

温利刚, 曾普胜, 詹秀春, 等. 矿物表征自动定量分析系统 (AMICS) 技术在稀土稀有矿物鉴定中的应用 [J]. 岩矿测试, 2018, 37(2): 121 - 129.

WEN Li-gang, ZENG Pu-sheng, ZHAN Xiu-chun, et al. Application of the Automated Mineral Identification and Characterization System (AMICS) in the Identification of Rare Earth and Rare Minerals [J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(2): 121 - 129.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.201708110129】

矿物表征自动定量分析系统 (AMICS) 技术在稀土稀有矿物鉴定中的应用

温利刚^{1,2}, 曾普胜^{1*}, 詹秀春¹, 范晨子¹, 孙冬阳¹, 王广¹, 袁继海¹

(1. 国家地质实验测试中心, 北京 100037;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 云南武定迤纳厂铁-铜-稀土矿床是我国扬子地块西南缘具有代表性的元古代铁-铜-稀土矿床之一, 矿床中除 Fe、Cu 外, 还伴生 REEs、Nb、Co、Mo、Au、U 等元素。由于矿石矿物组成复杂, 并且稀土、稀有矿物结晶粒度细小、嵌布特征复杂, 使用传统的测试技术很难准确地识别鉴定, 因此该矿床中稀土、稀有(钕)矿物的赋存状态研究一直较为薄弱。本文应用目前国际上矿物与地质行业先进的矿物自动分析系统——矿物表征自动定量分析系统 (AMICS), 结合扫描电镜-能谱仪 (SEM-EDS) 显微结构原位分析技术, 实现了常规岩矿鉴定手段难以完成的矿物定量识别和鉴定, 准确地测定了武定迤纳厂铁-铜-稀土矿床脉状矿石中矿物种类及其含量, 在脉状矿石发现了含量可观的氟碳钙铈矿 (0.82%) 和少量的含钕金红石 (0.02%) 等稀土稀有矿物。研究表明, 除了铁氧化物成矿阶段, 在铜硫化物成矿阶段也伴随有稀土成矿作用, 因此可将主矿化期划分为铁氧化物-稀土矿化阶段 (II-1) 和铜硫化物(-金)-稀土矿化阶段 (II-2)。研究成果为矿石中稀土、稀有金属等战略矿产资源的综合利用及矿床的进一步研究提供了可靠的数据, 同时建立了一套先进、实用的岩石矿物鉴定技术, 可望在地质、勘探、资源的有效利用等领域得到更广泛应用。

关键词: AMICS; 氟碳钙铈矿; 铁-铜-稀土矿床; 迤纳厂; 滇中

要点:

(1) 应用矿物表征自动定量分析系统 (AMICS) 测定脉状矿石的矿物组成、粒度和嵌布特征。

(2) 应用扫描电镜-能谱仪 (SEM-EDS) 分析目标矿物的微观形貌和物相组成。

(3) 在迤纳厂铁-铜-稀土矿床脉状矿石中发现含量可观的氟碳钙铈矿和少量含钕金红石等稀土、稀有(钕)矿物。

(4) 迤纳厂铁-铜-稀土矿床在铁氧化物成矿阶段 (II-1) 和铜硫化物成矿阶段 (II-2) 均伴随有稀土成矿作用。

中图分类号: P575

文献标识码: A

我国扬子地块西南缘元古代东川群下部因民组和落雪组地层中产出大量的前寒武铁铜矿床, 这些

矿床在铁、铜成矿过程中, 均伴随有不同程度的稀土稀有金属富集或矿化现象^[1-5], 其中以云南武定迤

收稿日期: 2017-08-11; 修回日期: 2018-01-22; 接受日期: 2018-03-21

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费资助项目 (YYWF201619); 国家自然科学基金资助项目 (41072073); 中国地质调查局地质调查工作项目 (12120113002500); 自然资源部公益性行业科研专项 (201211078)

作者简介: 温利刚, 硕士研究生, 主要从事岩浆作用与资源环境研究。E-mail: yunwenligang@163.com。

通信作者: 曾普胜, 博士, 研究员, 长期从事矿床学、岩石学和地球化学研究。E-mail: zengpusheng@vip.sohu.com。

纳厂铁-铜-稀土矿床^[4-5]最为典型。武定迤纳厂铁-铜-稀土矿床位于滇中地区中部,于20世纪70年代被云南地质局第四大队发现并勘探,矿床中除Fe(686.8万吨)、Cu(6.8万吨)外,还伴生有稀土(REE_2O_3 1.2774万吨,含量0.5%~1.5%左右)、Nb(1363吨)、Co(701.18吨)、Mo(1397.87吨)、Au、U等多种有用元素^[2-4]。近年来,前人在成岩成矿年代学^[3,6-9]、成矿流体特征^[10-11]、成矿物质来源^[12]、矿床成因类型^[4-5,9-13]等方面均取得了新的研究进展。但由于矿床中矿石矿物组成复杂,稀土稀有矿物结晶粒度细小,嵌布特征复杂,用传统的测试技术和方法难以准确地识别和鉴定,矿床中稀土、稀有(铌)矿物赋存形式一直缺少较为可靠的数据,给稀土、稀有(铌)资源的充分利用以及稀土稀有矿床的进一步研究造成了巨大障碍。

因此,本文应用目前国际上矿物与地质行业最前沿的分析测试方法——矿物表征自动定量分析系统(AMICS),结合扫描电镜-能谱仪(SEM-EDS)显微结构原位分析技术,对云南武定迤纳厂铁-铜-稀土矿床中稀土、稀有(铌)矿物的赋存状态进行研究,并通过实例建立了一套新的岩石矿物(尤其是稀有稀土矿物)鉴定技术,为研究岩矿样品中矿物种类及含量、粒度、嵌布特征、元素赋存状态等矿物学特征提供一套操作简单、结果可靠的分析方法。

1 实验部分

1.1 地质背景

云南武定迤纳厂铁-铜-稀土矿床大地构造位置处于扬子地台西南缘。矿区出露的地层主要为东川群(因民组、落雪组、鹅头厂组、绿枝江组)变质火山-碎屑岩建造。其中,因民组上部和落雪组的变质碎屑岩和白云岩地层为主要的赋矿层位。外围还出露昆阳群大营盘组和美党组、震旦系、寒武系、侏罗系等(图1)。矿区处于核桃箐逆冲断裂西侧,主要为一向西倾伏的东西向短轴复式背斜。在复式背斜的轴部和断层复合处,常见岩浆角砾岩体,往往富集铁铜矿体。矿区沿断裂分布着数条辉绿岩脉。

矿区共有8个矿段,分为东部矿(包括大宝山、辣椒矿、东部矿3个矿段)和西部矿(包括下狮子口、八层矿、东方红、过水沟、洒干拉5个矿段)两个矿群,共有58个矿体,平均铜含量0.85%~0.97%,铁含量41.93%~44.53%,金作为伴生元素主要赋存于铜矿体中,呈局部富集的特征(金含量最高可达3.4 $\mu\text{g/g}$),稀土有不同程度的矿化和

富集。矿石地球化学分析表明,脉状矿石和条纹条带状矿石中稀土元素总量(ΣREEs)分别高达 $2020.9 \times 10^{-6} \sim 3415.5 \times 10^{-6}$ 和 $1446.8 \times 10^{-6} \sim 11259.2 \times 10^{-6}$ (ICP-MS测试,测试单位:国家地质实验测试中心),尤其富集轻稀土(镧、铈)。矿体严格受地层及构造控制,矿体与顶底板围岩整合接触,呈似层状、透镜状、脉状及角砾状产出。围岩变质比较强烈,主要蚀变类型有黑云母化、铁铝榴石化、钠化、菱铁矿化、磷灰石化、碳酸盐化、黄铜矿化、绿泥石化、氟化、硅化等。

矿石构造以条纹条带状构造为主,还有脉状构造、致密块状构造、角砾状构造、浸染状构造以及透镜状构造等;主要结构包括粒状变晶结构、包嵌结构和交代结构等。矿石的矿物成分复杂,主要矿物包括磁铁矿、菱铁矿、赤铁矿、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、辉钼矿、辉铜矿、石英、萤石、方解石、铁白云石、钠长石、黑云母、铁铝榴石、磷灰石、氟碳铈矿、独居石、绿泥石等。

1.2 样品采集与制备

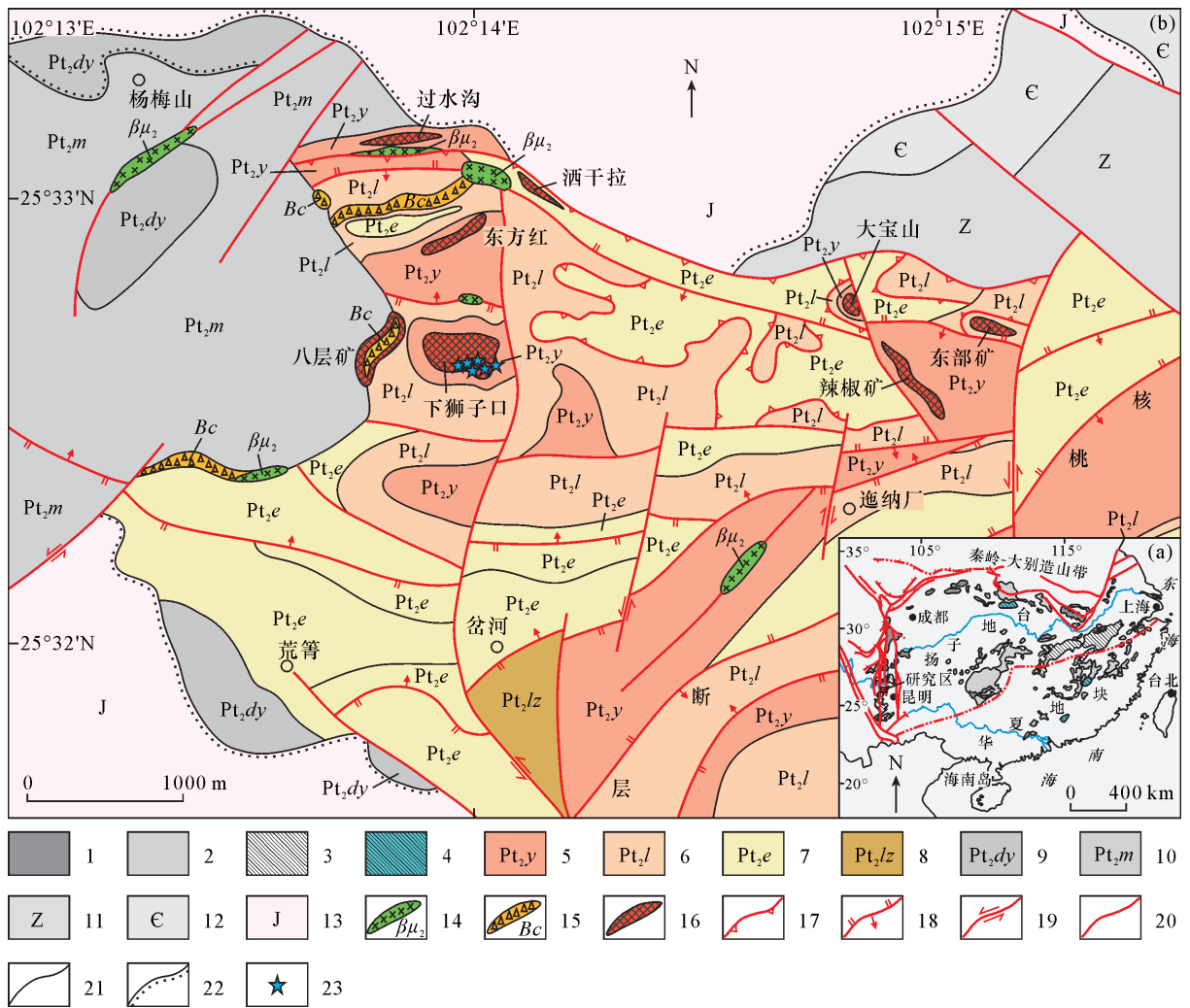
本次研究在云南武定迤纳厂铁-铜-稀土矿床下狮子口矿段采集了代表性较好的矿石样品6件(具体采样位置见图1)。本文主要选取含黄铜矿脉状矿石(编号YNC1-1-1),首先将样品磨制成探针片(在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成),经表面喷碳处理(在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成)增加样品导电性之后,直接对探针片进行AMICS分析测试。

1.3 分析仪器和实验条件

1.3.1 仪器主要性能

20世纪70年代以来,以澳大利亚研制的扫描电镜矿物定量评价(简称QEMSCAN)系统^[14-16]和矿物解离分析仪(简称MLA)^[17-21]为代表的矿物自动定量检测技术已经成功应用于金、银、钨、钼、铜、铁、铅、锌、磷、稀土等多种低品位难处理的矿石矿物的研究。本文所应用的矿物表征自动定量分析系统(简称AMICS),是继QEMSCAN和MLA之后最新一代(第三代)的矿物自动分析系统,是目前国际上矿物与地质行业最前沿的分析测试手段。该系统操作简便,分析速度和测试精确度均有较大提高,并且采用了全新的图形处理技术,在MLA的基础上有较大的改进。

AMICS的基本硬件由一台扫描电子显微镜(SEM)结合一个或多个X射线能谱仪(EDS)组成,



1—新元古代火山岩; 2—新元古界; 3—早-中元古界; 4—太古代-中元古代火山岩; 5—中元古代东川群因民组; 6—中元古代东川群落雪组; 7—中元古代东川群鹅头厂组; 8—中元古代东川群绿枝江组; 9—中元古代大营盘组; 10—中元古代美党组; 11—震旦系; 12—寒武系; 13—侏罗系; 14—晋宁期辉绿岩; 15—岩角砾岩; 16—矿段; 17—推覆构造; 18—逆断层; 19—平移断层; 20—断层; 21—整合界线; 22—不整合界线; 23—采样位置。

图 1 云南武定迤纳厂铁-铜-稀土矿床地质简图(据参考文献[2,9]修改)

Fig. 1 Tectonic setting (a) and mining district geological map with sampling sites (b) of the Yinchang Fe-Cu-REE deposit, Wuding Country, Yunnan Province, Southwest China (modified from Reference [2,9])

并配有一套矿物表征自动定量分析系统(AMICS)软件。主要工作原理是通过扫描电子显微镜软件、能谱分析技术和 AMICS 软件相结合,实现测试样品自动位移,利用能反映矿物相的成分差别特征的背散射电子(BSE)图像和 X 射线能谱快速分析技术,自动采集不同物相的能谱数据,利用 X 射线准确鉴定矿物,建立样品矿物标准库,结合现代图像分析技术进行计算机自动拟合计算和数据处理,快速、准确地测定矿物种类及含量、粒度、嵌布特征、元素赋存状态等。

1.3.2 实验条件

本文 AMICS 分析测试在国家地质实验测试中

心完成。系统由一台 ZEISS Sigma 500 型高分辨率场发射扫描电子显微镜(FESEM)、一台 Bruker XFlash 6130 型现代快速 X 射线能谱仪(EDS)和一套 AMICS 软件(包括 AMICSTool、MineralSTDManager、Investigator 和 AMICSProcess 等 4 个子程序)组成。实验条件为:加速电压 20 kV(由于 AMICS 矿物标准库的 X 射线能谱信息加速电压为 20 kV,所以测试过程中扫描电镜加速电压应该设置成 20 kV),工作距离 8.5 mm,背散射电子探测器(HDBSD),物镜光阑 60 μm,高真空模式。

完成 AMICS 测试之后,利用 AMICS 软件驱动扫描电镜到指定位置,通过扫描电镜-能谱(SEM-

EDS)在不同的放大倍数下分析目标矿物的微观形貌和物相组成。能谱仪(EDS)激发电压 20 kV,工作距离 8.5 mm,点分析采集时间达到指定计数 250 keps 后自动停止。数据处理原则:采用 P/B-ZAF 无标样定量分析法,能量范围为 0.25~20 kV。

2 结果与讨论

2.1 矿石矿物组成

本文利用 AMICS 技术完成了光学显微镜等常规岩矿鉴定手段难以完成的矿物定量识别和鉴定,测定脉状矿石样品(YNC1-1-1)中矿物种类和含量(图 2,表 1,含量指在 AMICS 测试范围内的矿物面积百分比,下同),得到矿石矿物组成及含量由多到少依次为:石英 36.90%、方解石 36.84%、绿泥石 21.24%、氟碳钙铈矿 0.82%、黑云母 0.79%、萤石 0.63%、黄铁矿 0.56%、绿帘石 0.45%、钠长石 0.26%、褐帘石 0.24%、黄铜矿 0.18%、铁白云石 0.07%、磷灰石 0.02%、金红石 0.02%等。

本文在脉状矿石样品中发现了氟碳钙铈矿、褐帘石、金红石等(含)稀土稀有金属矿物,这些矿物在以往的研究工作很难被准确表征出来。其中,氟碳钙铈矿在矿石中分布极不均匀,局部富集,与绿泥石、方解石、石英等矿物紧密共生。

2.2 稀土稀有元素赋存矿物特征

2.2.1 氟碳钙铈矿

氟碳钙铈矿在矿石中分布极不均匀,局部富集(图 2),含量较少,为 0.82%左右。矿石中氟碳钙铈矿结晶粒度较细,多数小于 0.05 mm。主要呈微细粒自形至半自形晶,多为微细粒放射状的针状、长柱状和板状连晶集合体(图 3a,b),与绿泥石、方解石、石英等紧密共生。本文对氟碳钙铈矿进行 X 射线能谱点分析,得到氟碳钙铈矿平均含有 C 6.76%、O 20.01%、F 2.89%、Ca 19.52%、Fe 1.51%、Y 2.37%、La 13.40%、Ce 24.21%、Pr 2.17%和 Nd 8.10%,矿物中富含轻稀土元素,以 Ce、Nd、La 为主,一般 $Ce > La > Nd$,含少量 Pr、Y,无放射性元素 U 和 Th 的替代。

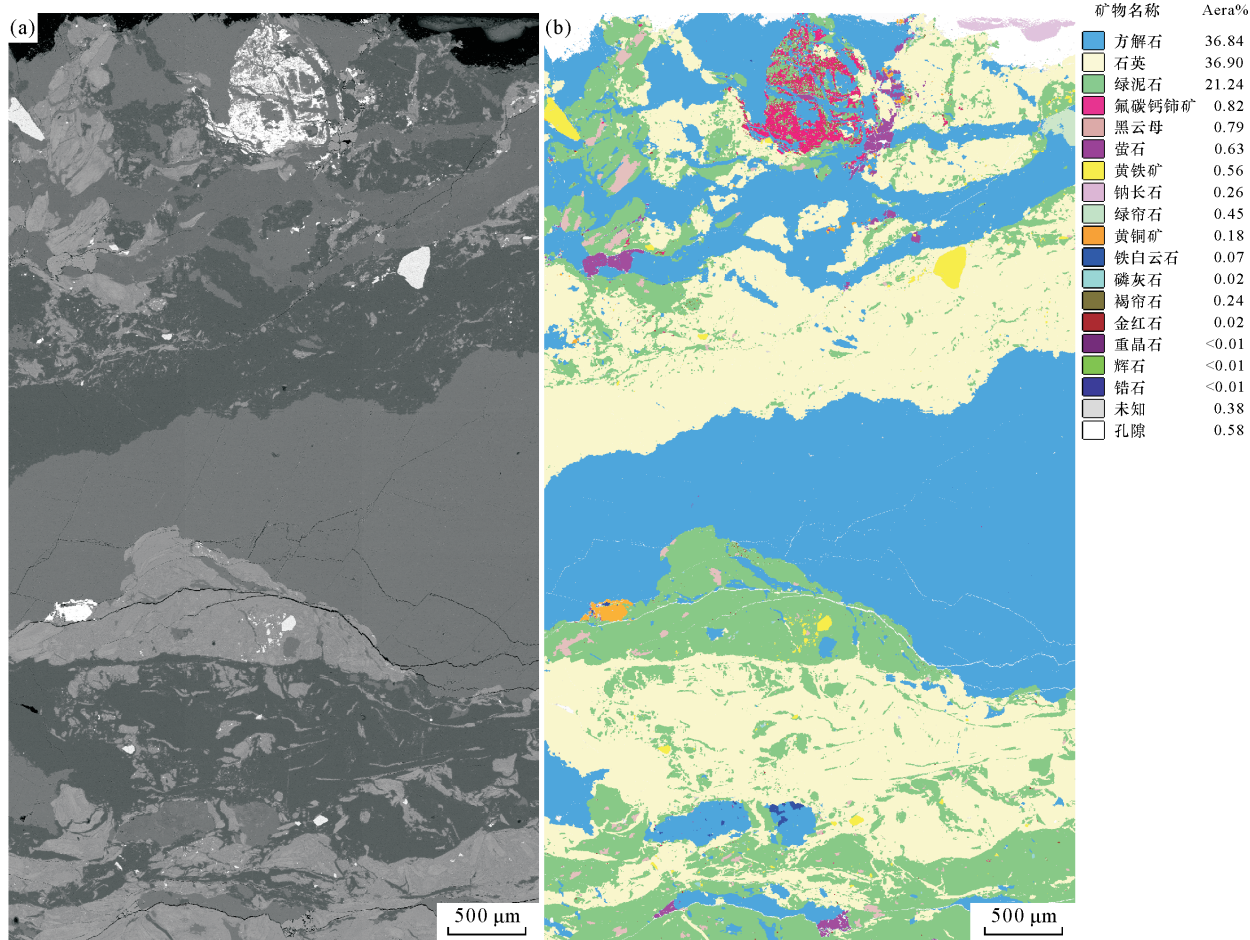


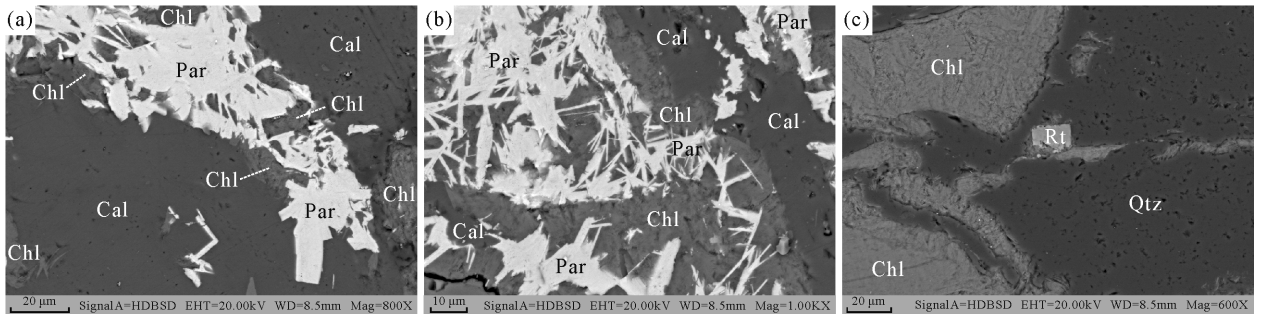
图 2 云南武定迤纳厂铁-铜-稀土矿床样品背散射电子图像(a)和 AMICS 测试结果图(b)

Fig. 2 BSE image (a) and classified AMICS image (b) of Sample YNC1-1-1 from the Yinachang Fe-Cu-REE deposit

表1 武定迤纳厂铁-铜-稀土矿床矿石样品 AMICS 矿物定量检测结果

Table 1 Quantitative composition of the Sample YNCl-1-1 by AMICS from the Yinachang Fe-Cu-REE deposit

矿物名称	质量分数 (%)	面积百分比 (%)	面积 (μm^2)	矿物颗粒数	相对误差	矿物标准分子式
石英	34.38	36.90	7500209.93	26069	0.01	SiO_2
方解石	35.81	36.84	7487643.98	21315	0.01	CaCO_3
绿泥石	24.17	21.24	4317504.81	39607	0.01	$\text{Fe}_3^{2+} \text{Mg}_{1.5} \text{AlFe}_{0.5}^{3+} \text{Si}_3 \text{AlO}_{12} (\text{OH})_6$
氟碳钙铈矿	1.28	0.82	167615.90	5255	0.03	$\text{CaCe}_{1.1} \text{La}_{0.9} (\text{CO}_3)_3 \text{F}_2$
黑云母	0.87	0.79	160222.11	450	0.09	$\text{KMg}_{2.5} \text{Fe}_{0.5}^{2+} \text{AlSi}_5 \text{O}_{10} (\text{OH})_{1.75} \text{F}_{0.25}$
萤石	0.70	0.63	128600.05	2776	0.04	CaF_2
黄铁矿	1.00	0.56	114151.95	3593	0.03	FeS_2
绿帘石	0.56	0.45	91840.77	3048	0.04	$\text{Ca}_2 \text{FeFeAl} (\text{Si}_2 \text{O}_7) (\text{SiO}_4) \text{O} (\text{OH})$
钠长石	0.24	0.26	53234.30	468	0.09	$\text{Na}_{0.95} \text{Ca}_{0.05} \text{Al}_{1.05} \text{Si}_{2.95} \text{O}_8$
褐帘石	0.32	0.24	48501.47	3669	0.03	$\text{La}_{0.5} \text{Ce}_{0.5} \text{Ca}_{0.5} \text{Y}_{0.5} \text{Al}_2 \text{Fe} (\text{SiO}_4)_3 (\text{OH})$
黄铜矿	0.27	0.18	36844.15	852	0.07	CuFeS_2
铁白云石	0.07	0.07	13484.56	133	0.17	$\text{CaFe}_{0.6}^{2+} \text{Mg}_{0.3} \text{Mn}_{0.1}^{2+} (\text{CO}_3)_2$
磷灰石	0.02	0.02	4078.82	60	0.26	$\text{Ca}_5 (\text{PO}_4)_3 (\text{OH}) \text{F}$
金红石	0.02	0.02	3135.25	159	0.16	TiO_2
辉石	<0.01	<0.01	688.96	15	0.52	$\text{Ca}_{0.9} \text{Na}_{0.1} \text{Mg}_{0.9} \text{Fe}_{0.2}^{2+} \text{Al}_{0.4} \text{Ti}_{0.1} \text{Si}_{1.9} \text{O}_6$
锆石	<0.01	<0.01	184.72	10	0.63	$\text{Zr} (\text{SiO}_4)$
重晶石	<0.01	<0.01	44.93	3	1.15	BaSO_4
未知	0.27	0.38	76973.31	5780	0.03	-
孔隙	-	0.58	118515.33	6188	0.02	-
合计	99.98	99.98	20323475.30	119450	-	-



Par—氟碳钙铈矿;Rt—金红石;Chl—绿泥石;Cal—方解石;Qtz—石英。

图3 稀土稀有矿物背散射电子(BSE)微观形貌图

Fig. 3 BSE micrograph images of the major rare earth minerals and rich-rare elements minerals in ores from the Yinachang Fe-Cu-REE deposit

2.2.2 含铌金红石

金红石在脉状矿石中含量较少,约0.02%,颗粒较小,大小不一,粒径5~30 μm 不等,晶形一般较好,多为自形-半自形晶,主要分布于石英脉中,与绿泥石关系密切(图3c)。X射线能谱点分析得到金红石的平均矿物组分为O 38.35%、Ti 57.94%、Nb 2.71%和Fe 0.99%,主要金属元素为Ti,含少量Nb、Fe等元素。

2.3 主成矿阶段的划分

前人通过地质填图、矿体追索与编录,并根据围岩蚀变、矿物组合和矿化特征的差异,将武定迤纳厂

铁-铜-稀土矿床的矿化作用划分为矿化前期(I)、主矿化期(II)和矿化后期(III)三个矿化期,其中主矿化期(II)又划分为铁氧化物-稀土矿化(II-1)和硫化物-金矿化阶段(II-2)两个阶段^[9-11,22-23]。

本研究发现在脉状矿石中存在含量可观的氟碳钙铈矿、少量的含铌金红石等(含)稀土稀有金属矿物。研究表明除了铁氧化物-稀土矿化(II-1)阶段^[23]之外,在铜硫化物(-金)矿化的阶段(II-2)也伴随有稀土成矿作用。因此,主矿化期可划分为铁氧化物-稀土矿化阶段(II-1)和铜硫化物

(-金)-稀土矿化阶段(II-2),其中铁氧化物-稀土矿化阶段形成氟碳铈矿^[23],而铜硫化物(-金)-稀土矿化阶段主要形成氟碳钙铈矿。

2.3.1 铁氧化物-稀土成矿阶段(II-1)

本阶段是铁和稀土(氟碳铈矿)矿化的主要阶段。矿石主要为条纹条带状构造,具粒状镶嵌结构和交代结构,该阶段形成的稀土矿物主要为氟碳铈矿^[23]。近年来,许多学者对武定迤纳厂铁-铜-稀土矿床开展成矿年代研究工作,获得了条纹条带状矿石的矿石全岩 Sm-Nd 等时线年龄(1617 ± 100 Ma^[3])、萤石 Sm-Nd 等时线年龄(1539 ± 40 Ma^[3])、黄铜矿 Re-Os 等时线年龄(1690 ± 99 Ma^[8])和 1648 ± 14 Ma^[9])、辉钼矿 Re-Os 等时线年龄(1674 ± 84 Ma^[24])等一系列代表铁氧化物-稀土成矿阶段(II-1)的年龄,这些年龄均集中于 1.5 ~ 1.7 Ga,与古元古代晚期扬子地台西南缘大规模非造山型岩浆活动及全球性 Columbia 超大陆^[25-27]完全汇聚和初始裂解的时间基本一致,表明铁氧化物-稀土(氟碳铈矿)成矿可能是在 Columbia 超大陆裂解时,深部(地幔)岩浆活动从深部带来大量成矿物质富集成矿。

2.3.2 铜硫化物(-金)-稀土成矿阶段(II-2)

本阶段是铜(-金)-稀土(氟碳钙铈矿)矿化的主要阶段。矿石主要为脉状、网脉状构造,具交代结构和自形晶结构。矿石矿物主要以黄铜矿和黄铁矿等硫化物的形式存在,其次还有辉铜矿、辉钴矿、辉钼矿等^[10-11]相对高温硫化物,另含少量的低温硫化物如方铅矿、闪锌矿。脉石矿物主要以石英、方解石、绿泥石、萤石等为主。硫化物颗粒较大,自形程度较好,与脉石矿物严格共生。矿石以脉状形式穿插铁氧化物-稀土成矿阶段(II-1)的条纹条带状矿石,说明两者为截然不同的先后两个矿化阶段。矿石中 ΣREEs 高达 $2020.9 \times 10^{-6} \sim 3415.5 \times 10^{-6}$,本文通过 AMICS 分析测试也表明矿石中局部富集氟碳钙铈矿,认为这一阶段同时也是稀土(氟碳铈矿)成矿的主要阶段,形成的稀土矿物主要为氟碳钙铈矿。前人获得了含石英脉坪年龄(784.25 ± 0.95 Ma^[6])和等时线年龄(783.93 ± 8.59 Ma^[6])等代表铜硫化物(-金)-稀土成矿阶段(II-2)的年龄,与区域内晋宁运动-澄江运动时间^[28-29]以及全球性 Rodinia 超级大陆汇聚完成,并发生明显裂解的时间(860 ~ 750 Ma)基本一致^[30]。结合区域地质背景和脉状黄铜矿硫、铅同位素^[12]研究资料,表明铜硫化物(-金)-稀土(氟碳钙铈矿)成矿可能

是在 Rodinia 超大陆裂解时,深部岩浆分异出的岩浆流体交代围岩,并与大气降水的混合,导致成矿物质再次沉淀。

3 结论

本文基于 AMICS,结合 SEM-EDS 显微结构原位分析技术,以云南武定迤纳厂铁-铜-稀土矿床为例,完成了常规岩矿鉴定手段难以完成的矿物定量识别和鉴定,在云南武定迤纳厂铁-铜-稀土矿床脉状矿石中发现了含量可观的氟碳钙铈矿、含铈金红石等(含)稀土稀有矿物,表明在铜硫化物(-金)矿化的阶段(II-2)也伴随有稀土成矿作用。此结论填补了云南武定迤纳厂铁-铜-稀土矿床稀土、稀有(铈)矿物的赋存状态研究方面的不足,为矿床中稀土、稀有(铈)资源的充分利用及矿床的进一步研究提供了依据,同时对区域上稀土稀有金属资源的勘查和进一步开发利用具有指导意义。

本文通过实例建立了一套新的岩石矿物(尤其是稀有稀土矿物)鉴定技术,为研究岩矿样品中矿物种类及含量、粒度、嵌布特征、元素赋存状态等矿物学特征提供了一套操作简单、结果可靠的分析方法,可望在地质、勘探、资源的有效利用等领域得到更广泛应用。

致谢:野外工作得到云南省地质矿产勘查开发局李华研究员的帮助和指导;样品采集及处理过程中得到了国家地质实验测试中心王兆全、费晓杰、张兰等硕士研究生的帮助;探针片喷碳得到中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室陈振宇教授级高级工程师的帮助;AMICS 测试得到国家地质实验测试中心赵九江博士的支持;审稿专家对论文提出了建设性的修改意见。在此一并表示衷心的感谢。

4 参考文献

- [1] 杨时蕙.从磁铁矿内部结构探讨云南迤纳厂铁矿床的成因[J].中国地质科学院成都地质矿产研究所所刊,1982,3(1):137-147.
Yang S H. An approach to the genesis of magnetite deposit, Yinachang, Yunnan, from the internal structures of magnetite [J]. Bulletin of the Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 1982, 3(1): 137-147.
- [2] 杨耀民,涂光炽,胡瑞忠.迤纳厂稀土铁铜矿床稀土元素地球化学[J].矿物学报,2004,24(3):301-308.

- Yang Y M, Tu G Z, Hu R Z. REE geochemistry of Yinachang Fe-Cu-REE deposit in Yunnan Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2004, 24(3): 301 - 308.
- [3] 杨耀民, 涂光炽, 胡瑞忠, 等. 武定迤纳厂 Fe - Cu - REE 矿床 Sm - Nd 同位素年代学及其地质意义[J]. *科学通报*, 2005, 50(12): 1253 - 1258.
- Yang Y M, Tu G Z, Hu R Z, et al. Sm-Nd isotopic geochronology of the Yinachang Fe-Cu-REE deposit at Wuding, Yunnan Province and its geologic significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(12): 1253 - 1258.
- [4] Zhao X F, Zhou M F. Fe-Cu deposits in the Kangdian region, SW China: A Proterozoic IOCG (iron oxide-copper-gold) metallogenic province [J]. *Mineralium Deposita*, 2011, 46(7): 731 - 747.
- [5] Zhao X F, Zhou M F, Gao J F, et al. *In situ* Sr isotope analysis of apatite by LA-MC-ICP-MS: Constraints on the evolution of ore fluids of the Yinachang Fe-Cu-REE deposit, Southwest China [J]. *Mineralium Deposita*, 2015, 50(7): 871 - 884.
- [6] 叶霖, 刘玉平, 李朝阳, 等. 云南武定迤纳厂铜矿含矿石英脉⁴⁰Ar - ³⁹Ar 年龄及其意义[J]. *矿物学报*, 2004, 24(4): 411 - 414.
- Ye L, Liu Y P, Li C Y, et al. Ar-Ar isotopic age Yinachang copper deposit, Wuding, Yunnan Province, China and its implications[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2004, 24(4): 411 - 414.
- [7] 侯林, 丁俊, 邓军, 等. 云南武定迤纳厂铁铜矿岩浆角砾岩 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄及其意义[J]. *地质通报*, 2013, 32(4): 580 - 588.
- Hou L, Ding J, Deng J, et al. Zircon LA-ICP-MS dating of the magmatic breccia from the Yinachang iron-copper deposit in Wuding County of Yunnan Province and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(4): 580 - 588.
- [8] 叶现韬, 朱维光, 钟宏, 等. 云南武定迤纳厂 Fe - Cu - REE 矿床的锆石 U - Pb 和黄铜矿 Re - Os 年代学、稀土元素地球化学及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(4): 1167 - 1186.
- Ye X T, Zhu W G, Zhong H, et al. Zircon U-Pb and chalcopyrite Re-Os geochronology, REE geochemistry of the Yinachang Fe-Cu-REE deposit in Yunnan Province and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(4): 1167 - 1186.
- [9] Hou L, Ding J, Deng J, et al. Geology, geochronology, and geochemistry of the Yinachang Fe-Cu-Au-REE deposit of the Kangdian region of SW China: Evidence for a Paleo-Mesoproterozoic tectono-magmatic event and associated IOCG systems in the Western Yangtze Block[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 103: 129 - 149.
- [10] 丁俊, 侯林. 云南武定迤纳厂岩浆热液型铁 - 铜 - 金 - 稀土矿床流体特征研究[J]. *西北地质*, 2012, 45(4): 39 - 50.
- Ding J, Hou L. Study on ore-forming fluid characteristics of Yinachang Fe-Cu-Au-REE deposit, Wuding, Yunnan Province, China [J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(4): 39 - 50.
- [11] 侯林, 丁俊, 王长明, 等. 云南武定迤纳厂铁 - 铜 - 金 - 稀土矿床成矿流体与成矿作用[J]. *岩石学报*, 2013, 29(4): 1187 - 1202.
- Hou L, Ding J, Wang C M, et al. Ore-forming fluid and metallogenesis of the Yinachang Fe-Cu-Au-REE deposit, Wuding, Yunan Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(4): 1187 - 1202.
- [12] 侯林, 彭惠娟, 丁俊. 云南武定迤纳厂铁 - 铜 - 金 - 稀土矿床成矿物质来源——来自矿床地质与 S、Pb、H、O 同位素的制约[J]. *岩石矿物学杂志*, 2015, 34(2): 205 - 218.
- Hou L, Peng H J, Ding J. Sources of the ore-forming materials for the Yinachang Fe-Cu-Au-REE deposit, Wuding, Yunnan Province: Constraints from the ore geology and the S, Pb, H, O isotope geochemistry [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2015, 34(2): 205 - 218.
- [13] Li X C, Zhou M F. Multiple stages of hydrothermal REE remobilization recorded in fluorapatite in the Paleoproterozoic Yinachang Fe-Cu-(REE) deposit, Southwest China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 166(1): 53 - 73.
- [14] Creelman R A, Ward C R. A scanning electron microscope method for automated, quantitative analysis of mineral matter in coal [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1996, 30(3): 249 - 269.
- [15] Liu Y H, Gupta R, Sharma A, et al. Mineral matter-organic matter association characterisation by QEMSCAN and applications in coal utilisation [J]. *Fuel*, 2005, 84(10): 1259 - 1267.
- [16] Pascoe R D, Power M R, Simpson B. QEMSCAN analysis as a tool for improved understanding of gravity separator performance [J]. *Minerals Engineering*, 2007, 20(5): 487 - 495.
- [17] Gu Y. Automated scanning electron microscope based mineral liberation analysis an introduction to JKMR/FEI Mineral Liberation Analyser [J]. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2003, 2(1): 33 - 41.

- [18] Redwan M, Rammlmair D, Meima J A. Application of mineral liberation analysis in studying micro-sedimentological structures within sulfide mine tailings and their effect on hardpan formation[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 414:480-493.
- [19] 梁冬云, 邹霓, 李波. MLA 自动检测技术在低品位钼矿石工艺矿物学研究中的应用[J]. *中国钼业*, 2010, 34(1):32-34.
Liang D Y, Zou N, Li B. Application of MLA automated quantitative mineralogy in process mineralogy research on low-grade molybdenum ore [J]. *China Molybdenum Industry*, 2010, 34(1):32-34.
- [20] 李波, 梁冬云, 张莉莉. 富磷灰石复杂稀土矿石工艺矿物学研究[J]. *中国稀土学报*, 2012, 30(6):761-765.
Li B, Liang D Y, Zhang L L. Process mineralogy of an apatite-rich complex rare earth ore [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2012, 30(6):761-765.
- [21] 苟瑞涛. 基于 MLA 的碳酸岩-碱性杂岩稀土-铌-铁矿矿物学特征研究——以内蒙古白云鄂博矿床为例[D]. 北京:中国地质大学, 2016:1-68.
Gou R T. The Study on Mineralogical Characteristics of REE-Nb-Fe Ore within Carbonatites-Alkaline Complexes Based on MLA—A Case Study for Bayan Obo Deposit in Inner Mongolia, China [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016:1-68.
- [22] Zhou M F, Zhao X F, Chen W T, et al. Proterozoic Fe-Cu metallogeny and supercontinental cycles of the Southwestern Yangtze Block, Southern China and Northern Vietnam [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 139:59-82.
- [23] 杨波, 丁俊, 徐金沙, 等. 滇中武定迤纳厂铁铜多金属矿床中稀土、金的赋存状态特征研究[J]. *矿物岩石*, 2014, 34(4):36-45.
Yang B, Ding J, Xu J S, et al. Research of occurrence character and REE of associated gold for the Yinachang Fe-Cu-Au-REE deposit in central Yunnan region [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2014, 34(4):36-45.
- [24] Zhao X F, Zhou M F, Li J W, et al. Sulfide Re-Os and Rb-Sr isotope dating of the Kangdian IOCG metallogenic Province, Southwest China: Implications for regional metallogenesis [J]. *Economic Geology*, 2013, 108(6):1489-1498.
- [25] Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Review of global 2.1-1.8Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent [J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 59(1-4):125-162.
- [26] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Assembly, accretion and breakup of the Paleo-Mesoproterozoic Columbia supercontinent: Records in the North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 2003, 6(3):417-434.
- [27] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: Assembly, growth and breakup [J]. *Earth Science Reviews*, 2004, 67(1-2):91-123.
- [28] 李献华, 周汉文, 李正祥, 等. 扬子块体西缘新元古代双峰式火山岩的锆石 U-Pb 年龄和岩石化学特征 [J]. *地球化学*, 2001, 30(4):315-322.
Li X H, Zhou H W, Li Z X, et al. Zircon U-Pb age and petrochemical characteristics of the Neoproterozoic bimodal volcanics from Western Yangtze Block [J]. *Geochimica*, 2001, 30(4):315-322.
- [29] 李献华, 周汉文, 李正祥, 等. 川西新元古代双峰式火山岩成因的微量元素和 Sm-Nd 同位素制约及其大地构造意义 [J]. *地质科学*, 2002, 37(3):264-276.
Li X H, Zhou H W, Li Z X, et al. Petrogenesis of Neoproterozoic bimodal volcanics in Western Sichuan and its tectonic implications: Geochemical and Sm-Nd isotopic constraints [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(3):264-276.
- [30] 江新胜, 王剑, 崔晓庄, 等. 滇中新元古代澄江组锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其地质意义 [J]. *中国科学(地球科学)*, 2012, 42(10):1496-1507.
Jiang X S, Wang J, Cui X Z, et al. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of the Neoproterozoic Chengjiang Formation in Central Yunnan Province (SW China) and its geological significance [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2012, 42(10):1496-1507.

Application of the Automated Mineral Identification and Characterization System (AMICS) in the Identification of Rare Earth and Rare Minerals

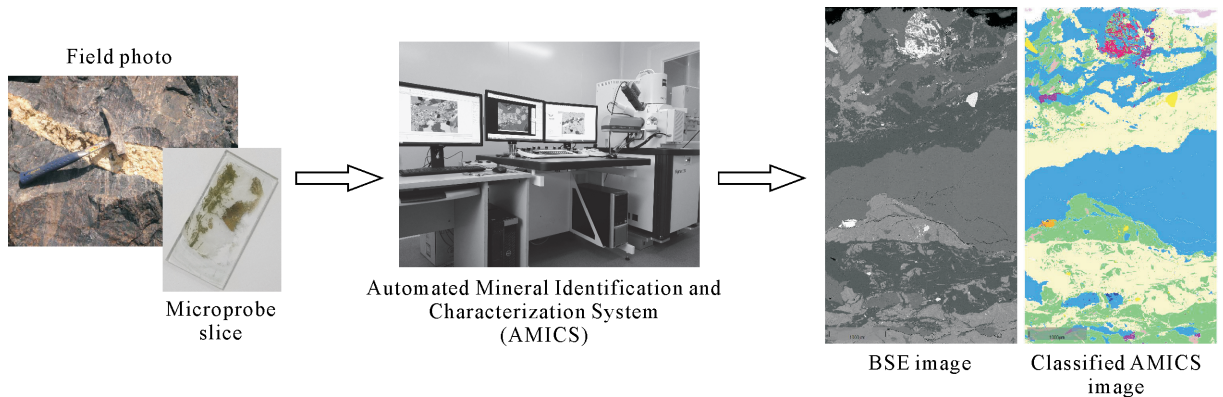
WEN Li-gang^{1,2}, ZENG Pu-sheng^{1*}, ZHAN Xiu-chun¹, FAN Chen-zi¹, SUN Dong-yang¹,
WANG Guang¹, YUAN Ji-hai¹

(1. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China;

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The mineral composition, size and distribution in vein ore were investigated by AMICS.
- (2) The mineral microstructure and chemical composition were observed by SEM-EDS.
- (3) A mounts of fine and micro-fine radial parasite aggregates, and minor Nb-bearing rutiles were recognized in the vein ores from the Yinachang Fe-Cu-REE deposit.
- (4) Both of the iron oxides (II -1) and copper sulfides (II -2) mineralization stages are associated with REEs mineralization in the Yinachang Fe-Cu-REE deposit.



ABSTRACT: The Yinachang Fe-Cu-REE deposit is one of the representative Proterozoic Fe-Cu-REE deposits in central Yunnan, at the southwestern margin of the Yangtze Block, China. Beside Fe and Cu, there are REEs, Nb, Mo, Co, Au, U and other elements in the ores. The study on the occurrences of rare earth minerals and rare minerals is very weak. It is difficult to identify precisely using the traditional testing techniques and methods due to the relatively complex mineral composition, the small size and the complex dissemination characteristics of rare earth minerals and rare minerals in ores. In order to explore the occurrences of rare earth minerals and rare minerals, the Automated Mineral Identification and Characterization System (AMICS) was used. This system is the most up-to-date mineral automatic analysis system in mineralogy and geology in the world. Combined with the Scanning Electron Microscope and X-ray Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) microstructure in-situ analysis technique, this system was used to determine the species and contents of minerals in vein ores from the Yinachang Fe-Cu-REE deposit. The quantitative mineral identification, which was difficult to achieve by conventional means of rock-mineral identification, have been completed. The results show that there are 0.82% parasites and 0.02% Nb-bearing rutiles in the vein ores. Both of the iron oxides and copper sulfides mineralization stages are associated with REE mineralization in this deposit. Two main mineralization stages are identified, i. e., the Fe-REE mineralization stage (II-1) and Cu (-Au)-REE mineralization stage (II-2). This study provides accurate and reliable evidence for the comprehensive utilization of rare earth and rare metal resources and the further study of Fe-Cu-REE deposits. An advanced and practical technical method of rock-mineral identification was established, which is expected to be more widely used in fields such as geology, exploration and effective utilization of mineral resources.

KEY WORDS: Automated Mineral Identification and Characterization System (AMICS); parasite; Fe-Cu-REE deposit; Yinachang; the central Yunnan Province