0.0013	0.1485	0.0040	0.0215	0.0003	0.0068	0.0002	141	4	137	2	137	4
ZK0403-8-23	474	521	0.91	0.0501	0.0019	0.1502	0.0063	0.0214	0.0003	0.0065	0.0002	142	6	137	2	131	4
ZK0403-8-24	459	374	1.23	0.0496	0.0024	0.1497	0.0075	0.0221	0.0005	0.0069	0.0003	142	7	141	3	140	6
ZK0403-8-25	976	1420	0.69	0.0490	0.0012	0.1455	0.0036	0.0214	0.0002	0.0065	0.0002	138	3	137	1	131	4
ZK0403-16-01	296	241	1.23	0.0517	0.0025	0.1557	0.0080	0.0217	0.0004	0.0073	0.0003	147	7	138	3	148	6
ZK0403-16-04	410	841	0.49	0.0503	0.0017	0.1521	0.0058	0.0219	0.0005	0.0079	0.0003	144	5	140	3	158	6
ZK0403-16-05	648	971	0.67	0.0494	0.0013	0.1513	0.0040	0.0221	0.0003	0.0068	0.0002	143	4	141	2	137	4
ZK0403-16-06	570	992	0.57	0.0504	0.0015	0.1492	0.0042	0.0215	0.0003	0.0069	0.0002	141	4	137	2	138	4
ZK0403-16-07	782	1005	0.78	0.0503	0.0014	0.1523	0.0051	0.0217	0.0003	0.0070	0.0002	144	4	139	2	141	5
ZK0403-16-08	740	807	0.92	0.0493	0.0013	0.1466	0.0042	0.0215	0.0003	0.0067	0.0002	139	4	137	2	135	4
ZK0403-16-09	739	900	0.82	0.0492	0.0014	0.1470	0.0041	0.0218	0.0003	0.0067	0.0002	139	4	139	2	134	3
ZK0403-16-10	731	1420	0.52	0.0491	0.0012	0.1471	0.0039	0.0216	0.0003	0.0072	0.0002	139	3	138	2	146	4
ZK0403-16-11	582	731	0.80	0.0500	0.0019	0.1532	0.0063	0.0222	0.0004	0.0075	0.0002	145	6	142	3	151	5
ZK0403-16-12	738	768	0.96	0.0520	0.0019	0.1529	0.0055	0.0215	0.0003	0.0074	0.0002	144	5	137	2	150	5
ZK0403-16-13	618	1274	0.49	0.0504	0.0011	0.1496	0.0034	0.0215	0.0002	0.0072	0.0002	142	3	137	1	144	4
ZK0403-16-14	121	228	0.53	0.0510	0.0025	0.1476	0.0067	0.0219	0.0004	0.0081	0.0003	140	6	140	2	163	7
ZK0403-16-15	440	851	0.52	0.0506	0.0013	0.1497	0.0038	0.0214	0.0003	0.0073	0.0002	142	3	137	2	148	4
ZK0403-16-17	541	1024	0.53	0.0528	0.0015	0.1584	0.0056	0.0215	0.0003	0.0083	0.0003	149	5	137	2	167	6
ZK0403-16-18	248	305	0.81	0.0544	0.0039	0.1671	0.0147	0.0223	0.0007	0.0094	0.0004	157	13	142	5	189	9
ZK0403-16-20	273	373	0.73	0.0531	0.0024	0.1524	0.0071	0.0215	0.0006	0.0094	0.0007	144	6	137	4	188	15
ZK0403-16-21	1707	1877	0.91	0.0509	0.0012	0.1507	0.0042	0.0212	0.0002	0.0068	0.0002	142	4	135	1	138	3
ZK0403-16-22	1194	1254	0.95	0.0528	0.0016	0.1584	0.0059	0.0217	0.0005	0.0071	0.0002	149	5	138	3	142	5
ZK0403-16-23	762	869	0.88	0.0492	0.0013	0.1513	0.0043	0.0222	0.0003	0.0068	0.0002	143	4	141	2	137	4
ZK0403-16-24	615	1354	0.45	0.0490	0.0012	0.1458	0.0035	0.0215	0.0003	0.0073	0.0002	138	3	137	2	146	4
ZK0403-16-25	188	210	0.89	0.0599	0.0079	0.1779	0.0209	0.0222	0.0005	0.0079	0.0003	166	18	142	3	159	7

多呈柱状,无色透明,长度一般为 80~150 μm ,长宽比一般为 2:1~4:1,含有清晰震荡环带(见图 5),且裂纹不太发育。两件样品的锆石 Th 含量为 118×10^{-6} ~ 1707×10^{-6} ,平均含量为 608×10^{-6} ;U 含量为 109×10^{-6} ~ 1877×10^{-6} ,平均含量为 867×10^{-6} ;Th/U 比值

为 0.45~1.23,平均值 0.74,且均大于 0.40,显示出岩浆成因锆石特征(见图 5)^[24]。选取 ZK0403-8 的 20 个分析点和 ZK0403-16 的 21 个分析点分别得到锆石 U-Pb 谐和年龄为 (139.6 ± 2.0) Ma (MSWD=0.56)和 (139.8 ± 2.2) Ma (MSWD=0.49)(见图 6),分别对应二长

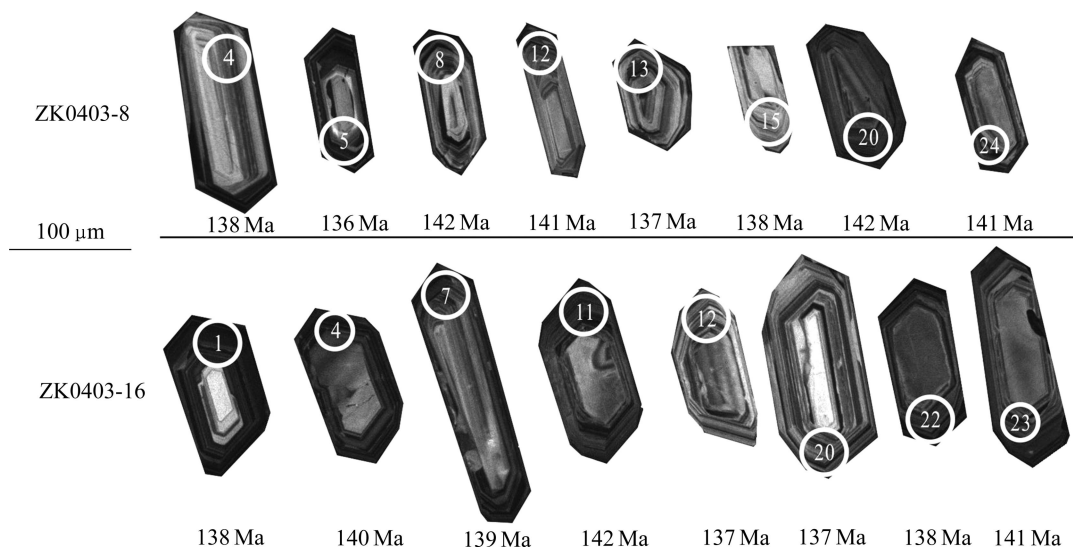


图 5 姚冲二长花岗岩(ZK0403-8)和花岗斑岩(ZK0403-16)中锆石代表性阴极发光图像及测点位置

Fig. 5 CL images of representative zircons in monzogranite(ZK0403-8) and granite porphyry(ZK0403-16) from Yaochong Mo deposit with analytical numbers and U-Pb ages

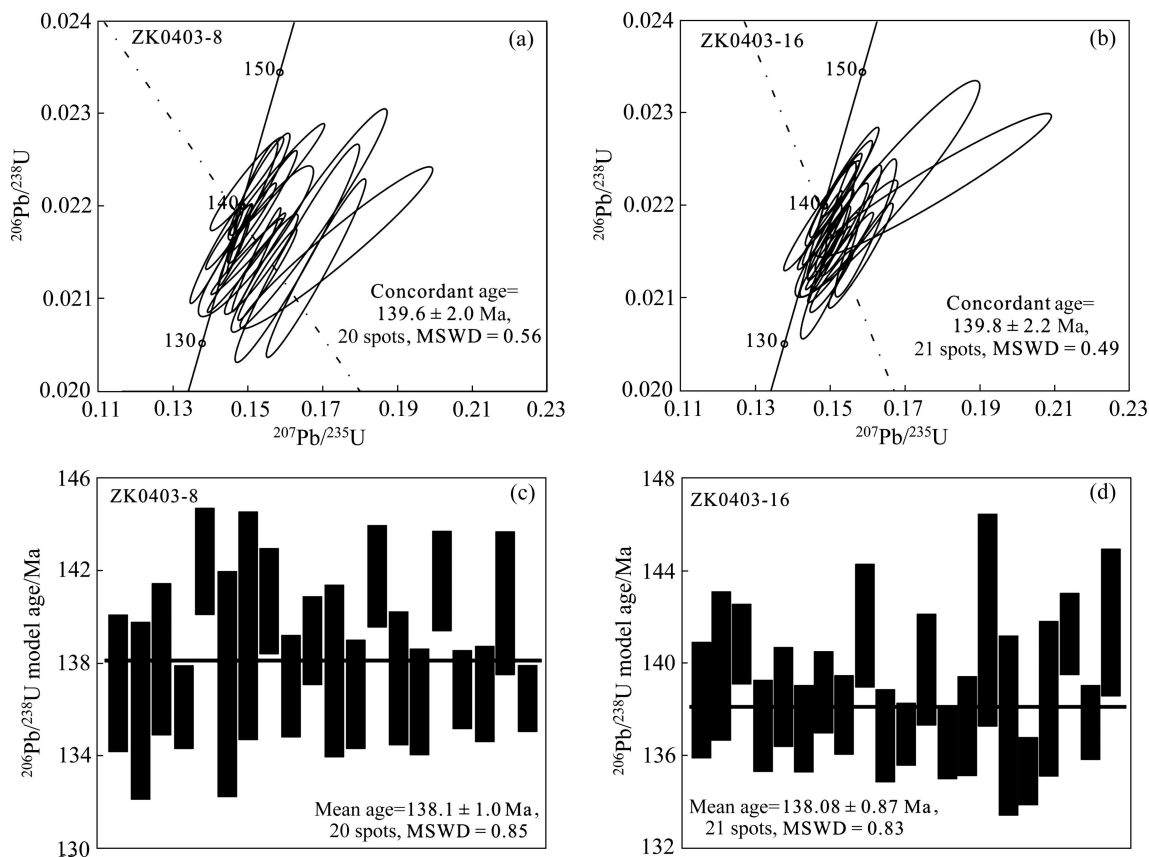


图 6 姚冲二长花岗岩(ZK0403-8)和花岗斑岩(ZK0403-16)锆石 U-Pb 谐和图及加权平均值

Fig. 6 Zircon U-Pb concordian and weighted mean ages of monzogranite(ZK0403-8) and granite porphyry (ZK0403-16) from Yaochong Mo deposit

花岗岩和花岗斑岩的侵位年龄。

4.2 锆石 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素分析结果如表 2 所列, 锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.000383~0.001237, 均小于 0.002, 表明锆石在形成以后具有很少的放射成因 Hf 的积累, 因此所获得的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值可以代表锆石形成时的

$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值^[25]。样品 ZK0403-8 共测试 13 个点, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.000383~0.001064, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.281923~0.282127, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -30~-22.8, t_{DM2} 值为 2212~2606 Ma; 样品 ZK0403-16 共测试 15 个点, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.000627~0.001237, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282022~0.282106, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -26.5~-23.6, t_{DM2} 值为 2252~2414 Ma。

表 2 姚冲花岗岩的锆石 Hf 同位素组成

Table 2 Zircon Hf isotope compositions for granite from Yaochong Mo deposit

Analytical position	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
ZK0403-8-1	137	0.020240	0.001064	0.282062	0.000020	-25.1	1677	2336	-0.97
ZK0403-8-4	138	0.013480	0.000517	0.282011	0.000010	-26.9	1724	2435	-0.98
ZK0403-8-4-1	138	0.014891	0.000564	0.281997	0.000010	-27.4	1744	2462	-0.98
ZK0403-8-5	136	0.019261	0.000951	0.282056	0.000016	-25.3	1680	2347	-0.97
ZK0403-8-8	142	0.016409	0.000697	0.282009	0.000012	-27.0	1735	2439	-0.98
ZK0403-8-12	141	0.024508	0.001021	0.281926	0.000144	-29.9	1864	2598	-0.97
ZK0403-8-13	137	0.016821	0.000753	0.282048	0.000016	-25.6	1683	2363	-0.98
ZK0403-8-15	138	0.014251	0.000667	0.281923	0.000062	-30.0	1852	2606	-0.98
ZK0403-8-19	136	0.007879	0.000383	0.282039	0.000015	-25.9	1680	2381	-0.99
ZK0403-8-20	142	0.018767	0.000897	0.282051	0.000010	-25.5	1685	2357	-0.97
ZK0403-8-22	137	0.014897	0.000691	0.282127	0.000026	-22.8	1572	2212	-0.98
ZK0403-8-23	137	0.018694	0.000855	0.282050	0.000014	-25.5	1686	2361	-0.97
ZK0403-8-24	141	0.022524	0.001021	0.282081	0.000018	-24.4	1649	2299	-0.97
ZK0403-16-1	140	0.015684	0.000730	0.282068	0.000014	-24.9	1655	2325	-0.98
ZK0403-16-4	141	0.018214	0.000887	0.282106	0.000023	-23.6	1610	2252	-0.97
ZK0403-16-7	139	0.023037	0.001115	0.282103	0.000052	-23.7	1623	2257	-0.97
ZK0403-16-8	137	0.018405	0.000888	0.282076	0.000013	-24.6	1651	2310	-0.97
ZK0403-16-10	138	0.025669	0.001237	0.282065	0.000015	-25.0	1681	2330	-0.96
ZK0403-16-11	142	0.018295	0.000806	0.282061	0.000017	-25.1	1667	2338	-0.98
ZK0403-16-12	137	0.020539	0.000951	0.282067	0.000015	-24.9	1666	2327	-0.97
ZK0403-16-13	137	0.018980	0.000999	0.282086	0.000014	-24.3	1642	2291	-0.97
ZK0403-16-14	140	0.014076	0.000607	0.282022	0.000011	-26.5	1713	2414	-0.98
ZK0403-16-17	137	0.020442	0.000972	0.282081	0.000021	-24.4	1647	2299	-0.97
ZK0403-16-20	137	0.014623	0.000627	0.282037	0.000014	-26.0	1694	2386	-0.98
ZK0403-16-21	135	0.018464	0.000887	0.282098	0.000013	-23.8	1620	2267	-0.97
ZK0403-16-22	138	0.020463	0.000977	0.282095	0.000017	-23.9	1628	2272	-0.97
ZK0403-16-23	141	0.016615	0.000836	0.282096	0.000015	-23.9	1621	2271	-0.97
ZK0403-16-25	142	0.015171	0.000650	0.282056	0.000016	-25.3	1668	2348	-0.98

Note: $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=10000 \times \{[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}-(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t}-1)]/[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0}-(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t}-1)]-1\}$; $t_{\text{DM1}}=1/\lambda \times \ln\{1+[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}-(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]/[(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}-(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}$; $t_{\text{DM2}}=1/\lambda \times \ln\{1+[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S},t}-(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},t}]/[(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}-(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}+t$; $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ and $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ are measured values of samples; $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0}=0.282772$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}=0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.28325$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.0384$ ^[24-25]; $\lambda=1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$ ^[23]; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{c}}=0.015$; t is crystallization time of zircon.

5 讨论

5.1 岩浆源区

锆石 Lu-Hf 同位素能够有效的揭示岩浆演化过程和源区性质^[26-28], 亏损地幔源区具有更高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值, 而大陆地壳相对亏损地幔具有较低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值^[29]。

姚冲花岗岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 具有明显的负值(-30~-22.8), t_{DM2} 值为 2.21~2.60 Ga, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分布于亏损地幔演化线之下(见图 7), 表明岩浆主要来源于古老地壳物质。关于大别造山带深部构造地质体是否存在于华北物质存在着争议, 但大部分学者认为大别造山带的地壳物质主要来自扬子板块^[30-33]。

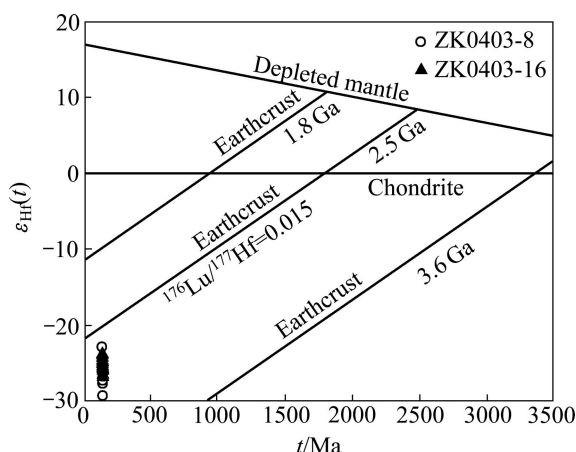


图7 姚冲花岗岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图

Fig. 7 Relationship between zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ between t plot for granite from Yaochong Mo deposit

华南扬子陆核周边在新元古代早期是 Rodinia 聚合所形成的弧陆碰撞造山带, 在新元古代中期由于 Rodinia 裂解使弧陆碰撞造山带发生构造垮塌, 引起裂谷岩浆活动^[33], 形成扬子板块北缘 TTG 型岩浆岩, 其源岩为元古代-太古代的古老地壳物质^[34-35], Hf 二阶段模式年龄为 2.07~2.79 Ga, 而姚冲花岗岩的 Hf 二阶段模式年龄为 2.21~2.60 Ga, 两者基本一致。在整个大别造山带的构造地层地质体中, 白垩纪花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要为-30~-15, t_{DM2} 值主要为 1.9~3.0 Ga^[36], 新县花岗岩基的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-22.92~-19.40, t_{DM2} 值为 2.39~2.61 Ga^[37], 姚冲花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-30~-22.8, t_{DM2} 值为 2.21~2.60 Ga, 该特征同样与扬子板块北缘的 TTG 型岩浆岩相吻合, 而明显不同于大别片麻岩 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-15~-8, t_{DM2} 为 1.0~2.0 Ga)^[38], 因此, 认为姚

冲花岗岩来源于扬子板块北缘的古老地壳。

5.2 地球动力学背景

自加里东运动开始, 直到三叠纪早期, 华北克拉通一直处于稳定发展阶段, 同位素测年及其他研究资料表明, 扬子克拉通与华北克拉通在 238~218 Ma 之间实现碰撞对接^[39-41], 两个大陆碰撞闭合于印支期末, 之后开始碰撞造山作用。碰撞造山作用结束于侏罗纪, 此时受太平洋构造域构造动力的影响, 整个中国大陆中东部的区域构造体制发生转换, 从以近东西向构造为主, 北北东-近南北向构造为次进入以北北东-近南北向构造为主, 近东西向构造为次的构造-动力体制大转换时期^[42-43]。在早白垩纪, 挤压造山活动基本结束, 伸展活动逐步加强, 拉张盆地的发育, 以及拆离断层的生成, 均表明本区此时处于伸展构造环境^[44-48]。

毛景文等^[49]提出华北克拉通及其邻区的中生代金属矿床大规模成矿作用出现在 200~160 Ma、140 Ma 左右和 130~110 Ma 的 3 个成矿期。并通过对中生代成矿作用的地球动力学演化特征的分析研究, 认为这 3 个成矿期所对应的地球动力学背景依次为晚三叠世-中侏罗世华北板块与扬子板块的碰撞造山后的南北向构造伸展过程、晚侏罗世-早白垩世由库拉板块俯冲于中国古大陆板块之下造成的南北向伸展构造体制向东西向挤压构造体制大转换过程和早白垩世晚期东西向岩石圈大规模伸展减薄过程。

综合已有的年代学数据可以看出(见表 3), 大别山钼矿带与中酸性花岗岩有关的钼矿应存在两期成矿事件, 第一期为 142~137 Ma 的成矿作用, 包括母山、肖畈和姚冲钼矿床等; 第二期为 127~110 Ma 的成矿作用, 包括汤家坪、大银尖钼矿床和千鹅冲钼矿床等, 且成岩与成矿基本近于同时, 或成岩作用略早于成矿作用。因此, 大别山北麓钼矿床的成矿时代及其地球动力学背景分别对应于晚侏罗世-早白垩世南北向伸展构造体制向东西向挤压构造体制大转换和早白垩世晚期东西向岩石圈大规模伸展减薄。

综上所述, 姚冲钼矿床二长花岗岩和花岗斑岩的成岩年龄分别为 (139.6 ± 2.0) Ma 和 (139.8 ± 2.2) Ma, 成矿年龄为 (137.0 ± 1.7) Ma^[5], 两者表现基本一致, 成岩作用略早于成矿作用。对应的地球动力学背景为晚侏罗世-早白垩世构造体制从挤压收缩向区域性伸展大转换阶段。晚侏罗世-早白垩世受太平洋构造域的影响, 库拉板块俯冲向中国古大陆板块俯冲, 中国中东部由以近东西向构造为主向以北北东向构造为主的区域构造体制大转换^[59], 此时, 地壳深部由于扬子板片

表 3 大别山地区斑岩型钼矿床同位素年龄

Table 3 Isotope ages of porphyry Mo systems in Dabie Shan

Deposit	Rock/Ores	Methods	Age/Ma	Reference
Tangjiaping	Ores	Molybdenite Re-Os	113.1±7.9	[50]
	Granite porphyry	LA-ICP-MS zircon U-Pb	121.6±4.6	[51]
Yaochong	Ores	Molybdenite Re-Os	137.2±2.0	[5]
	Monzogranite	LA-ICP-MS zircon U-Pb	139.6±2.0	This study
Qian'echong	Ores	Molybdenite Re-Os	127.82±0.9	[52]
	Granite porphyry stock	SHRIMP zircon U-Pb	129.0±2.0	[47]
Dayinjian	Ores	Molybdenite Re-Os	122.7±1.9	[53]
	Granite porphyry	LA-ICP-MS zircon U-Pb	124.9±1.3	[54]
Doupou	Ores	Molybdenite Re-Os	125.4±1.2	[55]
	Monzogranite	LA-ICP-MS zircon U-Pb	124.21±0.28	[55]
Mushan	Ores	Molybdenite Re-Os	155.7±5.1	[56]
	Granite porphyry	LA-ICP-MS zircon U-Pb	142±1.8	[57]
Xiaofan	Ores	Molybdenite Re-Os	142	[58]

发生断离，软流圈上涌导致岩石圈地幔发生部分熔融形成幔源岩浆，幔源岩浆在壳幔边界发生底侵作用，从而诱发加厚的下地壳部分熔融形成花岗质岩浆，在姚冲钼矿区，花岗质岩浆沿定远-八里畈断裂和近南北向断裂的交汇部位上升至浅层次侵位，形成该区深源浅成的中酸性岩体，即姚冲隐伏花岗岩体。因此，姚冲钼矿床整个构造-岩浆-成矿事件与中国东部中生代大规模地壳伸展构造背景密切相关^[49, 60]。

6 结论

- 1) 姚冲钼矿床二长花岗岩和花岗斑岩的成岩年龄分别为(139.6±2.0) Ma 和(139.8±2.2) Ma，略早于成矿年龄，为晚侏罗世-早白垩世。
- 2) 锆石 Hf 同位素特征表明姚冲花岗岩体的物质来源主要为扬子板块北缘的古老地壳，成份与扬子板块北缘 TTG 型岩浆岩类似。
- 3) 在晚侏罗世-早白垩世构造体制从挤压收缩向区域性伸展大转换阶段，扬子板块拆沉作用导致软流圈上涌，进而诱发加厚下地壳部分熔融产生岩浆活动，为姚冲钼矿床成岩成矿作用提供了物质来源。

REFERENCES

[1] 李 毅, 胡海珠, 陈丽娟, 白凤军, 李红超. 大别山北麓姚冲钼矿床地质特征及找矿标志[J]. 地质与勘探, 2013, 49(2):

280-288.
LI Yi, HU Hai-zhu, CHEN Li-juan, BAI Feng-jun, LI Hong-chao. Geological features and ore-searching indicators of the Yaochong Mo deposit in the northern Piedmont of the Dabie Shan[J]. Geology and Prospecting, 2013, 49(2): 280-288.
[2] MAO J W, PIRAJNO F, XIANG J F, GAO J J, YE H S, LI Y F, GUO B J. Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinlin-Dabie orogenic belt: Characteristics and tectonic settings[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43: 264-293.
[3] 陈丽娟, 陈 鹏. 河南省新县姚冲钼矿床地质特征及控矿因素分析[J]. 地质找矿论丛, 2011, 26(4): 385-392.
CHEN Li-juan, CHEN Peng. Study on geological characteristics and ore-controlling factors of Yaochong molybdenum deposit in Xinxian County, Henan Province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2011, 26(4): 385-392.
[4] 王 玘, 陈衍景, 糜 梅, 李忠烈, 王莉娟. 河南省新县姚冲钼矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 2013, 29(1): 107-120.
WANG Pi, CHEN Yan-jin, MI Mei, LI Zhong-lie, WANG Li-juan. Fluid evolution in the Yaochong porphyry Mo deposit, Dabie Shan, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(1): 107-120.
[5] 刘清泉, 张智慧, 李永峰, 罗正传, 谢克家. 大别山北麓斑岩型钼矿床地质特征、成矿时代及其成矿构造背景[J]. 地质与勘探, 2014, 50(2): 199-215.
LIU Qing-quan, ZHANG Zhi-hui, LI Yong-feng, LUO Zheng-zhuan, XIE Ke-jia. Geologic features, mineralization epoch and tectonic setting of molybdenum deposits in the northern Dabie Mountain[J]. Geology and Prospecting, 2014, 50(2): 199-215.
[6] 汤加富, 侯明金, 李怀坤, 吴跃东, 孙乘云. 扬子地块东北缘

- 多期叠加变形及形成演化[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(4): 313-326.
- TANG Jia-fu, HOU Ming-jin, LI Huai-kun, WU Yue-dong, SUN Cheng-yun. Multi-superimposed deformations and their evolution in northeastern margin of Yangtze Block[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2003, 27(4): 313-326.
- [7] 王勇生, 朱光, 王道轩, 刘国生, 宋传中. 大别山东缘郧庐两期走滑剪切带形成的温压条件与造山带折返的关系[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(3): 228-238.
- WANG Yong-sheng, ZHU Guang, WANG Dao-xuan, LIU Guo-sheng, SONG Chuan-zhong. Relation between P-T conditions of two phases of Tanlu strike-slip shear zones and delamination of the orogenic belts on the eastern margin of the Dabie Mountains[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2004, 28(3): 228-238.
- [8] 徐树桐, 江来利, 刘贻灿, 张勇. 大别山区(安徽部分)的构造格局和演化过程[J]. 地质学报, 1992, 66(1): 1-14.
- XU Shu-tong, JIANG Lai-li, LIU Yi-can, ZHANG Yong. Tectonic framework and evolution of the Dabie Mountains in Anhui, Eastern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1992, 66(1): 1-14.
- [9] 杨巍然, 杨坤光, 刘忠明, 简平. 桐柏-大别造山带加里东期构造热事件及其意义[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 247-253.
- YANG Wei-ran, YANG Kun-guang, LIU Zhong-ming, JIAN Ping. Caledonian tectono-thermal event in Tongbai-Dabie orogenic belt and its significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(4): 247-253.
- [10] 翟明国. 华北克拉通破坏前的状态: 对讨论华北克拉通破坏问题的一个建议[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(4): 516-520.
- ZHAI Ming-guo. State of lithosphere beneath the North China Craton before the Mesozoic lithospheric disruption: A suggestion[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2008, 32(4): 516-520.
- [11] 高山, 张本仁, 金振民. 秦岭-大别造山带下地壳拆沉作用[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(6): 532-541.
- GAO Shan, ZHANG Ben-ren, JIN Zhen-min. The lower crustal delamination in Qinling-Dabie orogeny[J]. *Science in China (Series D)*, 1999, 29(6): 532-541.
- [12] 王清晨, 丛柏林. 大别山超高压变质带的大地构造框架[J]. 岩石学报, 1998, 14(4): 481-492.
- WANG Qing-chen, CONG Bo-lin. Tectonic framework of the ultrahigh-pressure metamorphic zone from the Dabie Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1998, 14(4): 481-492.
- [13] 李先梓, 严阵, 卢欣祥. 秦岭-大别山花岗岩[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 10-27.
- LI Xian-zhi, YAN Zhen, LU Xin-xiang. *Granitoids of Qinling-Dabieshan*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 10-27.
- [14] 马昌前, 明厚利, 杨坤光. 大别山北麓的奥陶纪岩浆弧: 侵入岩年代学和地球化学证据[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 393-402.
- MA Chang-qian, MING Hou-li, YANG Kun-guang. An Ordovician magmatic arc at the northern foot of Dabie Mountain: Evidence from geochemistry of intrusive rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 393-402.
- [15] 李俊平, 李永峰, 罗正传, 谢克家. 大别山北麓钼矿找矿重大进展及其矿床地质特征研究[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(4): 576-586.
- LI Jun-ping, LI Yong-feng, LUO Zheng-zhuan, XIE Ke-jia. Geological features of molybdenum deposits and ore prospecting in northern slope of the Dabie Mountain, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2011, 5(4): 576-586.
- [16] 刘清泉, 柳玉虎, 李永峰, 罗正传, 谢克家. 大别山北麓斑岩型钼矿床成矿地质条件及矿床成因[J]. 地质找矿论丛, 2013, 28(1): 27-33.
- LIU Qing-quan, LIU Yu-hu, LI Yong-feng, LUO Zheng-zhuan, XIE Ke-jia. Metallogenic Conditions and Genesis of Porphyry-Type Molybdenum Deposit in the northern Piedmont of Dabieshan Mountain[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2013, 28(1): 27-33.
- [17] JACKSON S E, PEARSON N J, GRIFFIN W L. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2004, 211(1): 47-69.
- [18] LIU Y S, GAO S, HU Z C. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *J Petrology*, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [19] ANDERSEN T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1): 59-79.
- [20] LUDWIG K. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Geochronology Center Special Publication, 2003, 4: 70.
- [21] HU Z C, LIU Y S, GAO S, LIU W G, ZHANG W, TONG X R, LIN L, ZONG K Q, LI M, CHEN H H, ZHOU L, YANG L. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and Jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2012, 27(9): 1391-1399.
- [22] GOOLAERTS A, MATTIELLI N, DEJONG J, WEIS D, SCOATES J S. Hf and Lu isotopic reference values for zircon standard 91500 by MC-ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 2004, 206(1): 1-9.
- [23] GRIFFIN W L, PEARSON N J, BELOUSOVA E, JACKSON S E, ACHTERBERG E V, REILLY S Y O, SHEE S R. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICP-MS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(1): 133-147.
- [24] RUBATTO D, GEBAUER D. Use of cathodoluminescence for

- U-Pb zircon dating by IOM microprobe: Some examples from the western Alps[C]// Cathodoluminescence in Geoscience. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2000, 373–400.
- [25] WU Y B, ZHENG Y F, ZHANG S B, ZHAO Z F, WU F Y, LIU X M. Zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions of migmatite from the North Dabie terrane in China: Constrains on partial melting[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2007, 25(9): 991–1009.
- [26] BLICHERT J, ALBAREDE F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148: 243–258.
- [27] SODERLUND U, PATCHETT P J, VERVOORT J D, ISACHSEN C E. The Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219(3/4): 311–324.
- [28] BELOISOVA B A, GRIFFIN W L, O'REILLY S Y. Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf isotope composition as a tool for petrogenetic modeling: Examples from Eastern Australian granitoids[J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(2): 329–353.
- [29] PATCHETT P J, KOUVO O, HEDGE C E, TATSUMOTO M. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: Evidence from Hf isotopes[J]. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 1981, 78(3): 279–297.
- [30] ZHENG Y F, FU B, GONG B, LI L. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime [J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 62(1/2): 105–161.
- [31] ZHENG Y F, ZHANG S B. Formation and evolution of Precambrian continental crust in southern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(1): 1–10.
- [32] ZHAO Z F, ZHENG Y F, WEI C S, WU Y B. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen in China: Zircon U-Pb age, element and O isotope evidence for recycling of subducted continental crust[J]. *Lithos*, 2007, 93(3/4): 248–272.
- [33] 赵子福, 郑永飞. 俯冲大陆岩石圈重熔: 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩成因[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(7): 888–909.
- ZHAO Zi-fu, ZHENG Yong-fei. Remelting of subducted continental lithosphere: Petrogenesis of Mesozoic magmatic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt[J]. *Science in China (Series D): Earth Science*, 2009, 39(7): 888–909.
- [34] ZHANG S B, ZHENG Y F, ZHAO Z F, WU Y B, YUAN H, WU F Y. Neoproterozoic anatexis of Archean lithosphere: Geochemical evidence from felsic to mafic intrusions at Xiaofeng in the Yangtze Gorge, South China[J]. *Precambrian Research*, 2008, 163: 210–238.
- [35] ZHANG S B, ZHENG Y F, ZHAO Z F, WU Y B, YUAN H, WU F Y. Origin of TTG-like rocks from anatexis of ancient lower crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic granitoids in South China[J]. *Lithos*, 2009, 113: 347–368.
- [36] 续海金, 叶凯, 马昌前. 北大别早白垩世花岗岩类 Sm-Nd 和锆石 Hf 同位素及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2008, 24(1): 87–103.
- XU Hai-jin, YE Kai, MA Chang-qian. Early Cretaceous granitoids in the North Dabie and their tectonic implications: Sr-Nd and Zircon Hf isotopic evidences[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(1): 87–103.
- [37] 陈伟, 徐兆文, 李红超, 杨小男, 陈进全, 王浩, 王少华. 河南新县花岗岩基的岩石成因、来源及对西大别构造演化的启示[J]. *地质学报*, 2013, 87(10): 1510–1524.
- CHEN Wei, XU Zhao-wen, LI Hong-chao, YANG Xiao-han, CHEN Jin-quan, WANG Hao, WANG Shao-hua. Petrogenesis and Origin of the Xinxian Granitic batholith in Henan Province and its implacation for the tectonic evolution of the western Dabie area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(10): 1510–1524.
- [38] ZHAO Z F, ZHENG Y F, WEI C K, WEI C S, CHEN F, LIU X M, WU F Y. Zircon U-Pb ages, Hf and O isotopes constrain the crustal architecture of the ultrahigh-pressure Dabie orogen in China[J]. *Chemical Geology*, 2008, 253: 222–242.
- [39] AMES L, TILTON G R, ZHOU G. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites[J]. *Geology*, 1993, 21: 339–342.
- [40] 李锦轶. 中朝地块与扬子地块碰撞的时限与方式—长江中下游地区震旦纪-侏罗纪沉积环境的演变[J]. *地质学报*, 2001, 75(1): 25–34.
- LI Jin-yi. Pattern and Time of the collision between the Sino Korean and Yangtze Blokes: Evolution of the Sinian-Jurassic sedimentary settings in the middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(1): 25–34.
- [41] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1–855.
- ZHANG Guo-wei, ZHANG Ben-ren, YUAN Xue-chen, XIAO Qin-hui. Qinling orogenic belt and continental dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2001: 1–855.
- [42] LEECH M L. Arrested orogenic development: Eclogitization, delamination, and tectonic collapse[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185(1/2): 149–159.
- [43] VANDERHAEGHE O, TEYSSIER C. Partial melting and flow of orogens[J]. *Tectonophysics*, 2001, 342(3/4): 451–472.
- [44] BRYANT D L, AYERS J C, GAO S. Geochemical, age, and isotopic constraints on the northern Dabie complex, east central China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2004, 116(5/6): 698–717.
- [45] HACHER B R, RATACHBACHER L, LIU J G. Subduction, collision and exhumation in the ultrahigh-pressure Qin-ling-Dabie orogen. Aspects of the tectonic evolution of China[C]// MALPAS J, FLETCHER C, ALI J R, ed. London: Geological Society, Special Publication, 2004, 226: 157–175.
- [46] LIU X C, JAHN B M, LIU D Y, DONG S W, LI S Z. SHRIMP

- U-Pb dating on zircon of a metagabbro and eclogites from western Dabieshan(Hong'an Block), China, and its tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 2004, 394(3): 171–192.
- [47] 高 阳, 叶会寿, 李永峰, 罗正传, 李法岭, 熊必康, 孟 芳. 大别山千鹅冲钼矿区花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及微量元素特征[J]. *岩石学报*, 2014, 30(1): 49–63. GAO Yang, YE Hui-shou, LI Yong-feng, LUO Zheng-zhuan, LI Fa-ling, XIONG Bi-kang, MENG Fang. SHRIMP zircon U-Pb ages, Hf isotopic compositions and trace elements characteristics of the granites from the Qian'echong Mo deposit, Dabie Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(1): 49–63.
- [48] 李永峰. 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]. 北京: 中国地质大学, 2005: 1–143. LI Yong-feng. The Temporal-spatial evolution of mesozoid granitoids in the Xiong'ershan area and their relationships to molybdenum-gold mineralization[D]. Beijing: China University of Geoscience, 2005: 1–143.
- [49] 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 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[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(4): 289–299. MAO Jin-wen, ZHANG ZUO-heng, YU Jin-jie, WANG Yi-tian, NIU Bao-gui. The geodynamics setting of Mesozoic large-scale mineralization in North China: The revelation from accurate timing of metal deposits[J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(4): 289–299.
- [50] 杨泽强. 河南商城县汤家坪钼矿辉钼矿铼钨同位素年龄及地质意义[J]. *矿床地质*, 2007, 26(3): 289–295. YANG Ze-qiang. Re-Os isotopic ages of Tangjiaping molybdenum deposit in Shangcheng County, Henan and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(3): 289–295.
- [51] 魏庆国, 高昕宇, 赵太平, 陈 伟, 杨岳衡. 大别北麓汤家坪花岗斑岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年和岩石地球化学特征及其对岩石成因的制约[J]. *岩石学报*, 2010, 26(5): 1551–1561. WEI Qing-guo, GAO Xin-yu, ZHAO Tai-ping, CHEN Wei, YANG Yue-heng. Petrogenesis of Tangjiaping granite porphyry in northern Dabie: Evidence from Zircon LA-ICPMS U-Pb dating and geochemical characteristics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(5): 1551–1561.
- [52] 杨梅珍, 曾键年, 覃永军, 李法岭, 万守全. 大别山北缘千鹅冲斑岩型钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年代学及其地质意义[J]. *地质科技情报*, 2010, 29(5): 35–45. YANG Mei-zhen, ZENG Jian-nian, QIN Yong-jun, LI Fa-ling, WAN Shou-quan. LA-ICP-MS zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for Qianechong porphyry-type Mo deposit in northern Dabie, China, and its geological significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(5): 35–45.
- [53] 罗正传, 李永峰, 王义天, 王小高. 大别山北麓河南新县地区大银尖钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其意义[J]. *地质通报*, 2010, 29(9): 1349–1354. LUO Zheng-zhuan, LI Yong-feng, WANG Yi-tian, WANG Xiao-gao. The molybdenite Re-Os age of Dayinjian molybdenum deposit in the northern margin of the Dabie Mountain, Xinxian area, Henan, China and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(9): 1349–1354.
- [54] LI H C, XU Z W, LU X C, CHEN W, QU W J, FU B, YANG X N, YANG J, CHEN J Q. Constraints on timing and origin of the Dayinjian intrusion and associated molybdenum mineralization, western Dabie orogen, central China[J]. *International Geology Reviews*, 2012, 54 (13): 1579–1596.
- [55] 孟 芳. 大别山北麓灵山岩体的成岩成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013: 1–163. MENG Fang. Study on rock-forming and ore-forming of the Lingshan pluton in the northern margin of Dabie Mountains[D]. Beijing: China University of Geoscience, 2013: 1–163.
- [56] 李明立. 河南省大别山地区中生代中酸性小岩体特征及钼多金属成矿系统[D]. 北京: 中国地质大学, 2009: 1–147. LI Ming-li. Characteristics of intermediate-acid small intrusive bodies and metallogenic system of molybdenum-polymetallic deposits in Mesozoic in Dabie Mountain, Henan Province[D]. Beijing: China University of Geoscience, 2009: 1–147.
- [57] 杨梅珍, 曾键年, 任爱群, 陆建培, 潘思东. 河南罗山县母山钼矿床成矿作用特征及锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年代学[J]. *矿床地质*, 2011, 30(3): 435–447. YANG Mei-zhen, ZENG Jian-nian, REN Ai-qun, LU Jian-pei, PAN Si-dong. Characteristics of Mo mineralization and zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology of Mushan Mo deposit from Luoshan County, Henan Province[J]. *Mineral Deposits*, 2011, 30(3): 435–447.
- [58] 李厚民, 陈毓川, 叶会寿, 王登红, 郭保健, 李永峰. 东秦岭—大别山地区中生代与岩浆活动有关钼(钨)金银铅锌矿床成矿系列[J]. *地质学报*, 2008, 82(11): 1468–1477. LI Hou-min, CHEN Yu-chuan, YE Hui-shou, WANF Deng-hong, GUO Bao-jian, LI Yong-feng. Mo, (W), Au, Ag, Pb, Zn minerogenetic series related to mesozoic magmatic activities in the east Qinling-Dabie mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(11): 1468–1477.
- [59] 任继舜. 论中国大陆岩石圈构造的基本特征[J]. *中国区域地质*, 1991(4): 289–293. REN Ji-sun. The basic characteristics of the tectonic evolution of the continental lithosphere in China[J]. *Regional Geology of China*, 1991(4): 289–293.
- [60] WANG T, GUO L, ZHENG Y D, DONSKAYA T. Timing and Processes of late Mesozoic mid-lower-crustal extension in continental NE Asia and implications for the tectonic setting of the destruction of the North China Craton: Mainly constrained by zircon U-Pb ages from metamorphic core complexes[J]. *Lithos*, 2012, 154: 315–345.