



安徽池州马头铜钼矿床锆石 年龄与辉钼矿 Re-Os 同位素测定的地质意义

赵 超^{1,2}, 谢兴楠², 马 春², 柳建新¹, 曹创华¹

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

2. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 南京 210007)

摘 要: 安徽池州马头铜钼多金属矿床是江南过渡带池州段典型斑岩型铜钼矿床之一。对矿区钻孔中不同深度花岗闪长(斑)岩和钾长花岗岩采用高精度的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年。结果表明: 花岗闪长(斑)岩形成相对较早(144.5~145.8 Ma), 而钾长花岗岩侵位稍晚(141.5 Ma), 二者均为燕山晚期(晚侏罗-早白垩世)岩浆作用的产物。对矿区 13 件辉钼矿样品采用 Re-Os 同位素测年, 获得 Re-Os 等时线年龄为(148±3) Ma。考虑到矿体的形成和分布与岩体蚀变关系较为密切, 进一步确证安徽池州马头铜钼多金属矿床成岩与成矿作用为同一构造-岩浆热事件的产物。

关键词: 马头铜钼多金属矿床; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年; 辉钼矿 Re-Os 同位素定年; 矿化蚀变

中图分类号: P588.121; P597

文献标志码: A

Geological significance of zircon age and Re-Os isotopic measurement on molybdenite from Matou Cu-Mo polymetallic deposit Chizhou, Anhui province, China

ZHAO Chao^{1,2}, XIE Xing-nan², MA Chun², LIU Jian-xin¹, CAO Chuang-hua¹

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. East China Mineral Exploration and Development Bureau for Non-Ferrous, Nanjing 210007, China)

Abstract: Matou Cu-Mo polymetallic deposit is one of the typical porphyry Cu-Mo deposits in Chizhou segment of Jiangnan transitional zone, Anhui province. The high precision LA-ICP-MS zircon U-Pb dating is used for granodiorite (porphyry) of mine drill in this area. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of four drilling samples, yielded ages of 144.5–145.8 Ma for the granodiorite-porphyry, and of 141.5 Ma for the moyite, indicating that they are all the products of the Late-Yanshanian (late-Jurassic to early Cretaceous) magmatism. Meanwhile, Re-Os isotopic age analysis of thirteen molybdenite yielded a weighted average model age of (148±3) Ma. Considered the relationship between the distribution and forming of the ore closely related with the rock alteration, the above information suggests that the diagenesis and the metallogenesis of the Matou Cu-Mo polymetallic deposit are the products of the same tectonic-magmatic thermal events.

Key words: Matou Cu-Mo polymetallic deposit; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; molybdenite Re-Os isotopic dating; mineral alteration

我国长江中下游成矿带是非常重要的矿产资源集中地, 具有开发历史悠久、金属资源丰富、成矿特色鲜明、找矿潜力可观的显著特点, 素有“工业走廊”

之美誉。从大地构造位置来看, 该成矿带属于华北板块与扬子板块的碰撞造山带之东南侧的扬子板块北缘的长江断裂带内, 长期以来被认为是我国东部中生代

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41174103); 国家高科技基础性工作专项资助项目(2013FY110800); 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室开放基金资助项目

收稿日期: 2014-11-27; **修订日期:** 2015-10-15

通信作者: 赵 超, 教授级高级工程师; 电话: 13505156517; E-mail: zhaochao65@sohu.com

构造-岩浆-成矿活动最为活跃的区域,其中典型的大型矿集区主要包括鄂东南、九瑞、安庆-贵池、庐枞、铜陵、宁芜以及宁镇等。近年来,关于长江中下游地区的成矿理论研究取得了一系列重要进展,尤其是在地质找矿工作方面取得了重大突破,如九瑞、铜陵、庐枞等矿集区的深部地质找矿工作进展更为显著,显示出该成矿带的成矿潜力与找矿前景依然十分巨大。

位于我国长江中下游成矿带的安庆-贵池矿集区内的安徽池州马头铜钼多金属矿是一个典型的铜钼型矿床^[1-2],该矿床位于贵池复向斜之灌口向斜的北东段南东翼,大地构造位置处于下扬子板块北缘长江中下游海西-印支断裂拗陷褶皱带与皖南加里东造山带之间的过渡带上。该矿床最早为安徽省 321 地质队于地表踏勘与地表矿点检查时发现,后经江苏省有色金属华东地质勘查局下属地质勘查单位 2009~2010 年普查和详查,提交下冲矿段钼金属量 31741.87 t(Mo 平均品位为 0.052%),铜金属量 11688.20 t(Cu 平均品位为 0.293%),矿床规模达到中型。最近,在马头矿区下冲矿段南侧又连续施工了若干深孔(ZK1702、ZK1901、ZK2301、ZK2701、ZK2901 等),见矿程度均较好,并发现了新类型的富钼(铜)矿体,显示该矿床有升级为大型铜钼多金属矿床的远景和潜力。

尽管马头铜钼多金属矿床发现历史并不悠久,关于该矿床的相关研究工作却比较丰富,如矿床地质、控矿因素、成矿物质、矿床成因、矿化蚀变、找矿预测等,对于进一步发展与丰富该矿床的成矿作用及其形成机制发挥了重要作用,尤其是为找矿预测以及勘探实践提供了非常重要的科学依据。杨贵才等^[3]利用辉钼矿 Re-Os 同位素测年技术,分别对马头钼矿床中一件斑岩型矿石和一件砂板岩型矿石中的辉钼矿进行了定年,首次获得马头钼矿床成矿年龄,指出成矿物质主要来自于地幔,混有少量的地壳物质,且认为在长江中下游地区在 150 Ma 左右可能存在与中国东部由东西向构造体系向北东向构造体系转变相关的一次成矿事件。王伟华^[4]研究发现,马头铜钼矿床是典型的斑岩型矿床,其诸多地质特征、判别评价标志与国内外的斑岩型矿床完全能对比。肖娥等^[5]通过与部分典型斑岩型铜钼矿床的对比发现,马头铜钼矿与典型斑岩型矿床在蚀变类型及分带等方面大致相同,同属斑岩型成矿体系。成矿早期阶段,形成了大面积的钾长石化,伴生与面型钾长石化有关的细脉、浸染状矿化;热液演化中期阶段,形成硅化、绢云母化等蚀变类型,并伴随范围较大的细脉-网脉状的矿化;热液演化晚期阶段,主要形成碳酸盐化,矿化作用不显

著。薛卫冲^[6]也同样认为,该矿床为斑岩型铜钼矿床,花岗闪长斑岩与钼、铜成矿关系十分密切,矿体受构造控制明显,矿区主断层、次生断层是主要的导矿构造,接触带附近发育的节理裂隙是主要的容矿构造,坟头组砂岩与花岗闪长斑岩内外接触带是主要的赋矿部位。

根据目前已有研究成果,马头铜钼多金属矿床与岩体关系十分密切,毋庸置疑,岩浆活动以及岩体特征记录了大量的与成矿作用有关的信息。为此,本研究以马头铜钼多金属矿区的花岗闪长(斑)岩和钾长花岗岩以及辉钼矿为研究对象,通过开展精细的锆石 U-Pb 年代学以及辉钼矿 Re-Os 同位素定年,进一步限定与约束岩浆活动的时代及其期次,揭示铜钼多金属矿的成矿作用时代,进而为探讨岩体形成与成矿作用之间的关系奠定年代学基础。

1 矿区地质概况

安徽马头铜钼多金属矿床位于安徽省池州市南约 28 km 的梅村乡境内,是江南过渡带池州段近几年新探明的中型斑岩型铜钼(金)多金属矿床,地处下扬子板块北缘长江中下游海西-印支断裂拗陷褶皱带与皖南加里东造山带之间的衔接部位。

该矿区出露的最老地层为志留系下统高家边组层状粉砂质页岩夹粉砂岩,除第四系外,最新地层为泥盆系上统五通组石英砂岩、砾岩(见图 1)。区内断裂构造也十分发育,主要以北东向纵断层、北西向横断层以及北北东向斜断层为主。矿区岩体主体侵入于志留系坟头组地层中,受北北东向 F₁ 韧性剪切断裂带、北西向张性断裂带 F₂ 及其次级断裂构造所控制,两组断裂的交汇处及其附近为岩体侵位的主要部位(见图 1)。据矿区磁测成果和钻探工程揭露,该岩体由南西深部向浅部北东方向侵位,在地表出露为下冲、西山岩枝及桐坑、栗子坑小岩株。平面上呈不规则状,出露总面积小于 1 km²,以花岗闪长(斑)岩为主,矿区深部则见有钾长花岗岩的发育与产出。

现有研究认为,马头矿区铜钼矿成矿主要与地表出露的花岗闪长(斑)岩有关,并取得了一系列的研究成果^[7-8]。然而,随着勘探工作的不断深入,发现在马头矿区深部(如 ZK1901、ZK1902、ZK2301、ZK2701、ZK2901 等)发育有浅灰白色钾长花岗岩,侵入花岗闪长(斑)岩中,且在二岩体接触带附近,钾化蚀变较为强烈且出现强烈细脉-浸染状矿化,表明钼的矿化还可能与钾长花岗岩有着紧密的联系。

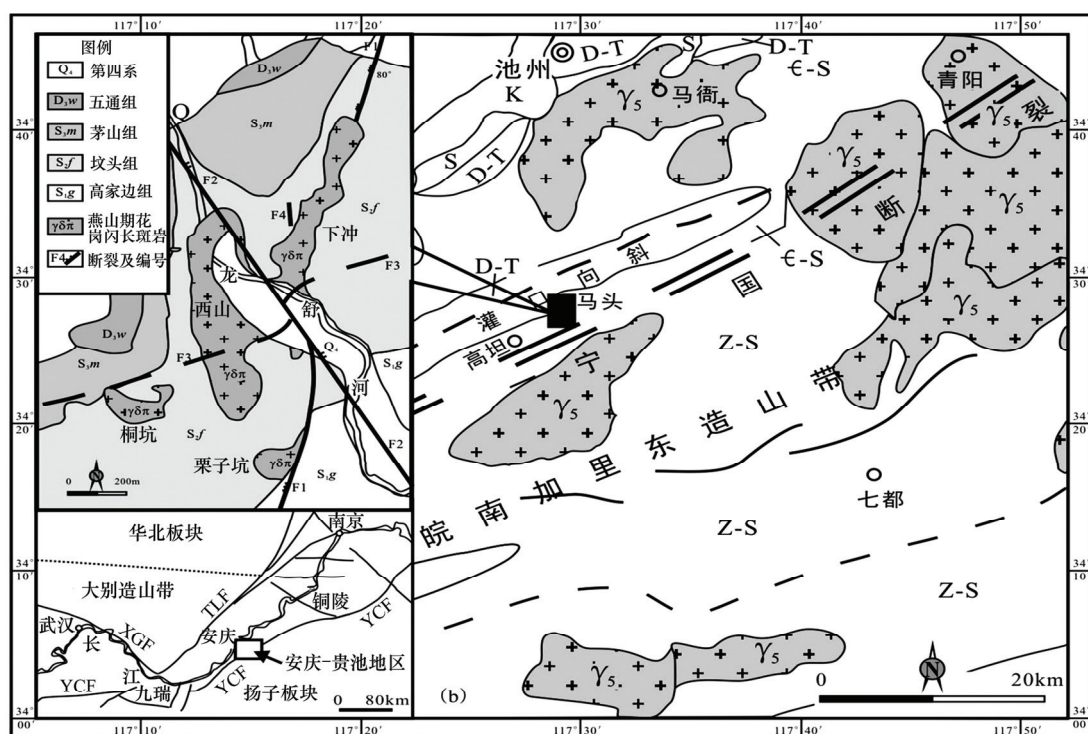


图1 马头铜钼多金属矿区地质简图

Fig. 1 Sketch geological map of Matou Cu-Mo polymetallic orefield

2 花岗岩体岩相学与地球化学

区内花岗岩体主体侵入于志留系坟头组中,受 NNE 向 F_1 韧性剪切断裂带、NW 向张性断裂带 F_2 及其次级断裂构造所控制,两组断裂的交汇处及其附近为岩体侵位的主要部位(见图 1)。据矿区磁测成果和钻探工程揭露,该岩体由 SW 深部向浅部 NE 方向侵位,在地表出露为下冲、西山岩枝及桐坑、栗子坑小岩株。平面上呈不规则状,出露总面积小于 1 km^2 。岩性以花岗闪长(斑)岩为主,钻孔深部可见钾长花岗岩。

花岗闪长(斑)岩主要呈灰白-青灰色,是矿区出露的主要岩石类型,深部表现为花岗闪长岩,而至浅部(似)斑状构造逐渐明显(见图 2(a))。岩石的主要矿物成分为斜长石、石英、碱性长石、普通角闪石和黑云母等(见图 2(b)),副矿物有磷灰石、锆石、榍石和不透明矿物等。斑晶以斜长石(20%~35%(质量分数))、石英(约 10%(质量分数))为主,黑云母(5%~10%(质量分数))、普通角闪石(5%~8%(质量分数))和碱性长石(约 5%(质量分数))次之。基质(25%~40%(质量分数))呈显晶质,半自形粒状结构,矿物成分与斑晶类似。斜长石斑晶呈板柱状,半自形,为更-中长石,牌号 $w(\text{An})$

为 20%~45%,具有明显的聚片双晶、卡钠复合双晶和环带构造,常发生绢云母化、粘土化和钾长石化。石英呈他形粒状,部分颗粒可见较明显的熔蚀现象而呈港湾状,具波状消光现象。碱性长石呈半自形板状,为钾长石,具粘土化和绢云母化。普通角闪石呈柱粒状,单偏光下为浅绿色-浅褐色,可见两组斜交解理,常具绿泥石化和碳酸盐化等,并可见铁质析出。黑云母呈较自形的片状,发育一组极完全解理,大多受到绿泥石化,个别白云母化。副矿物为磷灰石、锆石、榍石和磁铁矿,含量较少或偶见。

钾长花岗岩主要见于钻孔深部。岩石呈灰白-浅肉红色(见图 2(c)),半自形粒状结构、显微文象结构(见图 2(d)),块状或脉状构造。主要组成矿物为钾长石(55%~70%)、石英(30%~35%)和少量斜长石(<2%(质量分数)),几乎不含暗色矿物,副矿物偶见,为磷灰石、锆石和榍石等。钾长石呈半自形板状,表面具轻微粘土化。石英呈他形。斜长石发育聚片双晶,偶见绢云母化和碳酸盐化等。

马头花岗闪长岩和钾长花岗岩均为准铝-弱过铝质花岗岩^[8],但前者 SiO_2 含量明显偏低,且表现出相对偏低的全碱含量及钾钠比值,而后者全碱含量则较高,二者可分别归属为钙碱性花岗岩和偏碱性花岗岩。无论是花岗闪长岩还是钾长花岗岩均强烈富集 Ba、Sr

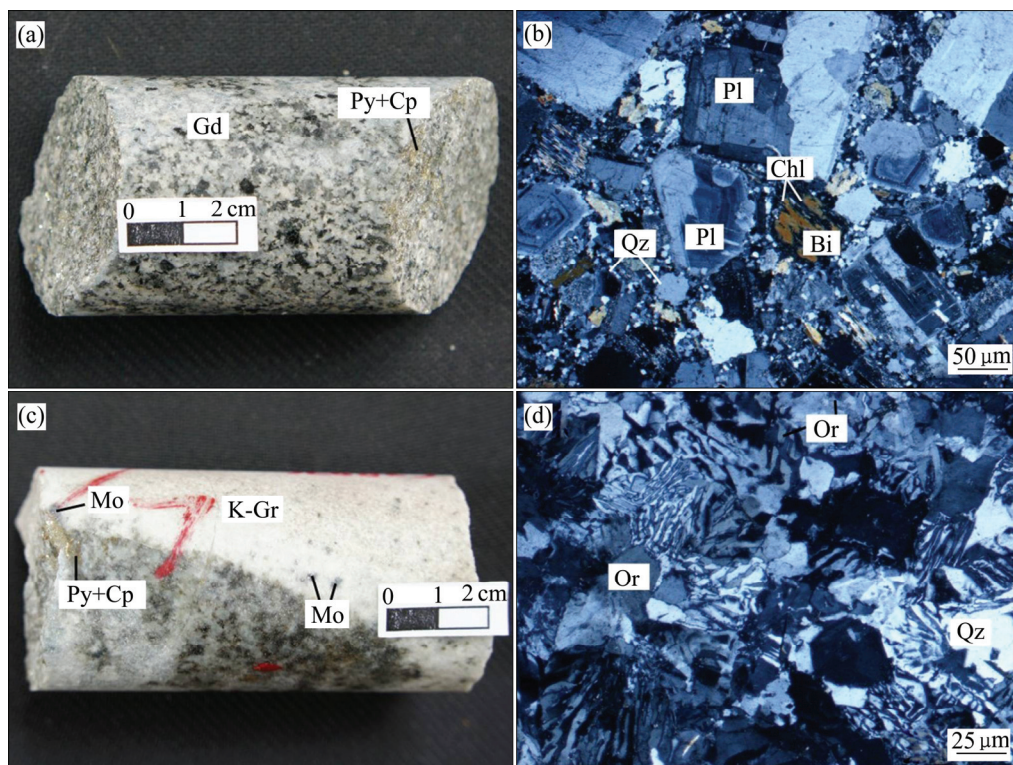


图 2 马头铜钼多金属矿区花岗岩显微特征

Fig. 2 Microscopic characteristics of granites in Matou Cu-Mo polymetallic orefield (Gd—花岗闪长(斑)岩; K-Gr—钾长花岗岩; Pl—斜长石; Or—钾长石; Qz—石英; Bi—黑云母; Mo—辉钼矿; Cp—黄铜矿; Py—黄铁矿)

(a) 较新鲜的花岗闪长斑岩, 样品采自 ZK1901 564.2 m; (b) 较新鲜的花岗闪长斑岩显微照片, 样品采自马头 ZK1901 564.2 m, 正交偏光; (c) 钾长花岗岩与花岗闪长(斑)岩的接触部位, 样品采自 ZK1901 512.8 m; (d) 钾长石与石英相互交生, 构成显微文象结构, 样品采自 ZK2701 672.9 m, 正交偏光

等大离子亲石元素以及轻稀土元素(LREE), 而在 Nb、Ta、Y 等高场强元素和重稀土元素(HREE)方面, 钾长花岗岩较花岗闪长岩更为亏损, 明显区别于典型的 I 型或 S 型花岗岩, 显示埃达克质岩石或高 Ba-Sr 花岗岩的地球化学特征^[8-9]。最近, 谢兴楠等^[8]研究认为, 马头花岗闪长岩是富集岩石圈地幔部分熔融的产物, 但在成岩过程中经历有一定程度的地壳组分混染^[7,9], 而钾长花岗岩则很可能是早期形成岩体在压力释放过程中再次熔融的产物。

3 样品及分析方法

3.1 岩体样品及分析方法

本研究中对马头复式花岗岩体中花岗闪长(斑)岩和钾长花岗岩进行了锆石 U-Pb 年代学测试, 相关实验在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成, 具体分析方法如下所述。

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年先将全岩样品(>2 kg)经破碎、淘洗、磁选以及重液分离后, 筛选出锆石精样, 然后在双目镜下观察所分离锆石的特征(如颜色、透明度和晶型等), 在此基础上, 仔细挑选表明平整光洁且具不同长宽比例、不同柱锥面特征, 不同颜色的锆石颗粒, 再将这些锆石排放在双面胶上, 置于圆环模具内。以三乙醇胺为固化剂, 按三乙醇胺与环氧树脂的质量比为 1:5 均匀混合后注入圆环模具内, 待固结后, 对环氧树脂表面抛光至锆石表面暴露以待测试。定年工作采用 New Wave 213 nm 激光取样系统与 Agilent 7500 s ICP-MS 仪联机, 使用 He 作为剥蚀物质的载气, 分析过程中激光束斑直径 21 μm, 频率 5 Hz。具体的分析方法和流程可参见文献[10]。普通铅的校正使用 ComPbCorr#3_15G 程序^[11]进行, 年龄及谐和图绘制采用 Isoplot(ver2.49)^[12]程序。

3.2 辉钼矿样品及分析方法

本次测试从马头矿区下冲平洞中挑选出 13 件可

以做 Re-Os 同位素定年的样品, 测试分析在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室完成, 分析过程主要包括化学分离和 ICP-MS 同位素比值测定, 其中质谱分析采用美国 TJA 公司生产的 TJA X-series ICP-MS 型质谱仪开展相关工作, 详细的化学分离过程参考文献[13]。实验全流程空白 Re 约为 0.03 ng, 普 Os 近乎为 0, 远远小于所测样品中的铼、钨含量, 因此不会影响实验中铼、钨含量的准确测定。辉钼矿的模式年龄可以通过辉钼矿中 Re 和 Os 的含量进行计算。计算公式为

$$t = \frac{1}{\lambda} \left[\ln \left(1 + \frac{m(^{187}\text{Os})}{m(^{187}\text{Re})} \right) \right]$$

式中: $\lambda(^{187}\text{Re}$ 衰变常数) $=1.666 \times 10^{-11}$ y/r。

4 分析结果

马头铜钼多金属矿床锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及辉钼矿 Re-Os 同位素测年结果分别见表 1~5。

表 1 马头铜钼多金属矿区花岗岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测试结果 (CZB51)

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating for granites in Matou Cu-Mo polymetallic orefield (CZB51)													
点号	$m(\text{Th})/m(\text{U})$	$m(^{207}\text{Pb})/m(^{206}\text{Pb})$		$m(^{207}\text{Pb})/m(^{235}\text{U})$		$m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$		$m(^{207}\text{Pb})/m(^{206}\text{Pb})$		$m(^{207}\text{Pb})/m(^{235}\text{U})$		$m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$	
		同位素 比值	1 σ	同位素 比值	1 σ	同位素 比值	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ
1	2.48	0.04640	0.00133	0.14769	0.00425	0.02308	0.00035	18	35	140	4	147	2
2	0.92	0.04789	0.00146	0.15349	0.00466	0.02324	0.00037	94	42	145	4	148	2
3	0.79	0.04761	0.00137	0.15330	0.00442	0.02335	0.00035	80	40	145	4	149	2
4	0.75	0.09126	0.01035	0.26446	0.02887	0.02102	0.00065	1452	226	238	23	134	4
5	0.50	0.04892	0.00153	0.15302	0.00476	0.02268	0.00036	144	44	145	4	145	2
6	0.83	0.04899	0.00201	0.15410	0.00617	0.02281	0.0004	147	61	146	5	145	3
7	0.65	0.04929	0.00201	0.15549	0.00621	0.02288	0.00039	162	62	147	5	146	2
8	0.98	0.04885	0.00210	0.15099	0.00634	0.02241	0.00039	141	66	143	6	143	2
9	0.82	0.04771	0.00138	0.14896	0.00429	0.02264	0.00034	85	40	141	4	144	2
10	0.46	0.04736	0.00164	0.14525	0.00496	0.02224	0.00036	67	49	138	4	142	2
11	0.61	0.04842	0.00132	0.15247	0.00414	0.02283	0.00034	120	37	144	4	146	2
12	0.58	0.04856	0.00123	0.15021	0.00383	0.02243	0.00032	127	34	142	3	143	2
13	0.63	0.16576	0.00211	10.8314	0.15511	0.47386	0.00631	2515	11	2509	13	2500	28
14	0.54	0.04981	0.00171	0.15742	0.00535	0.02293	0.00036	186	50	148	5	146	2
15	0.61	0.04893	0.0018	0.15735	0.0057	0.02333	0.00038	144	55	148	5	149	2
16	0.53	0.0478	0.00138	0.14481	0.00418	0.02197	0.00032	89	41	137	4	140	2
17	0.60	0.04908	0.0017	0.15147	0.00519	0.02239	0.00036	152	50	143	5	143	2
18	0.59	0.04919	0.00177	0.16074	0.00571	0.0237	0.00038	157	53	151	5	151	2
19	1.09	0.05011	0.00128	0.16174	0.00416	0.02341	0.00034	200	34	152	4	149	2
20	0.32	0.0493	0.00251	0.15388	0.00763	0.02264	0.00042	162	81	145	7	144	3

4.1 花岗岩体年龄

本次研究选取 3 件花岗闪长(斑)岩样品和 1 件钾长花岗岩样品开展 U-Pb 年代学测试。一般认为锆石的 Th/U 比值在一定程度上能指示岩浆或变质成因, 通常变质成因锆石的 Th/U 比值小于 0.1, 岩浆成因锆石的 Th/U 比一般在 0.1~1 的范围内。本次对花岗闪长(斑)岩和钾长花岗岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 测试结果表明, 锆石的 Th/U 比值较大, 变化于 0.32~2.48 之间, 平均值为 0.72, 均显示出典型的岩浆锆石特征。为此, 分析锆石为岩浆结晶作用过程中而形成的, 其主群锆石 U-Pb 年龄测试结果能够代表岩浆的侵位年龄以及岩体的结晶年龄。

样品 CZB51 采自 ZK904 深部 488m 处, 岩性为花岗闪长岩, 锆石主要为短柱状, 晶型较好, 无色透明或浅黄色, 长径约 100~150 μm 。锆石 $m(\text{Th})/m(\text{U})$ 介于 0.32~2.48 之间, 除 CZB51-20 点为 0.32 外, 其余测试点均在 0.4 以上, 表现为典型岩浆成因锆石特征^[14]。在 $m(^{207}\text{Pb})/m(^{235}\text{U})-m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$ 谐和图上, 除 CZB51-04 点外, 所有数据点均投影在谐和线上或

表 2 马头铜钼多金属矿区花岗岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测试结果 (CZB92)

Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating for granites in Matou Cu-Mo polymetallic orefield (CZB92)

点号	$m(\text{Th})/$ $m(\text{U})$	$m(^{207}\text{Pb})/m(^{206}\text{Pb})$		$m(^{207}\text{Pb})/m(^{235}\text{U})$		$m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$		$m(^{207}\text{Pb})/m(^{206}\text{Pb})$		$m(^{207}\text{Pb})/m(^{235}\text{U})$		$m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$	
		同位素 比值	1 σ	同位素 比值	1 σ	同位素 比值	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ
1	0.47	0.15353	0.00465	0.02302	0.00035	0.00325	0.00012	118	43	145	4	147	2
2	0.43	0.15399	0.00559	0.02302	0.00037	0.00313	0.00014	125	55	145	5	147	2
3	0.63	0.14886	0.00433	0.02212	0.00033	0.00277	0.00010	139	41	141	4	141	2
4	0.72	10.2678	0.13594	0.43963	0.00567	0.05202	0.00144	2552	10	2459	12	2349	25
5	0.67	0.15809	0.00514	0.02294	0.00036	0.00332	0.00014	195	47	149	5	146	2
6	0.62	0.15297	0.00893	0.02271	0.00048	0.00354	0.00022	142	94	145	8	145	3
7	1.31	4.13068	0.06294	0.22872	0.00307	0.04411	0.00155	2112	12	1660	12	1328	16
8	0.70	0.16188	0.00445	0.02299	0.00033	0.0040	0.00017	244	37	152	4	147	2
9	0.62	0.15511	0.00455	0.02293	0.00034	0.00408	0.00019	152	41	146	4	146	2
10	0.54	0.15438	0.00521	0.02284	0.00035	0.00416	0.00022	149	50	146	5	146	2
11	1.61	0.73482	0.01727	0.07812	0.00114	0.01812	0.00091	876	26	559	10	485	7
12	0.40	0.34888	0.00790	0.04079	0.00058	0.0088	0.00051	676	25	304	6	258	4
13	0.49	0.15446	0.00741	0.02260	0.00043	0.00409	0.00024	175	76	146	7	144	3
14	0.50	0.15963	0.00535	0.02261	0.00036	0.00478	0.0002	250	48	150	5	144	2
15	0.58	0.15551	0.00457	0.02272	0.00034	0.00401	0.00016	179	41	147	4	145	2
16	0.95	0.64124	0.01163	0.07285	0.00101	0.01422	0.00046	736	18	503	7	453	6
17	0.76	0.16817	0.00718	0.02395	0.00043	0.00434	0.0002	238	65	158	6	153	3
18	0.59	0.17101	0.00827	0.02395	0.00045	0.00421	0.00023	276	76	160	7	153	3
19	0.53	0.18967	0.00657	0.02328	0.0004	0.00472	0.00023	571	46	176	6	148	3
20	0.56	0.16415	0.00974	0.02192	0.00049	0.00421	0.00029	384	93	154	8	140	3
21	0.51	0.15533	0.00431	0.02296	0.00034	0.00409	0.00018	151	38	147	4	146	2
22	0.60	0.16584	0.00623	0.02329	0.0004	0.00374	0.0002	270	55	156	5	148	3
23	2.06	5.25557	0.0864	0.31089	0.00435	0.04785	0.00192	1995	13	1862	14	1745	21
24	0.83	10.0451	0.15898	0.46099	0.00637	0.06753	0.00282	2435	12	2439	15	2444	28
25	0.68	0.17939	0.00614	0.02261	0.00038	0.00394	0.00021	513	46	168	5	144	2

表 3 马头铜钼多金属矿区花岗岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测试结果 (CZB154)

Table 3 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating for granites in Matou Cu-Mo polymetallic orefield (CZB154)

点号	$m(\text{Th})/$ $m(\text{U})$	$m(^{207}\text{Pb})/m(^{206}\text{Pb})$		$m(^{207}\text{Pb})/m(^{235}\text{U})$		$m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$		$m(^{207}\text{Pb})/m(^{206}\text{Pb})$		$m(^{207}\text{Pb})/m(^{235}\text{U})$		$m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$	
		同位素 比值	1 σ	同位素 比值	1 σ	同位素 比值	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ	年龄	1 σ
1	0.65	0.04968	0.00166	0.15294	0.00505	0.02233	0.00035	180	48	145	4	142	2
2	0.53	0.04888	0.00126	0.15502	0.00403	0.02301	0.00033	142	35	146	4	147	2
3	0.54	0.04901	0.00166	0.15609	0.00522	0.0231	0.00036	148	49	147	5	147	2
4	0.77	0.04963	0.00180	0.15356	0.00547	0.02244	0.00036	178	53	145	5	143	2
5	1.00	0.04889	0.00171	0.15482	0.00537	0.02297	0.00036	143	52	146	5	146	2
6	0.58	0.04978	0.00172	0.15225	0.00522	0.02219	0.00035	185	51	144	5	141	2
7	1.20	0.04937	0.0019	0.15293	0.00579	0.02247	0.00036	165	58	144	5	143	2
8	0.69	0.04927	0.00158	0.15726	0.00500	0.02315	0.00036	161	46	148	4	148	2
9	0.75	0.04908	0.00172	0.15533	0.00536	0.02295	0.00037	152	51	147	5	146	2
10	0.70	0.04995	0.00183	0.15549	0.00561	0.02258	0.00038	193	53	147	5	144	2
11	0.58	0.04938	0.00196	0.15583	0.00611	0.02289	0.00037	166	61	147	5	146	2
12	0.47	0.04961	0.00238	0.15059	0.00706	0.02202	0.00041	177	74	142	6	140	3
13	1.49	0.06652	0.00125	1.05493	0.02077	0.11503	0.00162	823	20	731	10	702	9

表 4 马头铜钼多金属矿区花岗岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测试结果 (CZB87)

点号	$m(\text{Th})/$ $m(\text{U})$	$m(^{207}\text{Pb})/m(^{206}\text{Pb})$		$m(^{207}\text{Pb})/m(^{235}\text{U})$		$m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$		$m(^{207}\text{Pb})/m(^{206}\text{Pb})$		$m(^{207}\text{Pb})/m(^{235}\text{U})$		$m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$	
		同位素 比值	1σ	同位素 比值	1σ	同位素 比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
1	0.56	0.04887	0.00209	0.15048	0.00634	0.02234	0.0004	142	65	142	6	142	3
2	0.64	0.05050	0.00219	0.17423	0.00742	0.02503	0.00045	218	65	163	6	159	3
3	0.58	0.14032	0.00182	7.33335	0.11150	0.37909	0.00530	2231	12	2153	14	2072	25
4	0.40	0.04987	0.00196	0.15517	0.00603	0.02257	0.00039	189	58	146	5	144	2
5	0.50	0.04924	0.00180	0.15461	0.00559	0.02278	0.00038	159	54	146	5	145	2
6	0.47	0.05208	0.00155	0.15857	0.00475	0.02209	0.00035	289	40	149	4	141	2
7	0.83	0.05301	0.00478	0.15507	0.01345	0.02122	0.00063	329	143	146	12	135	4
8	0.56	0.05063	0.00165	0.17668	0.00576	0.02531	0.00041	224	46	165	5	161	3
9	0.83	0.13258	0.00819	0.36732	0.02141	0.02009	0.00041	2132	111	318	16	128	3
10	0.42	0.05172	0.00204	0.15476	0.00599	0.0217	0.00038	273	57	146	5	138	2
12	0.40	0.05511	0.00169	0.17070	0.00521	0.02247	0.00036	417	40	160	5	143	2
13	0.59	0.05908	0.00178	0.18027	0.00542	0.02213	0.00036	570	38	168	5	141	2
14	0.58	0.05893	0.00169	0.17837	0.00515	0.02195	0.00034	565	37	167	4	140	2
15	0.77	0.04731	0.00199	0.13572	0.00569	0.02081	0.00034	65	63	129	5	133	2
16	0.49	0.05327	0.00300	0.16091	0.00874	0.02191	0.00048	340	83	151	8	140	3

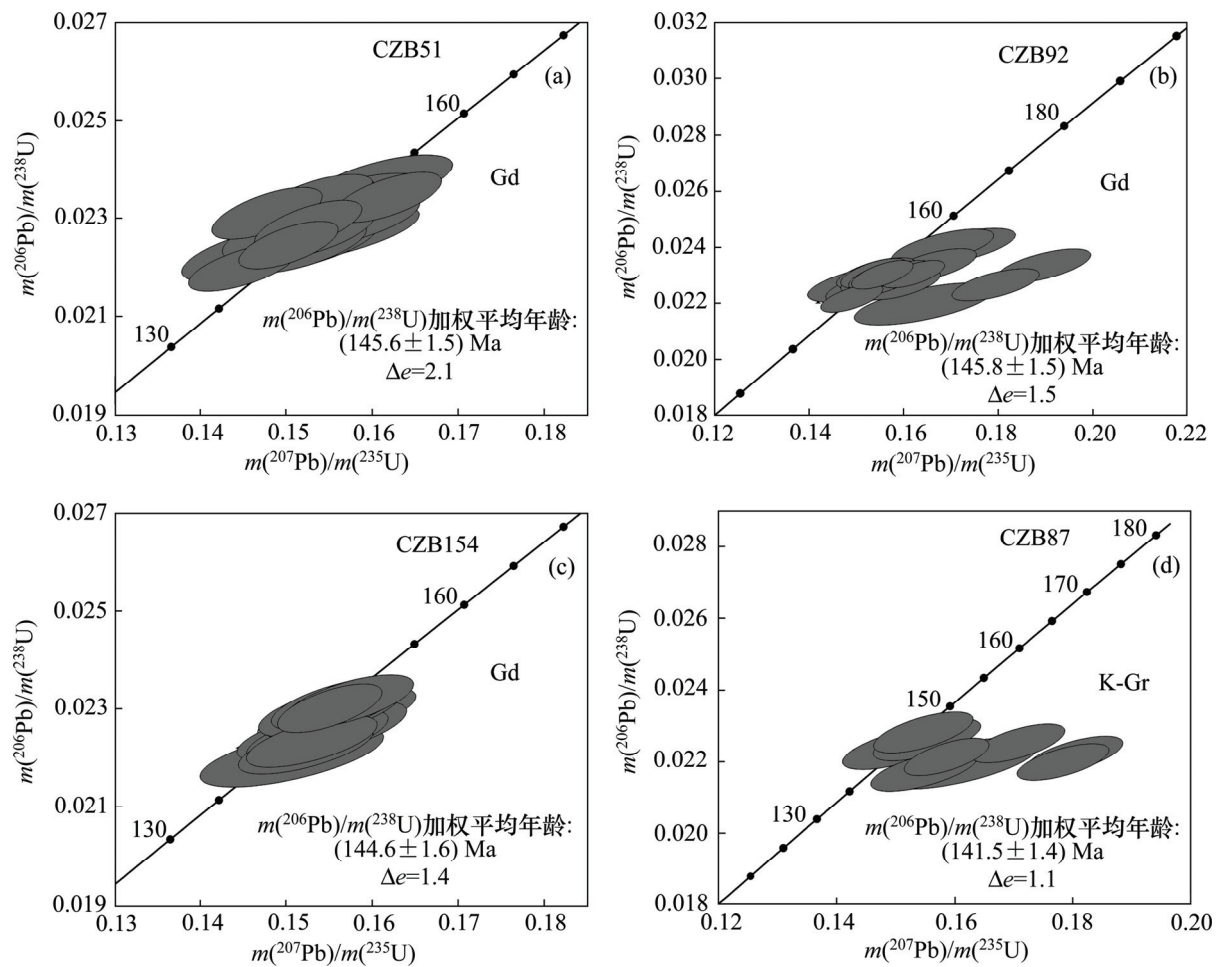


图 3 马头铜钼多金属矿区花岗岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagrams for granites in Matou Cu-Mo polymetallic orefield

附近,其中有 18 个数据点的 $m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$ 表面年龄介于 140~151 Ma(见图 3(a)), 计算加权平均年龄为 (145.6 ± 1.5) Ma(加权平均方差 $\Delta e=2.1$), 代表了样品 CZB51 的结晶年龄。此外,测试中还获得一组古老年龄 (2500 ± 28) Ma, 反映马头地区可能存在古元古代古老物质的信息^[7]。

样品 CZB92 采自 ZK1901 深部 596 m 处, 岩性为花岗闪长岩, 锆石主要为短柱状, 晶型较好, 无色透明或浅黄色, 长径约 100~200 μm 。锆石 $m(\text{Th})/m(\text{U})$ 介于 0.43~2.06 之间, 均大于 0.4, 为岩浆成因锆石^[14]。25 组测试数据中, 有 18 组数据投影在谐和线上或附近(见图 3(b)), 其中 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄集中在 140~153 Ma 之间, 计算加权平均年龄为 (145.8 ± 1.5) Ma ($\Delta e=1.5$), 可代表岩浆结晶年龄。同样, 测试中获得一组最古老谐和年龄 (2444 ± 28) Ma, 可能反映古老物质的印记^[7]。

样品 CZB154 采自 ZK1106 深部 14 m 处, 岩性为花岗闪长斑岩, 蚀变较强, 主要蚀变类型为硅化和绢云母化。样品中的锆石主要为短柱状, 晶型相对较好, 无色透明或呈淡黄色, 长径约 80~150 μm 。锆石 $m(\text{Th})/m(\text{U})$ 介于 0.47~1.49 之间, 为典型岩浆成因锆石^[14]。13 组测试数据中, 有 12 组数据较为集中, 均投影在谐和线上或附近(见图 3(c)), 其中 $m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$ 表面年龄集中在 140~148 Ma 之间, 计算加权平均年龄为 (144.6 ± 1.6) Ma($\Delta e=1.4$), 为岩浆结晶年龄。

样品 CZB87 采自 ZK1901 深部 513 m 处, 岩性为钾长花岗岩, 锆石呈短柱状, 晶型较好, 无色透明或淡黄色, 长径约 50~200 μm 。锆石 $m(\text{Th})/m(\text{U})$ 介于 0.54~1.09 之间, 为岩浆成因锆石^[14]。16 组数据中, 有 10 组数据 $m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$ 表面年龄集中在 138~145 Ma 之间, 计算加权平均年龄为 (141.5 ± 1.4) Ma ($\Delta e=1.1$), 可代表钾长花岗岩的侵位结晶年龄。

4.2 成矿年龄

本文作者对 13 件辉钼矿 Re-Os 进行了同位素测试, 其结果表明(见表 2), 辉钼矿的模式年龄为 $(142.2\pm3.7)\sim(149.0\pm3.0)$ Ma, 其加权平均值为 (146 ± 1) Ma(见图 4)。采用 IsoPlot 软件^[12]对所获得的 13 件数据进行等时线计算, 得到等时线年龄为 (148 ± 3) Ma(见图 5), 初始 Os 为 $-(1.8\pm3.4)$ Ma(MSWD=1.6), 即初始 Os 值近于 0, 说明辉钼矿形成时矿物内几乎不存在初始 Os, 同位素体系封闭后, Os 完全由衰变而来。由此可以确定辉钼矿的沉淀年龄为 (148 ± 3) Ma。

根据 13 件辉钼矿 Re-Os 同位素的测试结果, 样品中的 Re 含量为 $69.02\times10^{-6}\sim233\times10^{-6}$, 平均值为 129.23×10^{-6} 。已有的研究资料表明, Re-Os 同位素体系不仅能够精确测定硫化物矿床的成矿时代, 同时还具有指示成矿物质来源以及判断成矿作用过程中物质的组成特征, 而 Re 的含量高低则与成矿物质的来源尤其是物质的来源深度紧密联系, 表现出从幔源、壳

表 5 马头铜钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os ICP-MS 同位素数据

Table 5 Molybdenite Re-Os ICP-MS isotopic date in Matou Cu-Mo polymetallic deposit

原样名	样品 质量/g	$w(\text{Re})/10^{-6}$		$w(\text{Os})/10^{-9}$		$w(^{187}\text{Re})/10^{-6}$		$w(^{187}\text{Os})/10^{-9}$		模式年龄/Ma	
		测定 值	不确 定度	测定 值	不确 定度	测定 值	不确 定度	测定 值	不确 定度	测定 值	不确 定度
MT-H1	0.01078	231.80	3.80	0.4739	0.1104	145.70	2.40	353.80	3.50	145.6	3.0
MT-H2	0.01065	178.20	3.80	0.0332	0.1860	112.00	2.40	274.50	3.80	146.9	3.9
MT-H3	0.01059	71.71	1.16	0.6366	0.2264	45.07	0.73	110.50	1.80	147.0	3.6
MT-H4	0.01052	139.40	1.90	0.3007	0.1525	87.61	1.17	213.20	1.70	145.9	2.6
MT-H5	0.01018	82.77	0.74	0.0742	0.1177	52.02	0.46	125.00	1.40	144.0	2.4
MT-H6	0.01068	111.50	1.10	0.5280	0.2663	70.10	0.67	171.50	2.50	146.7	2.8
MT-H7	0.01024	233.00	3.60	0.3116	0.1975	146.40	2.20	364.00	4.00	149.0	3.0
MT-H10	0.01078	96.09	0.88	0.0710	0.0491	60.39	0.55	146.90	1.60	145.9	2.4
MT-H11	0.01082	69.02	1.01	0.0221	0.1483	43.38	0.64	106.30	1.20	146.9	3.0
MT-H12	0.01043	98.36	1.36	0.0741	0.0769	61.82	0.86	153.50	1.80	148.9	3.0
MT-H13	0.01098	83.87	1.36	0.0219	0.1719	52.71	0.86	125.00	2.30	142.2	3.7
MT-H14	0.01125	188.90	3.70	0.6735	0.2420	118.70	2.30	288.30	4.00	145.6	3.7
MT-H15	0.01033	95.39	1.12	0.4176	0.0030	59.95	0.71	144.90	1.40	144.9	2.5

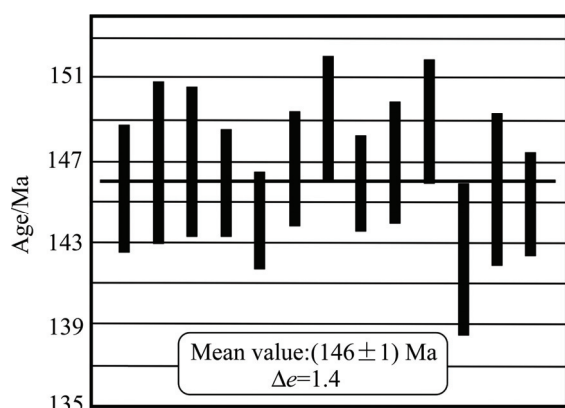


图4 辉钼矿 Re-Os 模式年龄加权平均值

Fig. 4 Molybdenite Re-Os weighted average model age

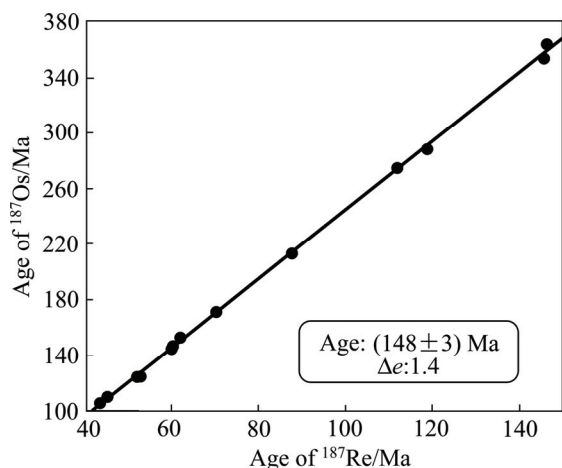


图5 辉钼矿 Re-Os 同位素等时线

Fig. 5 Isochron of molybdenite Re-Os isotopes

幔混合源到壳源其相应的 Re 含量呈数量级逐渐降低的特点。为此,根据本次辉钼矿中 Re 含量的测定情况,Re 的物质组成以幔源为主,表明成矿作用过程中地幔物质提供了大量的成矿物质且显著参与了成矿作用过程。

5 讨论

5.1 成岩成矿时代

本次测试研究结果表明,安徽池州马头铜钼多金属矿床花岗闪长(斑)岩锆石 U-Pb 年龄分别为 (145.6 ± 1.5) Ma、 (145.8 ± 1.5) Ma 和 (144.6 ± 1.6) Ma,钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (141.5 ± 1.4) Ma,这些岩石近乎同时产出,仅钾长花岗岩形成时代相对稍晚,因此,马头铜钼多金属矿床含矿岩体的形成年龄为 141~145 Ma,为晚侏罗-早白垩时代。13 件辉钼矿的

Re-Os 模式年龄自 (142.2 ± 3.7) Ma 至 (149 ± 3) Ma,加权平均年龄 (146 ± 1) Ma,与等时线年龄 (148 ± 3) Ma 在误差范围内一致,表明辉钼矿的沉淀年龄为 146~148 Ma,同样也为晚侏罗时代。一般而言,与岩体相关的内生金属矿床成矿时代往往会晚于含矿岩体的形成时代,马头矿区的基本地质事实也表明辉钼矿主要赋存于钾长花岗岩与花岗闪长岩接触带、花岗闪长岩内部及其外接触带等部位。然而,上述数据却显示成矿时代早于成岩时代,似乎存在一定的矛盾。张作伦等^[15]对内蒙古碾子沟钼矿床研究时也发现类似问题,其辉钼矿形成时代为 (154 ± 3.6) Ma,而赋矿岩体锆石 SHRIMP 年龄却为 (152.4 ± 1.6) Ma。此外,东沟钼矿床花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄为 (112 ± 1) Ma,而 Re-Os 模式年龄却为 (116.5 ± 1.7) ~ (115.5 ± 1.7) Ma^[16]。事实上,影响同位素定年结果的因素很多,如仪器误差、样品选择、同位素封闭温度、衰变常数准确度等,不同实验条件下获得的实验数据往往会存在一定的误差。本文作者在借助不同同位素体系分析成岩成矿事件时,要充分考虑到年龄误差产生的因素。总体上来看,马头铜钼多金属矿床成岩与成矿时代在误差范围内较一致,表明岩体和矿体为同一成岩、成矿系统演化的产物,均形成于燕山晚期。

5.2 成岩成矿构造背景

毛景文等^[17]对中国北方中生代成矿作用进行了系统研究,发现在华北克拉通北缘和大兴安岭南段出现三大期次成矿作用,分别为 200~160 Ma、140 Ma 左右和 120 Ma 左右,而华北克拉通南缘长江中下游成矿带和小秦岭-熊耳山成矿带则有后两次。长江中下游是中国东部环太平洋外带中一条向南突出的弧形陆内铁、铜、金多金属成矿带,是我国最重要的金属成矿带之一。主要由鄂东南、九瑞、安庆-贵池、铜陵、宁芜和宁镇等几个矿集区组成。其中,鄂东南、九瑞、安庆-贵池、铜陵等地为 Cu-Au-Mo-(Fe)矿集区,庐枞和宁芜主要变现为玢岩铁矿的矿集区。同位素测年证明这两套矿床体系分别形成于 140 Ma 和 120 Ma 左右。马头铜钼多金属矿大地构造上位于贵池多金属成矿带,其赋矿复式花岗岩体也在 140 Ma 左右形成,表明马头矿区无论成岩还是成矿作用均受到古太平洋构造域叠置转换前古特提斯构造域的区域构造变迁的综合制约^[18-22]。

5.3 矿化指示及成矿意义

已有研究表明,在岩浆-热液系统中,富含 K^+ 的溶液在各种微小裂隙,甚至粒间、矿物的解理、双晶

面等都具有很强的扩散能力和渗透能力,能与成矿元素组成各种易溶的配合物,促使它们活化转移或成矿。钾长石化的区间很广泛(100~500 °C或>500 °C),尤其是高温流体中钾能广泛交代各种岩石和矿物^[23]。在成矿热液交代蚀变过程中,往往以钾长石化为先导,因此,钾长石化带出现的时间较早,在空间上常分布在下部;而 Mo 属于酸性元素,在碱性介质中易于形成络合物,具有较强的搬运能力,实验显示成矿前 Mo 主要以钼酸根(H₂MoO₄或K₂MoO₄)的形式进行搬运^[24-26]。伴随着流体的运移,交代类型逐渐从碱交代向酸交代(或氢交代)过渡,此时开始出现大量的绢英岩化或黄铁绢英岩化,铜钼矿化即集中出现于钾长石化和绢英岩化阶段^[23]。伴随蚀变在空间上明显的分带,矿区内不同的矿体在空间上也有一定的分布规律。一般来说,蚀变与矿化密切相关,互相依存,蚀变强度控制了矿化强度,蚀变越强则矿化越强。

典型的斑岩型矿床其蚀变分带自内而外大致可划分为钾质蚀变带、绢英岩化(或黄铁绢英岩化带)、泥化带和青磐岩化带(或绿泥石化带)^[27],有时还可见次生石英岩化带。国内以西藏驱龙斑岩型铜矿^[28-29]、江西德兴斑岩型铜矿^[30]和豫西雷门沟^[31]、鱼池岭斑岩型钼矿^[32]等为其典型代表。近年来在长江中下游及其附近的秦岭—大别东段地区亦发现了大批有价值的斑岩型铜钼矿,例如,安徽庐枞沙溪斑岩型铜矿^[33]、安徽青阳百丈岩斑岩型钨钼矿^[34]和安徽沙坪沟特大型斑岩型钼矿床等^[35]。

马头矿区围岩及岩体的蚀变极为发育,蚀变类型主要包括硅化、绢云母化和钾长石化,其次有粘土化、绿泥石化和碳酸盐化等。根据其蚀变类型及其矿物组合,自岩体深部向浅部、自内向外可划分出面型石英钾长石化带、线型石英钾长石化带和石英绢云母化带3个蚀变带。然而,青磐岩化带在矿区内表现不明显,可能与该区围岩为粉砂—细砂岩,Ca、Fe、Mg等元素相对缺乏有关。泥化带虽不构成单独的蚀变带,但在矿区内也广泛出现,主要表现为粘土化叠加在早期的钾长石化和硅化、绢云母化带之上。总体而言,研究区显著发育的为钾长石化(钾硅酸盐化)带和硅化绢云母化带(绢英岩化带或黄铁绢英岩化带),与典型斑岩型矿床蚀变特征十分类似。

6 结论

1) 马头铜钼多金属矿区花岗闪长(斑)岩和钾长花岗岩锆石的 $m(\text{Th})/m(\text{U})$ 为 0.32~2.48,均值为 0.72,表

现出非常典型的岩浆岩锆石特征,锆石应为岩浆结晶作用过程而形成,其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄能够代表岩浆的侵位年龄以及岩体的结晶年龄。

2) 马头铜钼多金属矿区花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明,该区花岗闪长(斑)岩的形成时代较早,为 144.5~145.8 Ma;而钾长花岗岩体的侵位时代则相对稍晚,约为 141.5 Ma,但二者均为燕山晚期岩浆作用的产物,属于晚侏罗世—早白垩世。

3) 辉钼矿中 Re 含量为 $69.02 \times 10^{-6} \sim 233 \times 10^{-6}$,平均含量为 129.23×10^{-6} ,Re 的物质组成以幔源为主,表明马头铜钼多金属成矿作用过程中地幔提供了大量的成矿物质且显著参与了成岩与成矿作用过程,地幔对该区的成矿作用具有决定性贡献。

4) 通过对马头铜钼多金属矿中的辉钼矿 Re-Os 同位素测定,得出的等时线年龄为(148±3) Ma,略晚于成岩年龄,但在误差范围内与该区的成岩时代基本一致,均为晚侏罗世构造—岩浆热事件的产物;马头矿区成岩与成矿均受到古太平洋构造域叠置转换前古特提斯构造域的区域构造变迁的影响与制约。

REFERENCES

- [1] 宋国学,秦克章,李光明.长江中下游池州地区矽卡岩—斑岩型 W-Mo 矿床流体包裹体与 H、O、S 同位素研究[J].岩石学报,2010,26(9):2768-2782.
SONG Guo-xue, QIN Ke-zhang, LI Guang-ming. Study on the fluid inclusions and S-H-O isotopic compositions of skarn-porphyry-type W-Mo deposits in Chizhou area in the Middle-Lower Yangtze Valley[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(9): 2768-2782.
- [2] 赵超,谢兴楠,柳建新,顾连兴,胡建,肖娥.安徽省池州市马头斑岩型铜钼矿床特征、成因和找矿方向[J].中国有色金属学报,2013,23(12):3503-3517.
ZHAO Chao, XIE Xing-nan, LIU Jian-xin, GU Lian-xing, HU Jian, XIAO E. Characteristics, origin and future prospecting of porphyry copper-molybdenum deposit at Matou of Chizhou City, Anhui Province, China [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals. 2013, 23(12): 3503-3517.
- [3] 杨贵才,葛良胜,路英川,邹依林,邢俊兵,张峰,袁士松.安徽省池州地区马头钼矿辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J].矿物岩石,2014,34(1):30-35.
YANG Gui-cai, GE Liang-sheng, LU Ying-chuan, ZOU Yi-lin, XING Jun-bing, ZHANG Feng, YUAN Shi-song. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Matou Lindgrenite deposit from Chizhou area in the south of Anhui province and its geological implications [J]. Journal of Mineral Petrology, 2014, 34(1): 30-35.
- [4] 王伟华.安徽池州马头铜钼矿床特征及找矿思路[J].地质学

- 刊, 2011, 35(3): 311–316.
- WANG Wei-hua. On Matou Cu-Mo deposit properties and ore prospecting thoughts in Chizhou of Anhui [J]. *Journal of Geology*, 2011, 35(3): 311–316.
- [5] 肖娥, 马春, 顾连兴, 钟庆禄, 蒋南波, 黎彦博. 安徽池州马头铜钼矿地质特征及蚀变分带[J]. *地质学刊*, 2014, 38(2): 187–199.
- XIAO E, MA Chun, GU Lian-xing, ZHONG Qing-lu, JIANG Nan-bo, LI Yan-bo. On geological properties and alteration zoning of Matou Cu-Mo deposit in Chizhou in Anhui[J]. *Journal of Geology*, 2014, 38(2): 187–199.
- [6] 薛卫冲. 安徽池州马头铜钼矿控矿因素及矿床成因[J]. *地质学刊*, 2013, 37(2): 292–300.
- XUE Wei-chong. Discussions on genesis and ore control factors of Matou copper-molybdenum mine in Chizhou of Anhui [J]. *Journal of Geology*, 2013, 37(2): 292–300.
- [7] 刘园园, 马昌前, 吕昭英, 黄卫平. 长江中下游贵池矿集区燕山期岩浆作用及其地质意义: 年代学、地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素证据[J]. *岩石学报*, 2012, 28(10): 3287–3305.
- LIU Yuan-yuan, MA Chang-qian, LÜ Zhao-ying, HUANG Wei-ping. Zircon U-Pb age, element and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of Late Mesozoic magmatism from the Guichi metallogenic district in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(10): 3287–3305.
- [8] 谢兴楠, 马春, 柳建新, 胡建, 肖娥. 安徽马头铜钼多金属矿区复式花岗岩体成因及与成矿的关系[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(9): 2584–2591.
- XIE Xing-nan, MA Chun, LIU Jian-xin, HU Jian, XIAO E. Petrogenesis of compound granites and its relationships with mineralization in Matou CuMo polymetallic orefield, Anhui Province, China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(9): 2584–2591.
- [9] ZHU Zhi-yong, JIANG Shao-yong, HU Jian, GU Lian-xing, LI Jian-wei. Geochronology, geochemistry, and mineralization of the granodiorite porphyry hosting the Matou Cu-Mo ($\pm$ W) deposit, Lower Yangtze River metallogenic belt, eastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79: 623–640.
- [10] JACKSON S E, PEARSON N J, GRIFFIN W L, BELOVSOVA E. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2004, 211(1/2): 47–69.
- [11] ANDERSEN T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1/2): 59–79.
- [12] LUDWIG K R. Isoplot/Ex(rev.)2.49: A geochronological toolkit for microsoft excel[J]. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 2001, 1: 1–58.
- [13] SHIREY S B, WALKER R J. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 1995, 67(13): 2136–2141.
- [14] HOSKIN P W O, BLACK L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18(4): 423–439.
- [15] 张作伦, 刘建明, 曾庆栋. 内蒙古碾子沟钼矿床 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、硫同位素组成及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2011, 30(6): 1122–1128.
- ZHANG Zuo-lun, LIU Jian-ming, ZENG Qing-dong. SHRIMP zircon U-Pb dating and sulfur isotope compositions of Nianzigou molybdenum deposit in Inner Mongolia and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 2011, 30(6): 1122–1128.
- [16] 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 郭保健, 张长青, 刘珺, 闫全人, 刘国印. 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*, 2006, 80(7): 1078–1088.
- YE Hui-shou, MAO Jing-wen, LI Yong-feng, GUO Bao-jian, ZHANG Chang-qing, LIU Jun, YAN Quan-ren, LIU Guo-yin. 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*, 2006, 80(7): 1078–1088.
- [17] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 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*, 2005, 21(1): 169–188.
- MAO Jing-wen, XIE Gui-qing, ZHANG Zuo-heng, LI Xiao-feng, WANG Yi-tian, ZHANG Chang-qing, LI Yong-feng. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(1): 169–188.
- [18] 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚, 刘凤仁. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- REN Ji-shun, CHEN Ting-yu, NIU Bao-gui, LIU Zhi-gang, LIU Feng-ren. Tectonic evolution of the continental lithosphere and metallogeny in eastern China and Adjacent Areas[M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [19] 张国伟, 张本仁, 袁学诚. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- ZHANG Guo-wei, ZHANG Ben-ren, YUAN Xue-cheng. Qinling orogenic belt and continental dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [20] 李永峰, 毛景文, 白凤军, 李俊平, 和志军. 东秦岭南泥湖钼(钨)矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *地质论评*, 2003, 49(6): 652–659.
- LI Yong-feng, MAO Jing-wen, BAI Feng-jun, LI Jun-ping, HE Zhi-jun. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Nannihu molybdenum (tungsten) orefield in the eastern Qinling and its geological significance[J]. *Geological Review*, 2003, 49(6): 652–659.
- [21] 李厚民, 陈毓川, 叶会寿, 王登红, 郭保健, 李永峰. 东秦岭—大别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, WANG Deng-hong, GUO Bao-jian, LI Yong-feng. Mo, (W), Au, Ag, Pb, Zn minerogenetic series related to Mesozoic magmatic activities in east Qinling-Dabie mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(11): 1468–1477.
- [22] 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 华北大边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题[J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 2695–2726.
- CHEN Yan-jing, ZHAI Ming-guo, JIANG Shao-yong. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(11): 2695–2726.
- [23] 胡受奚, 叶 瑛, 方长泉. 交代蚀变岩石学及其找矿意义[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- HU Shou-xi, YE Ying, FANG Chang-quan. Petrology of the Metasomatically altered rocks and its significance in prospecting[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [24] 简 伟, 柳 维, 石黎红. 斑岩型钼矿床研究进展[J]. 矿床地质, 2010, 29(2): 308–316.
- JIAN Wei, LIU Wei, SHI Li-hong. Advances in study of porphyry molybdenum deposits[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(2): 308–316.
- [25] FARGES F, SIEWERT R, PONADER C W, BROWN G E, PICHAVANT M, BEHRENS H. Structural environments around molybdenum in silicate glasses and melts. II. Effect of temperature, pressure, H₂O, halogens and sulfur[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2006, 44(3): 755–773.
- [26] ULRICH T, MAVROGENES J. An experimental study of the solubility of molybdenum in H₂O and KCl–H₂O solutions from 500 °C to 800 °C, and 150 to 300 MPa[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(9): 2316–2330.
- [27] LOWELL J D, GUILBERT J M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits[J]. *Economic Geology*, 1970, 65(4): 373–408.
- [28] 杨志明, 侯增谦, 宋玉财, 李振清, 夏代洋, 潘凤雏. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床: 地质、蚀变与成矿[J]. 矿床地质, 2008, 27(3): 279–318.
- YANG Zhi-ming, HOU Zeng-qian, SONG Yu-cai, LI Zhen-qing, XIA Dai-xiang, PAN Feng-chu. Qulong superlarge porphyry Cu deposit in Tibet: Geology, alteration and mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 2008, 27(3): 279–318.
- [29] 侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 曲晓明. 初论大陆环境斑岩铜矿[J]. 现代地质, 2007, 21(2): 332–351.
- HOU Zeng-qian, PAN Xiao-fei, YANG Zhi-ming, QU Xiao-ming. Porphyry Cu–(Mo–Au) deposits no related to oceanic-slab subduction: Examples from Chinese porphyry deposits in continental settings[J]. *Geoscience*, 2007, 21(2): 332–351.
- [30] 潘小菲, 宋玉财, 李振清, 胡保根, 朱小云, 王增科, 杨 丹, 张天福, 李 岩. 德兴铜厂斑岩铜(钼金)矿床蚀变–矿化系统流体演化: H–O 同位素制约[J]. 矿床地质, 2012, 31(4): 850–860.
- PAN Xiao-Fei, SONG Yu-Cai, LI Zhen-Qing, HU Bao-Gen, ZHU Xiao-Yun, WANG Zeng-Ke, YANG Dan, ZHANG Tian-Fu, LI Yan. Restriction of H–O isotopes for alteration and mineralization system of Tongchang Cu (–Mo–Au) porphyritic deposit, Jiangxi Province[J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(4): 850–860.
- [31] 陈小丹, 叶会寿, 向君峰, 毛 冰, 褚松涛. 豫西雷门沟斑岩钼矿床围岩蚀变特征及其意义[J]. 矿床地质, 2010, 29(S1): 173–174.
- CHEN Xiao-dan, YE Hui-shou, XIANG Jun-feng, MAO Bing, ZHE Song-tao. Characteristics and significance of rock alteration of Leimengou porphyry Mo deposit in western Henan Province[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(S1): 173–174.
- [32] 周 珂, 叶会寿, 毛景文, 屈文俊, 周树峰, 孟 芳, 高亚龙. 豫西鱼池岭斑岩型钼矿床地质特征及其辉钼矿铼–钨同位素年龄[J]. 矿床地质, 2009, 28(2): 170–184.
- ZHOU Ke, YE Hui-shou, MAO Jing-wen, QU Wen-jun, ZHOU Shu-feng, MENG Fang, GAO Ya-long. Geological characteristics and molybdenite Re–Os isotopic dating of Yuchiling porphyry Mo deposit in western Henan Province[J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(2): 170–184.
- [33] 袁 峰, 周涛发, 王世伟, 范 裕, 汤 诚, 张千明, 俞沧海, 石 诚. 安徽庐枞沙溪斑岩铜矿蚀变及矿化特征研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(10): 3099–3112.
- YUAN Feng, ZHOU Tao-fa, WANG Shi-wei, FAN Yu, TANG Cheng, ZHANG Qian-ming, YU Cang-hai, SHI Cheng. Characteristics of alteration and mineralization of the Shaxi porphyry copper deposit, Luzong area, Anhui Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(10): 3099–3112.
- [34] 王克友. 青阳县百丈岩钨钼矿床中斑岩型(浸染型)钼矿体的发现及其找矿意义[J]. 安徽地质, 2008, 18(3): 185–188.
- WANG Ke-you. Discovery of molybdenum orebody of porphyry type (disseminated) in tungsten-molybdenum ore deposit, Baizhangyan, Qingyang county and the implications in ore prospecting[J]. *Geology of Anhui*, 2008, 18(3): 185–188.
- [35] 张怀东, 王波华, 郝越进, 程 松, 项 斌. 安徽沙坪沟斑岩型钼矿床地质特征及综合找矿信息[J]. 矿床地质, 2012, 31(1): 41–51.
- ZHANG Huai-dong, WANG Bo-hua, HAO Yue-jin, CHENG Song, XIANG Bing. Geological characteristics and comprehensive ore-prospecting information of Shapinggou porphyry-type molybdenum deposit in Anhui Province[J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(1): 41–51.

(编辑 李艳红)