

云南马厂箐岩体(似)斑状花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及地质意义

郭晓东^{1,2} 王治华² 王 梁^{2,3} 杨玉霞² 陈晓吾²

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 武警黄金地质研究所, 河北 廊坊 065000;

3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:应用 LA-ICP-MS 对马厂箐岩体中(似)斑状花岗岩的锆石进行了 U-Pb 定年和微量元素分析。在 CL 图像上, (似)斑状花岗岩中锆石均发育有典型的振荡环带, 锆石的稀土元素配分模式表现为亏损轻稀土, 富集重稀土, 具有强烈正 Ce 异常和中度负 Eu 异常, 且呈现出较高的 Th/U 比值等特征, 表明所测锆石均为典型的岩浆锆石。马厂箐岩体(似)斑状花岗岩锆石 U-Pb 加权平均年龄为 (33.78 ± 0.21) Ma (MSWD=0.71), 累计概率统计得到正长斑岩锆石 U-Th-Pb 年龄为 (35.6 ± 0.3) Ma、花岗斑岩锆石 U-Th-Pb 年龄为 (35.0 ± 0.2) Ma, 宝兴厂矿段铜钼矿辉钼矿 Re-Os 等时线年龄分别为 (35.8 ± 1.6) Ma 和 (33.9 ± 1.1) Ma, 乱洞山矿段接触交代型金矿白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 (35.25 ± 0.36) Ma, 人头箐—金厂箐矿段热液脉型金成矿白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 (35.35 ± 0.32) Ma, 反映斑岩型铜钼矿化、接触交代型金矿化和热液脉型金矿化为同一个构造—岩浆—热液成矿系统的产物, II 期(33~37Ma)正长斑岩+二长斑岩+花岗斑岩+(似)斑状花岗岩岩性组合是成矿的地质体, 为成矿提供了物质、流体和热动力条件, 这期斑岩—热液—成矿系统的持续时间约为 4Ma, 铜、钼、金的成矿主要发生在 II 期岩浆活动的早—中期。

关键词: (似)斑状花岗岩; LA-ICP-MS; 锆石 U-Pb 年龄; 马厂箐岩体; 云南

中图分类号: P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2011)03-0610-13

自 20 世纪 90 年代以来, 马厂箐铜钼金矿床作为滇西成矿带上一个典型的与喜马拉雅期富碱侵入岩有关的斑岩型矿床一直备受地质学家的关注^[1-19]。而有关成岩成矿年龄的研究, 在一定程度上推动了该区的矿产勘查和研究工作。从另一方面来看, 由于测试方法的局限性以及被测试矿物的自身不足, 所获得的年龄数据变化较大, 难以准确判断成岩成矿的时代, 又制约了研究和找矿工作的深入开展。

近年来, 不同学者针对马厂箐矿区不同的地质体选择不同的测年方法进行了系统的同位素年代学研究, 相继得到许多精确的同位素年龄数据, 而与成矿密切相关的(似)斑状花岗岩尚未有锆石 U-Pb 年龄的报道。本文是通过(似)斑状花岗岩锆石 LA-

ICP-MS U-Pb 定年, 结合前人精确的年代学数据, 为认识矿区岩浆活动与成矿作用之间的时空耦合关系提供新的可靠的年代学证据, 以期进一步厘定该区的岩浆活动与成矿作用之间的时间演化序列, 促进矿床成因的深入研究, 为进一步的地质找矿服务。

1 地质背景及岩石特征

马厂箐斑岩型铜钼金多金属矿床位于云南省祥云、弥渡、大理三市县的接壤部位。大地构造位置处于扬子板块西缘与金沙江—哀牢山深大断裂带东侧的交汇部位, NW 向金沙江—哀牢山断裂带与 NNE 向程海—宾川断裂带所夹锐角区^[7]。马厂箐矿化带(或岩带)总体呈 NE 向展布, 目前已发现几十条铜、

收稿日期: 2010-11-08; 改回日期: 2011-04-20

基金项目: 973 国家重点基础研究发展计划(2009CB421000)和武警黄金指挥部专项基金(HJ09-03)资助。

作者简介: 郭晓东, 男, 1969 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事金矿勘查和研究工作; E-mail: Xdguo191@sohu.com。

铜、金、铁、铅锌等矿化脉体,从 NE 向 SW 依次划分成金厂箐—人头箐、乱硐山、宝兴厂和双马槽 4 个矿段。著名的金厂箐金矿就位于金厂箐—人头箐矿段,而马厂箐铜铅矿床则位于宝兴厂矿段(图 1)。

矿区出露地层主要有下奥陶统向阳组长石石英砂岩、粉砂岩、碳泥质细砂岩夹条带状灰岩、泥质白

云岩透镜体,下泥盆统青山组灰岩,以及康廊组灰岩、白云质灰岩,局部被第四系覆盖。构造主要为控制马厂箐富碱侵入岩带和矿带空间展布的 NEE(或近 EW 向)断裂,以及岩浆侵入过程中形成的一套岩浆侵入接触构造体系,是主要的控矿构造。NNE 向响水断裂(F_1)、乱硐山断裂(F_3)和九顶山—梯子

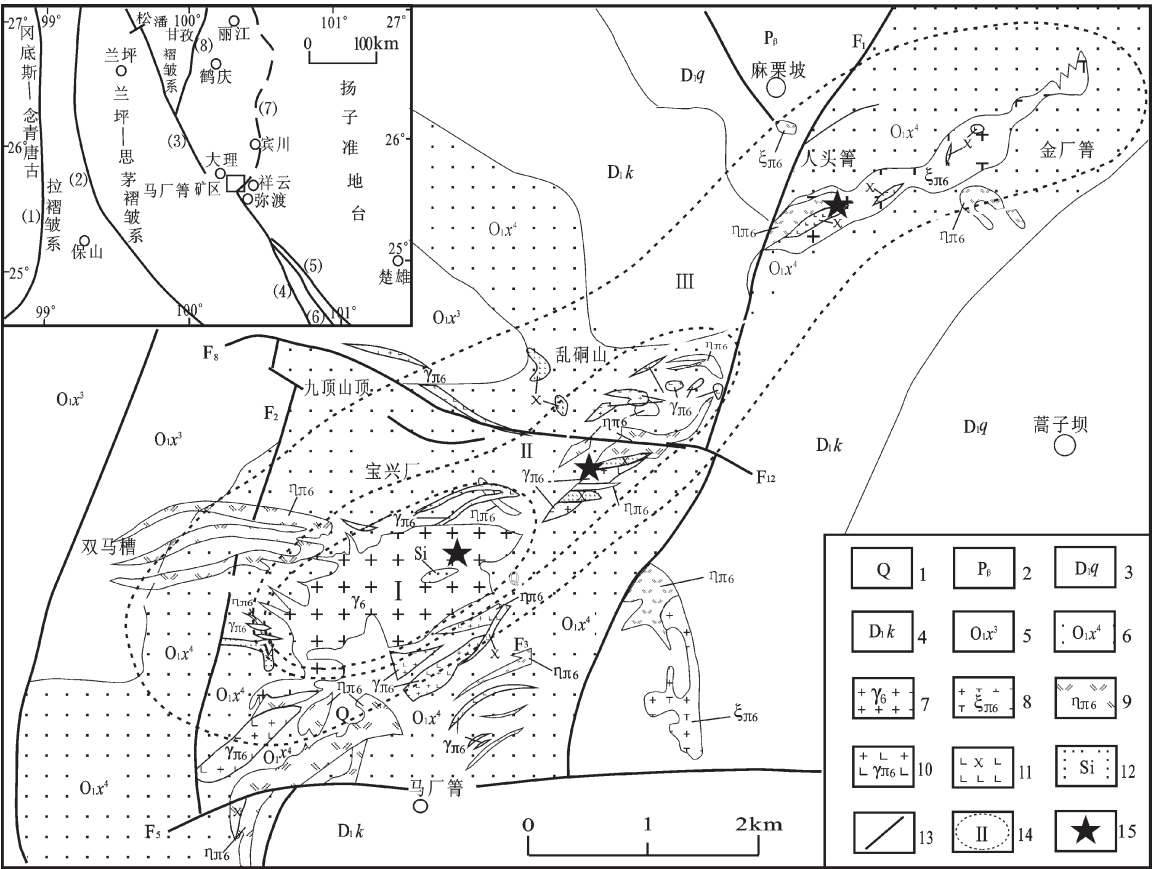


图 1 马厂箐矿区地质简图(据①修改)

1—第四系;2—二叠系玄武岩;3—下泥盆统青山组灰岩;4—下泥盆统康廊组白云质灰岩、白云岩;5—下奥陶统向阳组三段黑色页岩夹粉砂岩,底部为灰白色石英砂岩;6—下奥陶统向阳组四段长石石英砂岩、砾岩夹灰岩透镜体;7—斑状花岗岩;8—正长斑岩;9—二长斑岩;10—花岗斑岩;11—煌斑岩;12—硅化核;13—断层;14—矿化分带;15—同位素测年取样位置

I. Mo-W-Cu-Fe-Sn 矿化; II. Cu-Au-Mo-Fe 矿化; III. Au-Ag-P-bZn-As-Sb 矿化

(1)—怒江断裂;(2)—澜沧江断裂;(3)—金沙江—红河断裂;(4)—阿墨江断裂;(5)—哀牢山断裂;(6)—红河断裂;(7)—宾川—程海断裂;(8)—小金河断裂; F_1 —响水断裂; F_2 —乱硐山断裂; F_3 —九顶山—梯子水顶断裂

Fig.1 Geological sketch map of the Machangqin ore district(modified after①)

1-Quaternary; 2-Permian basalt; 3-Sandstone of lower Devonian Qingshan Formation; 4-Dolomitic limestone, dolomite of lower Devonian Kanglang Formation; 5-3rd Member of lower Ordovician Xiangyang Formation: black shale intercalated with siltstone, with grayish white quartz sandstone at the bottom; 6-4rd Member of Ordovician Xiangyang Formation: feldspar-quartz sandstone, conglomerate intercalated with limestone lenses; 7-Porphyritic granite; 8-syenite porphyry; 9-monzonite porphyry; 10-granite porphyry; 11-lamprophyre; 12-Silicate core; 13. Fault; 14. Zonation of mineralization; 15. Location of isotope-dating sample

I. Mo-W-Cu-Fe-Sn mineralization; II. Cu-Au-Mo-Fe mineralization; III. Au-Ag-PbZn-As-Sb mineralization

(1)-Nujiang fault; (2)- Lancangjiang fault; (3)-Jinshajiang fault; (4)-Amojiang fault; (5)-Ailaoshan fault; (6)-Honghe fault; (7)-Binchuan-chenghai fault; (8)-Xiaojinhe fault; F_1 -Xiangshui fault; F_2 -Luandongshan fault; F_3 -Jiudingshan-Tizishuiding fault

①西南冶金地质勘探公司 310 地质队.云南省祥云县马厂箐矿区铜铅矿评价地质报告,1981.

水顶断裂(F_2)的成矿后活动对该区影响较大,其左行走滑剪切作用将 NEE 或近 EW 向马厂箐岩(矿)带错移成金厂箐—人头箐、乱硐山、宝兴厂和双马槽 4 个矿段,显示出 NE 向展布的构造格局。区内侵入岩较为发育,主要为马厂箐复式杂岩体,由多种类型岩石组成,主要包括(似)斑状花岗岩、正长斑岩、二长斑岩、花岗斑岩和煌斑岩,以大面积出露的(似)斑状花岗岩为主。各类斑岩以岩株、岩脉、岩墙或岩床等产状侵位于下奥陶统向阳组地层中。属中酸性到酸性岩,以酸性岩为主,具有高钾富碱的特征^[2,7-9],属于高钾钙碱性或钾玄岩系列^[2,9,18],显示出 C 型钾质埃达克岩的地球化学亲和性^[9,18]。

马厂箐岩体属于滇西富碱侵入岩带的重要组成部分,岩浆侵入时代为喜马拉雅期^[3,7,8,10,12-16]。出露面积约 1.36 km²,平面上呈不规则似圆形,剖面上呈不对称的蘑菇状或倒水滴状。该岩体由 260 多个小岩体组成,具有多期次侵入特征。在野外地质调查和室内研究基础上,根据同位素年龄数据,结合前人研究成果,将马厂箐复式岩体岩浆活动划分为 3 期:Ⅰ期为(似)斑状花岗岩和煌斑岩脉(早期)组合(成矿前);Ⅱ期为正长(斑)岩脉、二长(斑)岩脉和花岗斑岩脉组合;Ⅲ期为碱长花岗斑岩脉和煌斑岩脉(晚期)组合^[9]。

马厂箐复式岩体的各类斑岩具有不同的岩石学和矿物学特征,呈现明显的变化规律。无论是正长斑岩、石英正长斑岩、二长斑岩、石英二长斑岩,还是斑状花岗岩、花岗斑岩、碱长花岗斑岩,主要矿物为斜长石、石英、角闪石、黑云母以及由钾化作用形成的钾长石,副矿物有磷灰石、榍石、锆石、磁铁矿。斑晶主要为钾长石、斜长石、石英、角闪石和黑云母,镜下统计显示斑晶组合(面积)占 20%~47%;基质具微晶结构,主要由微细粒长石、石英和少量的黑云母组成。块状构造,斑状结构。(似)斑状花岗岩在矿区大面积出露,呈岩株状产出,构成马厂箐复式杂岩体的主体,斑状结构,块状构造。基质具显微花岗、显微文象结构,粒度为 0.03~0.16 mm;斑晶大小 0.3~25 mm,约占 47%。主要矿物石英 23%、钾长石 35%、斜长石 27%、黑云母 4%、角闪石 3%;副矿物有磷灰石(0.3%)、榍石(0.7%)、锆石、磁铁矿,偶见磷钇石。钾长石:斑晶中钾长石有 2 个世代,岩浆结晶阶段为正长石及微斜长石,有溶蚀现象并含暗色矿物包体;自变质阶段为正长纹长石及微斜纹长石。斜长石:早期

为更长石,自变质及热液阶段为钠长石(常交代钾长石及暗色矿物)。斜长石有石英及暗色矿物包体。石英:斑晶多呈浑圆状,常有气液包体,边缘多被溶蚀。基质中长石、石英组成的文象石普遍存在。黑云母:呈淡黄—红褐色,属铁云母,含钛较高。部分变为水黑云母和白云母时,常有针状金红石析出。在黑云母中,见有磷灰石、锆石包体。普通角闪石:呈柱状,见有磷灰石、榍石、磁铁矿包体,个别与黑云母呈连晶产出。

(似)斑状花岗岩中发育深源暗色微粒包体,产状杂乱且分布不均,包体呈暗黑色、灰黑色,粒度较其寄主岩明显变细。大小不一,大者直径在 4~10 cm,小者 0.5~2 cm,大多数在 2~4 cm。形态多样,主要呈浑圆状、椭圆状、纺锤状、哑铃、次棱角状等,部分包体呈拉长状,显示出明显的塑性流变特点。包体与寄主岩石之间常呈截然的接触关系,边界一目了然,但二者的接触界面并不平直,而是呈圆弧形或港湾状。此外亦可见包体与寄主岩之间为过渡关系,呈弥散状,与主岩界线模糊。包体中常可见到与寄主岩(似)斑状花岗岩中相似的钾长石斑晶,大小在 0.5~1.5 cm,半自形,边部棱角多被蚀融圆化而呈浑圆状。在个别包体边部还可见到较大的钾长石斑晶骑跨在包体与寄主岩石的分界线间。此外,还可见到由颜色较浅的深灰色包体包裹颜色较深的暗黑色包体构成的双包体。包体与寄主岩反映出壳—幔岩浆混合来源的特点。

2 样品及分析方法

用于定年的样品采自马厂箐铜钼矿五中段,岩性为新鲜的(似)斑状花岗岩,地理坐标:东经 100°26'07",北纬 25°31'35"。具体采样位置见图 1。

用常规方法从(似)斑状花岗岩样品中分选出锆石,在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒,挑选工作由河北省区域地质矿产调查研究所承担。(似)斑状花岗岩锆石的制靶、光学显微镜照相、阴极发光图像分析(CL)及 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素年代学测试在西北大学大陆动力学重点实验室完成。所用 ICP-MS 为 ELAN 6100 DRC,剥蚀系统为德国 Microlas 公司生产 Geolas 200M 深紫外(DUV)193nm ArF 准分子激光。分析时光斑直径为 30 μ m,采用 ²⁹Si 作为外标,标准锆石为 91500,锆石 U-Th-Pb 年代学测试数据处理采

用 Glitter 软件进行。

3 分析结果

锆石粒径为 0.10~0.35 mm,多为长柱状和短柱状,自形程度较高,为自形到半自形。CL 图像上,锆石多有清楚的振荡环带,为典型的岩浆成因锆石特征(图 2)。部分锆石内部结构不均一,可见内核及外边,但其发育振荡环带的主体部分岩浆成因特征明显,振荡环带部分从内到外具有一致的表面年龄。锆石 U-Th-Pb 年龄测试结果见表 1。

在所获得的 25 个锆石年龄数据中,分析认为有 8 个锆石测试数据存在异议(分别为 3、10、11、13、14、16、21、22),其余 17 颗锆石的年龄较为一致。Tu/U 比值,绝大多数点都大于 0.4,最高达到 2.09,表明锆石为同期岩浆结晶形成。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ — $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上表现为较好的谐和性(图 4),年龄值较为集中,交点年龄为 $(33.93\pm 0.38)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.62$)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $(33.78\pm 0.21)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.71$, 概率为 0.79)(图 3)。样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄在误差范围内可信, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄能够代表(似)斑状花岗岩的成岩年龄。

计算年龄所用 17 颗年龄较为一致的锆石微区稀土微量元素测试结果见表 2。锆石稀土元素总量较高($\sum\text{REE}$)为 $339.72\times 10^{-6}\sim 1864.31\times 10^{-6}$,平均为 883.31×10^{-6} ;LREE 为 $29.28\times 10^{-6}\sim 335.84\times 10^{-6}$,平均为 75.60×10^{-6} ,HREE 为 $309.61\times 10^{-6}\sim 1528.47\times 10^{-6}$,平均为 807.71×10^{-6} ,LREE/HREE 为 0.03~0.22,平均为 0.09,(Ce/Yb)_N 为 0.01~0.13,平均为 0.04,轻稀土元素亏损,重稀土元素强烈富集; $\delta\text{Eu}=0.38\sim 0.51$,平均为 0.44, $\delta\text{Ce}=1.76\sim 281.82$,平均为 131.78,表现为中度的负铕异常,强烈的铈正异常。在稀土元素配分模式图上(图 5),表现为典型的锆石稀土分配模式,其稀土分配曲线型的整体形态一致,均表现为重稀土逐步富集的左倾曲线,分配曲线在 Ce 和 Eu 的位置分别呈现出明显的峰和谷。锆石稀土元素组成具有非常一致的变化趋势反映出这些锆石具有相同的成因来源,而锆石较高的稀土含量,强烈的正 Ce 异常和 HREE 富集明显区别于热液锆石和变质锆石^[20],进一步印证了其为岩浆锆石。

前人对锆石稀土元素进行深入研究后指出锆石的 Eu 负异常的形成可能有以下几种原因:①锆石形

成时有斜长石存在^[21];②继承寄主岩 Eu 异常特征^[22];③形成于较高的还原条件($\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$)的结果^[23]。锆石中的 Ce 的正异常是 Ce^{4+} 优先进入锆石晶格的结果,与锆石形成环境的氧化条件有关^[24]。似斑状花岗岩中锆石均具有强烈的正 Ce 异常,表明岩体形成于氧化环境,且在代表还原条件的 δEu 和代表氧化条件的 δCe 的协变图中(图 6-a),两者也未呈现出负相关关系,而是存在一定程度的正相关,因此, Eu 的负异常就不可能是由于形成于较还原的条件下的结果。整个马厂箐复式岩体均无明显的负 Eu 异常^[8],那么锆石的负 Eu 异常便不是继承寄主岩的结果。因此,(似)斑状花岗岩中锆石的负 Eu 异常可能表明锆石形成时有大量斜长石存在。

(似)斑状花岗岩中锆石的 Th 含量变化于 $306.24\times 10^{-6}\sim 3723.22\times 10^{-6}$,平均为 715.09×10^{-6} ,U 含量变化于 $557.04\times 10^{-6}\sim 2180.72\times 10^{-6}$,平均为 1079.05×10^{-6} 。研究显示,岩浆岩型锆石 Th、U 含量较高,Th/U 比值一般比较大(通常>0.4),而变质成因锆石的 U、Th 含量较低,Th/U 比值较低(一般<0.1)^[25]。似斑状花岗岩中锆石的 Th/U 变化范围较大,除了一个点为 0.22,其余变化于 0.41~1.71 之间,平均为 0.60,均大于 0.4,显示出与岩浆锆石相同的特点。在 U-Th, Th/U-Th 协变图上(图 6-b,c),表现出了随着 Th 含量增加 U 含量逐渐升高,且 Th/U 值也逐步攀升的良好的线性变化趋势,表明它们是同一岩浆系统中不同结晶阶段的产物。

P 变化于 $70.98\times 10^{-6}\sim 2378.91\times 10^{-6}$,平均为 241.62×10^{-6} 。一般幔源锆石的 P 含量为 $20\times 10^{-6}\sim 110\times 10^{-6}$,而花岗质岩石的 P 含量高达几百到几千 $\mu\text{g/g}$ ^[26]。似斑状花岗岩中锆石中 P 含量变化范围介于幔源锆石与壳源锆石之间,也能从侧面表明马厂箐岩体的可能为壳幔相互作用成因。野外可见岩体中发育有暗色微粒辉长-闪长质包体,便是岩体的壳幔岩浆混合成因更为直观的证据。

Nb 变化范围大,在 $2.43\times 10^{-6}\sim 23.97\times 10^{-6}$,平均为 6.48×10^{-6} 。Ta 变化于 $0.75\times 10^{-6}\sim 3.94\times 10^{-6}$,平均为 1.56×10^{-6} 。Nb/Ta 较低,变化于 $3.24\times 10^{-6}\sim 6.08\times 10^{-6}$,平均为 3.89×10^{-6} ,明显低于其寄主岩之值^[8],锆石中的低 Nb/Ta 值可能是由于 Ta 易进入锆石晶格^[24]。

Ti 变化于 $1.75\times 10^{-6}\sim 9.64\times 10^{-6}$,平均为 3.74×10^{-6} 。Watson et al^[27]利用锆石中 Ti 含量对温度具有敏感性,通过系统理论分析和实验,建立了锆石

表 1 马厂箐岩体(似)斑状花岗岩(BB108)单颗粒锆石 U-Th-Pb 同位素测试结果
Table 1 Results of U-Th-Pb isotopic dating for zircons from porphyritic granite (BB108) of Machangqing complex

测试点号	元素含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)							
					$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$			
	^{206}Pb	^{232}Th	^{238}U	比值	误差(1 σ)	比值	误差(1 σ)	比值	误差(1 σ)	比值	误差(1 σ)	年龄	误差(1 σ)	年龄	误差(1 σ)	年龄	误差(1 σ)	
BB108-1	36	1110	1627	0.68	0.0484	0.0016	0.0352	0.0010	0.0053	0.0006	0.0018	0.00003	35.1	0.97	33.9	0.38	36.6	0.53
BB108-2	33	325	1504	0.22	0.0484	0.0018	0.0349	0.0011	0.0052	0.0006	0.0017	0.00005	34.8	1.11	33.6	0.39	34.8	0.95
BB108-3	13	3050	612	0.5	0.0581	0.0036	0.0419	0.0024	0.0052	0.0009	0.0021	0.00007	41.7	2.37	33.6	0.55	43.0	1.41
BB108-4	21	509	888	0.57	0.0485	0.0027	0.0350	0.0018	0.0052	0.0008	0.0019	0.00005	34.9	1.77	33.6	0.49	37.6	0.98
BB108-5	20	396	906	0.44	0.0501	0.0024	0.0367	0.0016	0.0053	0.0007	0.0019	0.00005	36.6	1.60	34.2	0.46	38.0	0.99
BB108-6	18	350	849	0.41	0.0448	0.0027	0.0317	0.0018	0.0051	0.0007	0.0018	0.00005	31.7	1.79	33.0	0.46	37.2	1.09
BB108-7	20	419	913	0.46	0.0454	0.0021	0.0324	0.0014	0.0052	0.0007	0.0018	0.00004	32.4	1.35	33.3	0.43	36.9	0.87
BB108-8	12	306	557	0.55	0.049	0.0036	0.0353	0.0025	0.0052	0.0009	0.0019	0.00006	35.3	2.42	33.6	0.60	37.5	1.20
BB108-9	23	618	1056	0.59	0.0468	0.0019	0.0335	0.0012	0.0052	0.0006	0.0017	0.00004	33.5	1.21	33.4	0.42	34.6	0.71
BB108-10	21	457	975	0.47	0.0481	0.0026	0.0337	0.0017	0.0051	0.0006	0.0019	0.00005	33.7	1.62	32.7	0.47	38.3	1.05
BB108-11	14	280	669	0.42	0.0484	0.0024	0.0330	0.0015	0.0050	0.0007	0.0018	0.00005	33.0	1.45	31.8	0.43	36.7	0.98
BB108-12	35	904	1582	0.57	0.0495	0.0017	0.0354	0.0011	0.0052	0.0006	0.0018	0.00003	35.3	1.03	33.4	0.39	35.8	0.59
BB108-13	18	398	778	0.51	0.0531	0.0024	0.0398	0.0017	0.0054	0.0007	0.0020	0.00005	39.7	1.61	35.0	0.47	40.9	0.93
BB108-14	9	87	321	0.27	0.0940	0.0054	0.0678	0.0036	0.0052	0.0001	0.0044	0.00015	66.6	3.37	33.6	0.62	87.9	2.97
BB108-15	17	367	772	0.48	0.0468	0.0027	0.0344	0.0018	0.0053	0.0008	0.0018	0.00006	34.4	1.81	34.3	0.52	36.8	1.16
BB108-16	1295	3399	1623	2.09	0.0459	0.0033	0.0311	0.0021	0.0049	0.0008	0.0016	0.00003	31.1	2.08	31.5	0.48	31.7	0.60
BB108-17	16	509	743	0.68	0.0469	0.0022	0.0342	0.0015	0.0053	0.0007	0.0017	0.00004	34.1	1.44	34.0	0.45	35.2	0.73
BB108-18	49	3723	2181	1.71	0.0474	0.0015	0.0346	0.0009	0.0053	0.0006	0.0017	0.00002	34.5	0.89	34.0	0.39	34.9	0.37
BB108-19	22	498	949	0.52	0.0461	0.0021	0.0335	0.0014	0.0053	0.0007	0.0018	0.00004	33.5	1.33	33.9	0.44	35.2	0.78
BB108-20	25	683	1107	0.62	0.0462	0.0019	0.0339	0.0012	0.0053	0.0006	0.0018	0.00003	33.9	1.20	34.3	0.41	36.8	0.63
BB108-21	17	726	757	0.96	0.0483	0.0021	0.0369	0.0015	0.0055	0.0007	0.0018	0.00003	36.8	1.44	35.6	0.47	35.8	0.61
BB108-22	23	428	821	0.52	0.2025	0.0054	0.1886	0.0036	0.0068	0.0009	0.0082	0.00011	175.4	3.11	43.4	0.55	165.2	2.14
BB108-23	16	495	742	0.67	0.0465	0.002	0.0336	0.0013	0.0052	0.0007	0.0017	0.00003	33.5	1.26	33.7	0.43	34.8	0.66
BB108-24	23	440	1022	0.43	0.0484	0.0018	0.0353	0.0012	0.0053	0.0007	0.0018	0.00004	35.2	1.14	34.0	0.42	36.3	0.74
BB108-25	21	504	946	0.53	0.0503	0.0022	0.0367	0.0015	0.0053	0.0007	0.0020	0.00004	36.6	1.42	34.1	0.46	39.8	0.85

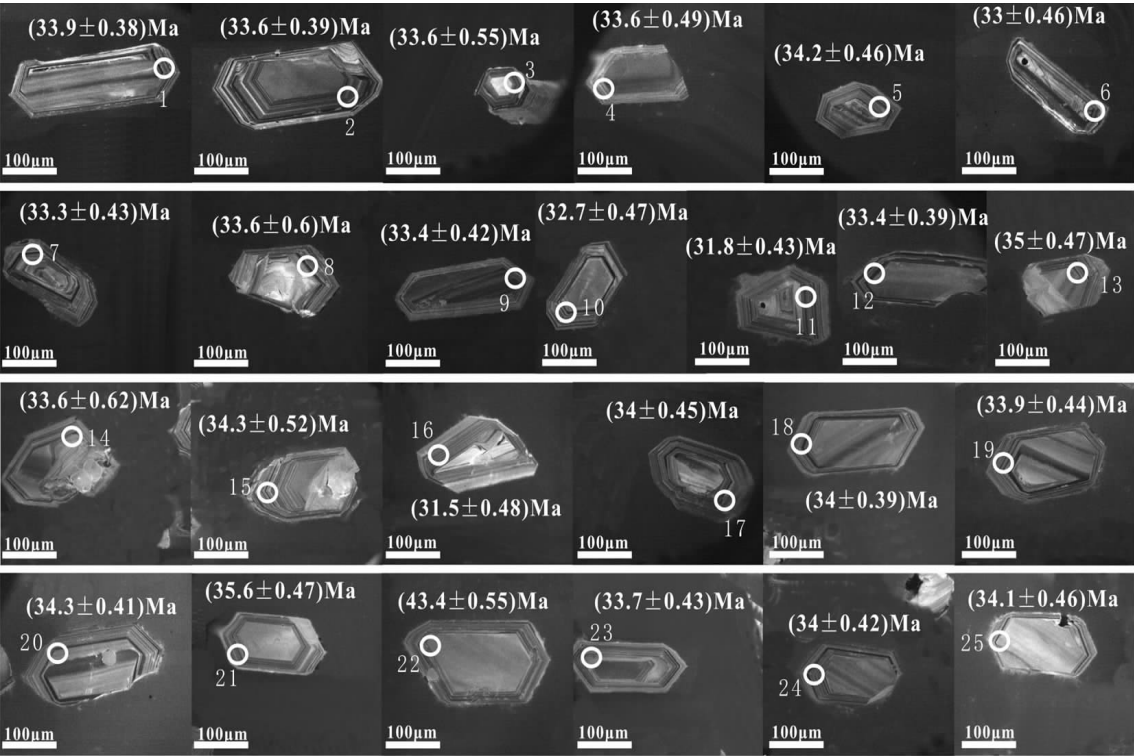


图 2 马厂箐岩体(似)斑状花岗岩中锆石测年阴极发光图像
圆圈表示分析位置,1-25 编号表示 U-Pb 分析点,并分别与表 1BB108(1-25)对应,其他数字表示 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄
Fig.2 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from granites of Machangqing complex
No. 1-25 circles show analyzed spots, the other nurericals mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age

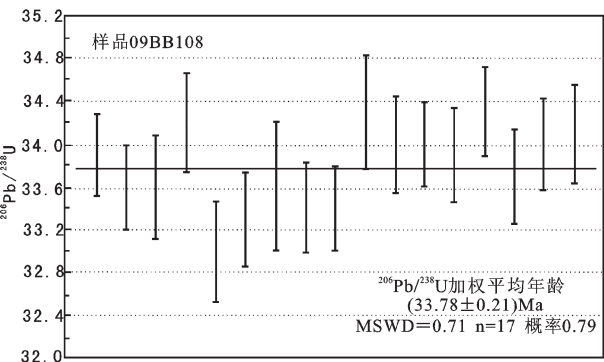


图 3 马厂箐岩体斑状花岗岩中锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图
Fig.3 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average ages of zircons from porphyritic granite of Machangqing complex

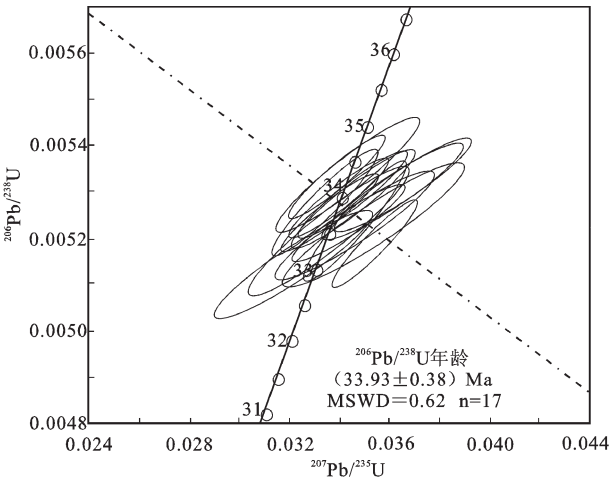


图 4 马厂箐岩体斑状花岗岩中锆石 U-Pb 谐和图
Fig.4 Zircon U-Pb concordant diagram of porphyritic granite from Machangqing complex

Ti 地质温度计 $t\ (^{\circ}\text{C}) = [(5080 \pm 30) / (6.01 \pm 0.03) - \log(\text{Ti})] - 273.15$ 。利用这个温度计计算出锆石的形成温度为 $608\sim 738^{\circ}\text{C}$, 平均为 654°C 。振荡环带的宽度可能与锆石结晶时岩浆的温度有关, 高温条件下微量元素扩散快, 常常形成较宽的结晶环带, 低温条件下微量元素的扩散速度慢, 一般形成较窄的岩浆环带^[25]。由于(似)斑状花岗岩中锆石形成于中高温,

故其具有较宽的震荡环带。

4 讨论

锆石阴极发光图像具有典型的岩浆振荡环带,

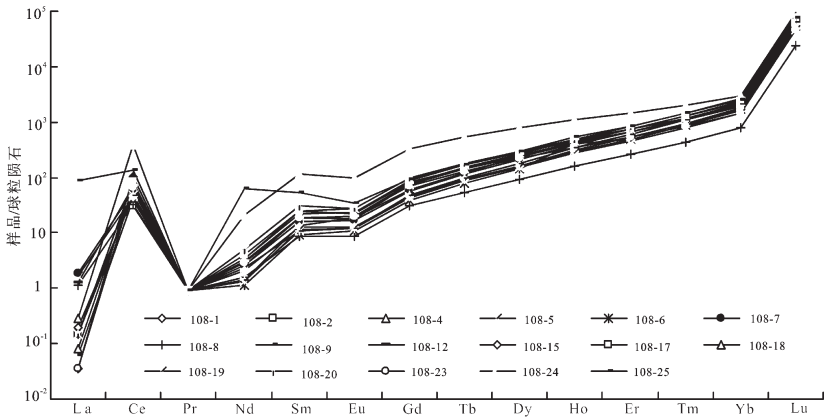


图 5 马厂箐岩体(似)斑状花岗岩锆石稀土元素球粒陨石标准化配分模式图
Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns of zircons from porphyritic granite of Machangqing complex

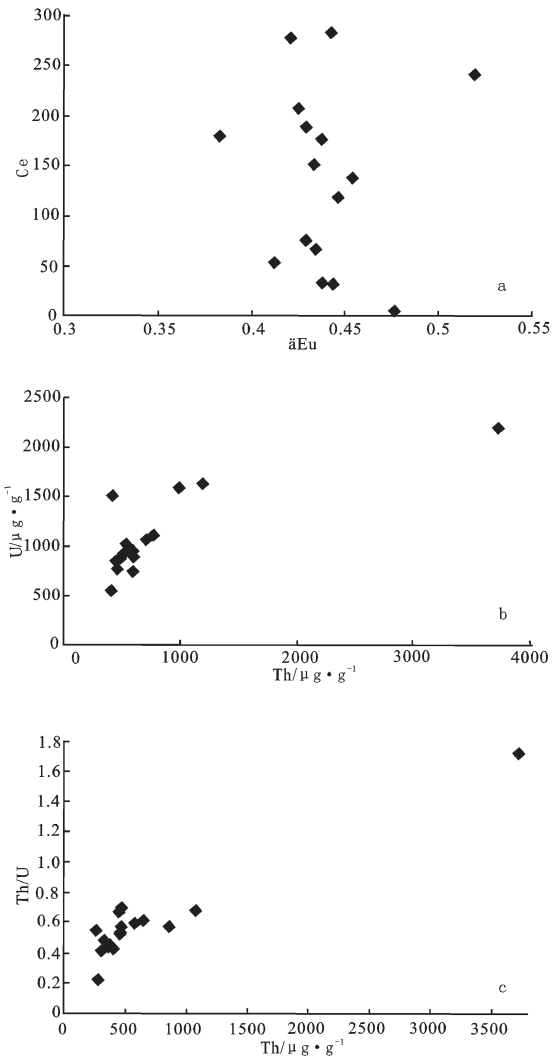


图 6 马厂箐岩体(似)斑状花岗岩锆石 $\delta\text{Ce}-\delta\text{Eu}$, $\text{U}-\text{Th}$, $\text{Th}/\text{U}-\text{Th}$ 协变图
Fig.6 $\delta\text{Ce}-\delta\text{Eu}$, $\text{U}-\text{Th}$, $\text{Th}/\text{U}-\text{Th}$ covariant diagrams for zircons from porphyritic granite of Machangqing complex

稀土元素表现出亏损轻稀土,富集重稀土,具有强烈的正 Ce 异常和中等的负 Eu 异常,且呈现出较高的 Th/U 比值等特征,表明本次所测锆石均为典型的岩浆锆石,其 U-Pb 年龄可以代表(似)斑状花岗岩的形成时间,进而为赋予所测年龄更加合理的地质意义解释提供了前提基础。

关于马厂箐岩体及其成岩成矿时代,前人开展了大量的研究工作,积累了丰富的同位素年代学数据(表 3)。尽管 K-Ar、Rb-Sr 测年方法获得的年龄数据变化范围相对较大,但它们还是能够反映出年龄的整体变化趋势。根据这些数据(表 3),按照成岩与成矿之间的关系,综合前人的研究成果^[16-29],进一步将马厂箐复式杂岩体岩浆活动划分为 3 期:Ⅰ期为斑状花岗岩和煌斑岩脉(早期)组合,Ⅱ期为正长(斑)岩脉、二长(斑)岩脉、花岗斑岩和(似)斑状花岗岩组合和Ⅲ期为碱长花岗斑岩脉和煌斑岩脉(晚期)组合^[19]。锆石同位素年龄为锆石由于热扩散导致放射元素子体的丢失量可以忽略不计,达到封闭温度时所测得的年龄,即冷却年龄。尽管锆石具有较高的封闭温度,但是当岩浆温度冷却到锆石的封闭温度之前仍要经过一段时间的演化,而在锆石结晶之后岩浆还将持续进行结晶分异,直至岩浆完全固结。因此,岩浆开始侵入的时间应早于锆石冷却年龄,结束时间则晚于锆石冷却年龄。正长斑岩锆石 U-Th-Pb 年龄为 $(35.6\pm0.3)\text{Ma}$ (2σ), $\text{MSWD}=2.81$,花岗斑岩锆石 U-Th-Pb 年龄为 $(35.0\pm0.2)\text{Ma}$ (2σ), $\text{MSWD}=2.92$ ^[13], (似)斑状花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $(33.78\pm0.21)\text{Ma}$, $\text{MSWD}=0.71$, Ⅱ期岩浆活动时间应早于 $(35.6\pm0.3)\text{Ma}$, 晚于 $(33.78\pm0.21)\text{Ma}$ 。

表 2 马厂箐岩体(似)斑状花岗岩中锆石微量元素分析结果(μg/g)
Table 2 Trace element analyses of zircons from porphyritic granite of Machangqing complex (μg/g)

	BB108-1	BB108-2	BB108-4	BB108-5	BB108-6	BB108-7	BB108-8	BB108-9	BB108-12	BB108-15	BB108-17	BB108-18	BB108-19	BB108-20	BB108-23	BB108-24	BB108-25
¹³⁹ La	0.01	<0.01	0.03	0.52	<0.01	0.57	0.36	0.02	0.40	0.06	0.05	0.09	<0.01	0.05	0.01	<0.01	26.96
¹⁴⁰ Ce	82.92	24.44	52.95	37.03	31.40	45.81	26.42	32.76	56.50	36.60	65.87	305.50	37.59	38.18	52.70	38.86	110.22
¹⁴¹ Pr	0.11	0.03	0.08	0.14	0.03	0.20	0.10	0.12	0.15	0.05	0.14	0.55	0.06	0.15	0.08	0.04	7.82
¹⁴³ Nd	2.00	0.85	1.55	1.41	0.68	1.57	0.95	2.00	1.80	1.24	2.42	12.87	0.79	2.94	1.71	0.83	36.85
¹⁴⁷ Sm	4.39	2.58	3.62	2.10	1.81	3.12	1.65	4.71	3.60	2.45	4.81	22.49	2.19	6.01	3.74	2.07	10.49
¹⁵¹ Eu	1.76	1.37	1.31	0.88	0.77	1.20	0.63	1.66	1.46	0.96	1.99	7.21	0.90	2.04	1.43	0.90	2.56
¹⁵⁷ Gd	23.19	15.18	19.26	11.18	9.87	14.93	7.98	20.93	20.12	11.66	24.94	87.05	11.60	25.07	18.41	12.32	23.89
¹⁵⁹ Tb	7.85	5.88	6.72	4.19	3.71	5.40	2.56	6.67	7.17	4.29	8.25	25.05	4.09	7.92	6.14	4.57	7.84
¹⁶³ Dy	89.79	74.11	78.74	51.60	46.90	67.46	30.10	75.67	86.25	52.36	95.30	248.67	48.69	88.95	70.32	58.95	95.80
¹⁶⁵ Ho	34.28	31.15	30.44	22.02	29.81	27.47	11.72	29.49	35.05	21.22	35.45	78.77	19.51	33.58	25.28	24.82	37.82
¹⁶⁶ Er	160.10	153.80	137.89	112.47	102.79	137.21	53.88	141.70	174.82	103.29	158.13	309.47	93.55	159.93	112.34	127.50	179.47
¹⁶⁹ Tm	41.43	41.73	35.53	30.92	29.05	36.76	14.13	37.82	46.92	28.06	38.43	66.25	25.53	41.92	27.76	35.87	45.97
¹⁷³ Yb	479.98	491.56	396.67	381.32	359.33	432.94	161.57	446.02	558.82	333.39	411.03	621.58	304.07	486.27	304.97	441.22	510.87
¹⁷⁵ Lu	80.65	83.39	66.09	68.62	64.61	74.12	27.67	78.10	98.37	56.31	66.25	91.63	52.18	82.48	48.55	78.31	86.33
⁸⁹ Y	1122.83	1042.78	957.93	747.58	684.16	904.53	371.00	982.34	1191.80	702.25	1084.60	2284.37	643.58	1120.68	786.78	858.03	1223.45
¹⁸¹ Ta	1.87	1.88	1.54	1.43	1.34	1.56	0.81	0.75	1.75	1.34	1.50	3.94	1.23	0.92	1.29	1.66	1.66
³¹ P	106.18	80.34	102.04	106.65	75.15	150.40	72.47	70.98	131.39	93.04	130.03	226.09	87.97	91.59	110.36	94.02	2378.91
⁴⁹ Ti	3.39	2.71	3.86	2.87	2.22	2.83	9.64	1.75	3.62	2.59	4.88	8.36	2.79	2.37	3.09	2.94	3.67
⁹³ Nb	8.06	7.44	6.51	4.88	4.80	6.10	2.87	2.43	7.78	4.54	5.74	23.97	4.10	2.88	4.66	6.25	7.22
²³² Th	1109.86	324.64	508.53	396.01	350.23	419.25	306.24	618.14	904.25	366.89	508.88	3723.22	497.58	683.40	494.46	440.44	504.44
²³⁸ U	1626.50	1504.21	888.03	906.09	848.88	913.28	557.04	1056.33	1581.79	772.22	742.96	2180.72	948.64	1107.17	742.33	1021.92	945.80

表 3 马厂箐成岩成矿同位素年龄

Table 3 Petrogenesis and mineralization isotope age of Machangqing

地点	岩性	测定对象	测试方法	年龄/Ma	资料来源
马厂箐	斑状花岗岩	黑云母	K-Ar	64.8	[15]
马厂箐	花岗斑岩	黑云母	K-Ar	48.0	[15]
马厂箐	斑状花岗岩	钾长石	K-Ar	46.5	[15]
马厂箐	煌斑岩	黑云母	K-Ar	45.7	❶
马厂箐	二长花岗斑岩	黑云母	K-Ar	35.10±0.5	[3]
马厂箐	花岗斑岩	全岩	Rb-Sr	36.0	[10]
马厂箐	花岗斑岩	全岩	Rb-Sr	36.3	[15]
马厂箐	石英正长岩	全岩	Rb-Sr	34.0	[28]
马厂箐	角闪正长岩	锆石	SHRIMP	35.60±0.3	[13]
马厂箐	花岗斑岩	锆石	SHRIMP	35.00±0.2	[13]
马厂箐	斑状花岗岩	锆石	U-Pb	33.78±0.21	本文
马厂箐(MCQ-1)	浅色花岗斑岩	全岩	K-Ar	31.36±0.49	[16]
马厂箐(MCQ-2)	肉红色花岗斑岩	全岩	K-Ar	29.88±0.32	[16]
马厂箐(MCQ-4)	正长斑岩	全岩	K-Ar	35.50±0.40	[16]
马厂箐(MCQ-8)	正长斑岩	全岩	K-Ar	36.50±0.46	[16]
马厂箐(MCQ-22)	正长斑岩	全岩	K-Ar	31.99±0.35	[16]
马厂箐(MCQ-25)	正长斑岩	全岩	K-Ar	30.02±0.38	[16]
马厂箐(MCQ-37)	暗色斑岩	全岩	K-Ar	33.54±0.38	[16]
马厂箐(MCQ-39)	花岗斑岩	全岩	K-Ar	33.65±0.41	[16]
马厂箐	铜钼矿	辉钼矿	Re-Os	33.90±1.1	[15]
马厂箐	铜钼矿	辉钼矿	Re-Os	35.80±1.6	[10]
马厂箐	铜钼矿	石英	Ar-Ar	34~35	[16]
金厂箐	金矿	石英	Ar-Ar	33.70±1.1	[16]
马厂箐	铜钼矿	辉钼矿	Re-Os	35.30±0.7	[17]
乱洞山矿段	接触交代型金矿	白云母	Ar-Ar	35.25±0.36	待刊
人头箐矿段	蚀变岩型金矿	白云母	Ar-Ar	35.35±0.32	待刊

将马厂箐复式岩体 3 期岩浆活动时限能够限定在Ⅰ期 45~48 Ma(成矿前)、Ⅱ期 33~37 Ma(成矿期)和Ⅲ期 29~32 Ma(成矿后)较为合适。

33~37 Ma 侵入的正长斑岩+二长斑岩+花岗斑岩+(似)斑状花岗岩岩性组合中发育浸染状黄铁矿化、黄铜矿化和辉钼矿化,局部钾长石斑晶中尚发育浸染状矿化,反映成矿与Ⅱ期岩浆活动有关。而这套岩性组合中发育镁铁质和闪长质暗色微粒包体,并发育浸染状黄铁矿化、黄铜矿化,包体与寄主岩地球化学特征反映其含有大量的幔源组分并遭受到地幔

流体的交代作用,说明这套岩浆为壳-幔岩浆混合作用的结果^[30-33],而地幔流体中含有丰富的铜、金、硫等成矿物质,具有提供成矿物质的基础。氢、氧、硫、铅、碳、锶、钕、氦、氩等同位素组成均反映成矿流体,成矿物质来自于马厂箐富碱侵入岩体^[6,7,9,10,14,19,34]。因此,Ⅱ期(33~37 Ma)正长斑岩+二长斑岩+花岗斑岩+(似)斑状花岗岩岩性组合是成矿的地质体,为成矿提供了物质、流体和热动力。这一时期也是区域应力场从剪切挤压背景向剪切伸展背景的应力转换阶段,有利于大规模的岩浆侵入作用和大规模的成

❶ 杨世瑜,江祝伟.云南弥渡马厂箐金矿区构造体系控矿特征及成矿预测.昆明工学院科研报告,1991.

矿作用^[10]。这一时期也是世界上斑岩铜矿最重要的成矿期,南美智利等地的斑岩铜矿也主要形成于 40.8~32.6 Ma^[35]。

如果将 37 Ma 作为Ⅱ期岩浆活动的开始,将 33 Ma 作为这期岩浆活动的结束,那么这期斑岩-热液系统的持续时间约为 4 Ma。如前所述,宝兴厂矿段接触交代型铜钼矿化成矿时间为 $(35.8\pm 1.6)\text{Ma}$ ^[10],乱洞山矿段接触交代型金成矿时间为 $(35.25\pm 0.36)\text{Ma}$,人头箐-金厂箐矿段热液脉型金成矿时间为 $(35.35\pm 0.32)\text{Ma}$ (待刊),铜、钼、金的成矿时间较为一致,铜、钼略早于金,这与Ⅱ期(33~37 Ma)岩浆活动较为吻合[正长斑岩 $(35.6\pm 0.3)\text{Ma}$,花岗斑岩 $(35.0\pm 0.2)\text{Ma}$, (似)斑状花岗岩 $(33.78\pm 0.21)\text{Ma}$]。对比可以看出,铜、钼、金的成矿总体发生于岩浆活动的早—中期,并非岩浆活动的末期,与前人有关成矿多发生在岩浆活动的晚期和末期的认识存在明显差异。这可能与岩浆侵入的早—中期是一个快速的上升过程有关,岩浆的快速上升导致其压力骤然降低,岩浆中大量的挥发份溢出形成含矿流体,随着含矿热液由岩体向外运移进一步形成不同类型的矿床。而在岩浆活动末期,岩浆从深部上升的速度、规模等都有所减弱,并未发生大规模成矿流体的出溶,从而影响成矿流体的向外运移以及成矿作用的发生。正如地震一样,尽管主震(岩浆活动的早—中期)后发生一系列余震(岩浆活动的晚期和末期),主震的强度、释放的能量、破坏的强度、影响的范围均较余震更大。当然,岩浆活动的晚期和末期仍然有成矿流体的出溶,由于流体多少、围岩条件、向外运移的热动力条件等的影响,向围岩地层运移的距离有限,加上岩体外壳的固结,大部分的流体都将封闭在岩体内,形成岩体内脉状、细脉状铜、钼矿化,Re-Os 等时线年龄为 $(33.9\pm 1.1)\text{Ma}$ 的辉钼矿可能就属于这一时期形成的。因此,马厂箐铜、钼、金的成矿作用主要发生在Ⅱ期岩浆活动的早—中期。

马厂箐铜、钼、金多金属矿床成矿作用时间上较为一致、空间上与富碱侵入岩体紧密共生、成因上密切相关,蚀变矿化类型和成矿元素组合特征清晰地展现了含矿岩浆向上侵位过程中,由于压力减小、温度降低,含矿流体从岩浆中结晶分异出来,并在岩浆热压力和流体内部压力的作用下从岩体向外运移,随着物理化学条件的改变,在不同位置上堆积沉淀形成不同种类的金属,从而在含矿流体通过的路径上

发生不同性质的成矿作用,形成一系列不同类型的矿床^[36],反映出这些成矿作用尽管其机制有所不同,但都是在同一动力驱动下发生的,其空间分布特征与^[37~38]讨论的透岩浆流体成矿作用体系不谋而合。它们属于同一个构造-岩浆-热液成矿系统在不同物理化学条件下的产物。

研究表明,马厂箐岩体Ⅱ期(33~37 Ma)正长斑岩+二长斑岩+花岗斑岩+(似)斑状花岗岩岩性组合是同一期岩浆作用不同相变的反映。在盖层岩石破裂较为发育前提下,岩浆热量散失较快,导致接触界面附近的岩浆发生快速的结晶,由于岩浆没有足够的时间分异以及其内的矿物没有足够的时间生长,在岩体边部形成成分偏中-基性、细粒边缘相的正长斑岩、二长斑岩岩性组合。偏中-基性边缘相带成为热的阻挡层导致其下的岩浆系统散热速度大大减慢,从而有足够的时间进行分异和结晶,形成偏酸性、矿物颗粒粗大岩体中心相的(似)斑状花岗岩,反映岩浆从边缘向内、向下的结晶过程,中心或下部岩浆结晶较晚。而不同岩性标准石英的含量向中心逐渐增加,显示出从外向内、向下的结晶作用,中心部位形成最晚^[39]。同位素年龄也反映出岩体从外向内的固结过程。马厂箐岩体大面积出露中心相(似)斑状花岗岩反映岩体剥蚀较深,其上的正长斑岩、二长斑岩等边缘相大部分已经被剥蚀掉。而岩体内硅化核的存在也反映侵入深度较大岩体遭受了区域规模上的总体抬升,并受到一定程度的剥蚀,即宝兴厂矿段剥蚀较深,这对于该矿段进一步找矿具有重要意义。

5 结 论

马厂箐复式杂岩体中的(似)斑状花岗岩成岩时代为 $(33.78\pm 0.21)\text{Ma}$ 。

矿区发育的(Ⅱ期,33~37 Ma)侵入的正长斑岩+二长斑岩+花岗斑岩+(似)斑状花岗岩岩性组合属于同一期岩浆作用不同相变的反映,铜钼金多金属矿床成矿与这套岩性组合有关,其为成矿的地质体,提供了成矿的物质、流体和动力。锆石年龄所反映的正长斑岩、二长斑岩和(似)斑状花岗岩成岩时代,以及铜钼金的成矿时代暗示成矿发生于岩浆活动的早—中期。

岩体中心相(似)斑状花岗岩的大面积出露以及硅化核的地表发育反映马厂箐岩体遭受了区域规模上的总体抬升,并受到一定程度的剥蚀。

参考文献(References):

- [1] 吕伯西, 王增, 张能德, 等. 三江地区花岗岩类及其成矿专属性 [M]. 北京:地质出版社, 1993.
Lv Baixi, Wang Zeng, Zhang Nenghui, et al. Granitoids in Sanjiang Region and Their Metallogenic Specialization [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993(in Chinese with English abstract).
- [2] 张玉泉, 谢应雯, 涂光炽, 袁牢山—金沙江富碱侵入岩及其裂谷构造关系初步研究[J]. 岩石学报, 1987, (1):17-25.
Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Tu Guangzhi. Preliminary studies of the alkali-rich intrusive rocks in the Ailaoshan—Jinshajiang belt and their relationship with rift tectonics[J]. Acta Petrologica Sinica, 1987, (1):17-25 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张玉泉, 谢应雯. 袁牢山—金沙江富碱侵入岩年代学和 Nd, Sr 同位素特征[J]. 中国科学(D 辑), 1997, 27(4):289-293.
Zhang Yuquan, Xie Yingwen. Chronology and Nd-Sr isotopes of the Ailaoshan-Jinshajiang alkali-rich intrusions[J]. Science of China (D), 1997, 27(4):289-293(in Chinese with English abstract).
- [4] 俞广钧. 马厂箐金矿床成矿地质条件及其成因探讨 [J]. 昆明理工学院学报, 1988, 13(1):1-10.
Yu Guangjun. A preliminary study on geological conditions of metallogenesis and genesis of Machangqing gold deposit[J]. Journal of Kunming Institute of Technology, 1988, 13 (1):1-10 (in Chinese with English abstract).
- [5] 杨建琨, 唐志国. 云南省新生代浅成侵入斑岩型金矿成矿特征及找矿预测[J]. 北京地质, 1996, 3:27-31.
Yang Jiankun, Tang Zhiguo. Mineralization characteristics and prospective prediction of the Cenozoic hypabyssal porphyry gold deposit in Yunnan Province [J]. Beijing Geology, 1996, 3:27-31(in Chinese with English abstract).
- [6] 胡瑞忠, 毕献武, Turner G, 等. 马厂箐铜矿床黄铁矿流体包裹体 He-Ar 同位素体系[J]. 中国科学(D 辑), 1997, 27(6):503-508.
Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Turner G, et al. He-Ar isotopic system in pyrite fluid inclusions of Machangqing Cu deposit [J]. Science in China (D), 1997, 27(6):503-508(in Chinese).
- [7] 毕献武, 胡瑞忠, 叶造军, 等. A 型花岗岩类与铜成矿关系研究—以马厂箐为例[J]. 中国科学(D), 1999, 29(6):489-495.
Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Ye Zaojun, et al. Research on the relationship between A-type granitoid and Cu metallogenetic—taking Machangqing Cu Deposit as an example[J]. Science in China (D), 1999, 2(6):489-495(in Chinese).
- [8] 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 等. 姚安和马厂箐富碱侵入岩体的地球化学特征[J]. 岩石学报, 2005, 21(1):113-124.
Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Peng Jiantang, et al. Geochemical characteristics of the Yao'an and Machangqing alkaline-rich intrusions [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21 (1):113-124 (in Chinese with English abstract).
- [9] 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠. 滇西富碱斑岩带的 Nd, Sr, Pb 同位素特征及其挤压走滑背景[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(3):231-241.
Zeng Pusheng, Mo Xuanxue, Yu Xuehui. Nd, Sr and Pb isotopic characteristics of the alkali-rich porphyries in western Yunnan and its compression strike-slip setting [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2002, 21 (3):231-241 (in Chinese with English abstract).
- [10] 曾普胜, 侯增谦, 高永峰, 等. 印度-亚洲碰撞带东段喜马拉雅期铜-钼-金矿床 Re-Os 年龄及成矿作用 [J]. 地质论评, 2006, 52 (1):72-84.
Zeng Pusheng, Hou Zengqian, Gao Yongfeng, et al. The Himalayan Cu-Au mineralization in the eastern Indo-Asian collision zone: Constraints from Re-Os dating of molybdenite [J]. Geological Review, 2006, 52 (1):72-84 (in Chinese with English abstract).
- [11] 侯增谦, 钟大赉, 邓万明. 青藏高原东缘斑岩铜钼金成矿带的构造模式 [J]. 中国地质, 2004, 31(1):1-14.
Hou Zengqian, Zhong Dalai, Deng Wanming. A tectonic model for porphyry copper-molybdenum-gold metallogenetic belts on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geology in China, 2004, 31(1):1-14(in Chinese with English abstract).
- [12] 何明勤, 杨世瑜. 滇西小龙潭—马厂箐地区铜金多金属矿床地质地球化学及成因研究[M]. 北京:地质出版社, 2004.
He Mingqin, Yang Shiyu. Geological Geochemistry and Genesis of Xiaolongtan—Machangqing Cu-Au Polymetallic Ore Deposit in Western Yunnan [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004(in Chinese with English abstract).
- [13] 梁华英, 谢应雯, 张玉泉. 富钾碱性岩体形成演化对铜矿成矿制约—以马厂箐铜矿为例[J]. 自然科学进展, 2004, 14(1):116-120.
Liang Huaying, Xie Yingwen, Zhang Yuquan. Forming of K-rich alkalescence rock restrict the metallogenetic of Cu-Machangqing Cu Deposit as an example [J]. Natural Science Evolution, 2004, 14(1): 116-120(in Chinese with English abstract).
- [14] 刘显凡, 刘家铎, 张成江, 等. 滇西富碱斑岩型矿床岩体和矿脉同位素地球化学研究 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(1): 32-39.
Liu Xianfan, Liu Jiaduo, Zhang Chengjiang, et al. Isotopic geochemistry of intrusives and ore-veins from alkali-rich porphyry type deposits in western Yunnan, China [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2004, 23(1):32-39(in Chinese with English abstract).
- [15] 王登红, 屈文俊, 李志伟, 等. 金沙江-红河成矿带斑岩铜钼矿的成矿集中期: Re-Os 同位素定年 [J]. 中国科学 (D 辑), 2004, 34 (4):345-349.
Wang Denghong, Qu Wenjun, Li Zhiwei, et al. The mineralization concentration stage of Jinshajiang-Honghe metallogenetic belt porphyry copper, molybdenum deposit [J]. Science in China (Series D), 2004, 34(4):345-349(in Chinese).
- [16] 彭建堂, 毕献武, 胡瑞忠, 等. 滇西马厂箐斑岩铜(钼)矿床成岩成矿时限的厘定[J]. 矿物学报, 2005, 25(1):69-74.
Peng Jiantang, Bi Xianwu, Hu Ruizhong, et al. Determination of porphyry ore and rock forming time of the machangqing Cu(Mo) deposit, Western Yunnan Province [J]. Acta Mineralogica Sinica,

- 2005, 25(1):69–74(in Chinese with English abstract).
- [17] 郭晓东, 王治华, 屈文俊. 云南省马厂箐斑岩型铜、钼矿辉钼矿 Re–Os 年龄及其地质意义[C]//2008 年第九届全国矿床会议论文集. 2008:453–454.
- Guo Xiaodong, Wang Zhihua, Qu Wenjun. Re –Os age for molybdenite and its geologic significance on copper– molybdenum the Machangqing porphyry –type deposit, in Yunnan [C]// Discourse Collection of the 9th National Deposit Conference. 2008:453–454 (in Chinese with English abstract).
- [18] 郭晓东, 侯增谦, 陈祥, 等. 云南马厂箐富碱斑岩埃达克岩性质的厘定及其成矿意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(4):375–386.
- Guo Xiaodong, Hou Zengqian, Chen Xiang, et al. Identification of adakitic characteristics of Machangqing alkali –rich porphyry in Yunnan Province and its significance to mineralization research[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2009, 28(4):375–386(in Chinese with English abstract).
- [19] 郭晓东, 王治华, 陈祥, 等. 云南马厂箐斑岩型铜钼(金)矿床:地质特征与矿床成因[J]. 地质学报, 2009, 83(12):1901–1914.
- Guo Xiaodong, Wang Zhihua, Chen Xiang, et al. Machangqing Cu –Mo –Au deposit, Yunnan Province: Geological characteristics and genesis[J]. Acta Geologic Sinica, 2009b, 83(12):1901–1914 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. 地质调查与研究, 2009, 33(3):161–170.
- Li Changmin. 2009. A review on the minerageny and situ microanalytical dating techniques of zircons[J]. Geology Survey and Research, 33(3):161–170 (in Chinese with English abstract).
- [21] Rubatto D, Williams I S. Imaging, trace element geochemistry and mineral inclusions: Linking U –Pb ages with metamorphic conditions [J]. EOS, 2000, 21:25.
- [22] Hermann J, Rubatto D, Korsakov A. Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subducted continental crust[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2001, 141(1):66–82.
- [23] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U –Pb ages and metamorphism [J]. Chem. Geol., 2002, 184(1/2):123–138.
- [24] 吴元保, 陈道公, 夏群科, 等. 大别山黄土岭麻粒岩锆石和共生矿物的微量元素分析及其地质意义 [J]. 地球化学, 2004, 38(4): 334–341.
- Wu Yuanbao, Chen Daogong, Xia Qunke, et al. Trace element analysis of zircon and associated minerals in the Huangtuling granulite, Dabieshan and its geological implication[J]. Geochemistry, 2004, 38(4):334–341(in Chinese with English abstract).
- [25] Rubatto D, Gebauer D. Use of cathodoluminescence for U –Pb zircon dating by IOM Microprobe: Some examples from the western Alps [J]. Cathodoluminescence in Geoscience, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2000, 373–400.
- [26] Li X, Liang X, Sun M, et al. Geochronology and geochemistry of single –grain zircons: Simultaneous in –situ analysis of U –Pb age and trace elements by LAM –ICP –MS [J]. Eur J Mineral, 2000; 1015–1024.
- [27] Watson E B, Wark D A, Thomas J B. Crystallization thermometers for zircon and rutile [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2006, 151:413–433.
- [28] 傅德明. 扬子地台西南缘陆内造山带有色、稀贵金属矿床成矿系列及成矿规律[C]//骆耀南主编. 扬子地台西南缘陆内造山带地质与矿产论文集. 成都: 四川科学技术出版社, 1996, 120–128.
- Fu Deming. Metallogenic series and regularity of the ferrous and rare, and precious ore deposits in the continental orogenic belt, southwestern margins of the Yangzi platform [C]//Luo Yaonan, et al. Contribution to geology and mineral resources in the continental orogenic belt, southwestern margins of the Yangzi platform. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1996: 120–129(in Chinese with English abstract).
- [29] 赵淮. 中甸 –大理 –金平地区与喜马拉雅期斑岩有关的铅 –铜 –钼 –金矿床成矿模式[J]. 云南地质, 14(4):333–341.
- Zhao Huai. Metallogenic model of Pb –Cu –Mo –Au deposit related to porphyry of Himalaya period in Zhongdian – Dali – Jinping area[J]. Yunnan Geology, 1995, 14(4):333–341 (in Chinese with English abstract).
- [30] Zorpi M J. Magma mingling, zoning and emplacement in calc –alkaline granitoid pluton[J]. Tectonophysics, 1989, 157:315.
- [31] Poli G, Tonunasin S. Geochemical modeling of acid basic magma interaction in the Sardinia Corsica Batholith: the case study of Sarrabus, southeastern Sardinia, Italy [J]. Lithos, 1999, 46 (3):553–571.
- [32] Nitoi E, Munteanu M, Marince S, et al. Magma enclave interactions in the East Carpathian Subvolcanic Zone, Romania: petrogenetic implications [J]. J. Volcanology and Geothermal Research, 2002, 118(1–2):229–259.
- [33] Perugini D, Poli G, Christofides G, et al. Magma mixing in the Sithonia Plutonic Complex, Greece: evidence from mafic microgranular enclaves [J]. Mineralogy and Petrology, 2003, 78(3/4):173–200.
- [34] 刘显凡, 蔡永文, 卢秋霞, 等. 滇西地区富碱斑岩中地幔流体作用踪迹及其成矿作用意义[J]. 地学前缘, 2010, 17(1):114–136.
- Liu Xianfan, Cai Yongwen, Lu Qiuxia, et al. Actual traces of mantle fluid from alkali –rich porphyries in western Yunnan, and associated implications to metallogenesis[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(1):114–136 (in Chinese with English abstract).
- [35] Marsh T M, Einaudi M T, McWilliams M. $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ geochronology of Cu –Au and Au –Ag mineralization in the Potrerillos district, Chile[J]. Econ. Geol., 1997, 92:784–806.
- [36] 於崇文. 矿床在混沌边缘分形生长 [M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2006, 705.
- Yu Chongwen. Growth of Mineral Deposits at the Edge of Chaos [M]. Hefei: Anhui Education Press, 2006, 705 (in Chinese with English abstract).
- [37] 罗照华, 莫宣学, 卢欣祥, 等. 透岩浆流体成矿作用——理论分析与野外证据[J]. 地学前缘, 2007, 14(3):165–183.

- Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, Lu Xinxiang, et al. Metallogeny by trans-magmatic fluids-Theoretical analysis and field evidence. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14 (3):165-183 (in Chinese with English abstract).
- [38] 罗照华, 卢欣祥, 陈必河, 等. 透岩浆流体成矿作用导论 [M]. 北京:地质出版社, 2009.
- Luo Zhaohua, Lu Xinxiang, Chen Bihe, et al. Introduction to the Metallogenic Theory on the Transmagmatic Fluids [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [39] 陈国能, 洛尼·格拉佩斯, 著. 彭卓伦, 张献河, 胡文焯, 译. 张珂校. 花岗岩成因:原地重熔与地壳演化[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2009:118-123.
- Chen Guoneng and Rodney Grapes. Granite Genesis:In-situ Melting and Crustal Evolution [M]. Wuhan:China University of Geosciences Press, 2009:118-123 (in Chinese with English abstract).

LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of porphyritic granite in Machangqing complex of Yunnan Province and their geological significance

GUO Xiao-dong^{1,2}, WANG Zhi-hua², WANG Liang^{2,3}, YANG Yu-xia², CHEN Xiao-wu²

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *Gold Geology Institute of CAPG, Langfang 06500, Hebei, China*; 3. *School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: U-Pb ages and trace elements of zircons from porphyritic granite of Machangqing complex were analyzed by the LA-ICP-MS method. As revealed by the cathodoluminescence (CL) images, all the zircons from porphyritic granite have the oscillatory zoning. REE patterns of the analyzed zircons are characterized by significantly high heavy rare earth elements (HREE), depleted light rare earth elements (LREE), obviously positive Ce anomaly and moderately negative Eu anomaly. In addition, nearly all the zircons have high Th/U ratios. These characteristics suggest a magmatic genesis of the analyzed zircons. The zircons from the porphyritic granite of Machangqing complex yield the U-Pb weighted average age of (33.78 ± 0.21) Ma (MSWD=0.71), whereas zircons from syenite porphyry and granitic porphyry yield the U-Th-Pb ages of (35.6 ± 0.3) Ma and (35.0 ± 0.2) Ma by cumulative probability statistics. Molybdenites from the Baoxingchang ore block yield the Re-Os isochron ages of (35.8 ± 1.6) Ma and (33.9 ± 1.1) Ma. Muscovites of contact metasomatic gold mineralization from the Luandongshan ore block yield the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of (35.25 ± 0.36) Ma. Muscovites of hydrothermal vein gold mineralization from the Rentouqin-Jinchangqin ore block yield the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of (35.35 ± 0.32) Ma. These ages show that porphyry type copper-molybdenum mineralization, contact metasomatic gold mineralization and hydrothermal vein gold mineralization are products of the same tectonic-magmatic-hydrothermal ore-forming system, and that the II period magmatic combination (33~37 Ma) of syenite porphyry+monzonite porphyry+granitic porphyry+porphyritic granite seems to have been the ore-forming geological body, which supplied materials, fluid and thermodynamic conditions for the ore-forming process. The duration of the porphyry-hydrothermal fluid-ore forming system is about 4 Ma. The ore-forming process of copper, molybdenum and gold occurred in the early-middle stage.

Key words: porphyritic granite; LA-ICP-MS; zircon U-Pb age; Machangqing complex; Yunnan

About the first author: GUO Xiao-dong, male, born in 1969, doctor and senior engineer, mainly engages in the study of gold deposit exploration; E-mail: Xdguo191@sohu.com.