

云南民乐铜矿床中玄武岩和流纹斑岩的成因： 年代学和地球化学制约*

朱维光¹ 钟宏^{1**} 王立全² 何德锋¹ 任涛¹ 范宏鹏¹ 柏中杰¹

ZHU WeiGuang¹, ZHONG Hong^{1**}, WANG LiQuan², HE DeFeng¹, REN Tao¹, FAN HongPeng¹ and BAI ZhongJie¹

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

2. 成都地质矿产研究所, 成都 610081

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resource, Chengdu 610081, China

2011-04-01 收稿, 2011-07-08 改回.

Zhu WG, Zhong H, Wang LQ, He DF, Ren T, Fan HP and Bai ZJ. 2011. Petrogenesis of the basalts and rhyolite porphyries of the Minle copper deposit, Yunnan: Geochronological and geochemical constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (9): 2694–2708

Abstract SIMS U-Pb zircon ages for rhyolite porphyries, and geochemical and Nd isotopic data are reported for rhyolite porphyries and the related basalts from the Songjiapo Formation of the Minle copper deposit of Yunnan Province, SW China. The aims are to constrain the origin and petrogenesis of these rocks. The basalts are commonly high in Fe₂O₃, Al₂O₃ and Na₂O contents. In the Harker diagrams, MgO, CaO and P₂O₅ contents of the basalts decrease with increasing SiO₂ contents. These rocks with high $\epsilon_{Nd}(t)$ values (+2.9 ~ +3.5), are characterized by relatively low total REE contents ($50.1 \times 10^{-6} \sim 60.6 \times 10^{-6}$) with relatively flat REE patterns in the chondrite-normalized diagram and with slightly negative Nb-Ta and positive Sr anomalies in the primitive-normalized spidergram. The parental magma for the basalts exhibits affinity with a sub-alkaline basaltic magma generated by melting of a depleted, plagioclase-rich and garnet-free mantle source in the spinel field. It is suggested that the basalts originated by fractional crystallization of the parental magma plus varying degrees of crustal contamination. Cameca SIMS zircon U-Pb dating indicates that the rhyolite porphyries were emplaced at 234.8 ± 2.4 Ma. These rocks have high SiO₂, (Na₂O + K₂O) and Al₂O₃ contents compared with the normal rhyolites, and are enriched in LREE and show relatively flat HREE patterns with slightly negative Eu anomalies in the chondrite-normalized diagram and significantly negative Nb-Ta, Sr, P and Ti anomalies in the primitive mantle-normalized spidergrams. The rhyolite porphyries display geochemical characteristics of I-type granites and exhibit variably initial $\epsilon_{Nd}(t)$ values ranging from -1.9 to -0.51. The parental magma for these rocks exhibits affinity with a mildly alkaline intermediate to felsic magma, which was probably generated by partial melting of the regional Mesoproterozoic to Neoproterozoic mafic to intermediate lower crust and thereafter mixed with small amounts of the Middle Triassic basaltic magmas. The rhyolite porphyries were then formed by extensive crystal fractionation of the mildly alkaline magma. The basalts and the rhyolite porphyries from the Minle copper deposit display the characteristics of arc volcanic rocks, which possibly formed in a late-collisional to post-collisional environment.

Key words Middle Triassic; Basalts; Rhyolite porphyries; Minle copper deposit; Yunnan

摘要 本文对云南民乐铜矿床中宋家坡组流纹斑岩进行了锆石 SIMS U-Pb 年代学、流纹斑岩和玄武岩的地球化学和 Nd 同位素研究工作, 目的是揭示民乐铜矿床中赋矿建造次火山岩和玄武岩的成因和构造环境。宋家坡组玄武岩通常显示出较高的 Fe₂O₃、Al₂O₃ 和 Na₂O 含量, 随 SiO₂ 含量增加, MgO、CaO 和 P₂O₅ 含量减小。玄武岩具有较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 (+2.9 ~ +3.5), 岩石稀土总量较低 ($\Sigma \text{REE} = 50.1 \times 10^{-6} \sim 60.6 \times 10^{-6}$) 并在球粒陨石标准化的稀土元素图解上显示出比较平坦的

* 本文受国家重点基础研究发展规划项目(2009CB421003)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-136-4)、国家自然科学基金项目(41073043)和矿床地球化学国家重点实验室专项经费联合资助。

第一作者简介: 朱维光, 男, 1968年生, 博士, 研究员, 矿床地球化学和同位素地球化学专业, E-mail: zhuweiguang@vip.gyig.ac.cn

** 通讯作者: 钟宏, 男, 1971年生, 博士, 研究员, 矿床地球化学和同位素地球化学专业, E-mail: zhonghong@vip.gyig.ac.cn

REE 模式, 在蛛网图上表现出 Nb-Ta 轻微亏损 Sr 富集的特征。这些岩石总体上表现出亚碱性玄武质岩石特征, 原始岩浆很可能来源于长期亏损、富斜长石而贫石榴石的尖晶石地幔源区部分熔融。本文认为这些玄武岩形成过程中岩浆经历了结晶分异作用和不同程度的地壳混染作用。宋家坡组流纹斑岩的锆石 SIMS U-Pb 年龄为 234.8 ± 2.4 Ma。这些岩石与一般流纹岩相比具有较高的 SiO_2 、 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 和 Al_2O_3 含量, 在球粒陨石标准化的稀土元素图解上显示出轻稀土元素 (LREE) 富集而重稀土元素相对平坦的模式, 并具有轻微 Eu 负异常的特征。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上, 这些岩石的 Nb-Ta、Sr、P 和 Ti 表现出明显亏损的特点。上述流纹斑岩显示出 I 型花岗岩的特征, 其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -1.9 至 -0.51 之间。这些岩石的母岩浆很可能是弱碱性的流纹安山质岩浆, 可能是由区域分布的中-新元古代镁铁质-中性的下地壳部分熔融而来, 然后加入了少量的同时代玄武质岩浆。这些岩浆而后经历了较充分的结晶分异作用形成了流纹斑岩。民乐矿区玄武岩和流纹斑岩表现出岛弧火山岩的特征, 很可能是在碰撞晚期-碰撞后环境下形成。

关键词 中三叠世; 玄武岩; 流纹斑岩; 民乐铜矿床; 云南

中图法分类号 P588.14; P597.3

1 引言

云南景谷民乐铜矿床位于澜沧江南段, 所处构造位置为南澜沧江结合带东侧的云县-景谷火山-岩浆弧带的中北部 (图 1)。云县-景谷火山-岩浆弧带主要由古生代和中生代沉积岩和火山岩组成, 受其西侧的南澜沧江结合带所控制 (杨岳清等, 2006; 图 1), 同时大平掌、官房、文玉等铜矿床也产于该火山岩带。因此, 与这些铜矿床密切相关的火山岩的形成时代、成因和成岩的动力学背景的研究对于认识这些铜矿床的成因和动力学背景有重要的意义。

近年来一些研究者对南澜沧江结合带东侧云县-景洪火山岩带中的晚三叠世小定西组和芒汇河组火山岩做了年代学和地球化学的研究工作 (张彩华等, 2006; Wang *et al.*, 2010), 但对该火山岩带的中三叠世忙怀组和宋家坡组的研究仍然很薄弱, 尤其是对这些火山岩的形成时代和成因机制仍然存在不同的看法 (彭头平等, 2006; 李学军, 2009; Wang *et al.*, 2010)。而且, 目前对民乐铜矿床的成因也有不同认识, 一部分人认为属火山-次火山热液型铜矿床 (杨贵来, 2003), 也有人认为成因上类似于斑岩型铜矿床 (杨宗良, 2004; 徐晓春等, 2004)。

为此, 本文选择民乐矿床的赋矿建造进行研究, 通过对流纹斑岩进行精确的锆石 SIMS U-Pb 定年和地球化学研究, 同时结合同时代地层中玄武岩的地球化学特征, 揭示民乐铜矿床中赋矿建造次火山岩和玄武岩的成因和构造环境。

2 地质背景

南澜沧江结合带位于澜沧江南段, 主要受澜沧江断裂所控制 (杨岳清等, 2006)。该断裂带对两侧地质作用具有显著的影响。其西侧主体为临沧大花岗岩基和元古代中-深变质岩系, 东侧主要由云县-景谷火山-岩浆弧带 (图 1) 的古生代和中生代沉积岩和火山岩组成 (杨岳清等, 2006)。

南澜沧江结合带西侧的临沧花岗岩体总体呈南北向延伸, 长达 350 km, 东西宽 10 ~ 48 km, 平均宽 22.5 km, 出露面积

达 7400 km² (图 1), 其岩性主要为黑云母二长花岗岩和钾长花岗岩, 无明显岩性分带 (李兴林, 1996)。前人研究得到该岩体中黑云母二长花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 229 ± 3 Ma 和 230 ± 4 Ma (彭头平等, 2006)。

南澜沧江结合带东侧的云县-景谷火山带位于兰坪-思茅盆地西缘, 属陆缘火山弧 (沈上越等, 2006)。该带广泛分布三叠纪火山岩, 尤以北部云县一带出露较完整, 自下而上为被划分为忙怀组 (T_2m)、小定西组 (T_3x) 和芒汇河组 (T_3m), 火山岩系总厚度大于 7400 m (云南省地质矿产局, 1990; 莫宣学等, 1998)。该火山岩系内各组之间呈整合或假整合接触, 与下伏前三叠纪地层不整合接触, 又被中侏罗统复成分砾岩和紫红色泥岩不整合上覆 (云南省地质矿产局, 1990; 莫宣学等, 1998)。云县棉花地忙怀组上段流纹岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 231 ± 5 Ma, 表明忙怀组火山岩和临沧岩基主体具有相似的形成时代, 即形成于中三叠世 (彭头平等, 2006)。小定西组和芒汇河组火山岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分别为 214 ± 7 Ma 和 210 ± 22 Ma (Wang *et al.*, 2010), 形成于晚三叠世。

民乐铜矿区位于云县-景谷火山-岩浆弧带的中北部 (图 1), 该区出露元古界、二叠系、三叠系和侏罗系-白垩系地层 (图 2)。元古界地层主要由各种混合岩、混合岩化变粒岩、片麻岩夹少量片岩、斜长角闪岩等组成, 总厚度大于 4000 m, 与上覆地层呈断层接触。二叠系地层主要由下部的灰色变质砂岩、板岩和上部的灰色灰岩、泥灰岩组成, 与上覆地层呈假整合或不整合接触 (云南省地质矿产局, 1990)。三叠系是一套以基性-酸性火山岩为主的地层, 包括中三叠统宋家坡组 (T_2s , 对应于忙怀组 T_2m) 和上三叠统小定西组 (T_3x)。

本研究所采的玄武岩分布于本区宋家坡组第一段底部, 该部分由玄武岩夹中厚层状双屑凝灰岩、凝灰质砂岩组成, 厚度大于 130 ~ 155 m。这些玄武岩呈深灰绿色, 致密块状, 偶含杏仁体。这些玄武岩主要由单斜辉石 (35% ~ 45%) 和斜长石 (50% ~ 65%) 组成, 岩石蚀变比较强, 可见绿泥石化、钠长石化和钠黝帘石化 (图 3a)。

民乐矿区宋家坡组次火山岩主要为流纹斑岩, 是矿区最主要的容矿岩石, 民乐宋家坡铜矿床即产于该组的流纹斑岩

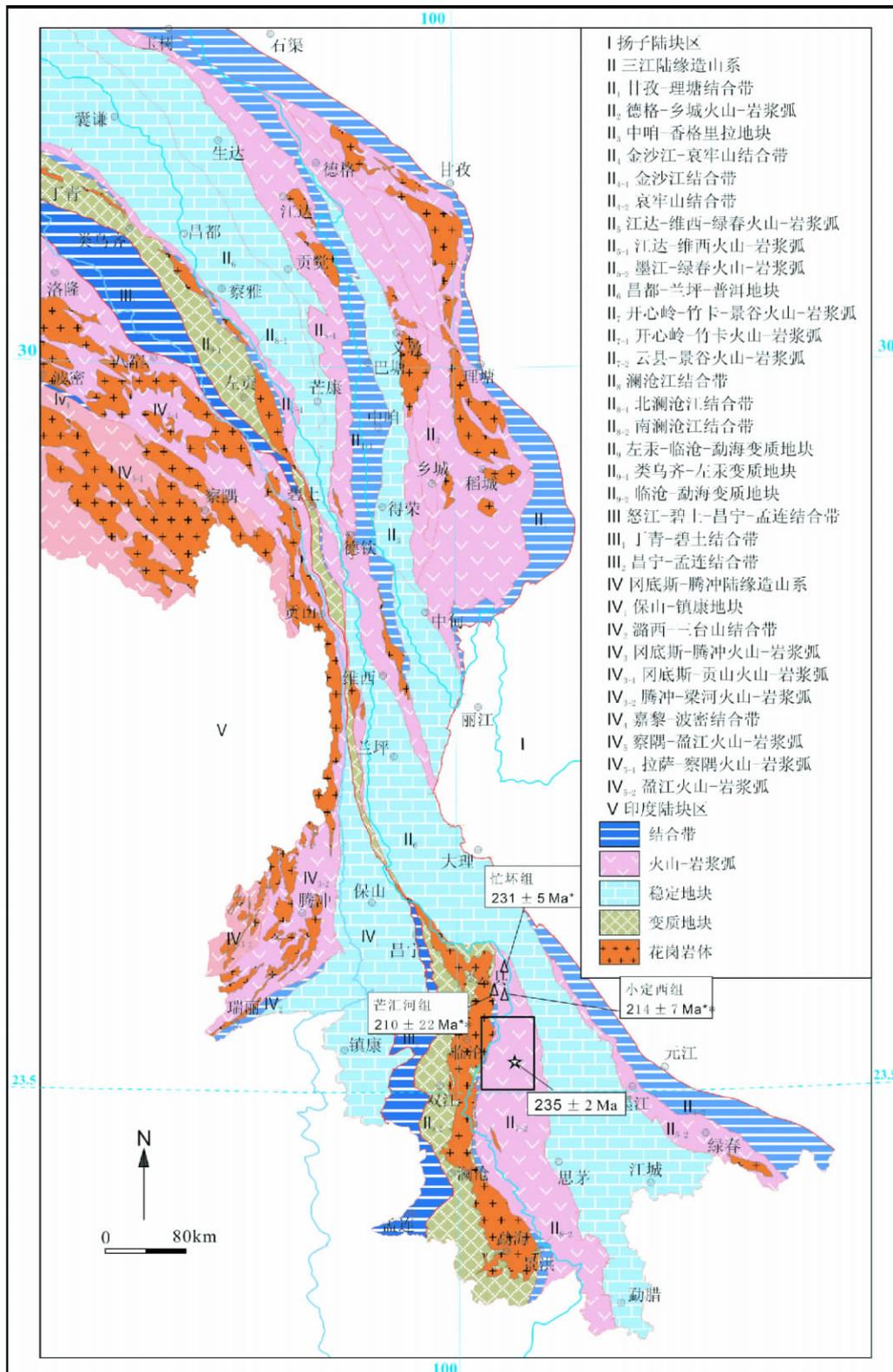


图1 中国西南三江构造带地质简图(* 资料据彭头平等 2006; ** 资料据 Wang et al. ,2010)

Fig.1 Simplified geological map of the Sanjiang area in Southwest China (* data after Peng et al. ,2006; ** data after Wang et al. ,2010)

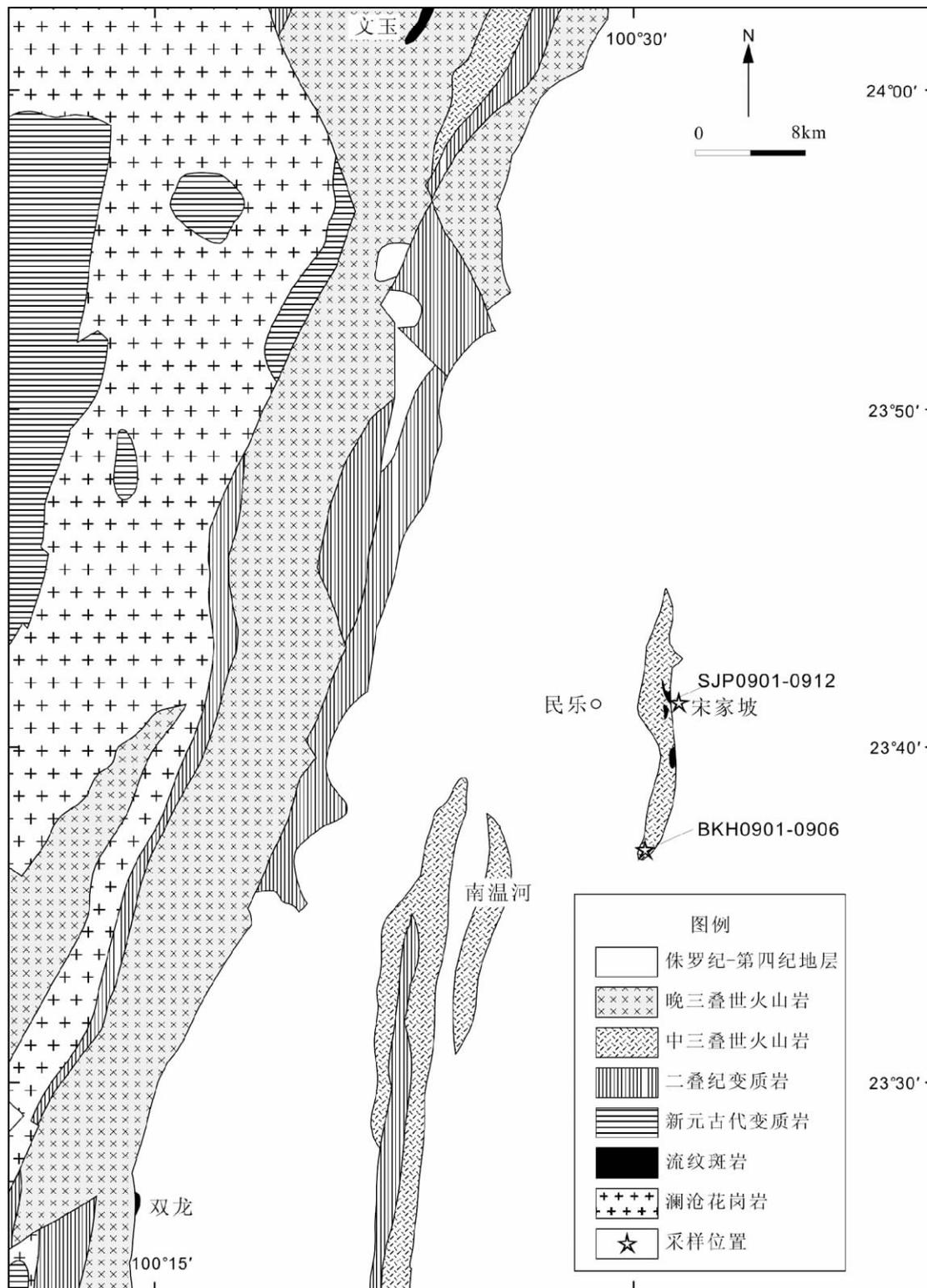


图2 云南景谷民乐铜矿床地质简图(据云南省地质局,1983^①修改)

Fig.2 Simplified geological map of the Minle copper deposit in the Jinggu area , Yunnan Province

① 云南省地质局. 1983. 中华人民共和国云南景谷幅区域地质调查报告 (1 : 200000)

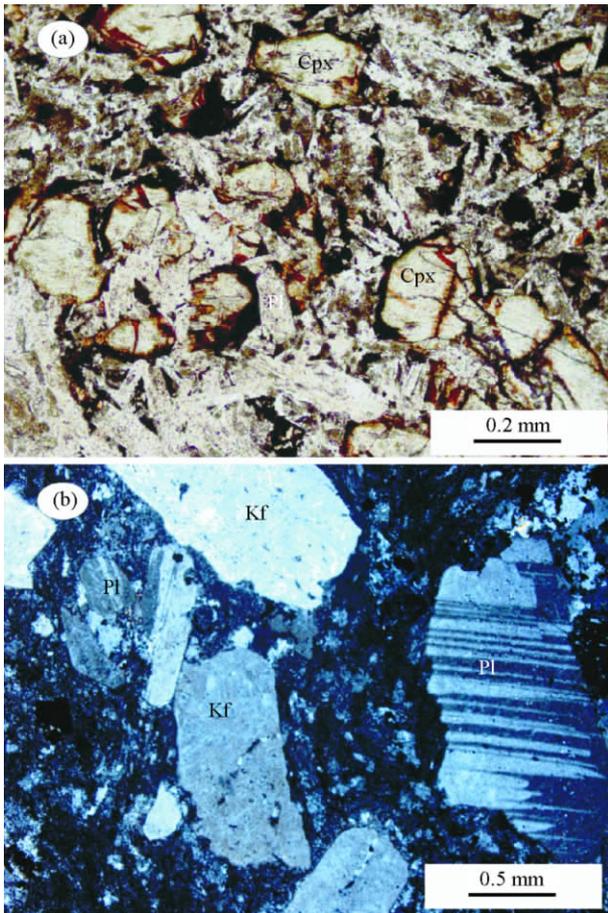


图3 民乐铜矿床中玄武岩和流纹斑岩的显微镜下照片 (a) 玄武岩样品 BKH0905, 单偏光; (b) 流纹斑岩样品 SJP0901, 正交偏光。Cpx-单斜辉石; Pl-斜长石; Kf-钾长石
Fig. 3 Photomicrographs of the representative basalt (a) and rhyolite porphyry (b) from the Minle copper deposit in the Jinggu area

中(徐晓春等, 2004; 田宗春等, 2006)。这些岩石呈岩盘状侵入于宋家坡组第一段粗面质(集块)角砾熔岩与流纹质熔结凝灰岩和晶屑凝灰岩中, 厚 70 ~ 160m。这些流纹斑岩为灰红色, 具流纹构造和块状构造, 斑状结构; 其斑晶主要由斜长石 (>35%) 和钾长石 (2% ~ 3%) 组成, 基质主要由微细粒石英 (约 20%)、玻璃质隐晶 (2% ~ 3%) 和绢云母 (2% ~ 3%) 组成 (图 3b)。与铜矿化有关的蚀变主要为钾硅化蚀变, 其矿石矿物中硫化物以辉铜矿、兰辉铜矿、铜蓝为主, 其次为黄铜矿、黄铁矿。

3 分析方法

本研究进行锆石 SIMS U-Pb 定年所选的锆石采于民乐铜矿床中宋家坡矿区赋矿的流纹斑岩 (SJP0901; N 23°41' 21.7", E 100°31'35.3")。为分选锆石, 首先对样品粗碎, 再采

用重选和磁选的方法从样品中分选出锆石颗粒, 然后在双目镜下将具代表性的锆石颗粒和锆石标样一起黏贴在环氧树脂表面, 抛光后将待测锆石做透射光、反射光显微照相和阴极发光 (CL) 照相, 以检查锆石的外部 and 内部结构。挑选出干净、透明、无裂纹、没有包裹体、较自形的锆石进行测定。锆石 U-Pb 定年在中国科学院地质与地球物理研究所离子探针实验室的 Cameca IMS-1280 型二次离子质谱仪 (SIMS) 上进行, 详细的分析流程见 Li *et al.* (2009)。锆石样品的 U-Th-Pb 比值和绝对含量用标准锆石 91500 (Wiedenbeck *et al.*, 1995) 进行校正。由于测得的普通 Pb 含量非常低, 可以认为普通 Pb 主要来源于制样过程中带入的表面 Pb 污染, 现代地壳的平均 Pb 同位素组成 (Stacey and Kramers, 1975) 作为普通 Pb 组成进行校正。单点分析的同位素比值及年龄的误差为 1σ , U-Pb 平均年龄的误差为 2σ 。

主量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素重点实验室完成, 采用 X 荧光光谱法, 测试仪器为 Rigaku ZSK100e 型荧光光谱仪, 分析过程类似于 Li *et al.* (2000, 2002, 2005) 将 0.5g 样品和 4g $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 制成玻璃片后进行 XRF 测试。样品的烧失量 (LOI) 为将干燥的样品在 1000°C 下灼烧 1h 所损失的重量百分率。主量元素分析精度在 1% ~ 5%。微量元素分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成, 分析仪器为 PE ELAN-DRC-e 型 ICP-MS, 分析过程见 Qi *et al.* (2000)。样品前处理过程如下: 称取 50mg 样品放入带不锈钢外套的密封装置中, 加入 1mL HF 和 0.5mL HNO_3 , 加盖后放入烘箱中, 在 200°C 下分解 48h。取出冷却后在电热板上低温蒸干, 加入 1mL HNO_3 再蒸干, 重复 1 次。然后加入 2mL HNO_3 和 5mL 蒸馏水, 同时加入 1mL $1 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ Rh 的内标溶液, 重新加盖后在 130°C 溶解残渣 3h, 取出冷却后加入转移至 50mL 离心管中上机测试。微量元素分析精度优于 5%。

样品的 Nd 同位素的化学分离和测试均在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。分析流程为: 称取粉末样品约 100mg (200 目以下) 于 Teflon 闷罐中, 加入纯化的 2mL HF、0.3mL HClO_4 和 1mL HNO_3 于 100°C 电热板上溶解 1w 蒸干, 加入纯化的 6mL 6N HCl 蒸干, 加入纯化的 1mL 2.5N HCl 并移至离心管中静置过夜, 离心, 取清液置于 Rb-Sr 交换柱 (AG50w × 12, 100 ~ 200 目) 分离 Sr 和稀土, 通过 Sm-Nd 交换柱 (P507) 分离 Nd 蒸干, 点样后上机测试。测试仪器为 Thermo Fisher 公司生产的 Triton 型热电离子质谱仪。Nd 同位素质量分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 校正。Nd 同位素的国际标样 La Jolla 和 JNDi-1 测定的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值分别为 $0.511841 \pm 3 (2\sigma)$ 、 $0.512104 \pm 5 (2\sigma)$ 。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

宋家坡组流纹斑岩样品 SJP0901 采于民乐矿床的宋家

表 1 云南民乐铜矿床中流纹斑岩(样品 SJP0901)的 Cameca SIMS 锆石 U-Pb 年龄

Table 1 Cameca SIMS zircon U-Pb isotopic analyses for rhyolite porphyry (sample SJP0901) from the Minle copper deposit of Yunnan Province

Spot	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	Th/U	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$ measured	f_{206} (%)	Isotopic ratio						Age(Ma)
						$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm 1\sigma$ (%)	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$ (%)	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$ (%)	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}} \pm 1\sigma$
1	553	373	0.674	19542	0.03	0.05201	2.09	0.26558	2.88	0.0370	1.98	234.4 \pm 4.6
2	476	222	0.467	2202	0.03	0.05012	3.56	0.24892	3.89	0.0360	1.57	228.1 \pm 3.5
3	554	447	0.806	28142	0.00	0.05087	2.25	0.26856	2.71	0.0383	1.52	242.2 \pm 3.6
4	507	427	0.843	9030	0.00	0.04890	2.49	0.24537	2.92	0.0364	1.51	230.4 \pm 3.4
5	600	256	0.427	22926	0.00	0.05138	2.19	0.27533	2.66	0.0389	1.50	245.8 \pm 3.6
6	556	504	0.906	9215	0.00	0.05127	2.33	0.25792	2.77	0.0365	1.50	231.0 \pm 3.4
7	241	198	0.820	2695	0.00	0.04819	5.71	0.23679	6.06	0.0356	2.03	225.7 \pm 4.5
8	972	1037	1.066	24926	0.14	0.05023	1.61	0.25318	2.21	0.0366	1.51	231.4 \pm 3.4
9	567	417	0.736	9907	0.00	0.05055	2.28	0.25494	2.74	0.0366	1.51	231.6 \pm 3.4
10	447	317	0.708	11169	0.00	0.05042	2.60	0.25663	3.01	0.0369	1.51	233.7 \pm 3.5
11	677	418	0.617	4704	0.03	0.04887	3.52	0.24935	3.94	0.0370	1.78	234.2 \pm 4.1
12	341	156	0.457	19233	0.10	0.05140	2.41	0.26908	2.84	0.0380	1.51	240.2 \pm 3.6
13	416	239	0.574	10596	0.00	0.05045	2.85	0.26110	3.22	0.0375	1.50	237.5 \pm 3.5
14	906	668	0.738	10781	0.00	0.05117	1.60	0.26198	2.21	0.0371	1.52	235.0 \pm 3.5
15	384	169	0.440	36723	0.00	0.05170	2.33	0.26381	2.77	0.0370	1.50	234.3 \pm 3.5
16	566	399	0.705	9685	0.18	0.05016	2.28	0.25315	2.73	0.0366	1.50	231.7 \pm 3.4
17	829	730	0.880	45512	0.04	0.05039	1.56	0.26051	2.16	0.0375	1.50	237.3 \pm 3.5
18	418	218	0.522	40597	0.00	0.05161	2.15	0.26271	2.63	0.0369	1.50	233.7 \pm 3.5

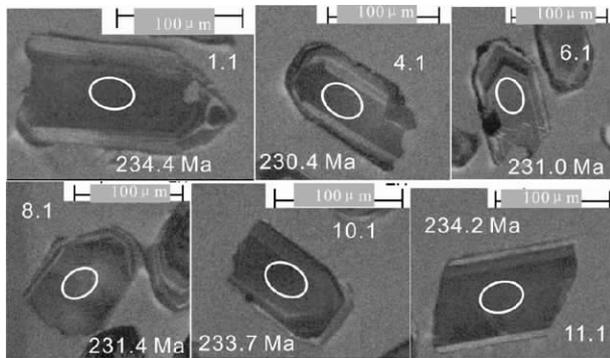
注: 误差为 1σ f_{206} 为普通 ^{206}Pb 占 ^{206}Pb 的百分率; 普通 Pb 用 ^{204}Pb 校正

图 4 民乐铜矿床中流纹斑岩(样品 SJP0901)的代表性锆石的阴极发光图像

Fig. 4 Representative CL images of zircon grains for rhyolite porphyry (sample SJP0901) from the Minle copper deposit in the Jinggu area

坡矿区, 该类岩石与铜矿化非常密切且赋存铜矿化, 对于认识民乐铜矿床形成的动力学背景有重要意义。该岩石中的锆石颗粒多数呈自形状, 长度达 $50 \sim 150 \mu\text{m}$, 长宽比大多为 $1:1$ 至 $2:1$ 。多数锆石颗粒呈透明、棱柱状, 阴极发光显示其内部呈简单的生长环带(图 4)。对 18 个锆石颗粒进行了 U-Pb 同位素分析(表 1)。这些锆石的 U 含量为 $241 \times 10^{-6} \sim 972 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $156 \times 10^{-6} \sim 1037 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 $0.43 \sim 1.07$ 。所有 18 个分析点的普通 Pb 含量非常低

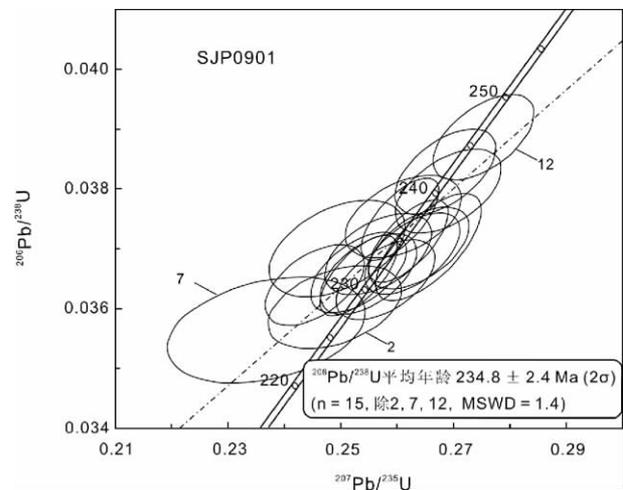


图 5 民乐铜矿床中流纹斑岩(样品 SJP0901)的 SIMS 锆石 U-Pb 年龄曲线谐和图

Fig. 5 SIMS zircon U-Pb concordia diagrams for rhyolite porphyry (sample SJP0901) from the Minle copper deposit in the Jinggu area

($f_{206} = 0 \sim 0.18\%$) 多数点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄在误差范围内谐和(图 5)。除去 3 个分析点, 15 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $234.8 \pm 2.4 \text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.4, 2\sigma$) 这一年龄可代表民乐矿区流纹斑岩的形成年龄。

表2 云南民乐铜矿床中玄武岩和流纹斑岩的主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)组成Table 2 Major element (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) data for basalts and rhyolite porphyries from the Minle copper deposit of Yunnan Province

样品号	BKH0901	BKH0902	BKH0903	BKH0904	BKH0905	BKH0906	SJP0901	SJP0902	SJP0903
岩石类型	玄武岩						流纹斑岩		
SiO ₂	51.14	44.82	46.14	47.34	45.38	42.65	66.29	68.81	68.45
TiO ₂	0.90	0.98	0.96	0.98	1.01	0.85	0.49	0.45	0.47
Al ₂ O ₃	17.07	16.64	16.94	17.12	16.92	16.04	16.41	15.51	15.84
Fe ₂ O ₃	11.17	11.97	10.86	11.65	11.39	10.86	4.42	3.93	3.75
MnO	0.24	0.39	0.40	0.33	0.38	0.26	0.02	0.03	0.02
MgO	3.67	5.91	5.81	5.08	4.83	3.02	0.28	0.22	0.12
CaO	4.20	4.74	6.53	5.41	8.30	12.83	0.28	0.25	0.30
Na ₂ O	6.18	8.81	5.22	5.57	4.97	4.36	4.71	4.98	5.87
K ₂ O	1.07	0.55	0.50	0.46	0.46	0.14	6.07	4.64	4.17
P ₂ O ₅	0.14	0.16	0.15	0.16	0.18	0.16	0.12	0.11	0.11
LOI	4.43	5.78	6.80	6.21	6.53	9.51	0.74	0.90	0.76
Total	100.22	100.76	100.31	100.30	100.35	100.69	99.82	99.82	99.87
Mg [#]	39.4	49.5	51.4	46.3	45.7	35.6	11.1	10.0	6.1
Sc	28.3	28.5	27.3	29.8	30.7	28.0	9.84	8.63	9.57
V	181	198	166	235	192	248	24.7	24.6	27.0
Cr	165	174	159	179	176	159	—	—	—
Co	28.9	44.0	44.7	45.0	48.2	28.0	0.99	1.41	1.07
Ni	117	110	106	108	115	72.8	3.50	2.83	3.15
Cu	15.5	15.1	10.1	18.6	14.6	15.9	101	217	112
Zn	167	272	214	210	230	175	27.0	42.1	42.9
Ga	14.6	14.2	13.4	13.9	15.30	15.70	13.9	14.8	14.3
Rb	48.2	22.8	21.5	18.8	19.40	4.60	89.3	99.5	84.7
Sr	600	333	349	254	344	183	180	377	180
Y	19.1	19.4	18.6	18.8	20.5	19.2	22.3	27.5	21.1
Zr	77.7	80.6	69.2	79.8	90.0	74.0	266	262	264
Nb	4.27	4.63	3.85	4.54	5.10	4.15	16.0	16.0	15.8
Cs	16.1	9.37	9.24	9.22	7.34	11.3	3.02	4.27	2.91
Ba	246	118	110	107	128	66.3	1170	1300	1130
La	8.83	8.04	6.76	7.75	9.27	6.72	30.7	43.1	27.8
Ce	19.7	18.2	15.5	17.4	19.8	15.8	65.9	69.7	52.7
Pr	2.63	2.43	2.25	2.27	2.58	2.11	7.07	9.73	6.14
Nd	11.5	11.0	10.0	10.2	11.2	9.49	25.5	36.6	21.7
Sm	3.01	2.79	2.66	2.65	2.84	2.41	5.10	7.06	4.66
Eu	1.09	0.95	0.94	1.00	1.09	0.93	1.17	1.65	0.99
Gd	3.18	3.07	2.80	3.02	3.35	2.98	4.24	5.55	3.78
Tb	0.62	0.60	0.56	0.53	0.57	0.51	0.72	0.94	0.67
Dy	3.51	3.53	3.49	3.24	3.51	3.29	3.80	4.88	3.80
Ho	0.79	0.84	0.80	0.79	0.85	0.79	0.86	1.09	0.89
Er	2.25	2.47	2.19	2.17	2.47	2.20	2.59	3.20	2.60
Tm	0.31	0.34	0.32	0.33	0.35	0.32	0.39	0.47	0.38
Yb	2.13	2.31	2.19	2.18	2.32	2.18	2.81	3.26	2.88
Lu	0.31	0.36	0.32	0.32	0.36	0.32	0.45	0.50	0.46
Hf	2.01	2.16	1.82	1.87	2.33	1.85	6.80	6.79	6.78
Ta	0.29	0.34	0.28	0.31	0.35	0.29	1.22	1.19	1.21
Pb	57.1	67.1	54.3	70.8	67.7	85.1	19.0	35.3	20.1
Th	1.05	0.76	0.67	0.72	1.28	0.66	18.1	19.1	18.3
U	1.88	1.09	0.72	1.18	1.24	1.17	3.53	3.65	3.50
T _{Zr} (°C)							881	884	881

续表 2

Continued Table 2

样品号	SJP0904	SJP0905	SJP0906	SJP0907	SJP0908	SJP0909	SJP0910	SJP0911	SJP0912
岩石类型	流纹斑岩								
SiO ₂	70.00	65.26	68.20	68.36	66.39	73.16	70.73	68.85	63.49
TiO ₂	0.43	0.51	0.45	0.43	0.51	0.35	0.32	0.45	0.73
Al ₂ O ₃	15.27	14.88	15.96	15.10	15.93	12.94	14.36	15.78	15.16
Fe ₂ O ₃	1.91	4.88	3.83	2.46	3.92	3.12	3.38	3.57	6.35
MnO	0.04	0.06	0.02	0.05	0.10	0.03	0.03	0.02	0.04
MgO	0.17	0.30	0.20	0.29	0.47	0.24	0.22	0.13	0.45
CaO	1.15	2.10	0.27	1.60	0.76	0.13	0.18	0.27	1.73
Na ₂ O	4.81	4.18	5.77	4.49	4.71	1.97	3.21	5.70	5.11
K ₂ O	4.38	5.17	4.40	4.84	4.89	6.52	6.32	4.17	4.40
P ₂ O ₅	0.10	0.13	0.12	0.11	0.13	0.06	0.06	0.11	0.20
LOI	1.50	2.35	0.68	2.06	2.03	1.02	0.86	0.82	2.22
Total	99.75	99.81	99.89	99.78	99.83	99.54	99.66	99.87	99.90
Mg [#]	15.0	10.9	9.2	18.7	19.1	13.0	11.2	6.7	12.2
Sc	8.22	3.23	10.4	9.42	11.4	6.90	7.79	9.71	14.9
V	12.4	29.6	19.5	20.8	40.7	16.2	13.8	38.6	126
Cr	—	3.33	3.51	1.33	4.04	—	2.21	—	6.10
Co	2.27	2.86	1.44	9.38	10.90	1.37	1.24	1.75	3.94
Ni	5.84	4.50	4.78	6.46	7.20	3.12	4.41	3.45	5.40
Cu	2030	18.7	82.7	1210	18.6	128	83.2	166	296
Zn	51.1	44.1	54.0	54.3	122	56.8	52.5	42.1	58.8
Ga	16.5	14.4	17.1	14.5	17.8	10.6	8.2	17.3	21.2
Rb	101	94.4	113	106	124	162	131	141	157
Sr	258	123	207	257	205	324	150	285	248
Y	23.1	15.8	23.7	23.1	21.8	27.1	21.6	23.1	21.9
Zr	250	229	263	229	248	234	219	266	190
Nb	14.8	14.0	15.7	14.2	14.5	14.4	13.5	17.3	12.7
Cs	4.35	8.41	6.37	5.12	7.82	6.01	3.76	6.42	19.7
Ba	1050	1350	1080	1470	1520	2270	1850	1830	1120
La	23.2	17.7	46.1	20.7	19.6	16.3	45.1	33.8	37.0
Ce	49.2	39.4	78.7	45.4	41.8	34.6	70.0	64.0	72.6
Pr	6.21	4.52	8.94	5.65	5.34	4.97	8.30	8.61	8.36
Nd	24.1	17.9	32.1	22.0	20.9	20.8	30.4	34.5	31.1
Sm	5.17	3.93	6.06	4.64	4.49	5.42	5.68	7.12	6.11
Eu	1.25	0.99	1.47	1.06	1.13	1.10	1.16	1.86	1.23
Gd	3.91	3.44	5.05	3.75	3.52	4.44	4.28	5.69	4.95
Tb	0.70	0.60	0.84	0.68	0.64	0.81	0.73	0.95	0.81
Dy	3.95	3.22	4.22	3.69	3.70	4.70	3.75	4.56	4.22
Ho	0.90	0.71	0.95	0.89	0.89	1.06	0.85	0.94	0.89
Er	2.69	2.04	2.72	2.62	2.76	3.12	2.60	2.72	2.49
Tm	0.41	0.29	0.42	0.42	0.41	0.46	0.41	0.42	0.34
Yb	3.01	2.10	2.89	2.88	2.98	3.22	2.84	2.97	2.41
Lu	0.47	0.35	0.48	0.45	0.46	0.51	0.44	0.47	0.38
Hf	6.52	6.19	7.23	6.22	6.52	6.68	6.08	7.26	5.22
Ta	1.17	1.08	1.25	1.16	1.10	1.13	1.09	1.34	0.91
Pb	105	30.4	35.3	42.9	105	43.5	22.0	35.6	41.0
Th	18.0	10.8	18.5	16.8	18.1	18.3	16.4	19.7	12.3
U	5.83	3.52	3.63	3.50	3.86	3.72	3.30	3.16	4.28
T _{Zr} (°C)	875	852	881	860	875	881	869	883	833

注: Mg[#] = 100 * molar MgO / (Mg + FeO) 假设 FeO^T = 0.9 × Fe₂O₃. T_{Zr}为锆石的饱和温度计 (据 Watson and Harrison, 1983). LOI 为烧失量

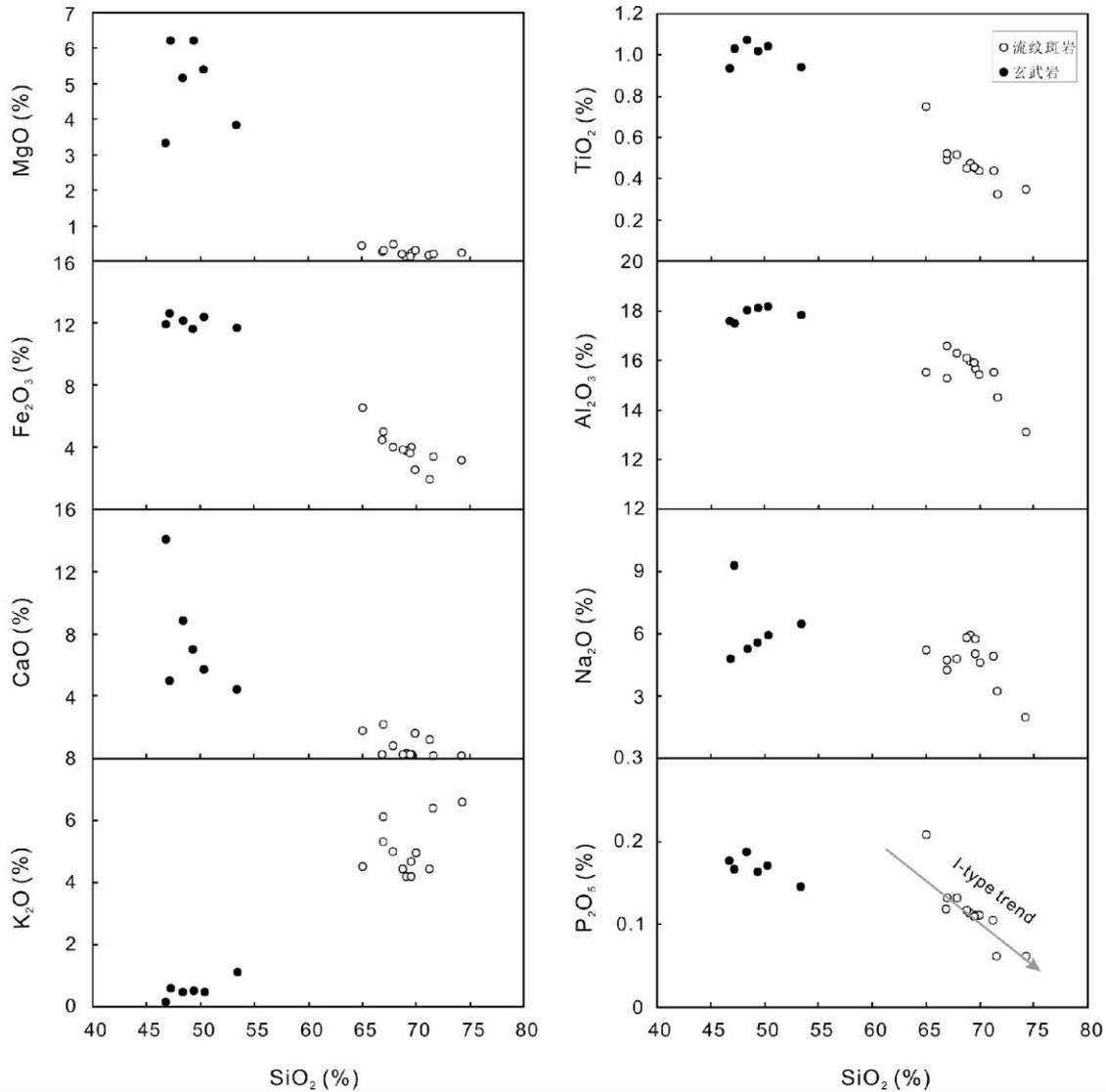


图6 民乐铜矿床中玄武岩和流纹斑岩的主要氧化物与 SiO₂ 的相关图

Fig. 6 Selected variation diagrams of major oxides and silica for basalts and rhyolite porphyries from the Minle copper deposit

4.2 主微量元素和 Nd 同位素组成

民乐矿区宋家坡组玄武岩和流纹斑岩的主量和微量元素分析结果见表2。考虑到所研究的岩石遭受了一定程度的蚀变,因此将主要氧化物含量校正为无挥发分、无水的干岩浆体系进行讨论。

4.2.1 玄武岩的主微量元素和 Nd 同位素组成

宋家坡组玄武岩 SiO₂ 含量为 46.8% ~ 53.4%, MgO 为 3.32% ~ 6.23%, TiO₂ 为 0.94% ~ 1.07%, CaO 为 4.39% ~ 14.07%, Mg[#] 为 36 ~ 61, 并显示出较高的 Fe₂O₃ (11.6% ~ 12.6%)、Al₂O₃ (17.5% ~ 18.2%) 和 Na₂O (4.28% ~ 9.28%) 含量, 而 K₂O (0.15% ~ 1.12%) 含量较低(图6)。在 Harker 图上(图6), 随 SiO₂ 含量的增加, MgO、CaO 和 P₂O₅ 含量减小, TiO₂、Fe₂O₃ 和 Al₂O₃ 含量变化小, 而 Na₂O 和

K₂O 含量明显增加。这些玄武岩具有较低的 Nb/Y 比值 (0.21 ~ 0.25), 位于亚碱性玄武岩的区域(图7)。

上述玄武岩具较低的 REE 总量 (50.1 × 10⁻⁶ ~ 60.6 × 10⁻⁶), 且在球粒陨石标准化的稀土元素图解上表现为轻稀土元素轻微富集 (La_N = 21.7 ~ 29.9, (La/Yb)_N = 2.1 ~ 2.8)、重稀土元素相对平坦 ((Gd/Yb)_N = 1.6 ~ 2.1) 的模式, 没有明显的 Eu 异常 (Eu/Eu* = 0.99 ~ 1.08) (图8a)。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上(图8b), 这些岩石显示出轻微的 Nb-Ta 亏损和 Sr 正异常的特征。

这些玄武岩的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值在 0.512733 至 0.512753 之间, 对应的 ε_{Nd}(t) 值为 +2.9 ~ +3.5 之间(表3)。

4.2.2 流纹斑岩的主微量元素和 Nd 同位素组成

宋家坡组流纹斑岩具有较高的 SiO₂ (65.0% ~ 74.3%)、Na₂O (2.00% ~ 5.93%)、K₂O (4.21% ~ 6.62%) 和 Al₂O₃

表3 云南民乐铜矿床中玄武岩和流纹斑岩的 Nd 同位素组成

Table 3 Nd isotopic data for the gabbros of for basalts and rhyolite porphyries from the Minle copper deposit of Yunnan Province

Sample No.	Sm($\times 10^{-6}$)	Nd($\times 10^{-6}$)	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (2σ)	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (i)	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM} (Ga)	$t_{2\text{DM}}$ (Ga)
BKH0902	2.79	11.00	0.512741 (2)	0.5125051	3.3		
BKH0903	2.66	10.00	0.512733 (2)	0.5124857	2.9		
BKH0904	2.65	10.20	0.512738 (1)	0.5124964	3.1		
BKH0906	2.41	9.49	0.512753 (2)	0.5125169	3.5		
SJP0901	5.10	25.50	0.512448 (4)	0.5122620	-1.4	1.15	1.12
SJP0904	5.17	24.10	0.512440 (2)	0.5122405	-1.9	1.29	1.15
SJP0905	3.93	17.90	0.512483 (2)	0.5122789	-1.1	1.25	1.09
SJP0906	6.06	32.10	0.512483 (2)	0.5123075	-0.55	1.02	1.05
SJP0908	4.49	20.90	0.512495 (2)	0.5122952	-0.78	1.19	1.07
SJP0910	5.68	30.40	0.512483 (2)	0.5123093	-0.51	1.01	1.05

注: 球粒陨石均一储库(CHUR) 值为 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.1967$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512638$, $\lambda_{\text{Sm}}=6.54 \times 10^{-12} \text{ year}^{-1}$ (Lugmair and Harti, 1978). 这些岩石的 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 假设形成年龄为 235Ma 计算. 单阶段模式年龄(t_{DM}) 和两阶段模式年龄($t_{2\text{DM}}$) 计算参考 Jahn *et al.* (1999)

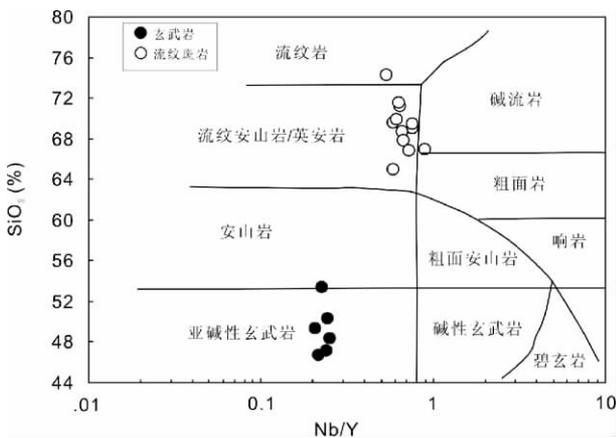


图7 民乐铜矿床中玄武岩和流纹斑岩的 Nb/Y 与 Zr/TiO₂ 关系图(据 Winchester and Floyd, 1977)

Fig. 7 Plots of Nb/Y vs. Zr/TiO₂ for classification of basalts and rhyolite porphyries from the Minle copper deposit (after Winchester and Floyd, 1977)

(13.1% ~ 16.6%), 较低的 MgO (0.12% ~ 0.48%)、Fe₂O₃ (1.95% ~ 6.51%)、TiO₂ (0.32% ~ 0.75%) 和 CaO (0.13% ~ 2.16%) (图 6)。在 Harker 图上(图 6) 随 SiO₂ 含量的增加 MgO、TiO₂、Fe₂O₃、Al₂O₃、CaO、Na₂O 和 P₂O₅ 含量减小, 而 K₂O 含量明显增加。这些岩石的 A/NK 值为 1.12 ~ 1.26, A/CNK 值为 1.03 ~ 1.24, 多数属于过铝质岩石(图 9)。流纹斑岩具有较高的 Nb/Y 比值(0.53 ~ 0.89), 落入弱碱性的流纹安山岩和流纹岩的区域(图 7)。

这些样品的 REE 总量为 $97.2 \times 10^{-6} \sim 191 \times 10^{-6}$, 且表现为表现为轻稀土元素(LREE) 明显富集 ($\text{La}_N = 52.6 \sim 149$, ($\text{La}/\text{Yb})_N = 3.4 \sim 10.8$)、重稀土元素(HREE) 相对平坦(($\text{Gd}/\text{Yb})_N = 0.95 \sim 1.7$) 的模式, 并有轻微的 Eu 负异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.68 \sim 0.89$) (图 8c)。在微量元素蛛网图上(图 8d) 其显示出较明显的 Nb-Ta、Sr、P 和 Ti 亏损的特征。

上述流纹斑岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值变化比较小(0.512440 ~ 0.512495), 对应的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-1.9 \sim -0.51$, 两阶段亏损地幔的 Nd 模式年龄($t_{2\text{DM}}$) 为 1.05 ~ 1.15Ga(表 3)。

5 讨论

5.1 玄武岩的成因

民乐矿区宋家坡组玄武岩具有低 MgO 和高 Al₂O₃ 的特征, 总体上显示出亚碱性玄武岩特征。岩石的 MgO、CaO 含量随 SiO₂ 含量的增加而减小, 而 Fe₂O₃ 含量随 SiO₂ 含量的增加没有明显的变化(图 6), 表明岩石形成过程中存在单斜辉石的结晶分异作用。TiO₂、Fe₂O₃ 含量随 SiO₂ 含量的增加而没有明显的变化, 表明形成过程中不存在 Fe-Ti 氧化物的分离作用。同时, 这些岩石显示出轻微的 Sr 正异常, 但没有明显的 P-Ti 和 Eu 异常的特征, 而且岩石的 Al₂O₃ 含量随 SiO₂ 含量的增加而变化很小, 表明形成过程中没有斜长石分离和堆积作用, Sr 正异常特征可能是继承了富斜长石的地幔源区特征(Rehkämper and Hofmann, 1997; Sobolev *et al.*, 2000)。可见, 玄武岩形成过程中岩浆主要经历了单斜辉石的分异作用。

虽然玄武岩的碱含量(Na₂O + K₂O = 4.93% ~ 9.86%) 比较高, 但其具有较低的 Nb/Y 比值, 这可能是由于岩石遭受了一定程度的钠长石化的结果(图 7)。玄武岩显示出 Nb-Ta 轻微亏损的特征(图 8b), 暗示有少量地壳组分的加入。在 Nb/Th 与 Nb/La 关系图上(图 10), Nb-Ta 显示轻微亏损很可能是由于岩浆中加入了富 Th 和富 La 而亏损 Nb 的组分, 即混染了少量上地壳成分(Rudnick and Fountain, 1995)。

该区的玄武岩在球粒陨石标准化的稀土元素图解上显示出比较平坦的 REE 模式, 低 La/Yb 比值主要反映了地幔源区经历了较高程度部分熔融, 或者地幔的主要残余相为尖晶石(Deniel, 1998)。因 Yb 在石榴石中的分配系数($D_{\text{Yb}} = 6.6$) 远大于 La 的分配系数($D_{\text{La}} = 0.0016$) (Johnson, 1998),

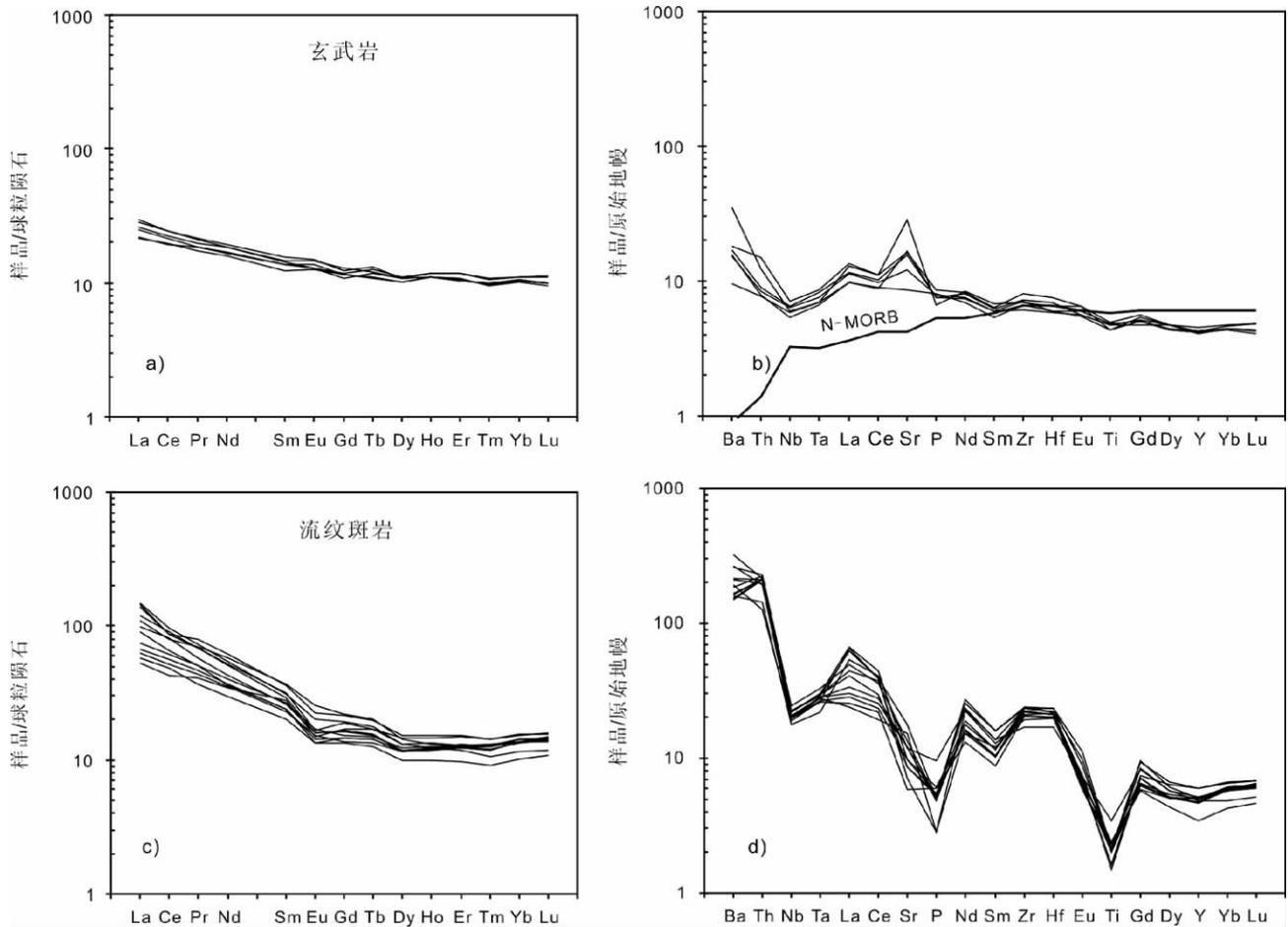


图8 民乐铜矿床中玄武岩(a, b)和流纹斑岩(c, d)的球粒陨石标准化的稀土元素模式图和原始地幔标准化的微量元素蛛网图(球粒陨石标准值据 Boynton, 1984; 原始地幔标准值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE diagrams and primitive mantle-normalized incompatible trace element spidergrams for basalts (a, b) and rhyolite porphyries (c, d) from the Minle copper deposit (chondrite-normalizing values after Boynton, 1984; primitive mantle-normalizing values after Sun and McDonough, 1989)

因此在地幔中有少量的石榴石残留都会导致 REE 的强烈分异造成 HREE 亏损。这些岩石具有高的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值 (+2.9 ~ +3.5), 但其微量元素特征与 N-MORB 明显不同(图 8b), 说明不太可能来源于 N-MORB 地幔源区。因此, 本文认为原始岩浆来源于长期亏损、富斜长石而贫石榴石的尖晶石地幔源区部分熔融, 其后经历了单斜辉石的结晶分异而形成宋家坡组玄武岩。

5.2 流纹斑岩的成因

民乐矿区的宋家坡组流纹斑岩显示出较高的 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 和 Zr 含量 ($190 \times 10^{-6} \sim 266 \times 10^{-6}$), 但这些岩石的 Ca ($8.21 \times 10^{-6} \sim 21.2 \times 10^{-6}$)、Rb ($84.7 \times 10^{-6} \sim 162 \times 10^{-6}$)、Nb ($12.7 \times 10^{-6} \sim 17.3 \times 10^{-6}$)、REE ($97 \times 10^{-6} \sim 191 \times 10^{-6}$) 和 Y ($15.8 \times 10^{-6} \sim 27.5 \times 10^{-6}$) 等含量比较低(表 2), 与典型的 A 型花岗岩明显不同(Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987), 而显示出 I 型花岗岩的特征(图 6、图 11)。

该区流纹斑岩的主要氧化物和微量元素成分的变化暗示岩石形成过程中经历不同程度的结晶分异作用(图 6)。这些岩石具有较低的 MgO 和 Fe_2O_3 含量, 是由于经历了富 MgO 和 Fe_2O_3 (如角闪石等) 矿物的分异作用。从其比较平坦的 HREE 配分模式来看, 角闪石很可能是 1 种重要分异相, 因为中-酸性岩浆经历角闪石的分异不会造成 HREE 的明显分异(Martin *et al.*, 1994; Han *et al.*, 1997)。流纹斑岩样品显示出较明显的 Sr 负异常、轻微的 Eu 负异常(图 8c, d), 同时 Al_2O_3 、CaO 和 Na_2O 含量随 SiO_2 含量的增加而减小, 而 Ba 和 K_2O 含量随 SiO_2 含量的增加而增加(图 6、图 12a), 说明岩石形成过程中存在一定程度的斜长石分离结晶, 而没有钾长石分异(Wu *et al.*, 2002)。此外, TiO_2 、 Fe_2O_3 和 P_2O_5 含量随 SiO_2 含量的增加而减小, 暗示岩石形成过程中岩浆经历了 Fe-Ti 氧化物和磷灰石的分离作用。此外, 图 7 也暗示这些岩石的原始岩浆很可能是弱碱性的中性-酸性的流纹安山质岩浆。可见, 流纹斑岩形成过程中岩浆已经历

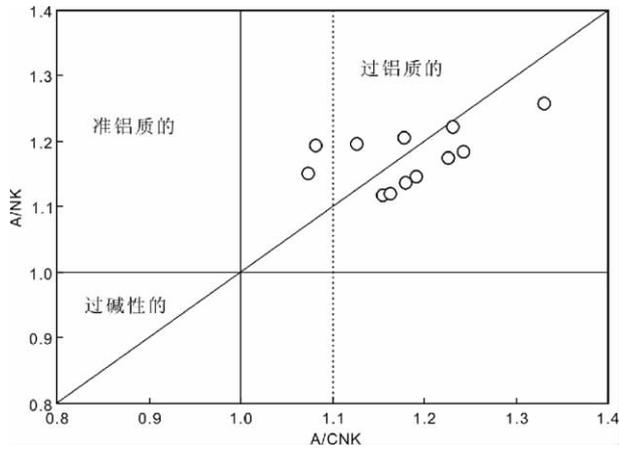


图9 民乐铜矿床中流纹斑岩的 A/NK 与 A/CNK 关系图

$A/CNK = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$ 摩尔比; $A/NK = Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O)$ 摩尔比

Fig. 9 A/NK vs. A/CNK plot showing the peraluminous nature of rhyolite porphyries from the Minle copper deposit

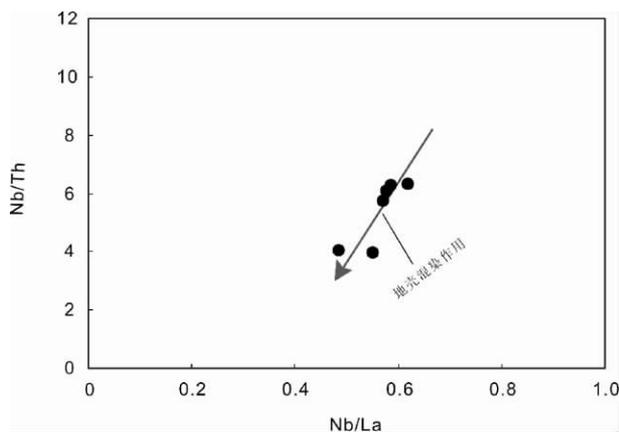


图10 民乐铜矿床中玄武岩的 Nb/Th 与 Nb/La 关系图

Fig. 10 Plots of Nb/Th vs. Nb/La for basalts from the Minle copper deposit

了角闪石、斜长石、少量 Fe-Ti 氧化物和磷灰石等分异作用。

钙碱性的 I 型安山质至长英质岩浆一般认为有 2 种可能: (1) 同时代玄武质岩浆提供的热对镁铁质至中性地壳部分熔融形成; (2) 地幔来源的玄武质岩浆经过进一步的地壳混染和结晶分异作用形成 (Roberts and Clemens, 1993; Li *et al.*, 2007)。尽管民乐矿区的流纹斑岩出露面积非常小, 但其 Nd 同位素 ($\epsilon_{Nd}(t) = -1.9 \sim -0.51$) 与玄武岩的 Nd 同位素 ($\epsilon_{Nd}(t) = +2.9 \sim +3.5$) 相差较大, 表明岩浆不太可能是由单一的玄武质岩浆演化而来, 其中有较多地壳物质的加入。

这些岩石具有较高的 K_2O 含量, 总体上显示出高钾 I 型花岗岩的特征。高钾钙碱性 I 型花岗岩通常认为是由下地

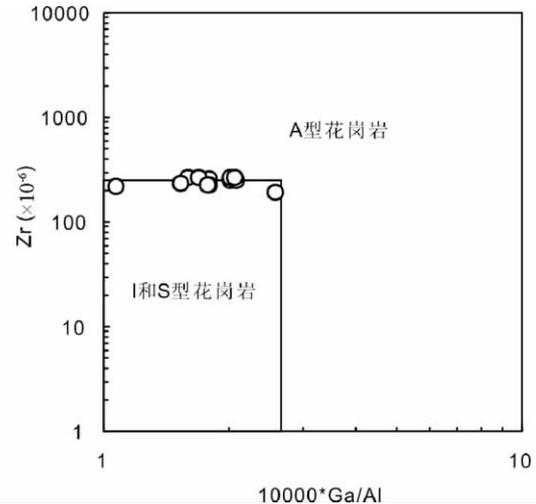


图11 民乐铜矿床中流纹斑岩的 Zr 与 $10000 \times Ga/Al$ 关系图(据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 11 Plots of Zr vs. $10000 \times Ga/Al$ showing rhyolite porphyries from the Minle copper deposit are affinitive to I-type granites from the Minle copper deposit (after Whalen *et al.*, 1987)

壳含水钙碱性至高 K 钙碱性镁铁质至中性变质岩部分熔融形成的 (Roberts and Clemens, 1993)。同时, 流纹斑岩的 t_{2DM} 值 (1.05 ~ 1.15 Ga) 暗示该岩浆很可能来源于中-新元古代镁铁质至中性的下地壳的部分熔融。前人工作得到区域上同时代的忙怀组流纹岩的初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 为 0.7082 ~ 0.7104, 显示出它们主要来源于镁铁质至中性的下地壳部分熔融作用 (彭头平等, 2006)。而民乐矿区流纹斑岩的 Nd 同位素组成暗示这些岩石的原始岩浆中加入了少量的同时代的玄武质岩浆, 即有幔源物质的加入。

由流纹斑岩的 Zr 与 SiO_2 关系图可见 (图 12b), 岩石形成过程中岩浆中的 Zr 已达到饱和状态。我们用 Zr 饱和温度计 (T_{Zr}) (Watson and Harrison, 1983) 可以估算出岩浆温度为 833 ~ 884°C (表 1), 表明在下地壳获得这么高的熔融温度还需要同时代玄武质岩浆提供大量的热。

根据以上讨论, 流纹斑岩的原始岩浆为弱碱性的流纹安山质岩浆, 主要来源于中-新元古代镁铁质-中性的下地壳部分熔融形成的岩浆并加入了少量同时代玄武质岩浆, 其后经过结晶分异作用形成上述流纹斑岩。

5.3 构造和成矿意义

澜沧江火山-侵入岩带东侧广泛发育三叠系火山岩。前人研究确定了该区忙怀组 (T_2m) 火山岩形成于约 231 Ma (彭头平等, 2006), 小定西组 (T_3x) 和芒汇河组 (T_3m) 的形成时代分别为 214 Ma 和 210 Ma (Wang *et al.*, 2010)。但对这些火山岩形成的构造背景仍然存在争论。彭头平等 (2006) 认为忙怀组火山岩很可能形成于碰撞晚期-碰撞后构造环境。而

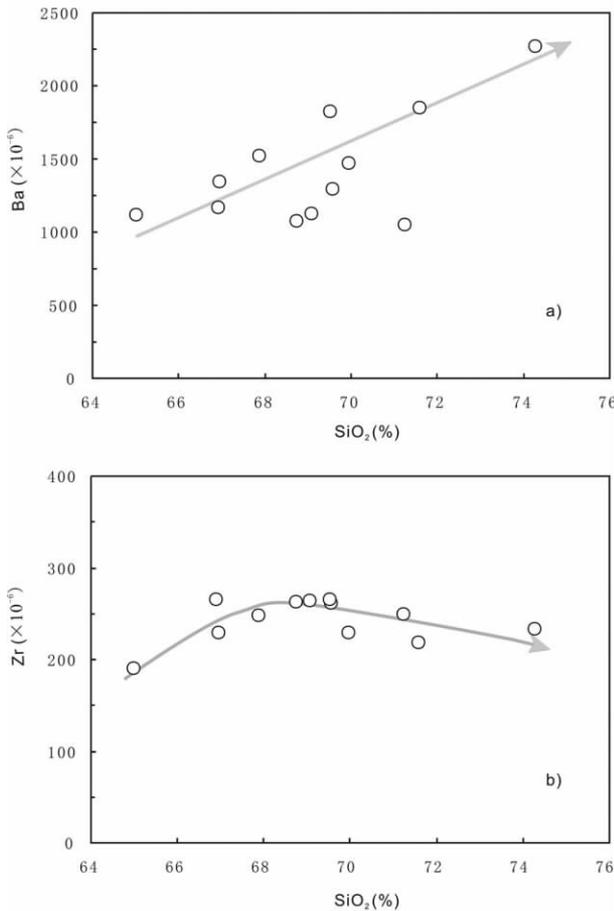


图 12 民乐铜矿床中流纹斑岩的 Ba 与 SiO₂ (a) 和 Zr 与 SiO₂ (b) 关系图

Fig. 12 Plots of Ba vs. SiO₂ (a) and Zr vs. SiO₂ (b) for rhyolite porphyries from the Minle copper deposit

Wang *et al.* (2010) 研究认为小定西组和芒汇河组火山岩比忙怀组火山岩形成约晚 15 ~ 20Ma, 提出忙怀组火山岩可能形成于同碰撞环境, 而小定西组和芒汇河组火山岩形成于碰撞后环境。

民乐矿区中三叠统宋家坡组 (T_{2s}) 玄武岩和流纹斑岩的研究有助于进一步认识澜沧江带火山岩形成的构造背景。在 Ti-Zr-Y 图解 (图 13) 上可以看出, 宋家坡组玄武岩总体上显示出岛弧玄武岩的特征。民乐矿区流纹斑岩也显示出岛弧花岗岩和/或同碰撞花岗岩的特征 (图 14)。上述特征表明, 这些玄武岩和流纹斑岩均显示出岛弧火山岩的特征, 形成时间与区域上忙怀组流纹岩在误差范围内一致, 比小定西组和芒汇河组火山岩形成早约 20Ma。

由于云县-景谷火山-岩浆弧带西侧南澜沧江结合带中高压蓝闪石片岩的形成年龄为 240 ~ 260Ma (彭兴阶和罗万林, 1982), 以及区域缺失下三叠统, 目前普遍认为早二叠世晚期-晚二叠世时碰撞活动已开始, 晚二叠世晚期-早三叠世应该属于同碰撞阶段。但中三叠统及以后的构造环境仍然有

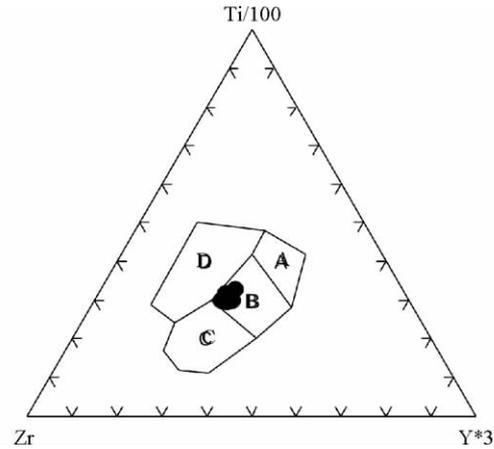


图 13 民乐铜矿床中玄武岩的 Ti-Zr-Y 图 (据 Pearce and Cann, 1973)

A-岛弧拉斑玄武岩; B-岛弧拉斑玄武岩、岛弧钙碱性玄武岩和 MORB; C-岛弧钙碱性玄武岩; D-板内玄武岩

Fig. 13 Discrimination diagrams of Ti-Zr-Y from basalts from the Minle copper deposit (after Pearce and Cann, 1973)

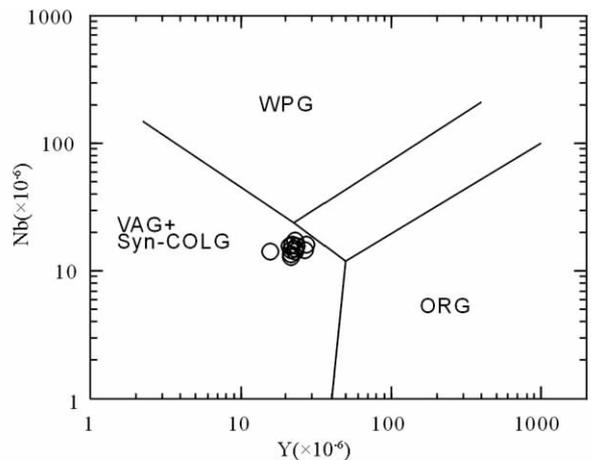


图 14 民乐铜矿床中流纹斑岩的 Nb 与 Y 关系图 (据 Pearce *et al.*, 1984)

VAG-岛弧花岗岩; syn-COLG-同碰撞花岗岩; WPG-板内花岗岩; ORG-洋脊花岗岩

Fig. 14 Nb vs. Y diagram for rhyolite porphyries from the Minle copper deposit (after Pearce *et al.*, 1984)

不同认识。本研究证实在民乐矿区发育中三叠统基性 (玄武岩) 和酸性 (流纹斑岩) 岩石组成的“双峰式”岩石组合, 且流纹斑岩具有高硅、高钾性质, 玄武岩和流纹斑岩均显示出岛弧火山岩特征, 同时区域上也存在同期的忙怀组“双峰式”岛弧火山岩 (彭头平等, 2006), 表明中三叠统时该区已处于碰撞晚期-碰撞后的伸展阶段。

民乐铜矿床与宋家坡组流纹斑岩有密切的联系 (杨宗良, 2004)。本研究认为该区流纹斑岩具有较高的碱含量,

并可能由弱碱性的流纹安山质岩浆结晶分异而来, 原始岩浆形成过程中有少量的幔源物质加入, 均表明民乐铜矿的形成与“双峰式”岛弧岩浆活动有关。但目前对产于云县-景谷火山-岩浆弧带的民乐、文玉、官房等铜矿床的成因尚难定论, 主要是该区中-晚三叠世火山岩是产于海相还是陆相环境仍然没有清楚的认识。如果火山岩形成于海相沉积环境, 而且是后碰撞伸展裂谷盆地, 则矿床成因应属于 VHMS 型矿床 (以喷口-通道相为主); 如果火山岩形成于陆相沉积环境, 由于缺失堆积场所和封闭盖层, 则矿床成因应属于火山-次火山热液脉型矿床。

6 结论

(1) 民乐铜矿床中宋家坡组流纹斑岩的 SIMS 锆石 U-Pb 年龄为 234.8 ± 2.4 Ma, 表明其形成于中三叠世。

(2) 宋家坡组玄武岩总体上为亚碱性玄武岩, 是由来源于长期亏损、富斜长石而贫石榴石的尖晶石地幔源区的岩浆经历了不同程度的地壳混染作用和结晶分异作用形成。

(3) 宋家坡组流纹斑岩总体上显示出偏碱性 I 型花岗岩的特征, 是由来源于镁铁质-中性的下地壳部分熔融形成弱碱性的流纹安山质岩浆并加入了少量的同时代玄武质岩浆经过结晶分异作用形成的。

(4) 民乐铜矿床中宋家坡组玄武岩和流纹斑岩均显示出岛弧火山岩的特征, 表明其形成于碰撞晚期-碰撞后构造环境。

致谢 野外工作得到了云南地质调查局尹光候高级工程师的大力帮助; 中国科学院地质与地球物理研究所李秋立副研究员、刘宇工程师和唐国强工程师在锆石 U-Pb 分析上给予热情指导和帮助; 微量元素分析工作得到了中国科学院广州地球化学研究所刘颖高级工程师热情指导和帮助; 微量元素分析得到了中国科学院地球化学研究所胡静高级工程师、黄艳助理研究员的大力帮助; Nd 同位素分析得到了中国科学院地球化学研究所李晓彪副研究员、肖芳助理研究员的大力帮助; 同时本文修改过程中得到两位审稿人很多有益意见; 在此一并感谢。

References

Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, 63-114

Bureau of Geology and Mineral Resource of Yunnan Province. 1990. Regional Geology of Yunnan Province. Beijing: Geological Publishing House, 1-729 (in Chinese)

Collins WJ, Beams SD, White AJR and Chappell BW. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. Contributions to Mineralogy and Petrology, 80: 189-200

Deniel C. 1998. Geochemical and isotopic (Sr, Nd, Pb) evidence for plume-lithosphere interactions in the genesis of Grande Comore

magmas (Indian Ocean). Chemical Geology, 144: 281-303

Han BF, Wang SG, Jahn BM, Hong DW, Kagami H and Sun YL. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur river A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. Chemical Geology, 138: 135-159

Jahn BM, Wu FY, Lo CH and Tsai CH. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. Chemical Geology, 157: 119-146

Johnson KTM. 1998. Experimental determination of partition coefficients for rare earth and high-field-strength elements between clinopyroxene, garnet, and basaltic melt at high pressures. Contributions to Mineralogy and Petrology 133: 60-68

Li XH, Sun M, Wei GJ, Liu Y, Lee CY and Malpas JG. 2000. Geochemical and Sm-Nd isotopic study of amphibolites in the Cathaysia Block, southeastern China: Evidence for extremely depleted mantle in the Paleoproterozoic. Precambrian Research, 102: 251-262

Li XH, Li ZX, Zhou H, Liu Y and Kinny PD. 2002. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: Implications for the initial rifting of Rodinia. Precambrian Research, 113: 135-154

Li XH, Li ZX, Li WX, Liu Y, Yuan C, Wei GJ and Qi CS. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? Lithos, 96: 186-204

Li XH, Qi CS, Liu Y, Liang XR, Tu XL, Xie LW and Yang YH. 2005. Petrogenesis of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks along the western margin of the Yangtze Block: New constraints from Hf isotopes and Fe/Mn ratios. Chinese Science Bulletin, 50: 2481-2486

Li XH, Liu Y, Li QL, Guo CH and Chamberlain KR. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multi-collector SIMS without external standardization. Geochemistry Geophysics Geosystems, 10, Q04010, doi: 10.1029/2009GC002400

Li XJ. 2009. Geochemistry and significance of the Minle volcanic rocks in Jinggu County, Yunnan Province. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 39: 831-836 (in Chinese with English abstract)

Li XL. 1996. Basic characteristics and formation structural environment of Lincang composite granite batholith. Yunnan Geology, 15: 1-18 (in Chinese with English abstract)

Lugmair GW and Harti K. 1978. Lunar initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: Differential evolution of the lunar crust and mantle. Earth and Planetary Science Letters, 39: 349-357

Martin H, Bonin B, Capdevila R, Jahn BM, Lameyre J and Wang Y. 1994. The Kuiqi peralkaline granitic complex (SE China): Petrology and geochemistry. Journal of Petrology, 35: 983-1015

Mo XX, Shen SY and Zhu QW. 1998. Volcanics-Ophiolite and Mineralization of Middle and Southern Part in Sanjiang, Southern China. Beijing: Geological Publishing House, 1-128 (in Chinese)

Pearce JA and Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. Earth and Planetary Science Letters, 19: 290-300

Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25: 956-983

Peng TP, Wang YJ, Fan WM, Liu DY, Shi YR and Miao LC. 2006. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of Early Mesozoic felsic igneous rocks from the southern Lancangjiang and its tectonic implications. Science in China (Series D), 49: 1032-1042

Peng XJ and Luo WL. 1982. The discovery of glaucophane schist zone in the southern Lancangjiang in the western Yunnan Province, China and its tectonic implications. Regional Geology of China (2).

- Beijing: Geological Publishing House, 69–75 (in Chinese)
- Qi L, Hu J and Grégoire DC. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 51: 507–513
- Rehkämper M and Hofmann AW. 1997. Recycled ocean crust and sediment in Indian Ocean MORB. *Earth and Planetary Science Letters*, 147: 93–106
- Roberts MP and Clemens JD. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids. *Geology*, 21: 825–828
- Rudnick RL and Fountain DM. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, 33: 267–309
- Shen SY, Feng QL, Wei QR, Zhang ZB and Zhang H. 2006. Determination of epicontinental arc volcanic rock of Late Permian in north part of south Lancangjiang belt, southwestern China. *J. Mineral. Petrol.*, 26: 35–39 (in Chinese with English abstract)
- Sobolev AV, Hofmann AW and Nikogosian IK. 2000. Recycled oceanic crust observed in ghost plagioclase within the source of Mauna Loa Lavas. *Nature*, 404: 986–990
- Stacey JS and Kramers JD. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26: 207–221
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313–345
- Tian ZC, Li HK, Yang SK and Ding HH. 2006. Geology and ore prospecting marks of Songjiapo Cu deposit in Minle, Simao. *Yunnan Geology*, 25: 31–39 (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ, Zhang AM, Fan WM, Peng TP, Zhang FF, Zhang YF and Bi XW. 2010. Petrogenesis of Late Triassic post-collisional basaltic rocks of the Lancangjiang tectonic zone, southwest China, and tectonic implications for the evolution of the eastern Paleo-Tethys: Geochronological and geochemical constraints. *Lithos*, 120: 529–546
- Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64: 295–304
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407–419
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Oberli F, Vonquadt A, Roddick JC and Speigel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace-element and REE analyses. *Geostandard Newsletter*, 19: 1–23
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325–343
- Wu FY, Sun DY, Li HM, Jahn BM and Wilde SA. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187: 143–173
- Xu XC, Huang Z, Xie SQ, Yue SC and Liu Y. 2004. The Sm-Nd and ⁴⁰Ar-³⁹Ar isotopic ages of lithogenesis and metallogenesis of the Songjiapo copper deposit in Jinggu, Yunnan Province. *Geological Review*, 50: 99–105 (in Chinese with English abstract)
- Yang GL. 2003. Geology and genesis of Minle ash flow copper deposit. *Yunnan Geology*, 22: 80–88 (in Chinese with English abstract)
- Yang YQ, Yang JM, Xu DC and Yang JH. 2006. Volcanic rock and metallogenic features of copper-polymetallic deposits in southern Lancang River valley, Yunnan Province. *Mineral Deposits*, 25: 447–462 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZL. 2004. Minle volcanic-subvolcanic copper deposit. *Yunnan Geology*, 23: 343–350 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CH, Liu JS and Liu DL. 2006. Geological and geochemical characteristics and tectonic setting of Triassic volcanic suite in Guanfang area along South Lancangjiang belt. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25: 377–386 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 李兴林. 1996. 临沧复式花岗岩基的基本特征及形成构造环境的研究. *云南地质*, 15: 1–18
- 李学军. 2009. 云南景谷民乐火山岩地球化学特征及其意义. *西北大学学报*, 39: 831–836
- 莫宣学, 沈上越, 朱勤文. 1998. 三江中南段火山岩蛇绿岩与成矿. 北京: 地质出版社, 1–128
- 彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 刘敦一, 石玉若, 苗来成. 2006. 澜沧江南段早中生代酸性火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及构造意义. *中国科学 (D 辑)*, 36: 123–132
- 彭兴阶, 罗万林. 1982. 滇西澜沧江南段蓝山片岩带的发现及其大地构造意义. *中国区域地质 (2)*. 北京: 地质出版社, 68–75
- 沈上越, 冯庆来, 魏启荣, 张志斌, 张虎. 2006. 南澜沧江带北段上二叠统陆缘弧火山岩的厘定. *矿物岩石*, 26: 35–39
- 田宗春, 李宏坤, 杨世坤, 丁海宏. 2006. 思茅民乐宋家坡铜矿地质及找矿标志. *云南地质*, 25: 31–39
- 徐晓春, 黄震, 谢巧勤, 岳书仓, 刘因. 2004. 云南景谷宋家坡铜矿床成岩成矿的 Sm-Nd 和 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素年龄. *地质论评*, 50: 99–105
- 杨贵来. 2003. 景谷民乐火山灰流型铜矿地质及成因. *云南地质*, 22: 80–88
- 杨岳清, 杨建民, 徐德才, 杨建华. 2006. 云南澜沧江南段火山岩演化及其铜多金属矿床的成矿特点. *矿产地质*, 25: 447–462
- 杨宗良. 2004. 民乐火山岩-次火山岩型铜矿. *云南地质*, 23: 343–350
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1–729
- 张彩华, 刘继顺, 刘德利. 2006. 滇西南澜沧江带官房地区三叠纪火山岩地质地球化学特征及其构造环境. *岩石矿物学杂志*, 25: 377–386