

玉龙铜矿带马拉松多斑岩体岩石学及成岩成矿系统年代学分析*

梁华英¹ 莫济海¹ 孙卫东¹ 张玉泉¹ 曾提¹ 胡光黔¹ Charlotte ALLEN²

LIANG HuaYing¹, MO JiHai¹, SUN WeiDong¹, ZHANG YuQuan¹, ZENG Ti¹, HU GuangQian¹ and Charlotte M ALLEN²

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 澳大利亚国立大学地球科学研究院, 堪培拉, ACT0200

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Research School of Earth Sciences, Australian National University, Canberra, ACT0200, Australia

2008-11-01 收稿, 2008-12-11 改回.

Liang HY, Mo JH, Sun WD, Zhang YQ, Zeng T, Hu GQ and ALLEN CM. 2009. Study on geochemical composition and isotope ages of the Malasongduo porphyry associated with Cu-Mo mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2):385–392

Abstract The Malasongduo porphyry Cu-Mo deposit is the second largest porphyry Cu-Mo deposit in the Yulong ore belt, eastern Tibet. Geochemical composition, zircon U-Pb, and mica K-Ar isotopic ages of the Malasongduo porphyry are reported here. The Malasongduo porphyry consists mainly of early stage quartz monzonite and K-feldspar porphyry and late stage K-feldspar porphyry. The early stage porphyry and late stage porphyry are different in composition. The first one is relatively rich in Al_2O_3 , MgO, CaO, Na_2O , $Fe_2O_3^T$, TiO_2 and the second one is relatively rich in K_2O and SiO_2 . The early stage porphyry yields zircon U-Pb age of 36.9 ± 0.4 Ma (MSWD = 1.52) and the late stage porphyry gives zircon U-Pb age of 36.9 ± 0.3 Ma (MSWD = 1.38). Mica K-Ar age of the late stage porphyry that was suffered from potassium alteration is 36.9 ± 0.6 Ma (MSWD = 1.36). The same zircon U-Pb age of both porphyries reveals that the porphyries of these two stages emplaced essentially at the same time. The concordance between zircon U-Pb age, mica K-Ar age and former Re-Os model age for the Malasongduo porphyry suggests that the Malasongduo porphyry ore-forming system cooled down from about 800°C (zircon crystallization temperature) through 500°C (Re-Os closure temperature of molybdenite) to below 300°C (Ar closure temperature of biotite) in a very short time. The lifespan of the Malasongduo ore-forming system is less than 1Ma. Based on the statistics of isotope ages of the main porphyries in the Yulong ore belt, it is also suggested that the duration of magmatic activities in the Yulong ore-belt is about 4.3Ma and the magmatic-ore-forming activities are less than four stages.

Key words Porphyry Cu-Mo deposit; Mineralization age; Duration of porphyry ore-forming system; Tibet

摘要 马拉松多斑岩铜钼矿床是玉龙斑岩铜钼矿带中第二大的大型斑岩铜钼矿床, 本文分析了岩体化学组成及用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法以及黑云母 K-Ar 法测定了成岩成矿体系同位素年代。赋矿岩体可分为早晚两期, 早期岩体主要由石英二长斑岩及碱长花岗岩斑岩组成, 晚期岩体主要由碱长花岗岩斑岩组成。早期岩体和晚期岩体在化学组成上有一定的差异, 早期岩体富 Al_2O_3 , MgO, CaO, Na_2O , $Fe_2O_3^T$, TiO_2 , 晚期岩体则相对富 SiO_2 及 K_2O ; 马拉松多早期岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 (36.9 ± 0.4 Ma, MSWD = 1.52) 与晚期岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 (36.9 ± 0.3 Ma, MSWD = 1.38) 相同, 也和黑云母 K-Ar 年龄 (36.9 ± 0.6 Ma) 及前人的铀钼矿 Re-Os 年龄一致。早期和晚期岩体是在现有同位素体系难以区别的相同的时间间隔内脉动侵入形成的, 马拉松多成岩成矿系统在很短时期内从高温 (800°C, 锆石 U-Pb 封闭温度) 冷却至中低温 (300°C 黑云母 Ar 同位素体系的封闭温度), 成岩成矿时间跨度小于 1Ma。玉龙矿带主要赋矿岩体锆石年龄表明, 玉龙斑岩铜钼矿带岩浆活动时间跨度 4.3Ma 内, 约发生过四次成岩成矿事件。

关键词 斑岩铜钼矿床; 成矿年龄; 斑岩成矿系统时间跨度; 西藏

中图法分类号 P618.41; P588.121; P597.3

* 中国科学院创新项目 (KZCX2-YW-Q04-2) 及国家自然科学基金项目 (40772054, 40472049) 资助。

第一作者简介: 梁华英, 男, 1962 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 矿床地球化学专业, E-mail: lianghy@gig.ac.cn

1 引言

西藏东部玉龙斑岩铜矿带是世界上重要的碰撞造山环境斑岩铜矿带,产有目前世界上该构造背景中最大的玉龙斑岩铜矿床,引起了人们的广泛关注并开展了大量的研究工作(Hou *et al.*, 2003, 2007; Jiang *et al.*, 2006, Liang *et al.*, 2005, 2006a, b, 2007, 2008; 芮宗瑶等,1984,2002;唐仁鲤和罗怀松,1995;马鸿文,1989, 1990;张玉泉等,1997, 1998;谢玉玲等,2005;姜耀辉等,2006a, b;郭利果等,2006;曾普胜等,2006;候增谦,2006;梁华英等,2008)。这些工作加深了对玉龙铜矿带成矿构造环境、岩浆源区及成矿过程等的认识。目前研究工作主要集中在玉龙斑岩铜矿床上,而对玉龙斑岩铜矿带南端马拉松多斑岩铜矿床则工作相对不多。马拉松多斑岩铜矿床位于玉龙斑岩铜矿带南部,是该带中第二大的大型斑岩铜矿床。对马拉松多含矿岩体形成时代曾作过锆石常规法 U-Pb 及 K-Ar 法定年,但所得的年龄差异很大,2 个样品 K-Ar 年龄分别为 35.8Ma 及 50.9Ma(唐仁鲤和罗怀松,1995),三个不同粒度锆石常规法 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年

龄分别为 $76.7 \pm 2.2\text{Ma}$, $64.4 \pm 1.7\text{Ma}$, 及 $45.3 \pm 20.7\text{Ma}$, 其构成 $t(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U})$ 及 $t(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})$ 等时线年龄分别为 40.9Ma 及 33.7Ma(马鸿文,1990)。Liang *et al.* (2006a) 等获得马拉松多含矿斑岩锆石 U-Pb 年龄为 $36.9 \pm 0.3\text{Ma}$ 。由于不同方法所得年龄差异很大,其地质意义不清。不同年龄既可能反映岩体是多期次侵入活动形成的,也可能是分析误差造成的。我们已对玉龙斑岩成岩成矿系统作了系统的定年,为了深入分析藏东玉龙斑岩铜矿带时空分布特征及成矿演化,很有必要对玉龙矿带南端最大的马拉松多斑岩体作精确的同位素定年及分析成岩成矿系统的时间跨度。为此,本文在分析不同期次岩体岩石化学特征的基础上,通过早期及晚期含矿岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄以及钾化形成母岩 K-Ar 年龄,结合前人 Re-Os 年龄资料,探讨了马拉松多含矿岩体成矿时代及成岩成矿系统的寿命。

2 含矿岩体地质及矿化特征

马拉松多含矿斑岩体位于玉龙斑岩铜矿带南端(图1),是玉龙斑岩铜矿带南端最大型的斑岩铜矿床,Cu 金属量

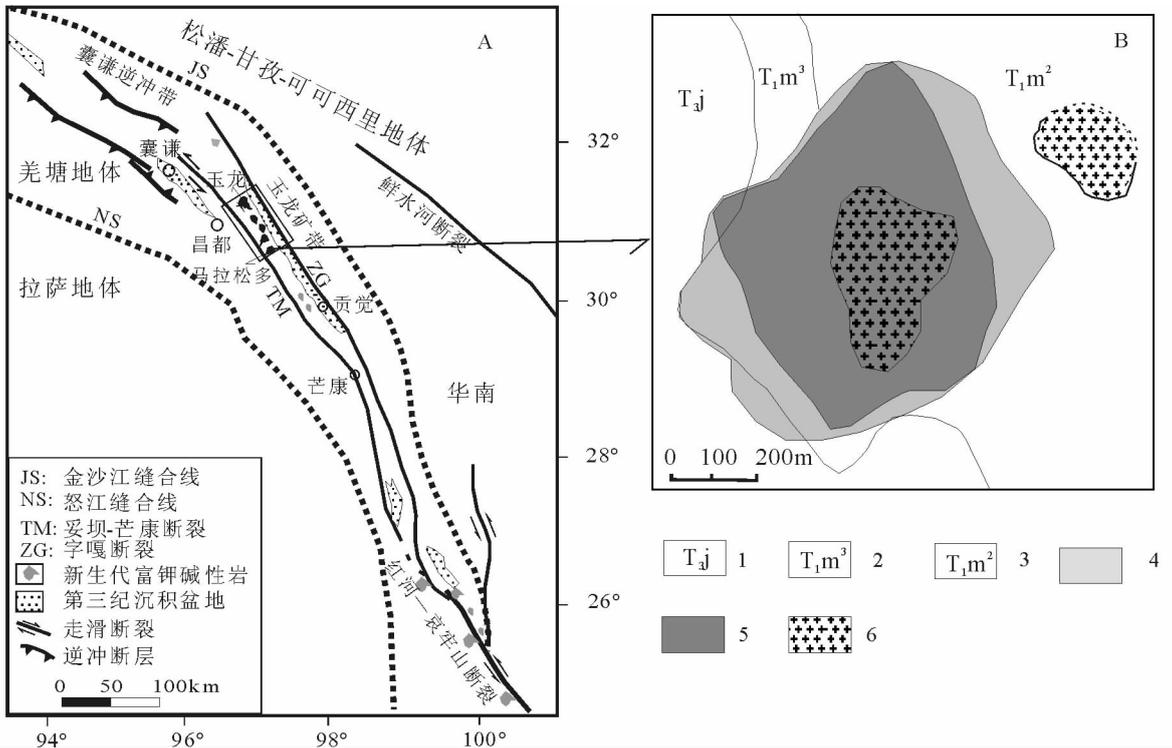


图1 玉龙斑岩铜矿带(A)及马拉松多斑岩体(B)地质简图(据 Yin and Harrison, 2000; Hou *et al.*, 2003;唐仁鲤和罗君烈, 1995 修改)

1-上三叠统泥岩、粉砂岩;2-下三叠统凝灰流纹岩;3-下三叠统流纹质凝灰岩;4-矿化带;5-矿体;6-斑岩

Fig. 1 Simplified geological map of the Yulong porphyry copper belt in the eastern Tibet, China (A) and the Malasongduo porphyry (B) (Modified after Yin and Harrison, 2000, Hou *et al.*, 2003, Tan and Luo, 1995)

1-Upper Triassic mudstone and siltstone; 2-Lower Triassic tuff rhyolite; 3-Lower Triassic rhyolitic tuff; 4-mineralized zone; 5-ore body; 6-porphyry

超过 1.0 Mt, Cu 含量在 0.36% ~ 0.6% 之间, 平均含量 0.44%, Mo 达大型规模, 平均含量为 0.014%, 此外还伴生 Au、Ag、PGE 等(唐仁鲤和罗怀松, 1995)。含矿岩体侵入上三叠统甲垓拉组泥岩、粉砂岩及下三叠统流纹岩和凝灰岩中, 出露面积约 0.1 km²。含矿岩体具多期次活动特征, 张玉泉等(1997)据野外考察及钻孔观察, 将该岩体分为早期碱长花岗斑岩及晚期碱性花岗斑岩。含矿斑岩斑晶主要是钾长石、斜长石、石英及云母, 斑晶矿物粒度主要在 0.3 ~ 2 mm 之间, 基质为显晶质, 基质矿物组成和斑晶的相似。马拉松多含矿岩体普遍发生蚀变, 蚀变类型主要有钾长石化、硅化、绢云母化及粘土化。

马拉松多矿化主要为细脉浸染状产于斑岩体内及斑岩体接触带围岩中(图 1), 矿化体面积约 0.51 km²。主要金属矿物为黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿等。按矿物成分特征不同, 可分为: 石英硫化物脉、黑云母硫化物脉、钾长石硫化物脉、碳酸盐硫化物脉、电气石石英阳起石硫化物脉(唐仁鲤和罗怀松, 1995)。

3 分析方法

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年样品选自岩芯, 早期碱长花岗斑岩(83-305)采自 ZK7 孔 345 m 处, 晚期碱长花岗斑岩(83-328)采自 ZK11 孔 356 m 处。样品经碎样、磁选及重液选等选出锆石, 经手选纯后装入环氧树脂靶中并打磨抛光至锆石内部结构充分暴露。用光学显微镜及扫描电镜阴极发光(CL)观察选出晶形较好, 没裂纹及包裹体不发育的锆石晶体点进行年龄测定。锆石 LA-ICP-MS 定年在澳大利亚国立大学地球科学研究所 ICP-MS 实验室完成, 分析流程见 Harris *et al.* (2004)。为了减少继承铅、铅丢失等对年龄的影响, 在 ²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U 图中和谐度低于 95% 的年龄数据及观测误差值/预期误差值大于 2 的分析数据点将被排除掉。岩体单颗粒锆石 U-Pb 年龄是统计年龄, 如果不同锆石颗粒的年龄变化较大, 表明其含有继承锆石或铅丢失锆石, 分析锆石颗粒较少加上分析过程中仪器偏差, 统计结果会产生较大的误差(梁华英等, 2008)。为了获得较精确的年龄值, 我们分析较多锆石颗粒, 用累积概率统计分析锆石年龄。正态分布数据在累积概率统计图上是一条斜率为正值的直线, 分布在直线沿伸方向上方较大年龄被解释为继承锆石年龄, 而分布在直线沿伸方向下方的年龄被解释为铅丢失锆石年龄。在累积概率统计图上呈线性分布的年龄代表锆石主群年龄。主群岩浆锆石年龄代表岩体锆石结晶年龄。

黑云母 K-Ar 年龄测定在中国科学院广州地球化学研究所完成, K 含量用原子吸收光谱法测定; 岩石化学成分在中国科学院广州地球化学研究所用湿法分析及在澳大利亚国立大学用 XRF 法分析(表 1 中带#号样品)完成的, 为了减少蚀变对岩石化学组成的影响, 尽量选择蚀变较弱的样品进行分析。

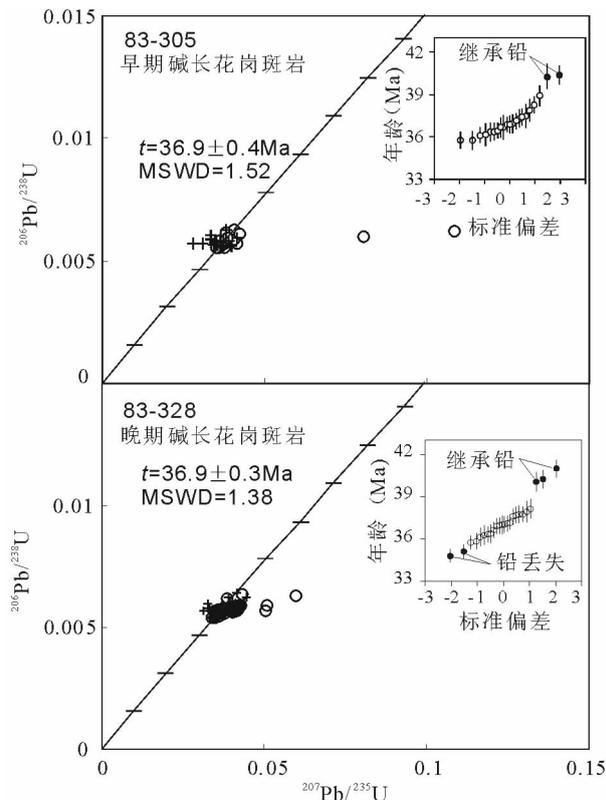


图 2 马拉松多斑岩铜钼矿床含矿岩体早期及晚期岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄

内插图为累积概率统计图, 圆圈为未校正普通铅, 十字为 ²⁰⁸Pb 校正普通铅

Fig. 2 Concordia plots showing the zircon U-Th-Pb analyses of the Malasongduo early stage porphyry and late stage porphyry

○: before ²⁰⁸Pb correction for common Pb; +: after ²⁰⁸Pb correction for common Pb. The insets are probability plots

4 分析结果

马拉松多含矿斑岩岩石化学组成见表 1, 从表 1 可见含矿岩体 SiO₂ 较高, 在 67% ~ 78% 之间, 富碱且 K₂O/Na₂O 比值大 1, TiO₂ 低。马拉松多含矿斑岩晚期碱长花岗斑岩云母 K-Ar 年龄见表 2, 云母 K-Ar 年龄为 36.9 ± 0.6 Ma。马拉松多早期及晚期岩体锆石 U-Pb 年龄见表 3、表 4 及图 2, 早期斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 36.9 ± 0.4 Ma, MSWD = 1.52, 晚期斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 36.9 ± 0.3 Ma, MSWD = 1.38。

5 讨论

5.1 岩石化学

张玉泉等(1997)提出马拉松多斑岩体早期和晚期都为

表1 马拉松多含矿斑岩化学组成 (wt%)

Table 1 Major composition of the Malasongduo ore-bearing porphyry (wt%)

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	SUM	注释
83-300	69.96	0.22	13.78	1.10	1.09	0.09	1.29	1.12	4.12	5.44	0.18	0.93	99.32	早期
83-301	67.42	0.22	15.33	1.01	1.17	0.10	1.30	1.54	4.78	5.44	0.26	0.98	99.55	
83-305	69.48	0.24	13.78	1.23	1.13	0.08	1.30	1.37	4.35	5.12	0.26	0.78	99.12	
83-304 [#]	70.38	0.30	13.26	2.49		0.06	0.98	1.30	3.44	5.10	0.17	1.59	99.07	
83-307	77.61	0.10	11.55	0.70	0.60	0.06	0.60	0.10	0.35	5.81	0.16	1.78	99.42	晚期
83-313	74.59	0.12	12.22	0.97	0.67	0.07	1.12	1.05	1.14	5.84	0.32	1.53	99.64	
83-331	74.13	0.12	12.67	1.36	0.53	0.07	0.97	0.33	0.62	5.53	0.18	2.95	99.64	
83-308 [#]	77.38	0.19	11.72	1.35		0.06	0.18	0.07	0.42	6.06	0.09	1.92	99.44	
83-328 [#]	73.96	0.25	13.20	1.59		0.01	0.61	0.65	1.66	5.42	0.12	1.90	99.37	

表2 马拉松多斑岩黑云母 K-Ar 同位素年龄表

Table 2 K-Ar isotope age of biotite from the Malasongduo ore-bearing porphyry

斑岩体	样品号	矿物	w (K)/ %	⁴⁰ Ar _{rad} / × 10 ⁻¹⁰ (mol · g ⁻¹)	⁴⁰ Ar _{rad} (%)	Age (Ma)
马拉松多	83-328	黑云母	7.93 ± 0.12	5.12	79.54	36.9 ± 0.6

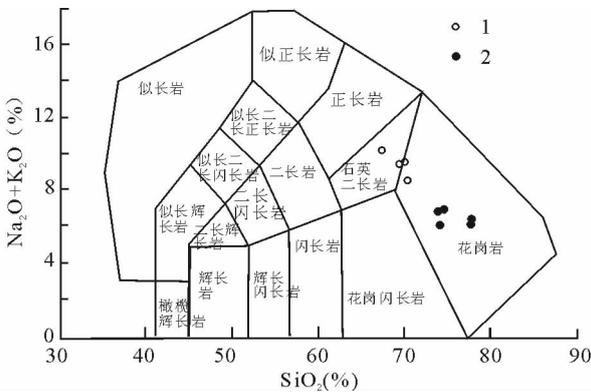


图3 马拉松多铜钼矿化斑岩 (Na₂O + K₂O) -SiO₂ 岩石分类图

1-早期斑岩; 2-晚期斑岩

Fig. 3 TAS classification of the Malasongduo porphyry in the eastern Tibet

1-early stage porphyry; 2-late stage porphyry

碱长花岗斑岩。但在侵入岩全碱-SiO₂ 分类图上 (图 3) (Middlemost, 1994), 马拉松多早期斑岩体主要落在石英二长岩与花岗岩分界线附近, 晚期斑岩落在花岗斑岩区。考虑到岩体中钾长石的含量以及早期岩体相对贫 SiO₂、富 Al₂O₃、MgO、CaO、Na₂O、Fe₂O₃^T、TiO₂, 晚期岩体则相对富 SiO₂ 及 K₂O (表 1), 因此, 马拉松多早期斑岩体应为石英二长斑岩及碱长花岗斑岩, 晚期岩体则主要为碱长花岗斑岩。在以 SiO₂ 含量为横坐标的 Harker 图解中, Al₂O₃、MgO、CaO、Na₂O、

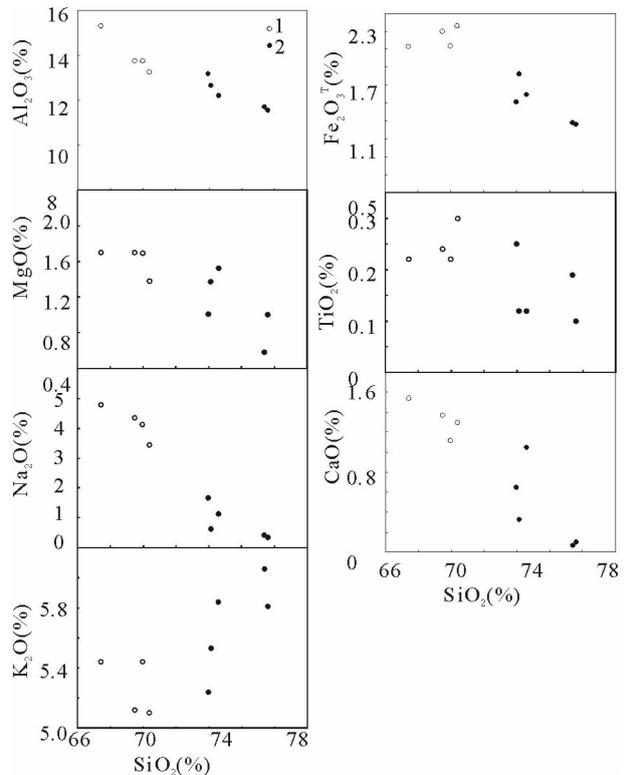


图4 马拉松多斑岩的 Harker 图解

图例同图 3

Fig. 4 Harker diagram for Malasongduo porphyry in the eastern Tibet

Symbols are the same as those in Fig. 3

Fe₂O₃^T、TiO₂ 与 SiO₂ 均呈良好的负相关关系 (图 4), 表现出角闪石、斜长石、钛铁矿等矿物的更多集中在早期。岩体 SiO₂ 和 K₂O 则有正相关关系, 表明 SiO₂ 和 K₂O 在岩体演化晚期相对富集。

5.2 岩体年龄及成岩成矿系统时间跨度

虽然马拉松多斑岩铜钼矿床是玉龙斑岩铜钼带第二大的大型矿床, 但过去对马拉松多成岩成矿系统同位素年代学工

表 3 马拉松多早期碱长花岗岩斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄表

Table 3 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data of the Malasangduo early stage K-feldspar porphyry

样号	U ($\times 10^{-6}$)	$\frac{U}{Th}$ (原子比)	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1 σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1 σ	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1 σ	$\frac{^{208}Pb}{^{232}U}$	1 σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ 年龄 (Ma)	1 σ	注释
305-01	471	0.5	0.00581	0.00011	0.03705	0.00175	0.04628	0.00200	0.00181	0.00006	37.5	0.9	
305-02	176	0.5	0.00554	0.00007	0.03757	0.00267	0.04914	0.00343	0.00177	0.00006	35.8	0.7	
305-03	252	1.1	0.00615	0.00009	0.03802	0.00224	0.04483	0.00255	0.00194	0.00005	40.3	0.9	
305-04	834	0.5	0.00579	0.00006	0.04014	0.00160	0.05032	0.00194	0.00188	0.00005	37.3	0.6	
305-05	115	1.0	0.00621	0.00010	0.10858	0.00515	0.12685	0.00562	0.00311	0.00008	36.7	0.8	
305-06	275	0.7	0.00570	0.00007	0.03678	0.00189	0.04681	0.00234	0.00186	0.00006	37.0	0.7	
305-07	392	1.2	0.00594	0.00009	0.05428	0.00279	0.06628	0.00326	0.00194	0.00004	38.3	0.8	删除
305-08	233	0.9	0.00627	0.00006	0.04085	0.00209	0.04727	0.00237	0.00206	0.00004	40.4	0.7	
305-09	223	0.8	0.00570	0.00006	0.04157	0.00187	0.05293	0.00231	0.00192	0.00004	36.4	0.7	
305-10	1096	1.0	0.00576	0.00005	0.03920	0.00167	0.04935	0.00206	0.00189	0.00003	37.1	0.6	
305-11	841	2.0	0.00569	0.00003	0.03652	0.00084	0.04652	0.00103	0.00184	0.00002	37.1	0.5	删除
305-12	1217	0.6	0.00573	0.00003	0.03790	0.00090	0.04797	0.00112	0.00189	0.00003	36.9	0.5	
305-13	313	0.9	0.00600	0.00006	0.03968	0.00160	0.04794	0.00188	0.00183	0.00003	39.1	0.6	删除
305-14	397	0.9	0.00590	0.00009	0.04062	0.00273	0.04992	0.00327	0.00200	0.00008	37.9	0.8	
305-15	193	1.7	0.00559	0.00005	0.03626	0.00181	0.04705	0.00230	0.00177	0.00002	36.4	0.6	
305-16	190	0.9	0.00610	0.00008	0.04233	0.00229	0.05032	0.00263	0.00207	0.00005	38.9	0.7	
305-17	315	1.1	0.00597	0.00009	0.08063	0.00455	0.09803	0.00532	0.00251	0.00009	36.2	0.8	
305-18	330	0.7	0.00566	0.00005	0.03699	0.00167	0.04739	0.00210	0.00184	0.00004	36.5	0.6	
305-19	389	0.9	0.00557	0.00004	0.03589	0.00114	0.04674	0.00144	0.00169	0.00003	36.1	0.6	
305-20	244	0.9	0.00571	0.00007	0.03634	0.00179	0.04616	0.00221	0.00188	0.00004	36.7	0.7	
305-21	252	0.9	0.00573	0.00005	0.03556	0.00155	0.04498	0.00192	0.00181	0.00003	36.9	0.6	
305-22	780	0.9	0.00553	0.00005	0.03514	0.00125	0.04606	0.00158	0.00173	0.00003	35.7	0.6	
305-23	591	0.6	0.00592	0.00005	0.03840	0.00112	0.04702	0.00132	0.00179	0.00003	38.2	0.6	
305-24	496	0.8	0.00616	0.00005	0.04194	0.00145	0.04942	0.00166	0.00186	0.00003	39.9	0.6	删除
305-25	837	0.6	0.00580	0.00005	0.03611	0.00124	0.04518	0.00150	0.00182	0.00003	37.4	0.6	

表 4 马拉松多晚期碱长花岗岩斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄表

Table 4 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data of the Malasangduo late stage K-feldspar porphyry

样号	U ($\times 10^{-6}$)	$\frac{U}{Th}$ (原子比)	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1 σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1 σ	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1 σ	$\frac{^{208}Pb}{^{232}U}$	1 σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ 年龄 (Ma)	1 σ	注释
328-01	600	0.5	0.00577	0.00004	0.03873	0.00157	0.04871	0.00194	0.00189	0.00004	37.0	0.6	
328-02	272	0.8	0.00582	0.00006	0.03930	0.00209	0.04894	0.00255	0.00183	0.00004	37.8	0.6	
328-03	639	0.9	0.00568	0.00005	0.03616	0.00155	0.04616	0.00195	0.00177	0.00003	36.9	0.6	
328-05	179	1.0	0.00573	0.00007	0.03869	0.00237	0.04894	0.00295	0.00185	0.00005	37.0	0.7	
328-06	1151	0.7	0.00592	0.00003	0.05086	0.00135	0.06226	0.00163	0.00215	0.00003	37.8	0.5	
328-09	361	1.1	0.00590	0.00005	0.03734	0.00179	0.04592	0.00216	0.00179	0.00003	38.7	0.7	删除
328-10	871	0.5	0.00583	0.00005	0.04026	0.00121	0.05004	0.00145	0.00192	0.00003	37.6	0.6	
328-12	811	0.8	0.00588	0.00004	0.03897	0.00110	0.04810	0.00132	0.00177	0.00002	38.3	0.6	删除
328-13	189	1.3	0.00561	0.00007	0.04029	0.00279	0.05206	0.00355	0.00183	0.00004	36.3	0.7	
328-15	1393	0.4	0.00541	0.00003	0.03488	0.00079	0.04680	0.00103	0.00176	0.00003	34.8	0.5	
328-16	351	1.2	0.00558	0.00005	0.04035	0.00197	0.05240	0.00252	0.00172	0.00003	36.6	0.6	删除
328-17	3652	0.5	0.00567	0.00003	0.05063	0.00116	0.06475	0.00144	0.00231	0.00003	35.8	0.5	
328-19	493	1.4	0.00544	0.00005	0.03583	0.00144	0.04772	0.00187	0.00174	0.00002	35.8	0.6	
328-22	547	0.7	0.00620	0.00005	0.03840	0.00136	0.04491	0.00154	0.00195	0.00003	40.2	0.6	
328-23	796	0.8	0.00632	0.00004	0.04318	0.00105	0.04952	0.00115	0.00205	0.00003	41.0	0.6	
328-24	788	1.0	0.00580	0.00004	0.03870	0.00122	0.04839	0.00149	0.00185	0.00002	37.7	0.6	
328-25	129	0.8	0.00609	0.00010	0.04931	0.00370	0.05872	0.00430	0.00184	0.00007	39.6	0.9	删除
328-29	633	0.8	0.00566	0.00005	0.04211	0.00160	0.05394	0.00200	0.00178	0.00003	36.9	0.6	删除
328-31	886	1.2	0.00554	0.00004	0.03615	0.00099	0.04730	0.00125	0.00171	0.00002	36.3	0.6	
328-32	443	0.8	0.00591	0.00005	0.04237	0.00168	0.05195	0.00202	0.00183	0.00003	38.5	0.6	删除
328-35	273	0.8	0.00628	0.00007	0.05970	0.00297	0.06899	0.00335	0.00228	0.00006	40.1	0.7	
328-36	232	1.2	0.00592	0.00007	0.04291	0.00248	0.05261	0.00297	0.00198	0.00004	38.1	0.7	
328-37	428	0.8	0.00575	0.00005	0.03686	0.00151	0.04649	0.00186	0.00192	0.00004	37.1	0.6	
328-40	595	0.8	0.00566	0.00004	0.03466	0.00133	0.04445	0.00168	0.00180	0.00003	36.6	0.6	
328-41	1655	0.9	0.00539	0.00003	0.03403	0.00073	0.04575	0.00095	0.00169	0.00002	35.1	0.5	
328-42	1109	0.8	0.00571	0.00004	0.03592	0.00098	0.04566	0.00121	0.00176	0.00002	37.2	0.5	
328-45	277	1.0	0.00567	0.00007	0.04157	0.00229	0.05314	0.00286	0.00194	0.00004	36.4	0.7	

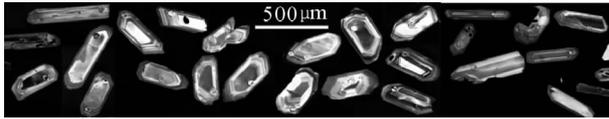


图5 马位松多含矿岩体锆石 CL 图

Fig. 5 CL photos of the analyzed zircon grains from the Malasongduo porphyry

作不多且差异较大,例如2个K-Ar法分别35.8Ma及50.9Ma(唐仁鲤和罗怀松,1995),锆石常规U-Pb年龄在33.7~76.7Ma之间(马鸿文,1990)。因此,本文对岩体作了精确的定年研究。马位松多含矿岩体锆石韵律环带发育(图5),显示岩浆锆石特征,加上测定锆石Th/U比值较大,在0.5~1.2之间,也显示岩浆锆石特征,因此,分析锆石为岩浆结晶作用过程中形成的锆石,锆石U-Pb年龄代表岩浆侵位年龄。我们的工作表明,马位松多含矿斑岩早期岩体锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄为 36.9 ± 0.4 Ma,MSWD=1.52,晚期斑岩锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄为 36.9 ± 0.3 Ma,MSWD=1.38。早期及晚期岩体锆石U-Pb年龄基本相同。锆石年龄代表岩体侵位年龄,这表明马位松多赋矿岩体是在 36.9 ± 0.4 Ma侵位形成的。

虽然早期岩体和晚期岩体在岩石化学特征上有一定的差异,但它们的同位素年龄却基本一致。这表明早期岩体及晚期岩体是含矿岩浆在较短时间间隔内2次脉动侵入形成的,由于其2次侵入时间间隔较短,现代同位素定年体系难以精确区分两期岩体的形成时代的差异。马位松多斑岩铜钼矿化含矿岩体黑云母K-Ar年龄 36.9 ± 0.6 Ma,和岩体锆石U-Pb年龄(36.9 ± 0.4 Ma)及辉钼矿Re-Os模式年龄(35.9 ± 1.0 Ma、 35.4 ± 1.3 Ma、 36.2 ± 1.1 Ma,唐仁鲤和罗怀松,1995; 35.8 ± 0.4 Ma,杜安道等,1994)在误差范围内基本一致。锆石U-Pb同位素体系封闭温度 800°C (Harris,1996)、Re-Os同位素体系封闭温度 $500 \pm 50^\circ\text{C}$ (Suzuki *et al.*,1996)、黑云母Ar-Ar同位素封闭温度 $300 \pm 50^\circ\text{C}$ (Harris,1996)。马位松多斑岩铜钼矿床成矿均一温度主要在 $300 \sim 500^\circ\text{C}$ 之间。黑云母Ar同位素体系封闭温度 $300 \pm 50^\circ\text{C}$,和主要成矿温度基本相同。因此,辉钼矿Re-Os体系及黑云母Kr-Ar年龄可反映成矿事件年龄。不同封闭温度同位素体系的年龄值基本相同表明马位松多斑岩铜钼含矿岩浆是从 800°C 快速冷却至 $500 \pm 50^\circ\text{C}$ 及至 $300 \pm 50^\circ\text{C}$ 的(图6);成矿系统具较快的冷却史,其时间跨度很短,小于1Ma。马位松多大型斑岩铜钼矿床成矿时间跨度和玉龙超大型斑岩铜矿床(梁华英等,2008)及智利Chuquicamata超大型斑岩铜矿床的基本相同(Ballard *et al.*,2001),也和Cathles *et al.*(1997)提出的浅成小岩体成矿系统时间跨度小于1Ma一致。

5.3 玉龙矿带岩浆活动期限

过去对玉龙斑岩铜矿带含矿岩体作了30多个同位素年

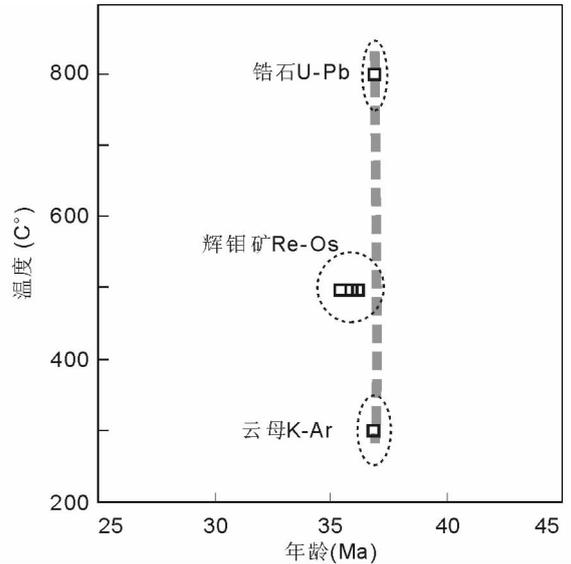


图6 马位松多斑岩体同位素年龄-封闭温度图,虚线为误差范围

Fig. 6 Diagram of isotope ages vs. their closure temperature for the Malasongduo porphyry

龄测定,所得的同位素年龄在26~58Ma之间(唐仁鲤和罗怀松,1995;马鸿文,1990)。由于一些岩体获得的同位素年龄相差超过10Ma,如玉龙岩体同位素年龄在37~58Ma之间,马位松多岩体同位素年龄在33~51Ma之间(唐仁鲤和罗怀松,1995),因而一些学者提出玉龙矿带岩体是多期次活动的形成的,岩浆活动时间跨度超过10Ma(马鸿文,1990)。最新同位素年龄结果表明,玉龙斑岩铜矿带北端玉龙超大型斑岩铜矿床成矿都发生在约~41Ma,成矿成矿时限小于1Ma(梁华英等,2008);玉龙斑岩铜矿带南端大型马位松多斑岩型铜钼矿床成矿主要发生在约~36.9Ma,成矿成矿系统的寿命也小于1Ma。玉龙超大型斑岩铜钼(金)矿床(Cu:6.2Mt)和马位松多大型斑岩铜钼矿床(Cu:1.0Mt)成矿成矿时间跨度在现有同位素定年技术内差异不大,因此,藏东玉龙斑岩铜带成矿成矿时间跨度和矿床规模没有明显的对应关系。

玉龙斑岩铜矿带从北西往南东主要由玉龙、扎那尔、莽总、多霞松多及马位松多等5个岩体组成,最新的锆石年龄结果表明,玉龙含矿斑岩体锆石U-Pb年龄 41.2 ± 0.2 Ma(梁华英等,2008)、扎那尔岩体锆石U-Pb年龄 38.5 ± 0.2 Ma、莽总岩体锆石U-Pb年龄 37.6 ± 0.2 Ma、多霞松多岩体锆石U-Pb年龄 37.5 ± 0.2 Ma(Liang *et al.*,2006a,b)、马位松多岩体锆石U-Pb年龄 36.9 ± 0.4 Ma。玉龙含矿岩体和扎那尔岩体锆石U-Pb年龄之差为 2.6 ± 0.2 Ma,扎那尔岩体和莽总岩体锆石U-Pb年龄之差为 0.9 ± 0.2 Ma,莽总岩体和多霞松多岩体锆石U-Pb年龄在误差范围内基本一致,多霞松多岩体和马位松多岩体锆石U-Pb年龄之差为 0.6 ± 0.3 Ma。因此玉龙斑岩铜矿带5个主要含矿岩体大约发生过4次成矿成矿

事件, 玉龙矿带岩浆活动期限为 4.3 ± 0.3 Ma。

玉龙矿带含矿岩体 LA-ICP-MS U-Pb 年龄由北西的玉龙往南东的马拉松多逐渐降低。印度板块与欧亚板块碰撞使藏东地区在中始新世至早中新世处于扭压构造背景 (Wang *et al.*, 2001; Liang *et al.*, 2007, 2008), 北西向断裂发生了巨型走滑活动, 如位于玉龙矿带南部的红河—哀牢山巨型断裂带左行走滑水平错距 700 ± 200 km (Leloup *et al.*, 1995)。红河—哀牢山巨型左行走滑断裂活动产生的局部俯冲与沿断裂带分布钾质碱性岩有内在成因联系 (Wang *et al.*, 2001), 玉龙斑岩铜矿带位于红河—哀牢山断裂北延断裂系统, 其西侧为妥坝—芒康断裂, 东侧为贡觉盆地及字嘎断裂 (图 1)。据含矿岩体年龄从北西往南东方向逐渐降低、藏东地区在岩浆侵位时处于挤压走滑构造活动环境、岩体微量元素及 Sr-Nd-Pb 同位素组成上具交代富集地幔特征 (张玉泉等, 1997, 1998; Hou *et al.*, 2003; Jiang *et al.*, 2006) 等, 初步认为玉龙矿带含矿岩体岩浆活动主要和区内妥坝—芒康左行走滑断裂活动产生的局部俯冲有关。

6 结论

通过上述分析, 我们可得出下述主要结论:

(1) 马拉松多岩体主要分为两期, 早期为石英二长斑岩及碱长花岗斑岩, 晚期为碱长花岗斑岩, 早期岩体和晚期岩体在岩石化学组成上有一定的差异, 早期岩体相对贫 SiO_2 富 Al_2O_3 , MgO, CaO, Na_2O , $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$, TiO_2 , 晚期岩体则相对富 SiO_2 及 K_2O 。

(2) 马拉松多早期岩体和晚期岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 36.9 ± 0.4 Ma 及 36.9 ± 0.3 Ma, 早期岩体和晚期岩体锆石年龄一致, 是岩浆房在较短时间内脉动侵入形成的。

(3) 马拉松多岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和辉钼矿 Re-Os 模式年龄及黑云母 K-Ar 年龄在误差范围内基本一致, 表明马拉松多成岩和成矿形成时代相近, 成岩成矿系统寿命小于 1 Ma。

(4) 藏东玉龙斑岩铜矿带成岩成矿时间跨度长短和矿床规模没有明显对应关系, 玉龙斑岩铜矿带岩浆活动期限小于 4.3 ± 0.3 Ma, 约发生过四次成岩成矿事件。

致谢 野外工作期间西藏地质矿产局第一地质大队给予大力协助, 澳大利亚国立大学地球科学研究院 ICP-MS 实验室在实验工作中给予大力支持, 两位评审专家对本文提出宝贵修改意见, 特此致谢!

References

Ballard JR, Palin JM, Williams IS, Campbell IH and Faunes A. 2001. Two ages of porphyry intrusion resolved for the super-giant

- Chuquicamata copper deposit of northern Chile by ELA-ICP-MS and SHRIMP. *Geology*, 29: 383–386
- Cathles LM, Erendi AHJ and Barrie T. 1997. How long can a hydrothermal system be sustained by a single intrusive event? A special issue on the timing and duration of hydrothermal events. *Economic Geology*, 92: 766–771
- Du AD, He GL, Yin NW, Zhou XQ, Sun YL, Sun DH, Chen SZ and Qu WJ. 1994. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenites. *Acta Geologica Sinica*, 66 (4): 339–347 (in Chinese with English abstract)
- Guo LG, Liu YP, Xu W, Zhang XC, Qin KZ, Li TS and Shi YR. 2006. Constraints to the mineralization age of the Yulong porphyry copper deposit from SHRIMP U-Pb zircon data in Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 1009–1016 (in Chinese with English abstract)
- Harris AC, Allen CM, Bryan SE, Campbell IH, Holcombe RJ and Palin JM. 2004. ELA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of regional volcanism hosting the Bajo de la Alumbrera Cu-Au deposit: Implications for porphyry-related mineralization. *Mineralium Deposita*, 39: 46–67
- Harris N. 1996. Radiogenic isotopes and the interpretation of granitic rocks. *Episodes*, 19: 107–113
- Hou ZQ, Ma HW, Khin Z, Zhang YQ, Wang MG, Wang Z and Pan GT. 2003. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Product of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet. *Economic Geology*, 98: 125–145
- Hou ZQ, Xie YL, Xu WY, Li YQ, Zhu XK, Khin Z, Beaudoin G, Rui ZY, Huang W and Huang W. 2007. Yulong deposit, eastern Tibet: A high-sulfidation Cu-Au porphyry copper deposit in the eastern Indo-Asian Collision Zone. *International Geology Review*, 49, 235–258
- Hou ZQ, Yang ZS, Xu WY, Mo XX, Ding L, Gao YF, Dong FL, Li GM, QU XM, Li GM, Zhao ZD, Jiang SH, Meng XJ, Li ZQ, Qin KZ and Yang ZM. 2006. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: I. Mineralization in main collisional orogenic setting. *Mineral Deposits*, 25 (4): 337–358 (in Chinese with English abstract)
- Jiang YH, Jiang SY, Ling HF and Dai BZ. 2006. Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogranite-porphyry, east Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 241: 617–633
- Jiang YH, Jiang SY, Ling HF and Dai BZ. 2006a. Petrogenesis of Cu-bearing porphyry associated with continent-continent collisional setting: Evidence from the Yulong porphyry Cu ore-belt, east Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (3): 697–706 (in Chinese with English abstract)
- Jiang YH, Jiang SY, Dai BZ and Ling HF. 2006b. Comparison on elemental and isotopic geochemistry of ore-bearing and barren porphyries from the Yulong porphyry Cu deposit, eastern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2561–2566 (in Chinese with English abstract)
- Liang HY, Zhang YQ, Xie YW, Lin W, Campbell IH and Yu HX. 2005. Geochronological and geochemical study on the Yulong porphyry copper ore belt in eastern Tibet, China. *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*, Volumes 1 and 2, 1235–1237
- Liang HY, Campbell IH, Allen CM, Sun WD, Liu CQ, Yu HX, Xie YW and Zhang YQ. 2006a. zircon $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet. *Mineralium Deposita*, 41: 152–159
- Liang HY, Yu HX, Mo CH, Zhang YQ and Xie YW. 2006b. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age, $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ ratios and the geochemical features of the Machangqing complex associated the copper deposit. *Chinese Journal of Geochemistry*, 25(3): 223–229
- Liang HY, Campbell IH, Allen CM, Sun WD, Yu HX, Xie YW and Zhang YQ. 2007. The Age of the potassic alkaline igneous rocks along the Ailao Shan Red River shear zone: Implications for the onset age of left-lateral shearing. *The Journal of Geology*, 115: 231–242

- Liang HY, Campbell IH, Allen CM, Sun WD, Xie YW and Zhang YQ. 2008. The Age of the potassic alkaline igneous rocks along the Ailao Shan Red River shear zone: Implications for the onset age of left-lateral shearing: A Reply. *The Journal of Geology*, 116: 205 – 207
- Liang HY, Mo JH, Sun WD, Yu HX, Zhang YQ and Allen CM. 2008. Study on the duration of the ore-forming system of the Yulong giant porphyry copper deposit in eastern Tibet, China. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2352 – 2358 (in Chinese with English abstract)
- Leloup PH, Lacassin R, Tapponnier P, Scharer U, Zhong DL, Liu XH, Zhang LS, Ji SC and Trinh PT. 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China): Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251: 3 – 84
- Ma HW. 1989. Emplacement age of granitic magma in the Yulong porphyry copper belt, eastern Tibet. *Geochimica*, 3: 210 – 216 (in Chinese with English abstract)
- Ma HW. 1990. Petrology and Mineralization of Granites in the Yulong Porphyry Copper Belt, Tibet. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1 – 158 (in Chinese with English abstract)
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Sci. Rev.*, 37: 215 – 224
- Suzuki K, Shimizu H and Masuda A. 1996. Re-Os dating of molybdenites from ore deposits in Japan; Implication for the closure temperature of the Re-Os system for molybdenite and the cooling history of molybdenum ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 3151 – 3159
- Rui ZY, Huang CK, Qi GM, Xu J and Zhang HT. 1984. Porphyry Copper (Molybdenum) Deposits of China. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 333 (in Chinese with English abstract)
- Rui ZY, Li GM, Wang LS and Wang YT. 2002. Porphyry copper deposits in Tibet. *Tibet Geology*, 21(2): 3 – 12 (in Chinese with English abstract)
- Tang RL and Luo HS. 1995. The Geology of Yulong Porphyry Copper (molybdenum) Ore Belt, Xizang (Tibet). Beijing: Geological Publishing House, 1 – 320 (in Chinese with English abstract)
- Wang JH, Yin A, Harrison TM, Grove M, Zhang YQ and Xie GH. 2001. A tectonic model for Cenozoic tectonic activities in the eastern Indo-Asian collision zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 188: 123 – 133
- Xie YL, Hou ZQ, Xu JH, Yang ZM, Xu WY and He JP. 2005. Evolution of multi-stage ore-forming fluid and mineralization: Evidence from fluid inclusions in Yulong porphyry copper deposit, East Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1409 – 1415 (in Chinese with English abstract)
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.*, 28: 211 – 280
- Zeng PS, Hou ZQ, Gao YF and Du AD. 2006. The Himalayan Cu-Mo-Au mineralization in the eastern Indian-Asian Collision Zone: Constraints from Re-Os dating of molybdenite. *Geological Review*, 22(1): 72 – 84 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ, Xie YW, Liang HY, Qiu HN and Li XH. 1997. Study on the relation between the evolution of the Yulong ore-bearing porphyries and the related mineralization. *Tibet Geology*, 18: 73 – 86 (in Chinese)
- Zhang YQ, Xie YW, Liang HY, Qiu HN, Li XH and Chung SL. 1998. Petrogenesis series and the ore bearing porphyries of the Yulong copper ore belt in eastern Tibet. *Geochimica*, 27(3): 236 – 243

(in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 邹晓秋, 孙亚利, 孙德忠, 陈少珍, 屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钼同位素地质年龄测定方法研究. *地质学报*, 66(4): 339 – 347
- 侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 莫宣学, 丁林, 高永丰, 董方浏, 李光明, 曲晓明, 李光明, 赵志丹, 江思宏, 孟祥金, 李振清, 秦克章, 杨志明. 2006. 青藏高原碰撞造山带 I: 主碰撞造山成矿作用. *矿床地质*, 25(4): 337 – 358
- 郭利果, 刘玉平, 徐伟, 张兴春, 秦克章, 李铁胜, 石玉若. 2006. SHRIMP 锆石年代学对西藏玉龙斑岩铜矿成矿年龄的制约. *岩石学报*, 22: 1009 – 1016
- 姜耀辉, 蒋少涌, 凌洪飞, 戴宝章. 2006a. 陆-陆碰撞造山环境下含铜斑岩岩石成因: 以藏东玉龙斑岩铜矿带为例. *岩石学报*, 22: 697 – 706
- 姜耀辉, 蒋少涌, 戴宝章, 凌洪飞. 2006b. 玉龙斑岩铜矿含矿与非含矿斑岩元素和同位素地球化学对比研究. *岩石学报*, 22: 2561 – 2566
- 马鸿文. 1989. 论藏东玉龙斑岩铜矿带岩浆侵入时代. *地球化学*, 3: 210 – 216
- 马鸿文. 1990. 西藏玉龙斑岩铜矿带花岗岩类与成矿. 武汉: 中国地质大学出版社, 1 – 158
- 梁华英, 莫济海, 孙卫东, 喻亨祥, 张玉泉, Charlotte Allen. 2008. 藏东玉龙超大型斑岩铜矿床成矿成矿系统时间跨度分析. *岩石学报*, 24(10): 2352 – 2358
- 芮宗瑶, 黄崇朝, 齐国明. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床. 北京: 地质出版社, 1 – 300
- 芮宗瑶, 李光明, 王龙生, 王义天. 2002. 西藏斑岩铜矿床. *西藏地质*, 21: 3 – 12
- 唐仁鲤, 罗怀松. 1995. 西藏玉龙斑岩铜(钼)矿带地质. 北京: 地质出版社, 1 – 310
- 谢玉玲, 侯增谦, 徐九华, 杨志明, 徐文艺, 何建平. 2005. 藏东玉龙斑岩铜矿床多期流体演化与成矿的流体包裹体证据. *岩石学报*, 21: 1409 – 1415
- 曾普胜, 侯增谦, 高永峰, 杜安道. 2006. 印度-亚洲碰撞带东喜马拉雅期铜-钼-金矿床 Re-Os 年龄及成矿作用. *地质论评*, 52: 72 – 84
- 张玉泉, 谢应雯, 梁华英, 邱华宁, 李献华. 1997. 藏东玉龙铜矿带含矿斑岩演化与成矿关系. *西藏地质*, 18: 73 – 86
- 张玉泉, 谢应雯, 梁华英, 邱华宁, 李献华, 钟孙霖. 1998. 藏东玉龙铜矿带含矿斑岩及成矿系列. *地球化学*, 27: 236 – 243