

# 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\*

叶现韬<sup>1,2</sup> 朱维光<sup>1\*\*</sup> 钟宏<sup>1</sup> 何德锋<sup>1</sup> 任涛<sup>3</sup> 柏中杰<sup>1</sup> 范宏鹏<sup>1,2</sup> 胡文俊<sup>1,2</sup>

YE XianTao<sup>1,2</sup>, ZHU WeiGuang<sup>1\*\*</sup>, ZHONG Hong<sup>1</sup>, HE DeFeng<sup>1</sup>, REN Tao<sup>3</sup>, BAI ZhongJie<sup>1</sup>, FAN HongPeng<sup>1,2</sup> and HU WenJun<sup>1,2</sup>

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. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

2012-09-08 收稿, 2013-01-17 改回.

**Ye XT, Zhu WG, Zhong H, He DF, Ren T, Bai ZJ, Fan HP and Hu WJ. 2013. Zircon U-Pb and chalcopyrite Re-Os geochronology, REE geochemistry of the Yinachang Fe-Cu-REE deposit in Yunnan Province and its geological significance. Acta Petrologica Sinica, 29(4): 1167-1186**

**Abstract** The Yinachang Fe-Cu-REE ore deposit is hosted in the Paleoproterozoic Yinachang Formation of the Lower Kunyang Group in the Kangdian iron-copper metallogenic province, SW China. The main minerals in the Yinachang ore bodies consist of chalcopyrite, magnetite, quartz and calcite. As the host rocks of the deposit had experienced intensively alternation and metamorphism, the age and origin of the Yinachang deposit are still a matter of hot debate. U-Pb ages of detrital zircons from the volcanic tuff and breccia in the Yinachang Formation have been used to identify the provenance and evaluate the age of the Yinachang Formation of the Lower Kunyang Group. Most analyzed zircon grains show oscillatory zoning and have high Th/U ratios ( $> 0.4$ ), suggesting that they were mainly derived from igneous rocks. A total amounts of about 200 detrital zircons exhibit U-Pb age populations at 1.75 ~ 1.88Ga, 1.90 ~ 2.00Ga, 2.02 ~ 2.20Ga and 2.30 ~ 2.40Ga, with the oldest  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  age of ~3.0Ga and the youngest age of ca. 1750Ma. The dating results provide a maximum deposition age of ca. 1.7Ga for the Yinachang Formation, and suggest the possible existence of older basement. Rhenium-osmium dating for six chalcopyrite samples from the Yinachang Fe-Cu-REE deposit was conducted to constrain the timing of sulfide mineralization. Direct Re-Os dating for chalcopyrite of ore minerals yields an isochron age of  $1690 \pm 99\text{Ma}$  (MSWD = 9.0) and a weighted mean of  $1685 \pm 37\text{Ma}$  (MSWD = 3.0), respectively, indicating the main ore-forming age of about 1.7Ga. In addition, the major ore types exhibit significantly positive Eu anomaly and LREE enrichment, similar to those of modern submarine hydrothermal fluids. The above dating results reveal that the ore-forming age of the deposit is nearly contemporaneous with the deposition timing of the Yinachang Formation, and the characteristics of fluid deduced from REE indicate that the ore formation was related to submarine hydrothermal fluids activity. It is therefore suggested that the Yinachang Fe-Cu-REE deposit is a volcanic exhalation-hydrothermal sedimentary deposit. Several recent studies showed the occurrence of relatively widespread magmatism at ca. 1.7Ga and large numbers of synchronous Fe-Cu deposits, suggesting that the magmatism is probably the crucial factor for the formation of deposits in this region. Furthermore, the Fe-Cu deposits in the Kangdian region may be related to the break-up of the Columbia supercontinent at about 1.7Ga.

**Key words** Fe-Cu-REE ore deposit; Zircon U-Pb dating; Chalcopyrite Re-Os dating; REE geochemistry; Yinachang; Yunnan

**摘要** 迤纳厂矿床是康滇地区典型的铁-铜-稀土矿床之一。因为其特殊的矿物组合(磁铁矿与黄铜矿共生)以及富含稀

\* 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-436-4)、国家自然科学基金项目(41273049、41073043)和矿床地球化学国家重点实验室125项目群(SKLOG-ZY125-06)联合资助。

第一作者简介: 叶现韬,男,1987,硕士生,矿床地球化学专业,E-mail: yexiantao@jg.ac.cn

\*\* 通讯作者: 朱维光,男,1968,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

土矿物,这类矿床一直是矿床学家研究的热点。然而由于其围岩遭受不同程度的变质和蚀变作用,这类矿床的成矿时代与矿床成因一直存在争议。本文通过对迤纳厂组中层状凝灰岩和火山角砾岩所含锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 定年来揭示迤纳厂组的最大沉积年龄。大多数锆石具有明显的震荡环带和较高的 Th/U 比值 ( $>0.4$ ) 表明它们均是岩浆锆石,近 200 粒碎屑锆石的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄大致可以分为四组: 1.75 ~ 1.88Ga, 1.90 ~ 2.00Ga, 2.02 ~ 2.20Ga 和 2.30 ~ 2.40Ga, 且最老年龄在 3.0Ga 左右, 而最年轻年龄在 1750Ma 左右。这一定年结果反映了迤纳厂组的沉积上限大约为 1.7Ga, 并且在康滇地区可能还有更老的基底存在。通过对矿石矿物黄铜矿的 Re-Os 同位素定年测试, 直接限定了矿床的成矿时代。6 个黄铜矿样品的 Re-Os 同位素等时线年龄为  $1690 \pm 99\text{Ma}$  (MSWD = 9.0), 模式年龄的加权平均值为  $1685 \pm 37\text{Ma}$  (MSWD = 3.0), 表明该矿床形成于距今约 1.7Ga。另外, 主要类型矿石具显著的正铕异常和轻稀土富集的特点, 与现代海底热液极其相似。年代学研究显示矿床的形成时代和地层的沉积时代大致相同, 而 REE 揭示的流体特征反映其成矿作用与海底热液活动有关。这些结果暗示了该矿床为海底火山喷发-同生沉积形成。近来的较多研究证实, 康滇地区存在 1.7Ga 左右较大范围的岩浆活动和较多同期铁-铜矿床, 表明该期岩浆活动可能是制约该区铁-铜矿床形成的关键因素, 且岩浆活动可能与约 1.7Ga 的 Columbia 超大陆的裂解事件有关。

**关键词** 铁-铜-稀土矿床; 锆石 U-Pb 定年; 黄铜矿 Re-Os 定年; 稀土元素地球化学; 迤纳厂; 云南

**中图法分类号** P595; P597.3; P611

*al.*, 2002) 和成矿响应事件之间的关系。

## 1 引言

康滇地区是我国重要的铁-铜矿成矿区之一(龚琳等, 1996), 目前有的学者也称之为 IOCG (iron oxide-copper-gold) 成矿省 (Greentree, 2007; Zhao, 2010; Zhao and Zhou, 2011)。该地区产出拉拉、大红山、东川等大型铁-铜矿床, 同时也产出迤纳厂、观天厂等小型但含稀土元素很高的特殊铁-铜矿床(杨耀民, 2004)。近年来康滇地区的这些矿床得到了广泛的研究, 并取得了一系列重要的成果(杨耀民等, 2004, 2005; Greentree and Li, 2008; Zhao *et al.*, 2010; Zhao and Zhou, 2011; Zhao *et al.*, 2012; Chen and Zhou, 2012)。这些研究发现康滇地区的铁-铜矿床都赋存于 1.7Ga 左右的地层中, 且大多数铁-铜矿体的围岩为石榴石黑云母片岩(吴孔文, 2008; 何德锋, 2009; Greentree and Li, 2008; Zhao and Zhou, 2011; Chen and Zhou, 2012)。由于原有测试技术和方法的限制, 一直没有获得这些矿床的较精确成矿年代学数据, 在一定程度上限制了对康滇地区铁-铜矿床成因方面的认识。同时, 由于康滇地区构造复杂、沉积厚度较大(戴恒贵, 1997), 昆阳群内部地层层序一直存在很大的争议(李希勤, 1984; 吴懋德等, 1990; 钟寿华, 1993; 陈天佑, 1993; 戴恒贵, 1997; 薛步高, 1999; 吕世琨和戴恒贵, 2001)。此外, 该区古元古代晚期-中元古代地层在不同区域的划分和名称往往不统一, 这也是造成对康滇地区的地层和矿床在形成时间和成因上认识不一致的重要原因。

本文选取康滇地区迤纳厂 Fe-Cu-REE 矿床为研究对象, 通过赋矿地层中火山角砾岩和凝灰岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年来限定地层的沉积上限年龄, 同时用矿石中黄铜矿 Re-Os 定年结果来限定矿床的成矿时代。本文结果不但有利于了解康滇地区铁-铜矿床的形成时代和成因, 有利于康滇地区的地层层序对比, 而且有利于揭示约 1.7Ga 的全球 Columbia 超大陆裂解事件(Rogers and Santosh, 2002; Zhao *et al.*, 2002) 和成矿响应事件之间的关系。

## 2 区域地质背景

康滇地区位于扬子地块西缘, 一般是指位于绿汁江断裂与小江断裂之间(图 1)。目前认为该地区最老基底岩石是古元古代晚期-中元古代夹长英质和镁铁质火山岩的变质沉积岩, 它们分别被称为大红山群(Greentree and Li, 2008)、东川群(下昆阳群)(Zhao *et al.*, 2010) 和河口群等(何德锋, 2009)。大红山群为一套变质火山岩及沉积岩(吴懋德等, 1990; Hu *et al.*, 1991), 产出大红山铁-铜矿床。大红山变质火山岩主要分布在曼岗河组, 前人通过对大红山群曼岗河组中火山岩的锆石 U-Pb 定年分析得到了三组年龄数据, 分别为  $1687 \pm 8\text{Ma}$  (吴孔文, 2008)、 $1675 \pm 8\text{Ma}$  (Greentree and Li, 2008)、 $1659 \pm 16\text{Ma}$  (Zhao and Zhou, 2011)。河口群也是一套夹变质火山岩的变质火山-沉积岩, 主要分布于四川会理县河口地区一带。该地层中产出拉拉铜矿床, 地层下部的变质火山岩为(石英)角斑岩, 上部的变质火山岩为细碧岩(何德锋, 2009; 尹福光等, 2011); 拉拉矿区角斑岩的锆石 U-Pb 年龄为  $1695 \pm 20\text{Ma}$  (何德锋, 2009)。

昆阳群分布于云南的中部和北部, 被划分为上、下两个亚群(吴懋德等, 1990; 孙志明等, 2009), 其中下昆阳群现在也被称为东川群(Zhao *et al.*, 2010)。下昆阳群由因民组、落雪组、鹅头厂组和绿汁江组构成, 上昆阳群由黄草岭组(大营盘组)、黑山头组、大龙口组和美党组构成(图 2)。因民组地层中火山岩由火山角砾岩、中-基性条带状钠质凝灰岩、沉凝灰岩、细碧岩-角斑岩等在多个旋回中呈互层产出, 凝灰岩样品的锆石 U-Pb 年龄为  $1742 \pm 13\text{Ma}$  (Zhao *et al.*, 2010), 而侵入因民组中辉长岩样品的锆石 U-Pb 年龄为  $1690 \pm 32\text{Ma}$  (Zhao *et al.*, 2010), 表明因民组形成年龄也在 1.7Ga 左右。落雪组为青灰、灰白、肉红色厚层-块状含藻白云岩, 夹硅质白云岩和泥砂质白云岩, 白云岩的 Pb-Pb 等时线年龄

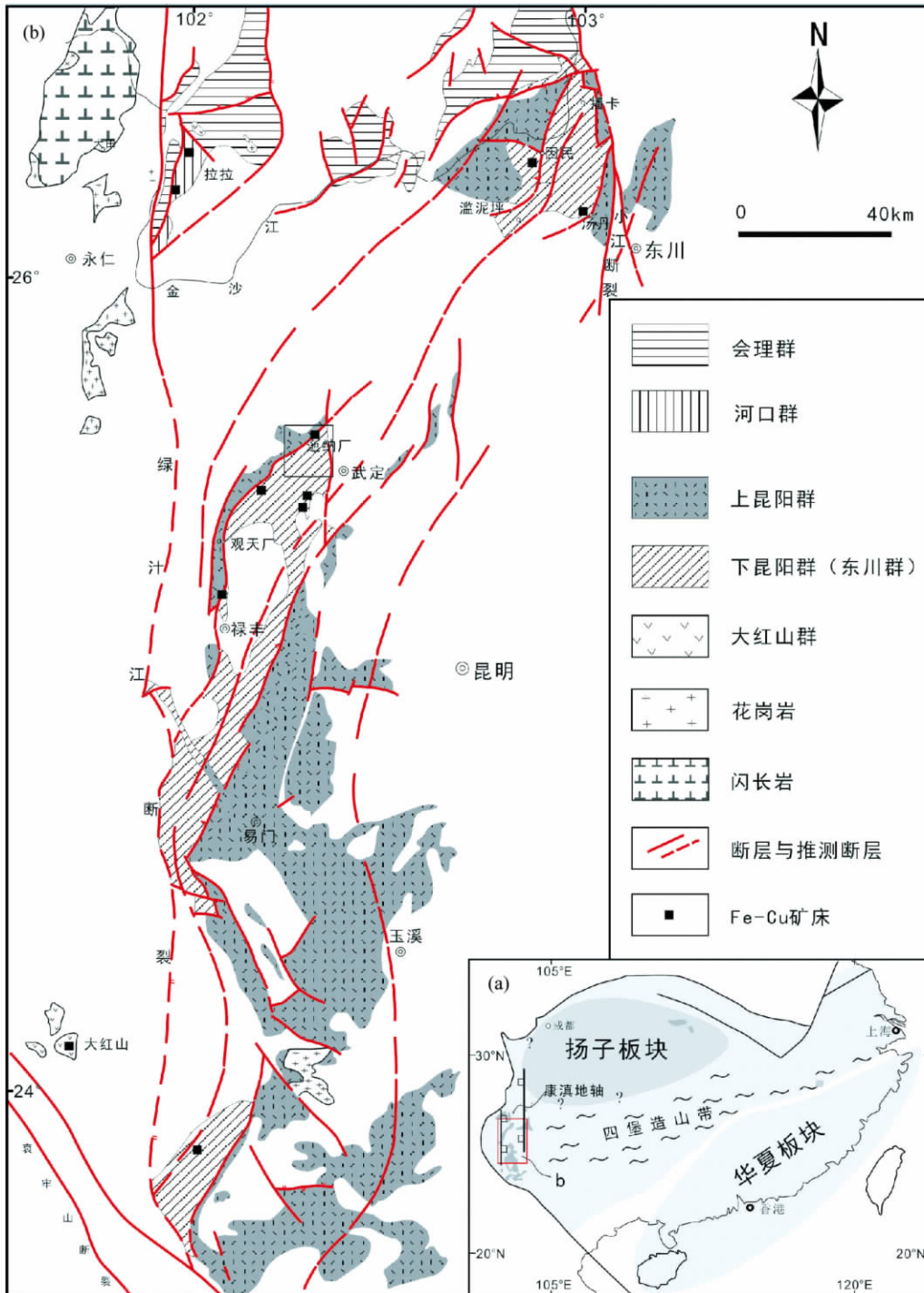


图1 华南地质构造简图 (a 据 Li *et al.* ,1999 ,2002 修改) 和康滇地区昆阳群、大红山群、河口群和会理群及其铁铜矿床分布图 (b 据吴懋德等 ,1990 修改)

Fig.1 Simplified tectonic map showing the study area in relation to South China's major tectonic units ( a ,after Li *et al.* ,1999 , 2002) and distribution of the Kunyang Group , Dahongshan Group , Hekou Group , Huili Group and or its equivalents , and Fe-Cu deposits in the Kangdian region ( b ,after Wu *et al.* ,1990)

为  $1716 \pm 56\text{Ma}$ (常向阳等,1997)。鹤头厂组为一套黑色板岩夹凝灰质火山岩的火山-沉积岩组合,凝灰质火山岩的锆石 SHRIMP 年龄为  $1503 \pm 17\text{Ma}$ (孙志明等,2009)。因此,下

昆阳群可能形成于  $1.8 \sim 1.5\text{Ga}$  之间。上昆阳群黑山头组中火山岩为细碧岩及变质基性熔岩,呈层状产出,火山岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $995 \pm 15\text{Ma}$ (Greentree *et al.* ,2006)

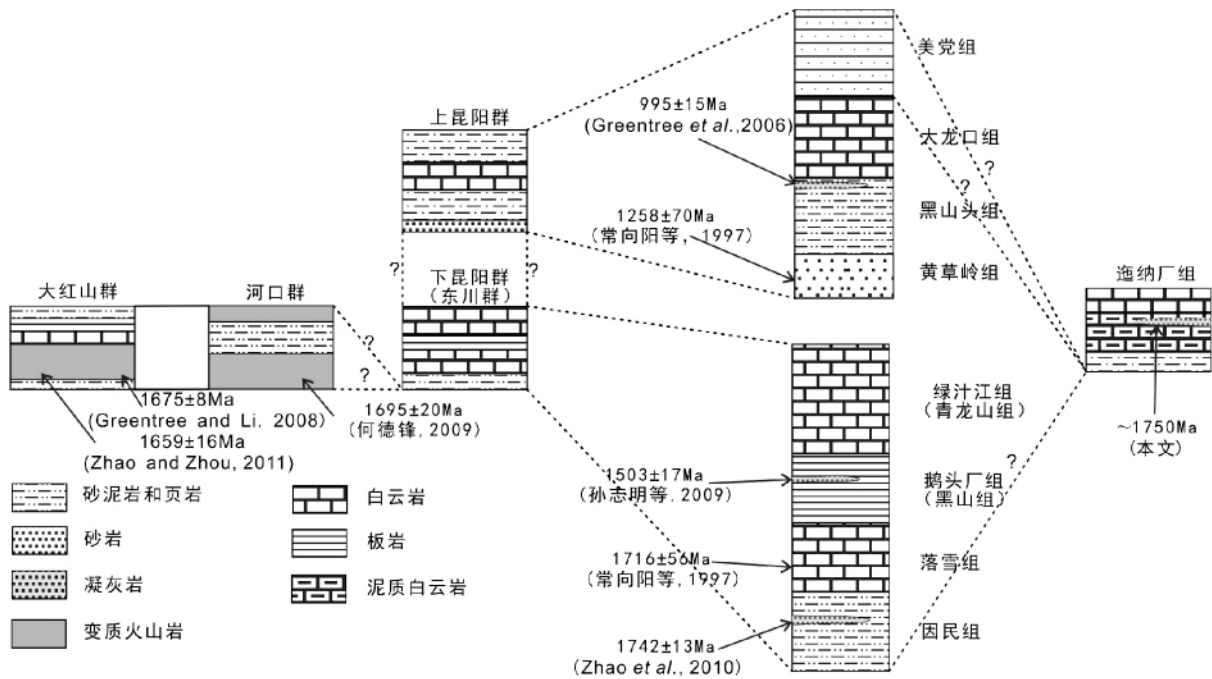


图2 康滇地区昆阳群地层层序图 (据 Zhao and Zhou, 2011 修改)

Fig. 2 Stratigraphic sequences of Kunyang Group in the Kangdian region (after Zhao and Zhou, 2011)

和  $1032 \pm 9\text{Ma}$  (张传恒等, 2007)。美党组中火山岩仅有少量凝灰质板岩、凝灰岩, 呈夹层状产出。可见, 昆阳群形成时代在约 1.8 ~ 1.0Ga 之间。

### 3 矿床地质特征和样品描述

迺纳厂 Fe-Cu-REE 矿床位于云南省武定县。该矿床所处的大地构造位置属于扬子地块西南缘, 康滇地轴云南段中部 (冉崇英, 1989)。矿区处于核桃阱大尖山逆断层西侧、绿汁江断裂东侧, 还分布其它不同规模的断裂, 构造交错复杂 (图 3)。该矿床的赋存地层为昆阳群迺纳厂组, 主要是由炭质板岩、泥质白云岩和白云岩组成, 然而目前迺纳厂组在昆阳群中的层位还有争议。地层中的凝灰岩与火山角砾岩位于该含矿层的上部, 其呈似层状产出, 与地层的产状基本一致, 总体上属于迺纳厂组中上部。凝灰岩呈浅绿色, 与火山角砾岩有明显的边界, 凝灰岩中未见明显的角砾 (图 4a), 镜下可见基质蚀变严重, 多数长石都已蚀变, 石英呈不规则粒状分布, 石英与蚀变的长石约占 70% (图 4c)。火山角砾岩也呈浅绿色, 从手标本中可见火山喷发时从地层中带上来的灰岩和砂岩角砾, 角砾大小不一, 直径从 0.5 ~ 20cm, 棱角不明显 (图 4b)。镜下可见磨圆程度较好的地层角砾, 基质蚀变严重 (图 4d)。

迺纳厂矿床分为 8 个矿段, 东部有大宝山、辣椒矿、东部矿等 3 个矿段, 西部有下狮子口、八层矿、东方红、过水沟、撒卡拉等 5 个矿段, 各矿段均赋存于迺纳厂组。其中, 东方红矿段和大宝山矿段的规模相对较大, 也是本文的主要研究区

域。矿体与顶底板围岩整合接触, 且与地层产状基本一致。围岩变质比较强烈, 主要为石榴石黑云母片岩和黑云母片岩。矿体呈层状、似层状和透镜状产出, 一般长 400 ~ 700m, 最长大于 1000m, 厚 3.93 ~ 4.31m, 宽 200m。矿石以条带状、纹层状和浸染状构造为主, 除此之外还有块状构造。矿石平均含铜 0.85% ~ 0.97%, 含铁高达 41.93% ~ 44.53% (杨耀民, 2004)。在空间上, 矿体的形成与三个火山喷发-沉积旋回相关 (杨耀民, 2004), 浸染状矿石位于条带状矿石的下方, 表明浸染状矿石形成要比条带状矿石早。而块状黄铜矿往往呈脉状穿插于条带状矿石中, 因此, 块状黄铜矿应是最晚形成。条带一般宽几毫米, 一般不超过 1cm, 纹层只有 1mm 左右。矿石矿物组成比较复杂, 主要有磁铁矿、黄铜矿、黄铁矿、菱铁矿, 而辉铜矿、辉钼矿、方铅矿、斑铜矿很少。块状黄铜矿往往呈脉状穿插于磁铁矿之中, 表明黄铜矿的形成时间比磁铁矿稍晚 (图 5a, b); 条带状、纹层状矿石中黄铜矿、磁铁矿以及方解石等常互层产出 (图 5c, d); 浸染状矿石中, 磁铁矿与黄铜矿颗粒紧密共生, 反映了这类矿石中两种矿物几乎同时形成 (图 5e)。该矿床矿石中的脉石矿物主要为石英、方解石、萤石, 其次为磷灰石、透闪石、透辉石和黑云母。其中, 方解石和石英是最常见的脉石矿物, 且方解石与磷灰石紧密共生 (图 5f)。方解石脉主要有三种产状。块状磁铁矿矿石中的方解石呈白色 (图 5g), 块状黄铜矿矿石中的方解石呈浅黄色 (图 5h), 而围岩中方解石呈乳黄色 (图 5i)。



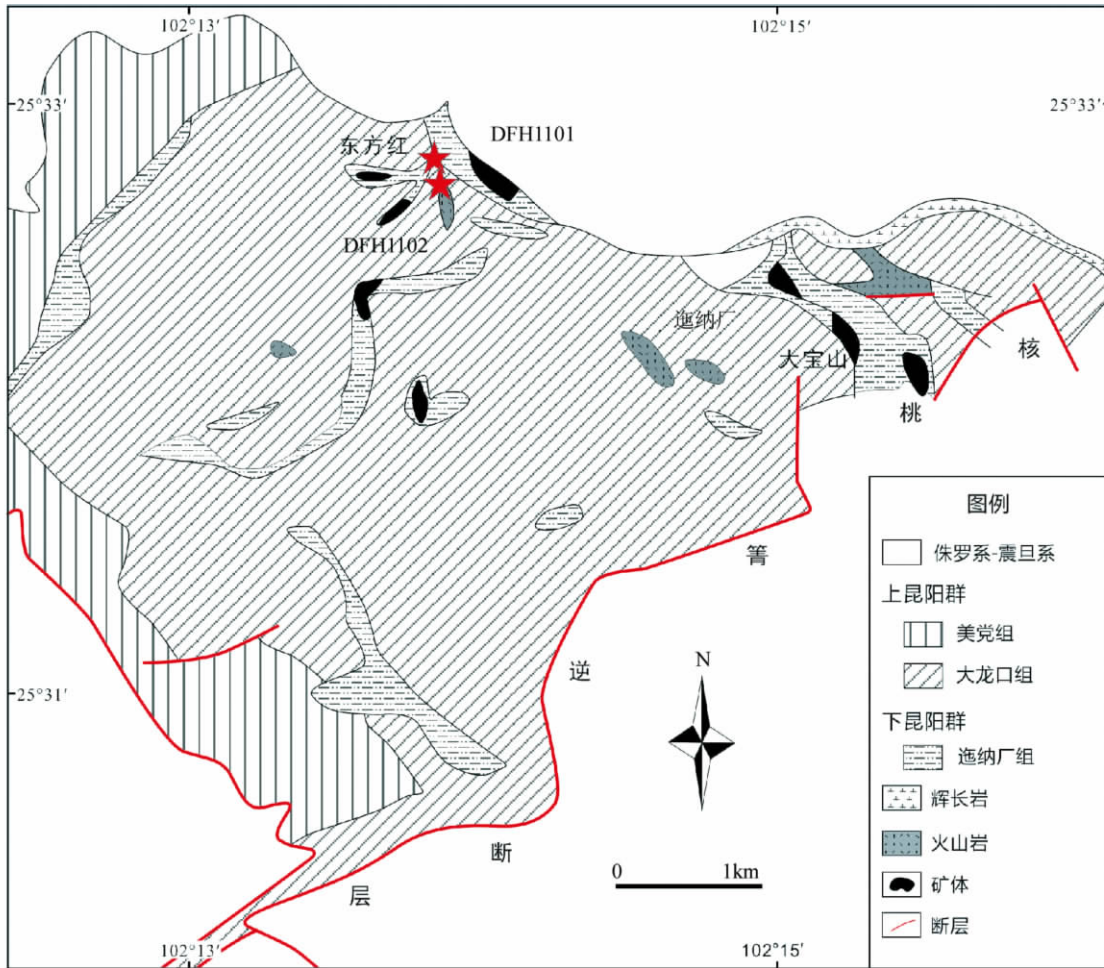


图3 云南武定迤纳厂矿床地质简图 (据吴懋德等,1990 修改)

Fig.3 Simplified geological map of the Yinachang deposit in Wuding County, Yunnan Province (after Wu *et al.*, 1990)

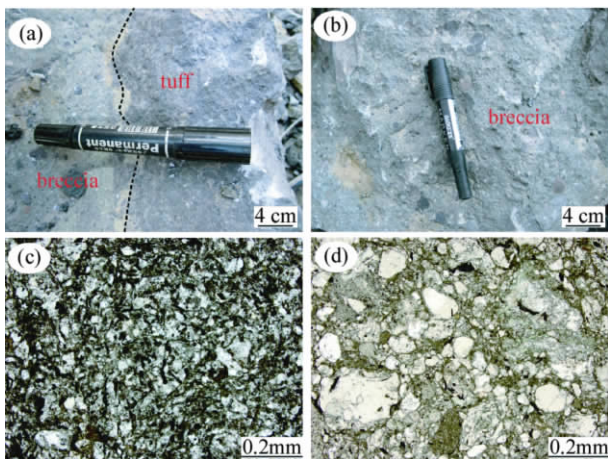


图4 迤纳厂矿区火山岩照片

(a) 迤纳厂凝灰岩 DFH1101; (b) 迤纳厂火山角砾岩 DFH1102; (c) 凝灰岩镜下照片,单偏光; (d) 火山角砾岩镜下照片,单偏光. tuff-凝灰岩; breccia-火山角砾岩

Fig.4 Photographs and photomicrographs of the representative tuff (a, c) and breccias (b, d) from the Yinachang deposit

## 4 分析方法

本研究进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的锆石颗粒从迤纳厂组中上部的凝灰岩 (DFH1101; N 25°32'53.1" E 102°13'34.3") 和火山角砾岩 (DFH1102; N 25°32'53.1" E 102°13'34.3") 中分选出来。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球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,实验中所用的准分子激光剥蚀系统由德国哥廷根 Lamda Physik 公司制造,型号为 GeoLasPro。电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 由日本东京安捷伦公司制造,型号为 Agilent 7700x。实验中激光剥蚀系统产生的紫外光束能量密度为 10J/cm<sup>2</sup>,束斑直径为 32μm,频率为 5Hz,共剥蚀 40s,剥蚀气溶胶由氦气



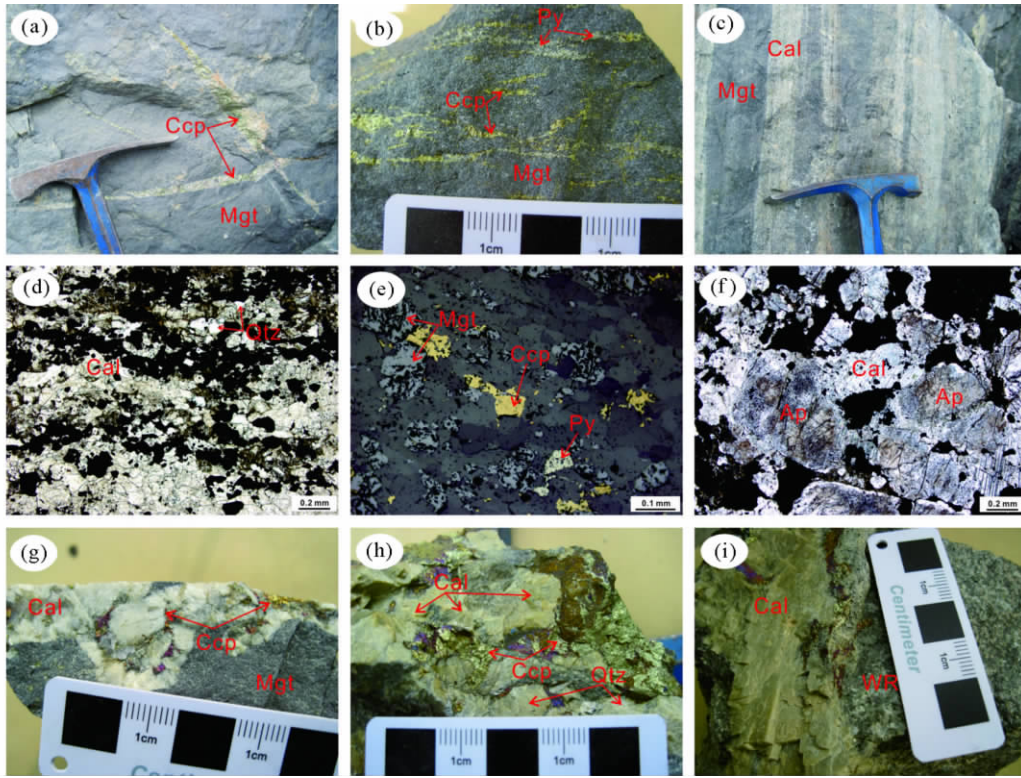


图5 迤纳厂矿床铁铜矿石照片与显微照片

(a, b) 脉状矿石; (c, d) 层状矿石; (e) 浸染状矿石; (f) 矿石中的磷灰石和方解石; (g) 块状磁铁矿矿石中的方解石; (h) 块状黄铜矿矿石中的方解石; (i) 围岩中的方解石. Ccp-黄铜矿; Cal-方解石; Py-黄铁矿; Mgt-磁铁矿; Ap-磷灰石; Qtz-石英; WR-围岩

Fig.5 Photographs and photomicrographs of iron-copper ore from the Yinachang deposit

(a, b) -vein-type ore; (c, d) -bedded ore; (e) -disseminated ore; (f) -apatite and calcite in the ore; (g) -calcite in the magnetite ore; (h) -calcite in the copper ore; (i) -calcite in the wall-rock. Ccp-chalcopyrite; Cal-calcite; Py-pyrite; Mgt-magnetite; Ap-apatite; Qtz-quartz; WR-wall-rock

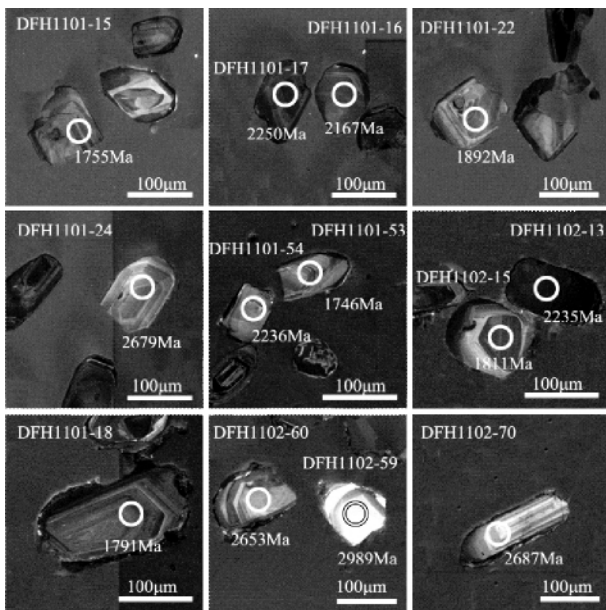


图6 凝灰岩和火山角砾岩中代表性碎屑锆石的阴极发光图像

Fig.6 Representative CL images of the detrital zircon grains for tuff and breccia from the Yinachang deposit

送入 ICP-MS 完成测试。测试过程中以标准锆石 91500 为外标,校正仪器质量歧视与元素分馏;以标准锆石 GJ-1 与 Plešovice 为盲样,检验 U-Pb 定年数据质量;以 NIST SRM 610 为外标,以 Si 为内标,标定锆石中的 Pb 元素含量;以 Zr 为内标,标定锆石中其余微量元素含量(Liu *et al.*, 2010a; Hu *et al.*, 2011)。原始的测试数据用 ICPMSDataCal 软件进行处理(Liu *et al.*, 2010a, b)。

本研究所用的含黄铜矿的矿石采于迤纳厂矿床东方红矿段和大宝山矿段,用于实验的黄铜矿单矿物选自于条带状、浸染状和块状矿石。将矿石样品碎至 40~60 目,然后在双目显微镜下将杂质剔除,使纯度达到 99% 以上,最后将纯净的黄铜矿碎至 200 目。黄铜矿 Re-Os 同位素测试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用 ELAN DRC-e ICP-MS 完成。实验方法参照 Qi *et al.* (2010), 分析步骤大致如下:称取 0.1g 样品于卡洛斯管中,加入 <sup>185</sup>Re 和 <sup>190</sup>Os 稀释剂,用逆王水在 200℃ 下分解 12h,开管后在水浴中用原位蒸馏法蒸馏 Os,Os 用 3mL 水吸收;将蒸馏后的溶液在烧杯中蒸干,转化为 2mol/L 的 HCl 介质,用阴离子交换树脂 AG 1-X8 分析 Re (Qi *et al.*, 2007, 2010) 最后定容至 3mL,用 ICP-MS 测定,相对标准偏差(RSD%) 小于 3%。

表 1 凝灰岩和火山角砾岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses of tuff and breccia in the Yinachang deposit

测点号	组成 ( $\times 10^{-6}$ )				Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		同位素比值		年龄 (Ma)		谐和度					
	Pb	Th	U	Th		$1\sigma$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$			
DFH1101																	
-01	152.7	274	352	0.78	0.1089	0.0029	5.0129	0.1233	0.3251	0.0064	1781	48	1822	21	1815	31	99%
-02	123.9	133	276	0.48	0.1356	0.0014	7.0601	0.0762	0.3757	0.0023	2172	18	2119	10	2056	11	96%
-03	95.4	152	219	0.69	0.1186	0.0012	5.7333	0.0613	0.3492	0.0021	1935	19	1936	9	1931	10	99%
-04	80.0	128	156	0.82	0.1324	0.0013	7.2370	0.0759	0.3950	0.0026	2131	13	2141	9	2146	12	99%
-05	91.7	98	176	0.56	0.1431	0.0014	8.4020	0.0842	0.4240	0.0025	2265	18	2275	9	2279	11	99%
-06	54.7	66.0	111	0.60	0.1325	0.0015	7.4449	0.0840	0.4054	0.0028	2132	14	2166	10	2194	13	98%
-07	98.9	85.7	166	0.52	0.1521	0.0020	10.0328	0.1323	0.4764	0.0031	2369	23	2438	12	2512	13	97%
-08	221.3	119	703	0.17	0.1074	0.0015	4.5076	0.0628	0.3019	0.0022	1755	26	1732	12	1701	11	98%
-09	137.0	179	307	0.58	0.1244	0.0014	6.4374	0.0710	0.3727	0.0022	2020	-14	2037	10	2042	10	99%
-10	67.5	101	172	0.59	0.1096	0.0012	5.1086	0.0595	0.3363	0.0022	1794	21	1838	10	1869	11	98%
-11	88.0	69.5	172	0.40	0.1416	0.0014	8.7017	0.0874	0.4426	0.0027	2247	17	2307	9	2362	12	97%
-12	92.6	97	187	0.52	0.1409	0.0013	8.3040	0.0828	0.4251	0.0028	2239	16	2265	9	2284	12	99%
-13	53.1	98	156	0.63	0.1090	0.0020	4.5260	0.0816	0.2989	0.0026	1783	33	1736	15	1686	13	97%
-14	151.6	45.3	297	0.15	0.1359	0.0032	8.5099	0.1912	0.4487	0.0041	2176	8	2287	20	2389	18	95%
-15	48.3	78	118	0.66	0.1074	0.0030	4.8496	0.1339	0.3217	0.0037	1755	52	1794	23	1798	18	99%
-16	88.3	113	193	0.58	0.1344	0.0012	7.1352	0.0668	0.3823	0.0020	2167	15	2128	8	2087	9	98%
-17	141.2	121	309	0.39	0.1418	0.0015	8.0412	0.0834	0.4083	0.0020	2250	51	2236	9	2207	9	98%
-18	84.3	97	178	0.54	0.1407	0.0014	7.6483	0.0772	0.3913	0.0021	2236	18	2191	9	2129	10	97%
-19	53.0	46.7	92.0	0.51	0.1829	0.0024	12.0911	0.1522	0.4759	0.0034	2679	22	2611	12	2509	15	96%
-20	52.1	103	115	0.89	0.1186	0.0015	5.7778	0.0708	0.3520	0.0027	1944	22	1943	11	1944	13	99%
-21	63.3	61.5	141	0.44	0.1416	0.0015	7.5152	0.0834	0.3816	0.0024	2247	18	2175	10	2084	11	95%
-22	80.7	186	183	1.02	0.1157	0.0012	5.4370	0.0563	0.3385	0.0020	1892	18	1891	9	1879	10	99%
-23	90.4	71.8	175	0.41	0.1481	0.0014	9.1857	0.0944	0.4463	0.0027	2324	17	2357	9	2379	12	99%
-24	116.3	221	197	1.12	0.1442	0.0014	9.2189	0.1027	0.4600	0.0033	2280	17	2360	10	2439	15	96%
-25	60.7	96.4	141	0.69	0.1114	0.0014	5.2621	0.0696	0.3407	0.0025	1833	28	1863	11	1890	12	98%
-26	69.9	42.0	105	0.40	0.1820	0.0020	13.4280	0.1506	0.5320	0.0037	2672	18	2710	11	2750	15	98%
-27	135.9	119	254	0.47	0.1453	0.0014	8.7781	0.0899	0.4352	0.0028	2292	17	2315	9	2329	12	99%
-28	32.9	68.8	71.8	0.96	0.1156	0.0015	5.4173	0.0708	0.3397	0.0025	1900	24	1888	11	1885	12	99%
-29	74.1	68.2	133	0.51	0.1437	0.0014	8.9251	0.0913	0.4489	0.0029	2272	17	2330	9	2390	13	97%
-30	140.6	204	325	0.63	0.1101	0.0011	5.3534	0.0598	0.3505	0.0025	1802	18	1877	10	1937	12	96%
-31	69.2	72.7	134	0.54	0.1436	0.0016	8.1495	0.1022	0.4106	0.0036	2272	23	2248	11	2218	16	98%
-32	163.4	177	280	0.63	0.1437	0.0015	9.1696	0.1051	0.4603	0.0030	2273	18	2355	10	2441	13	96%
-33	34.3	83.2	76.5	1.09	0.1132	0.0016	5.0951	0.0723	0.3260	0.0024	1852	25	1835	12	1819	12	99%
-34	120.4	94.9	236	0.40	0.1323	0.0015	7.5196	0.0915	0.4063	0.0037	2129	20	2175	11	2198	17	98%
-35	165.4	181	316	0.57	0.1358	0.0013	7.8953	0.0812	0.4183	0.0026	2176	16	2219	9	2253	12	98%

续表 1

Continued Table 1

测点号	组成 ( $\times 10^{-6}$ )			Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		同位素比值		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		年龄 (Ma)		谱和度			
	Pb	Th	U		$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$				
-36	80.9	209	142	1.47	0.1200	0.0013	6.3927	0.0761	0.3834	0.0029	19	2031	10	2092	14	97%
-37	87.2	64.5	167	0.39	0.1413	0.0014	8.6286	0.0934	0.4396	0.0030	18	2300	10	2349	13	97%
-38	266.3	264	713	0.37	0.1105	0.0011	5.0255	0.0526	0.3267	0.0018	19	1824	9	1822	9	99%
-39	101.1	93.2	236	0.39	0.1188	0.0014	6.0271	0.0729	0.3643	0.0026	21	1980	11	2002	12	98%
-40	103.0	84.7	196	0.43	0.1444	0.0018	8.8538	0.1100	0.4396	0.0031	21	2323	11	2349	14	98%
-41	69.0	74.6	135	0.55	0.1341	0.0016	7.6710	0.0938	0.4103	0.0030	20	2193	11	2216	13	98%
-42	88.9	142	212	0.67	0.1095	0.0012	5.1544	0.0604	0.3375	0.0023	20	1845	10	1875	11	98%
-43	89.6	89.3	210	0.43	0.1452	0.0015	7.1268	0.0931	0.3524	0.0035	17	2127	12	1946	17	91%
-44	266.3	264	713	0.37	0.1103	0.0010	4.9246	0.0457	0.3202	0.0017	16	1806	8	1791	8	99%
-45	161.9	170	312	0.55	0.1391	0.0013	8.2752	0.0886	0.4270	0.0031	16	2262	10	2292	14	98%
-46	129.0	253	289	0.87	0.1203	0.0012	5.6090	0.0600	0.3350	0.0022	23	1917	9	1863	10	97%
-47	211.5	374	438	0.85	0.1389	0.0014	7.5703	0.0909	0.3905	0.0031	18	2181	11	2125	14	97%
-48	109.7	155	230	0.67	0.1260	0.0013	6.6323	0.0745	0.3783	0.0027	18	2064	10	2068	12	99%
-49	173.7	177	327	0.54	0.1434	0.0013	8.7362	0.0925	0.4378	0.0031	15	2311	10	2341	14	98%
-50	137.0	125	343	0.36	0.1169	0.0011	5.4973	0.0531	0.3382	0.0019	18	1900	8	1878	9	98%
-51	215.8	177	347	0.51	0.1799	0.0016	12.2556	0.1307	0.4904	0.0041	14	2624	10	2573	18	98%
-52	98.4	41.0	157	0.26	0.1785	0.0017	12.9855	0.1377	0.5232	0.0036	11	2679	10	2713	15	98%
-53	48.7	68.7	120	0.57	0.1068	0.0013	4.8869	0.0608	0.3302	0.0027	22	1800	10	1839	13	97%
-54	106.4	109	195	0.56	0.1406	0.0015	8.4237	0.0995	0.4313	0.0031	19	2278	11	2312	14	98%
-55	134.8	120	308	0.39	0.1266	0.0013	6.5019	0.0767	0.3693	0.0027	20	2046	10	2026	13	99%
-56	73.4	196	140	1.40	0.1222	0.0014	5.9134	0.0683	0.3483	0.0022	19	1963	10	1926	10	98%
-57	62.0	70.0	119	0.59	0.1379	0.0014	7.9104	0.0866	0.4133	0.0028	17	2221	10	2230	13	99%
-58	36.1	69.7	74.7	0.93	0.1208	0.0016	6.0204	0.0861	0.3598	0.0031	23	1979	12	1981	15	99%
-59	82.1	263	167	1.58	0.1116	0.0013	5.0164	0.0616	0.3236	0.0023	21	1822	10	1807	11	99%
-60	187.0	197	354	0.56	0.1432	0.0015	8.3718	0.0911	0.4207	0.0027	18	2272	10	2264	12	99%
-61	49.4	77.2	82.9	0.93	0.1454	0.0019	8.8411	0.1230	0.4378	0.0035	23	2322	13	2341	16	99%
-62	123.4	92.1	250	0.37	0.1429	0.0015	8.1120	0.0905	0.4081	0.0025	19	2244	10	2206	12	98%
-63	215.1	194	431	0.45	0.1451	0.0014	8.2793	0.0852	0.4102	0.0023	17	2262	9	2216	10	97%
-64	133.9	124	299	0.42	0.1377	0.0014	7.0855	0.0792	0.3696	0.0026	18	2122	10	2028	12	95%
-65	160.0	132	332	0.40	0.1434	0.0014	7.9348	0.0791	0.3978	0.0024	17	2224	9	2159	11	97%
-66	79.1	70.6	174	0.41	0.1253	0.0014	6.7131	0.0808	0.3852	0.0028	20	2074	11	2101	13	98%
-67	62.0	61.8	109	0.57	0.1456	0.0017	9.2008	0.1131	0.4555	0.0035	20	2358	11	2420	16	97%
-68	63.2	77.5	159	0.49	0.1106	0.0014	5.2508	0.0704	0.3418	0.0027	18	1861	11	1895	13	98%
-69	123.9	94.3	238	0.40	0.1459	0.0017	8.7938	0.1075	0.4335	0.0030	19	2317	11	2321	13	99%
-70	151.1	340	302	1.13	0.1213	0.0013	6.1160	0.0688	0.3626	0.0024	14	1993	10	1994	11	99%
-71	63.0	75.0	117	0.64	0.1443	0.0016	8.6918	0.0966	0.4329	0.0027	19	2306	10	2319	12	99%



续表 1  
Continued Table 1

测点号	组成 ( $\times 10^{-6}$ )				Th/U	同位素比值				年龄 (Ma)				谐和度				
	Pb	Th	U			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$		
-72	136.9	136	207		0.66	0.1845	0.0018	13.0323	0.1292	0.5076	0.0030	2694	16	2682	9	2646	13	98%
-73	122.1	150	231		0.65	0.1418	0.0014	8.3021	0.0890	0.4200	0.0027	2250	50	2265	10	2260	12	99%
-74	144.7	227	264		0.86	0.1328	0.0013	7.7595	0.0846	0.4192	0.0030	2135	18	2204	10	2257	13	97%
-75	156.1	143	353		0.41	0.1297	0.0013	6.7816	0.0713	0.3749	0.0023	2094	23	2083	9	2052	11	98%
-76	118.4	169	291		0.58	0.1080	0.0013	5.0668	0.0618	0.3367	0.0025	1766	21	1831	10	1871	12	97%
-77	88.2	103	166		0.62	0.1408	0.0015	8.5921	0.1031	0.4386	0.0035	2237	19	2296	11	2344	16	97%
-78	123.2	151	277		0.55	0.1193	0.0012	6.1333	0.0680	0.3691	0.0027	1946	18	1995	10	2025	13	98%
-79	64.8	96.5	133		0.72	0.1243	0.0013	6.7847	0.0806	0.3925	0.0030	2020	-14	2084	11	2134	14	97%
-80	63.0	109	151		0.73	0.1084	0.0012	5.1333	0.0626	0.3408	0.0026	1773	20	1842	10	1890	12	97%
-81	143.8	111	303		0.37	0.1296	0.0012	7.3295	0.0815	0.4065	0.0031	2094	17	2152	10	2199	14	97%
-82	64.1	65.3	119		0.55	0.1442	0.0016	8.8574	0.1082	0.4419	0.0035	2280	20	2323	11	2359	16	98%
-83	133.1	168	286		0.59	0.1379	0.0014	7.1239	0.0875	0.3709	0.0030	2211	17	2127	11	2034	14	95%
-84	79.6	109	182		0.60	0.1162	0.0014	5.7745	0.0709	0.3580	0.0025	1898	22	1943	11	1973	12	98%
DFH1102																		
-01	87.6	164	200		0.82	0.1092	0.0012	4.9917	0.0618	0.3287	0.0025	1787	22	1818	10	1832	12	99%
-02	24.28	34.6	56.9		0.61	0.1103	0.0016	5.2812	0.0836	0.3466	0.0035	1806	21	1866	14	1918	17	97%
-03	36.8	62	91		0.68	0.1074	0.0016	4.8210	0.0728	0.3235	0.0029	1767	27	1789	13	1807	14	98%
-04	213.4	230	468		0.49	0.1435	0.0012	7.1364	0.0634	0.3575	0.0017	2270	15	2129	8	1971	8	92%
-05	113.9	114	219		0.52	0.1338	0.0012	7.5570	0.0714	0.4069	0.0024	2148	17	2180	8	2201	11	99%
-06	62.8	91.4	112		0.82	0.1548	0.0016	8.9171	0.1226	0.4145	0.0041	2399	18	2330	13	2235	19	95%
-07	53.3	122	120		1.01	0.1100	0.0013	4.8264	0.0546	0.3159	0.0018	1811	16	1790	10	1770	9	98%
-08	74.5	104	153		0.68	0.1303	0.0015	6.7038	0.0784	0.3709	0.0025	2102	20	2073	10	2034	12	98%
-09	123.5	154	249		0.62	0.1334	0.0014	6.9575	0.0832	0.3754	0.0031	2143	19	2106	11	2055	14	97%
-10	252.0	284	451		0.63	0.1475	0.0018	8.1843	0.0999	0.3968	0.0026	2317	21	2252	11	2154	12	95%
-11	95.2	86.7	135		0.64	0.1817	0.0017	13.2204	0.1292	0.5231	0.0032	2668	15	2696	9	2712	14	99%
-12	200.3	67.7	466		0.15	0.1197	0.0012	6.0441	0.0620	0.3623	0.0020	1954	13	1982	9	1993	9	99%
-13	114.0	107	211		0.51	0.1406	0.0013	8.3927	0.0873	0.4291	0.0030	2235	16	2274	9	2302	13	98%
-14	85.6	91.3	184		0.50	0.1193	0.0021	6.0186	0.0983	0.3624	0.0029	1946	38	1979	14	1994	14	99%
-15	49.0	76.3	120		0.64	0.1101	0.0014	5.0646	0.0700	0.3313	0.0029	1811	18	1830	12	1845	14	99%
-16	75.7	131	156		0.84	0.1193	0.0014	5.9654	0.0721	0.3601	0.0025	1946	21	1971	11	1983	12	99%
-17	33.53	22.3	49.6		0.45	0.1794	0.0022	13.4050	0.1688	0.5381	0.0045	2647	53	2709	12	2775	19	97%
-18	49.4	68.7	121		0.57	0.1094	0.0012	4.9766	0.0554	0.3283	0.0023	1791	20	1815	9	1830	11	99%
-19	61.6	61.1	122		0.50	0.1368	0.0013	7.6532	0.0773	0.4029	0.0026	2187	17	2191	9	2182	12	99%
-20	79.6	92.6	181		0.51	0.1188	0.0012	5.8956	0.0590	0.3577	0.0022	1939	23	1961	9	1971	10	99%
-21	49.6	82.1	99.9		0.82	0.1275	0.0013	6.7275	0.0734	0.3794	0.0026	2065	13	2076	10	2073	12	99%
-22	63.0	62.8	119		0.53	0.1442	0.0015	8.5432	0.0972	0.4267	0.0029	2280	19	2291	10	2291	13	99%

续表 1

Continued Table 1

测点号	组成 ( $\times 10^{-6}$ )				Th/U	同位素比值				年龄 (Ma)				谐和度			
	Pb	Th	U	Th/U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$					
						$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$				
-23	35.9	58.6	90.3	0.65	0.1089	0.0014	4.8011	0.0596	0.3184	0.0022	1781	23	1785	10	1782	11	99%
-24	124.4	140	328	0.42	0.1102	0.0011	4.8986	0.0548	0.3199	0.0021	1803	19	1802	9	1789	10	99%
-25	47.3	63.4	83.8	0.76	0.1447	0.0016	8.8049	0.1078	0.4384	0.0033	2284	19	2318	11	2343	15	98%
-26	251	503	461	1.09	0.1285	0.0011	7.0057	0.0682	0.3922	0.0024	2080	16	2112	9	2133	11	99%
-27	264.8	149	630	0.24	0.1221	0.0010	6.3192	0.0613	0.3724	0.0023	1987	15	2021	9	2041	11	99%
-28	115.3	209	253	0.83	0.1194	0.0011	5.8358	0.0601	0.3521	0.0022	1947	17	1952	9	1945	11	99%
-29	55.2	102	120	0.85	0.1178	0.0013	5.7559	0.0622	0.3521	0.0020	1924	19	1940	9	1945	10	99%
-30	136.7	271	317	0.85	0.1146	0.0012	5.2842	0.0547	0.3325	0.0020	1873	18	1866	9	1850	10	99%
-31	30.9	60.8	69.6	0.87	0.1146	0.0016	5.2778	0.0815	0.3321	0.0029	1876	26	1865	13	1849	14	99%
-32	23.08	50.6	50.6	1.00	0.1181	0.0018	5.4172	0.0837	0.3324	0.0028	1928	27	1888	13	1850	14	97%
-33	90.2	114	187	0.61	0.1295	0.0013	7.0000	0.0758	0.3890	0.0027	2092	18	2111	10	2118	13	99%
-34	42.1	58.7	71.3	0.82	0.1465	0.0016	9.0346	0.1112	0.4441	0.0031	2305	19	2342	11	2369	14	98%
-35	71.6	158	140	1.14	0.1207	0.0013	6.1774	0.0706	0.3686	0.0027	1969	20	2001	10	2023	13	98%
-36	22.71	23.3	45.7	0.51	0.1330	0.0018	7.4644	0.0996	0.4056	0.0033	2139	23	2169	12	2195	15	98%
-37	104.1	91.0	198	0.46	0.1424	0.0015	8.4429	0.0923	0.4268	0.0026	2257	19	2280	10	2291	12	99%
-38	82.6	72.3	159	0.45	0.1431	0.0017	8.4088	0.0993	0.4223	0.0028	2265	21	2276	11	2271	12	99%
-39	24.67	22.2	50.1	0.44	0.1391	0.0019	7.8226	0.1091	0.4057	0.0034	2216	24	2211	13	2195	16	99%
-40	70.6	86.8	143	0.61	0.1308	0.0014	7.1540	0.0789	0.3937	0.0026	2109	14	2131	10	2140	12	99%
-41	106.1	115	227	0.51	0.1283	0.0013	6.9709	0.0784	0.3906	0.0028	2076	18	2108	10	2126	13	99%
-42	63.38	14.7	165	0.09	0.1173	0.0012	5.7424	0.0639	0.3532	0.0024	1917	23	1938	10	1950	11	99%
-43	61.7	62.6	112	0.56	0.1443	0.0016	8.9434	0.1008	0.4460	0.0029	2279	19	2332	10	2378	13	98%
-44	70.20	15.1	179	0.08	0.1200	0.0013	6.0008	0.0692	0.3605	0.0026	1967	19	1976	10	1984	12	99%
-45	33.0	74.6	74.4	1.00	0.1134	0.0015	5.2027	0.0722	0.3307	0.0026	1855	24	1853	12	1842	12	99%
-46	142.31	13.1	354	0.04	0.1222	0.0013	6.3090	0.0731	0.3724	0.0026	1991	19	2020	10	2041	12	98%
-47	139.7	181	338	0.54	0.1115	0.0012	5.2756	0.0639	0.3409	0.0026	1825	25	1865	10	1891	12	98%
-48	83.7	82.5	179	0.46	0.1291	0.0014	6.9444	0.0832	0.3890	0.0028	2087	14	2104	11	2118	13	99%
-49	37.6	80.0	83.1	0.96	0.1142	0.0015	5.3632	0.0736	0.3401	0.0028	1933	24	1879	12	1887	13	99%
-50	79.5	72.0	143	0.50	0.1502	0.0014	9.3526	0.0946	0.4493	0.0029	2350	16	2373	9	2392	13	99%
-51	90.4	65.8	137	0.48	0.1860	0.0018	13.3917	0.1384	0.5196	0.0033	2706	17	2708	10	2697	14	99%
-52	76.6	135	197	0.68	0.1110	0.0012	4.7530	0.0564	0.3088	0.0019	1817	20	1777	10	1735	10	97%
-53	69.2	47.5	130	0.36	0.1472	0.0017	9.0958	0.1100	0.4458	0.0032	2314	19	2348	11	2377	14	98%
-54	57.6	107	136	0.79	0.1110	0.0014	5.0751	0.0666	0.3306	0.0023	1817	24	1832	11	1841	11	99%
-55	42.7	82.5	62.0	1.33	0.1541	0.0019	10.0469	0.1300	0.4716	0.0035	2392	21	2439	12	2490	16	97%
-56	50.9	61.0	98.5	0.62	0.1380	0.0016	7.8258	0.0915	0.4092	0.0027	2202	19	2211	11	2211	12	99%
-57	57.0	118	133	0.89	0.1127	0.0013	5.0735	0.0603	0.3259	0.0023	1843	21	1832	10	1819	11	99%
-58	71.5	75.5	151	0.50	0.1296	0.0014	7.0428	0.0849	0.3919	0.0029	2094	23	2117	11	2132	14	99%

续表 1

Continued Table 1

测点号	组成 ( $\times 10^{-6}$ )		Th/U	同位素比值		年龄 (Ma)		谐和度									
	Pb	Th		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$										
-59	31.92	19.8	40.0	0.50	0.2197	0.0026	18.8909	0.2486	0.6217	2989	19	0.0055	3036	13	3117	22	97%
-60	55.9	47.1	82.0	0.57	0.1800	0.0020	13.4778	0.1675	0.5401	2653	18	0.0042	2714	12	2784	17	97%
-61	26.04	43.5	61.0	0.71	0.1101	0.0016	5.1550	0.0768	0.3391	1802	26	0.0027	1845	13	1852	13	98%
-62	112.5	59.0	266	0.22	0.1217	0.0014	6.3109	0.0740	0.3741	1981	53	0.0024	2020	10	2048	11	98%
-63	47.2	55.3	85.2	0.65	0.1457	0.0019	8.8067	0.1194	0.4369	2295	22	0.0033	2318	12	2337	15	99%
-64	76.7	119	185	0.64	0.1100	0.0012	5.1465	0.0640	0.3371	1799	16	0.0025	1844	11	1873	12	98%
-65	44.3	70.9	106	0.67	0.1129	0.0014	5.2148	0.0658	0.3337	1847	23	0.0023	1855	11	1856	11	99%
-66	29.14	52.5	65.9	0.80	0.1116	0.0016	5.2541	0.0746	0.3412	1825	26	0.0024	1861	12	1892	12	98%
-67	63.2	128	130	0.99	0.1179	0.0014	5.8883	0.0706	0.3604	1925	20	0.0025	1960	10	1984	12	98%
-68	51.6	65.7	126	0.52	0.1120	0.0014	5.2242	0.0701	0.3365	1832	23	0.0025	1857	11	1870	12	99%
-69	86.1	82.9	115	0.72	0.2020	0.0024	15.5602	0.1927	0.5550	2842	14	0.0039	2850	12	2846	16	99%
-70	46.0	42.0	66.2	0.64	0.1836	0.0022	13.5549	0.1696	0.5334	2687	20	0.0044	2719	12	2756	19	98%
-71	59.9	85.4	105	0.81	0.1408	0.0016	8.4530	0.1001	0.4327	2237	20	0.0031	2281	11	2318	14	98%
-72	54.9	92.8	130	0.72	0.1110	0.0013	5.1143	0.0623	0.3320	1817	21	0.0023	1838	10	1848	11	99%
-73	19.44	20.6	35.7	0.58	0.1450	0.0021	8.8198	0.1403	0.4382	2289	24	0.0042	2320	15	2343	19	99%
-74	43.9	62.1	96.8	0.64	0.1129	0.0014	5.6604	0.0775	0.3616	1847	18	0.0032	1925	12	1990	15	96%
-75	52.0	69.6	99.6	0.70	0.1313	0.0015	7.4376	0.0966	0.4073	2117	21	0.0032	2166	12	2202	15	98%
-76	51.9	81.3	128	0.64	0.1115	0.0014	5.0472	0.0683	0.3250	1833	18	0.0023	1827	11	1814	11	99%
-77	135.6	54.7	276	0.20	0.1420	0.0016	8.3715	0.0974	0.4228	2254	20	0.0028	2272	11	2273	13	99%
-78	48.6	53.1	99.1	0.54	0.1351	0.0018	7.4327	0.1073	0.3946	2165	23	0.0031	2165	13	2144	14	99%
-79	79.1	93.5	154	0.61	0.1324	0.0015	7.4413	0.0910	0.4038	2131	20	0.0029	2166	11	2187	13	99%
-80	105.5	131	236	0.56	0.1191	0.0012	5.9883	0.0654	0.3611	1943	19	0.0024	1974	10	1987	11	99%
-81	173.4	174	320	0.54	0.1476	0.0014	9.0175	0.0919	0.4386	2318	21	0.0028	2340	9	2344	12	99%
-82	150.7	227	284	0.80	0.1346	0.0013	7.4881	0.0761	0.3989	2159	17	0.0024	2172	9	2164	11	99%
-83	160.0	213	347	0.62	0.1203	0.0012	6.0871	0.0616	0.3630	1961	23	0.0020	1988	9	1996	10	99%
-84	54.2	84.6	132	0.64	0.1113	0.0014	5.0491	0.0645	0.3255	1820	22	0.0022	1828	11	1816	11	99%
-85	30.4	56.5	70.9	0.80	0.1136	0.0018	5.3533	0.0895	0.3403	1858	29	0.0033	1877	14	1888	16	99%
-86	111.2	68.5	250	0.27	0.1270	0.0014	6.7727	0.0780	0.3827	2057	18	0.0025	2082	10	2089	12	99%
-87	80.5	84.9	143	0.59	0.1507	0.0016	9.3012	0.1041	0.4435	2353	19	0.0029	2368	10	2366	13	99%
-88	44.90	36.6	97.4	0.38	0.1276	0.0015	6.9153	0.0855	0.3895	2066	16	0.0028	2101	11	2121	13	99%
-89	86.3	134	159	0.84	0.1355	0.0014	7.7422	0.0859	0.4104	2170	17	0.0029	2202	10	2217	13	99%
-90	149.3	102	331	0.31	0.1271	0.0013	6.8407	0.0719	0.3864	2058	18	0.0023	2091	9	2106	11	99%
-91	58.7	53.0	112	0.47	0.1448	0.0016	8.6416	0.1050	0.4291	2287	19	0.0031	2301	11	2302	14	99%
-92	39.6	60.6	95.7	0.63	0.1103	0.0015	5.1442	0.0720	0.3354	1806	24	0.0024	1843	12	1865	12	98%
-93	61.9	62.3	119	0.53	0.1415	0.0018	8.3089	0.1079	0.4230	2256	50	0.0029	2265	12	2274	13	99%

注: 经普通 Pb 校正后

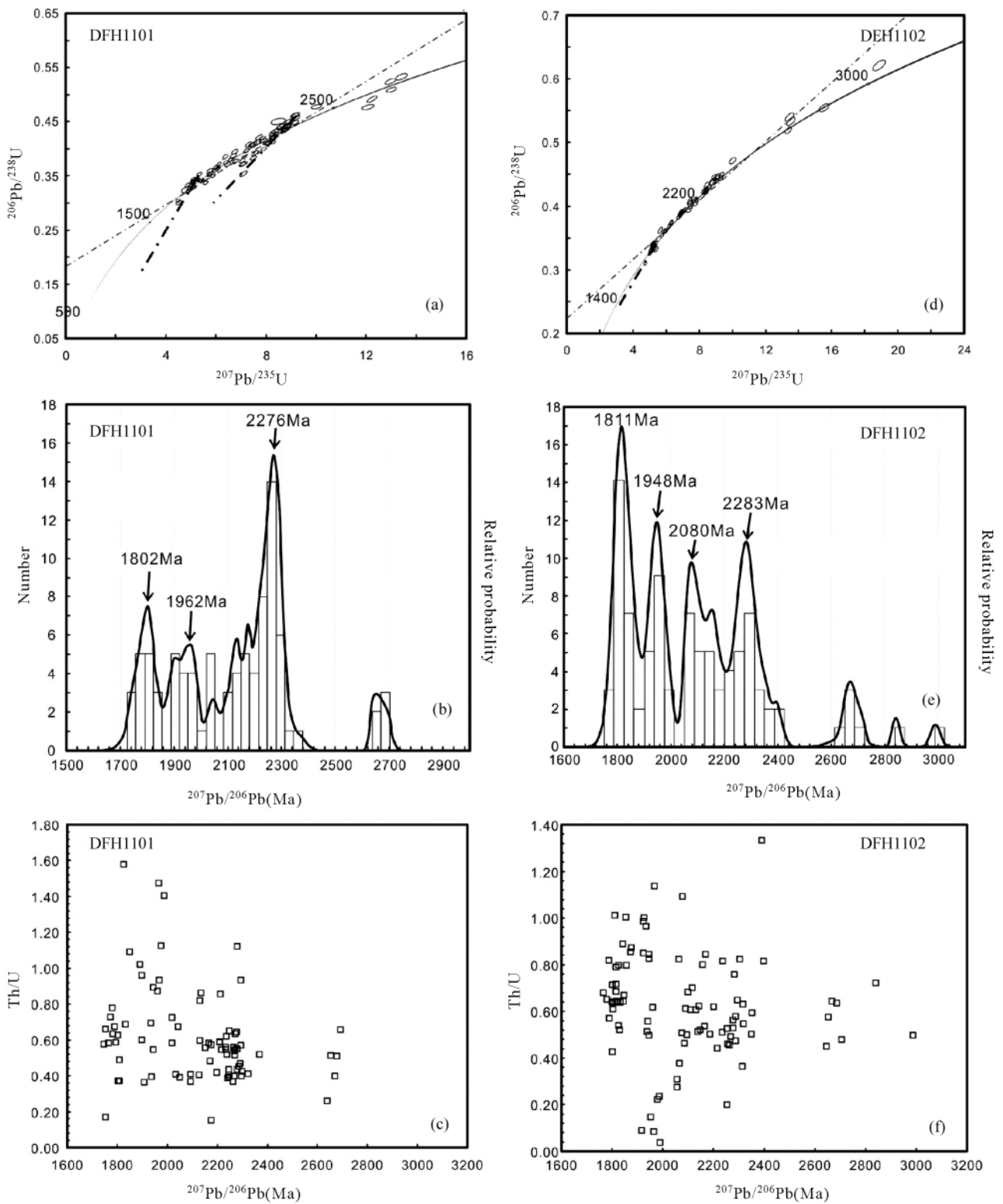


图7 凝灰岩和火山角砾岩中碎屑锆石的 U-Pb 谐和曲线图、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄频率分布图和  $\text{Th}/\text{U}-^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄图  
 Fig. 7 Plot of U-Pb concordant curve,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  age frequency and  $\text{Th}/\text{U}-^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  age diagram of the detrital zircons from tuff and breccia of the Yinachang deposit



表2 迤纳厂矿床中黄铜矿的 Re-Os 同位素组成

Table 2 Re-Os isotope compositions for chalcopyrite from the Yinchang deposit

样品号	矿物	$^{187}\text{Re}$ ( $\times 10^{-9}$ )	$1\sigma$	$^{187}\text{Os}$ ( $\times 10^{-9}$ )	$1\sigma$	Re ( $\times 10^{-9}$ )	$1\sigma$	普通 Os ( $\times 10^{-9}$ )	$1\sigma$	模式年龄 (Ma)	$1\sigma$
YNC1006		562.306	16.269	16.881	0.314	898.253	25.989	0.023	0.006	1732	23
10YNC-40		161.659	2.145	4.455	0.061	258.242	3.426	0.017	0.001	1638	22
YNC1010	黄铜矿	4.615	0.108	0.118	0.003	7.373	0.172	0.003	0.000	1719	20
10YNC-32		12.859	0.300	0.366	0.004	20.541	0.480	0.004	0.000	1690	20
10YNC-41		246.010	30.390	6.836	0.079	392.988	48.547	0.005	0.001	1651	19
YNC1112		4.388	0.149	0.073	0.005	7.010	0.239	0.002	0.000	1687	19

表明这些碎屑锆石均为岩浆成因。

## 5 分析结果

### 5.1 锆石 U-Pb 年代学

凝灰岩和火山角砾岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的分析结果见表 1。图 6 为样品中代表性碎屑锆石的 CL 图像。图 7 显示了两个样品锆石分析的 U-Pb 谐和曲线图、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄频率分布图以及 Th/U- $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄图解。

凝灰岩(DFH1101)中挑选出锆石 2000 多粒,测试了其中 84 个锆石颗粒,这些锆石的年龄谐和度都在 95% 以上。最年轻的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $1746 \pm 22\text{Ma}$ ,最老的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $2694 \pm 16\text{Ma}$ 。除 5 个锆石颗粒的年龄大于 2500Ma 以外,其余的年龄大致可以分为三组,分别为 1.75 ~ 1.85Ga、1.90 ~ 2.00Ga 和 2.20 ~ 2.35Ga。其中第一组和第三组最为显著,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄的加权平均值分别为  $1796 \pm 15\text{Ma}$ ( $n = 16$ , MSWD = 1.5) 和  $2262 \pm 12\text{Ma}$ ( $n = 34$ , MSWD = 3.5),这三组年龄的峰值分别为约 1800Ma、约 1960Ma 和约 2270Ma (图 7b)。从凝灰岩锆石 CL 图像可以看出这些锆石具有明显的震荡环带(图 6),Th/U 比值均在 0.1 以上,大部分在 0.4 ~ 1.0 之间(图 7c)。

火山角砾岩(DFH1102)中挑选出锆石为 2500 粒左右,测试了其中 93 个锆石颗粒,这些锆石的年龄谐和度都在 95% 以上。其中最小的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $1767 \pm 27\text{Ma}$ ,最大的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $2989 \pm 19\text{Ma}$ 。除了 7 个锆石颗粒的年龄大于 2500Ma 以外,其余的大致可以分为四组,分别为 1.75 ~ 1.88Ga、1.90 ~ 2.00Ga、2.02 ~ 2.20Ga 和 2.30 ~ 2.40Ga。其中第一组数据分布最集中,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄的加权平均值为  $1796 \pm 9\text{Ma}$ ( $n = 19$ , MSWD = 0.71)。这四组年龄的四个峰值分别为约 1800Ma、约 1950Ma、约 2080Ma 和约 2280Ma (图 7e)。从锆石的 CL 图像上可以看到明显的震荡环带(图 6),Th/U 比值除个别外均在 0.2 以上,绝大多数分布在 0.4 ~ 1.0 之间(图 7f)。

综上所述,凝灰岩和火山角砾岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄主要集中在 1750 ~ 2300 Ma 之间,最小年龄均为约 1750Ma,从锆石的 CL 图像的明显震荡环带以及较高的 Th/U 比值都

### 5.2 黄铜矿 Re-Os 同位素年代学

迤纳厂 Fe-Cu-REE 矿床中 6 个黄铜矿样品的 Re-Os 同位素分析结果见表 2。样品中 Re 的含量( $7.01 \times 10^{-9} \sim 898.25 \times 10^{-9}$ )变化较大,并具有低普通 Os( $0.002 \times 10^{-9} \sim 0.023 \times 10^{-9}$ )、高放射性 $^{187}\text{Os}$ (占总 Os 的 97% 以上)、高 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  比值( $> 11000$ )的特征。由于黄铜矿中普通 Os 的含量很低,在实验中很难准确测定,为了避免普通 Os 测量误差导致较大的分析不确定性和校正误差,因此采用 $^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$  等时线代替 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}-^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  等时线(Stein *et al.*, 2000),由此利用 ISOPLOT 软件(Ludwig, 2001)得出黄铜矿的 $^{187}\text{Re}-^{187}\text{Os}$  的等时线年龄为  $1690 \pm 99\text{Ma}$ (MSWD = 9.0)(图 8a),加权平均年龄为  $1685 \pm 37\text{Ma}$ (MSWD = 3.0)(图 8b)。

### 5.3 矿物的稀土地球化学特征

矿石与石榴石黑云母片岩的稀土含量、特征比值和球粒陨石标准化后的分布模式分别见表 3 和图 9。

浸染状矿石中稀土总量变化范围较大,除 YNC1004 只有  $116 \times 10^{-6}$  外,其它均在  $665 \times 10^{-6} \sim 2460 \times 10^{-6}$  之间, ( $\text{La}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> (11.1 ~ 74.1)、( $\text{La}/\text{Sm}$ )<sub>N</sub> (3.1 ~ 8.5)、( $\text{Gd}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> (1.8 ~ 5.0) 和 (LREE/HREE) (6.9 ~ 26.6) 等特征参数的变化范围较宽。所有浸染状矿石样品的球粒陨石标准化稀土配分模式为右倾型,轻稀土明显富集,具有明显的铕正异常( $\delta\text{Eu} = 1.95 \sim 4.06$ ),铈异常不明显( $\delta\text{Ce} = 0.87 \sim 1.01$ )(表 3、图 9a)。

条带状矿石中的稀土总量变化也较大( $\Sigma \text{REE} = 581 \times 10^{-6} \sim 10736 \times 10^{-6}$ ),与浸染状矿石相比具更高的稀土总量,最高达  $11000 \times 10^{-6}$  左右,轻稀土富集(( $\text{La}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> = 5.51 ~ 31.9, LREE/HREE = 4.3 ~ 13.5),且轻稀土的分馏程度与重稀土的分馏程度相近(( $\text{La}/\text{Sm}$ )<sub>N</sub> = (1.7 ~ 4.1)、( $\text{Gd}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> = (2.0 ~ 4.5)),铕异常不明显或弱的正异常( $\delta\text{Eu} = 0.99 \sim 1.49$ ),铈异常不明显( $\delta\text{Ce} = 0.93 \sim 1.29$ )(表 3、图 9b)。

表3 透纳厂矿床中矿石和围岩的稀土元素含量( $\times 10^{-6}$ )及特征值

Table 3 Rare earth elements (REE) contents ( $\times 10^{-6}$ ) of ores and wall-rock from the Yinachang deposit

样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	$\Sigma$ REE	$\delta$ Eu	$\delta$ Ce	(La/Yb) <sub>N</sub>	(La/Sm) <sub>N</sub>	(Gd/Yb) <sub>N</sub>	LREE/HREE
浸染状矿石																					
10YNC-31	670	1050	108	340	54.8	29	37.9	5.38	27.4	4.46	10	1.36	6.2	0.5	2345	1.95	0.94	72.86	7.69	4.93	24.16
10YNC-41	584	983	101	320	53.1	30.9	38.9	6.07	32.1	5.92	14.2	2.04	9.7	0.94	2182	2.08	0.97	40.59	6.92	3.24	18.86
DFH111	264	421	41.1	128.5	19.5	11.8	12.5	1.63	8.9	1.61	4.4	0.87	5.3	0.57	922	2.31	0.97	33.58	8.52	1.90	24.76
DFH112	609	961	97.9	319	52.1	44.4	42.1	6	31.2	6.02	14.3	1.78	8.9	0.73	2194	2.90	0.95	46.13	7.35	3.82	18.76
YNC1003	186	340	47.2	179	38.1	26.4	36.8	6.09	35	6.95	17.9	2.12	11.3	1.13	934	2.16	0.87	11.10	3.07	2.63	6.96
YNC1004	31.2	53.1	5.05	17.1	2.6	3.09	2.08	0.23	0.975	0.154	0.404	0.0453	0.284	0.033	116	4.06	1.02	74.07	7.55	5.92	26.63
YNC1011	144	228	21.4	74.5	14.6	19.8	15.9	2.88	16.7	3.74	9.87	1.33	6.93	0.783	805	3.97	0.99	14.01	6.20	1.85	8.64
YNC1015	217	335	29.9	102	18.3	24.1	20.9	3.86	22.8	5.38	13.3	1.73	9.54	1.08	560	3.77	1.00	15.34	7.46	1.78	9.23
条带状矿石																					
YNC1006	129	279	31.6	124	27.6	10.3	29.5	5.38	31.9	7.09	18.5	2.34	12	1.18	709	1.10	1.05	7.25	2.94	1.98	5.58
YNC1007	125	249	26.8	99.7	19.5	7.6	19.3	2.98	15.2	2.96	7.24	0.853	4.58	0.477	581	1.20	1.04	18.40	4.03	3.41	9.84
YNC1008	169	322	41.2	158	25.3	8.55	20.4	3.1	14.9	3.31	8.54	1.17	6.48	0.747	783	1.15	0.93	17.58	4.20	2.55	12.35
YNC1009	2180	4320	525	1890	374	125	320	52.8	320	68.3	159.5	20.7	88.2	8.2	10452	1.11	0.97	16.66	3.67	2.93	9.07
YNC1010	251	640	90.9	370	93.7	45.8	93.9	17.4	104	21.4	51.6	5.89	26.5	2.45	6223	1.49	1.02	6.39	1.69	2.86	4.61
YNC1012	382	978	120	572	130	60.7	147	26.9	163	36.3	88.4	10.3	46.6	4.36	10736	1.34	1.10	5.53	1.85	2.54	4.29
YNC1013	356	1111	121	496	102	43.3	97.9	17.7	98.6	20.1	47.3	5.31	23.8	2.28	4802	1.32	1.29	10.08	2.20	3.32	7.12
YNC1014	1060	2423	279	1320	271	87.6	268	43.8	235	48.2	112	12.7	57.9	5.17	2766	0.99	1.07	12.34	2.46	3.73	6.95
10YNC-30	2350	4630	558	1970	361	126	274	40.6	223	43.3	94.1	12.3	49.6	4.35	2542	1.22	0.97	31.94	4.09	4.46	13.48
10YNC-32	1035	2040	243	868	162.5	51.7	136	21.8	118	24.7	57.8	7.23	33	2.97	1815	1.06	0.98	21.15	4.01	3.33	10.96
石榴石黑云母片岩																					
YNC1001	47	91.7	9.08	31.9	6.13	4.59	5.16	0.8	4.5	0.968	2.69	0.367	2.24	0.309	207	2.49	1.07	14.15	4.82	1.86	11.18
YNC1002	71.1	125	11.5	36.7	6.33	4.49	5.58	0.758	3.39	0.744	2.06	0.307	2	0.274	270	2.31	1.05	23.97	7.07	2.25	16.89

注:  $\Sigma$ REE 为稀土含量总和,  $\delta$ Eu =  $Eu/(Sm \times Gd)^{1/2}$ ,  $\delta$ Ce =  $Ce/(La \times Pr)^{1/2}$ , LREE/HREE =  $\Sigma(La - Sm)/\Sigma(Gd - Lu)$ . 球粒陨石值据 Boynton, 1984

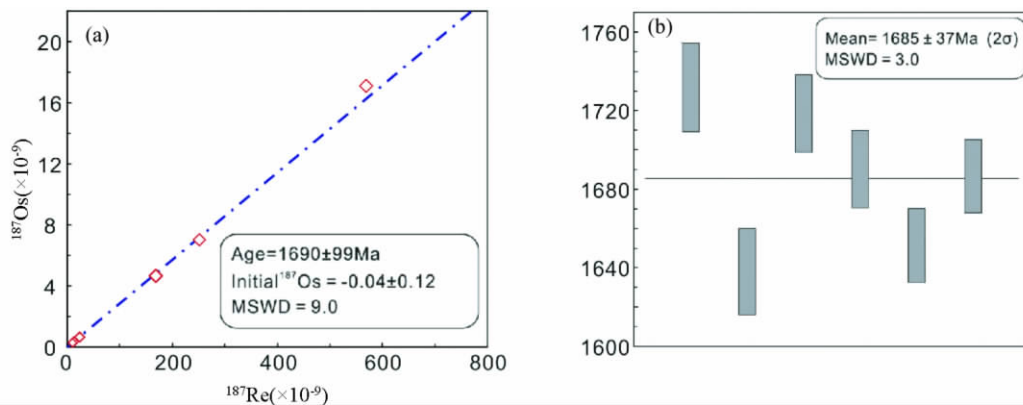


图8 迤纳厂矿床黄铜矿的 Re-Os 等时线年龄 (a) 与模式年龄加权平均图 (b)

Fig. 8 Isochrone age diagram (a) and weighted average of model age (b) of Re-Os isotope for chalcopyrite of the Yinachang deposit

石榴石黑云母片岩的稀土总量相对较低 ( $\Sigma \text{REE} = 207 \times 10^{-6} \sim 270 \times 10^{-6}$ )，其球粒陨石标准化配分模式与浸染状矿石基本一致，其  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  (14.1 ~ 23.9)、 $(\text{La}/\text{Sm})_N$  (4.8 ~ 7.1) 和  $(\text{LREE}/\text{HREE})$  (11.2 ~ 16.9) 等特征参数的变化范围都与浸染状矿石基本一致。具有明显的铈正异常 ( $\delta\text{Ce} = 2.31 \sim 2.50$ )，铈异常不明显 ( $\delta\text{Ce} = 1.1$ ) (表3、图9c)。

## 6 讨论

### 6.1 迤纳厂组的沉积时限和归属

迤纳厂组是1954年谢振西在该区进行铁矿普查时，因不能与昆阳群进行对比而命名。迤纳厂地区构造复杂，变质和变形强烈导致迤纳厂组的沉积时代和归属一直存在较大争议。前人根据上覆层有炭质板岩和硅质岩这一柳坝塘组的特有标志，将其归为上昆阳群美党组(吴懋德, 1990)。而有学者认为迤纳厂组并非是一套完整的地层，应分别是由因民组、落雪组、鹅头厂组和美党组组成(赵秀鲲和单卫国, 1993)。中南工业大学滇中科研队在1995年提出迤纳厂组相当于大红山群或河口群。可见，迤纳厂组的沉积时代和归属问题一直没有得到很好的解决。

近年来许多地质工作者广泛用地层中碎屑锆石来研究地层的沉积时代和沉积物源(Zhang *et al.*, 2006; Greentree and Li, 2008; Zhao *et al.*, 2010)。本研究对迤纳厂组中层状凝灰岩和火山角砾岩的碎屑锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 分析，其中凝灰岩(DFH1101)最年轻的锆石年龄为  $1746 \pm 22 \text{Ma}$ ，该数据具有较好的谐和性，高的 U ( $120 \times 10^{-6}$ )、Th ( $68.7 \times 10^{-6}$ ) 含量及相对较高的 Th/U (0.57) 比值。火山角砾岩(DFH1102)中最年轻锆石  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $1767 \pm 27 \text{Ma}$ ，其 U ( $91 \times 10^{-6}$ )、Th ( $62 \times 10^{-6}$ ) 含量较高，而且 Th/U (0.68) 比值也相对较高。可见，凝灰岩和火山角砾岩中锆石的最年轻的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄均为 1750Ma 左右，因此可以将约 1750Ma 作为迤纳厂组的沉积的上限年龄。

在区域上，下昆阳群(东川群)因民组中最年轻碎屑锆石的年龄约 1780Ma，凝灰岩样品的锆石 U-Pb 年龄为  $1742 \pm 13 \text{Ma}$ (Zhao *et al.*, 2010)，而侵入因民组中辉长岩样品的锆石 U-Pb 年龄为  $1690 \pm 32 \text{Ma}$ (Zhao *et al.*, 2010)，由此将因民组的形成时代限定在 1.7Ga 左右。同时，前人获得大红山群老厂河组中薄层火山岩的锆石 U-Pb 年龄为  $1711 \pm 4 \text{Ma}$ (杨红等, 2012)，曼岗河组中火山岩锆石 U-Pb 年龄为 1.7Ga 左右(吴孔文, 2008; Greentree and Li, 2008; Zhao and Zhou, 2011)，这些研究显示大红山群的形成时代也是在 1.7Ga 左右。此外，四川拉拉铜矿区角斑岩的锆石 U-Pb 年龄为  $1695 \pm 20 \text{Ma}$ (何德锋, 2009)，而侵入河口群中辉绿岩体获得了  $1710 \pm 8 \text{Ma}$  的锆石 U-Pb 年龄(关俊雷等, 2011)。因此，下昆阳群(东川群)、大红山群、河口群在形成时间上为同时或者相近。

通过对比下昆阳群(东川群)因民组、大红山群中沉积岩和迤纳厂组火山岩碎屑锆石的特征发现：它们均显示四个最明显的峰，峰值年龄分别为  $\sim 1800 \text{Ma}$ 、 $\sim 1950 \text{Ma}$ 、 $\sim 2080 \text{Ma}$  和  $\sim 2280 \text{Ma}$ ，且大于 2.5Ga 的锆石颗粒都很少，这表明它们可能来源于相同的源区，但这些岩浆事件的成因还有待进一步研究。较老的碎屑锆石年龄显示，在康滇地区应该还有更老的基底存在。迤纳厂组中碎屑锆石最年轻的年龄与因民组基本一致，并且其碎屑锆石的年龄分布与因民组更为相似，暗示了迤纳厂组和因民组在形成时代上应该是同时或者基本同时，只是由于后期强烈的变质变形使迤纳厂组难以识别，进而无法与邻区的地层层位进行对比。综合本文和前人的研究成果，河口群、大红山群和下昆阳群(东川群)等很可能是同时期在不同地区形成的地层单元，但它们对应层位之间的关系仍有待进一步研究来确认。

### 6.2 迤纳厂 Fe-Cu-REE 矿床成矿年代学限制

康滇地区铁-铜矿床已经有较多的成矿年代学数据，但由于当时测试方法的局限，测试对象的选择不一定适合，难

以从多个方面限定这些矿床的形成时代。另一方面,这些矿床往往遭受了比较明显的后期地质作用(如新元古代变质作用和岩浆作用等)的影响(Li *et al.*, 2002; Zhao and Zhou, 2011),导致对样品测试时可能出现多期年龄,而得不到比较真实的成矿年龄。

叶霖等(2004a)获得迤纳厂 Fe-Cu-REE 矿床中含矿石英脉的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为  $784.25 \pm 0.95\text{Ma}$ ,等时线年龄为  $783.93 \pm 8.59\text{Ma}$ 。杨耀民等(2005)获得了该矿床中成矿期萤石和条带状矿石的 Sm-Nd 同位素等时线年龄分别为  $1539 \pm 40\text{Ma}$  和  $1617 \pm 100\text{Ma}$ 。显然,迤纳厂矿床的成矿时代仍有争议。

康滇地区最大的铁-铜矿床拉拉铜矿一直以来都是矿床学家们研究的热点。前人研究获得了矿石中单矿物的 Rb-Sr 等时线年龄为  $845 \pm 2\text{Ma}$ (陈好寿, 1994),矿床中黄铁矿、黄铜矿的 Pb-Pb 等时线年龄为  $888\text{Ma}$ (孙燕等, 2006),以及辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄为  $928 \sim 1005\text{Ma}$ (李泽琴等, 2003)和  $1086 \pm 8\text{Ma}$ (Chen and Zhou, 2012)。此外,前人对康滇地区其它铁-铜矿床的成矿年代学也取得一些成果,如邱华宁等(2002)对东川落雪矿中层状铜矿的两个石英样品进行 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 测年,得到两组年龄,分别为  $1470\text{Ma}$  和  $810 \sim 770\text{Ma}$ 。Qiu *et al.* (2002)对汤丹落雪组层位中脉状铜矿石英和稀矿山硅质角砾状铜矿的硅质角砾进行 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年获得  $780 \sim 700\text{Ma}$  的成矿年龄。他们的研究成果认为约  $1470\text{Ma}$  是一期热液活动的时间,而晋宁-澄江期才是东川铜矿的重要成矿期。同时,叶霖等(2004b)对东川桃园铜矿中与铜矿共生的石英进行 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄测定,获得  $768.43 \pm 0.58\text{Ma}$  的坪年龄和  $770 \pm 5\text{Ma}$  的等时线年龄。

从以上的研究成果来看,康滇地区 Fe-Cu 矿床的成矿时代大多集中于  $800\text{Ma}$  左右,而这些成矿年龄大部分都是通过 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 和 Rb-Sr 定年的方法获得的。然而,大多数矿物的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素体系的封闭温度在  $350^\circ\text{C}$  以下(Jenkin *et al.*, 2001)而 Rb-Sr 体系中由于 Rb 的活动性较强而导致 Rb-Sr 体系的封闭性差(陈文等, 2011),因此它们均可能会受到后期地质热事件的影响。相反,Re-Os 同位素体系的封闭性较好,受后期影响小,可以比较准确地测定成矿时代(Stein *et al.*, 1998)。本文测得成矿期 6 件黄铜矿样品的 Re-Os 同位素等时线年龄为  $1690 \pm 99\text{Ma}$  模式年龄加权平均值为  $1685 \pm 37\text{Ma}$ ,这两个年龄与每个样品的模式年龄基本一致(表 2),表明测试结果较为可信。因此,本研究认为迤纳厂矿床的形成时代应为约  $1690\text{Ma}$ ,而前人获得的  $784\text{Ma}$  的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄很可能反映的是后期的变质事件的影响。

因此,本研究证实在康滇地区存在约  $1.7\text{Ga}$  的成矿事件,通过对比这些矿床的赋矿地层的时代以及矿床类型。我们认为这期成矿事件很可能影响了整个康滇地区铁-铜矿床的成矿作用,是形成迤纳厂及其周边的 Fe-Cu-REE 矿床的一个主要成矿期。

### 6.3 迤纳厂矿床的稀土元素特征及成因的初步认识

大量研究表明,活动于各种构造背景(如扩张的洋中脊、板内海底火山及陆内裂谷等)的现代海底热液以轻稀土富集和高的正铈异常为显著特征(Michard and Albarède, 1986; Michard, 1989; Klinkhammer *et al.*, 1994; Craddock *et al.*, 2010),虽然在不同的构造环境中稀土的分布模式相似,但是其总量相差却很大(Klinkhammer *et al.*, 1994)。与现代海底热液相比,迤纳厂矿床中矿物的稀土配分模式与现代海底热液极为相似,而明显不同于海水(图 9d)。前人对古代的块状硫化物矿床研究表明,以轻稀土富集和铈正异常为特征的稀土分布模式也常见于这些矿床的矿石及喷流岩中(Graf, 1977; Lottermoser, 1989, 1992)。通过对迤纳厂矿床变质围岩的原岩恢复,其原岩为变碱性粗面安山岩(Yang *et al.*, 2004),而变质围岩与矿石具有相似的稀土分布模式(图 9a, c),这说明迤纳厂矿床的成矿作用可能与海底火山活动有关。

迤纳厂矿床中浸染状矿石具非常明显的正铈异常,然而矿石中却没有富集铈的长石类矿物。Graf(1977)指出沉积作用对稀土元素的分馏能产生较小或者中等程度的铈异常,而热液本身富集铈会使沉积物中初始的铈异常增强而使异常更加明显,在块状硫化物矿床中,铈正异常是长石受浓集卤水蚀变的结果,即是长石优先蚀变使溶液富集铈。由此不难发现浸染状矿石中明显的正铈异常是由富铈的成矿热液导致。然而随着成矿作用的延续,热液中铈的含量越来越低,导致后来形成的条带状矿石的正铈异常并不明显。稀土元素主要在条带状矿石中富集,然而不同位置的稀土总量差别较大,这可能与富含稀土流体运移的空间位置和当时的物理化学条件有关。

本研究得到迤纳厂矿床较精确的黄铜矿 Re-Os 等时线年龄,较好地限定了矿床形成于约  $1.7\text{Ga}$ ,而且矿区火山岩碎屑锆石的年龄限定赋矿层的形成时代也是在  $1.7\text{Ga}$  左右,表明矿床与地层基本上是同时形成的。并且这与矿体呈层状和似层状产出,与地层产状基本一致的地质现象非常吻合。而矿物的稀土元素地球化学特征表明迤纳厂矿床成矿流体为海底热液,所以迤纳厂矿床很可能是由海底火山喷发-沉积形成。

近年来有些学者在武定观天厂发现了火成碳酸岩(碳酸质火山岩),并将其与附近的 Fe-Cu-REE 矿床联系起来,认为这些矿床与火成碳酸岩有密切的关系(张永北等, 1996, 2008)。然而这些矿床中矿体的产状与地层的产状并不支持这一点,它们均为层状产出,而且在矿区也并未发现有侵入的火成碳酸岩体。另外还有一些学者认为迤纳厂 Fe-Cu-REE 矿床为 IOCG 矿床,并且认为康滇地区是一个 IOCG 成矿省(Zhao, 2010; Zhao and Zhou, 2011; Chen and Zhou, 2012)。然而对于迤纳厂矿床来说,其稀土含量之高,以及在矿区并没有发现 IOCG 矿床中热液成因的角砾岩和与成矿相



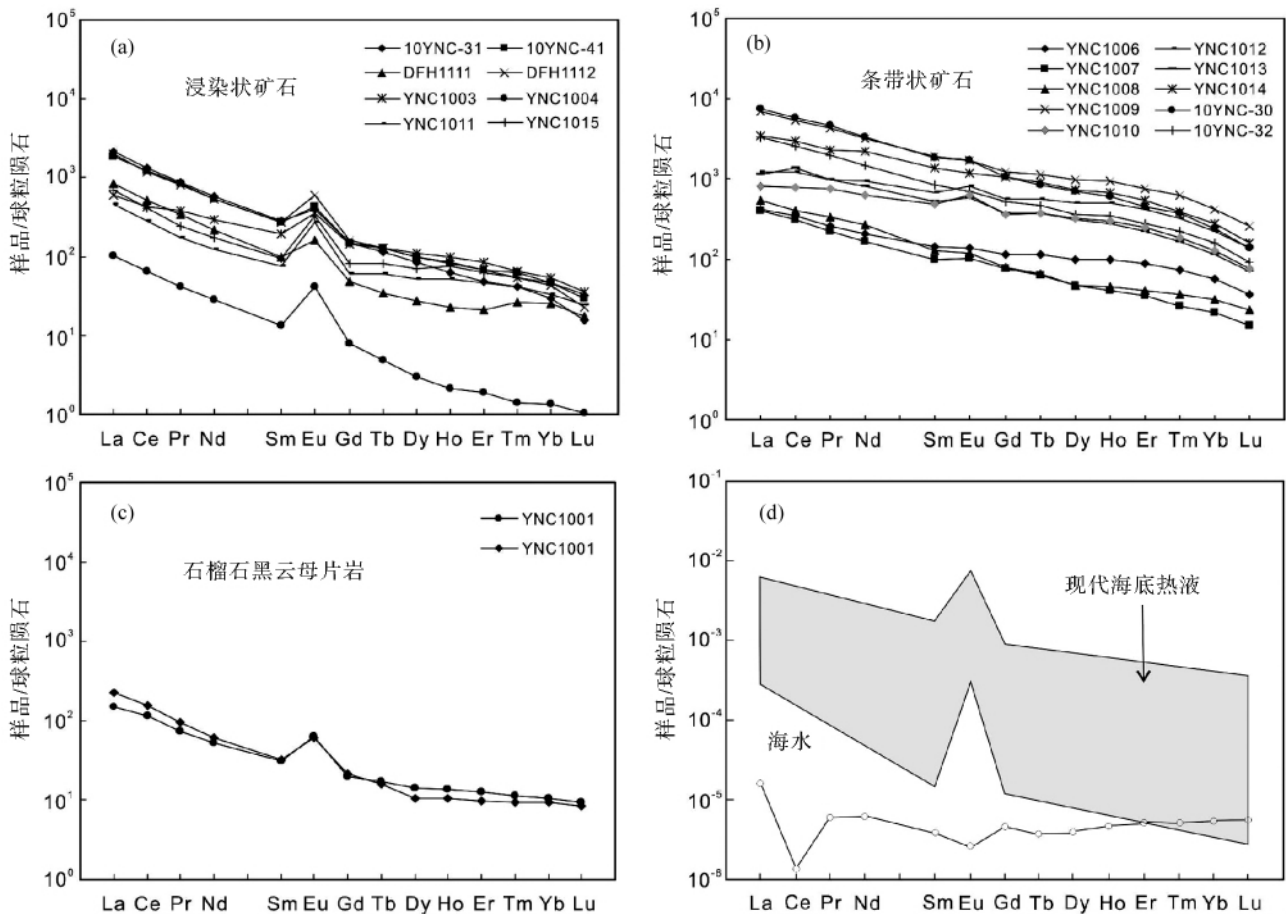


图9 迤纳厂矿床中浸染状矿石 (a)、条带状矿石 (b) 和石榴石黑云母片岩 (c) 的稀土元素球粒陨石标准化分布模式图  
图d中现代海底热液的稀土分布范围据 Craddock *et al.*, 2010, 海水的稀土分布模式据 Elderfield and Greaves, 1982; 球粒陨石标准值据 Boynton, 1984

Fig.9 Chondrite-normalized REE patterns for disseminated ores (a), banded ores (b) and garnet biotite schist (c) of the Yinachang deposit

REE patterns for submarine hydrothermal fluids after Craddock *et al.*, 2010, REE pattern for seawater after Elderfield and Greaves, 1982; chondrite-normalizing values after Boynton, 1984

关的岩体。因此,迤纳厂矿床与典型的 IOCG 矿床还是有明显的差别。

综上所述,本研究认为迤纳厂矿床的成矿时代和赋矿地层的形成时代近于同时,结合野外的地质现象,因此我们认为迤纳厂矿床是在 1.7Ga 左右的海底火山喷发-沉积形成的。

迤纳厂矿床的形成时代与约 1.7Ga 的全球 Columbia 超大陆裂解事件的时间上基本一致 (Rogers and Santosh, 2002; Zhao *et al.*, 2002)。近年来随着研究工作的不断深入,认为扬子地块西缘的古元古代晚期-中元古代早期的岩浆活动与全球 Columbia 超大陆裂解有密切联系 (Zhao and Zhou, 2011; Wang *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2012)。因此,本研究认为扬子地块西缘在约 1.7Ga 时可能存在板内裂谷,裂谷盆地中发生大量的火山-沉积作用是康滇地区迤纳厂等 Fe-Cu 矿床形成的关键。

## 7 结论

(1) 通过对迤纳厂组中火山角砾岩和凝灰岩的碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年得到最年轻的谐和锆石年龄为 1750Ma 左右,并且显示与因民组具有相同的源区。因此,迤纳厂组在层位上与因民组相当。

(2) 迤纳厂 Fe-Cu-REE 矿床中黄铜矿的 Re-Os 同位素等时线年龄为  $1690 \pm 99$ Ma,表明矿床的形成时代为约 1.7Ga 左右。

(3) 迤纳厂矿床的形成时代和迤纳厂组的沉积时代大致相同,且其成矿流体性质与现代海底热液类似,结合矿体呈层状、似层状产出的地质现象和稀土元素地球化学结果表明迤纳厂矿床为海底火山喷发-沉积形成。

致谢 野外工作得到云南核工业地质局 209 队罗成文工程师的大力帮助;中国科学院地球化学研究所李亮助理研究员在锆石 U-Pb 分析上的指导和帮组; Re-Os 同位素分析得到中国科学院地球化学研究所漆亮研究员和尹一凡实验师的大力帮助;同时本文修改过程中得到审稿人和编辑提出的很多有益意见;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
- Chang XY, Zhu BQ, Sun DZ, Qiu HN and Zou R. 1997. Isotope geochemistry study of Dongchuan copper deposits in middle Yunnan Province, SW China: I. Stratigraphic chronology and application of geochemical exploration by lead isotopes. *Geochimica*, 26(2): 32–38 (in Chinese with English abstract)
- Chen HS. 1994. Isotopic Geochemistry. Hangzhou: Zhejiang University Press, 28–39 (in Chinese)
- Chen TY. 1993. The stratigraphic sequence review of Kunyang Group in Dongchuan region and recommends for future work. *Yunnan Geology*, 12(1): 126–129 (in Chinese)
- Chen W, Wan YS, Li HQ, Zhang ZQ, Dai TM, Shi ZE and Sun JB. 2011. Isotope geochemistry: Technique and application. *Acta Geologica Sinica*, 85(11): 1917–1947 (in Chinese with English abstract)
- Chen WT and Zhou MF. 2012. Paragenesis, stable isotopes, and molybdenite Re-Os isotope age of the Lala iron-copper deposit, Southwest China. *Economic Geology*, 107(3): 459–480
- Craddock PR, Bach W, Seewald JS, Rouxel OJ, Reeves E and Tivey MK. 2010. Rare earth element abundances in hydrothermal fluids from the Manus Basin, Papua New Guinea: Indicators of sub-seafloor hydrothermal processes in back-arc basins. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(19): 5494–5513
- Dai HG. 1997. On the strata, structure and prospecting target area of Kunyang Group and Huili Group in Kangdian region. *Yunnan Geology*, 16(1): 1–39 (in Chinese with English abstract)
- Elderfield H and Greaves MJ. 1982. The rare earth elements in seawater. *Nature*, 296(5854): 214–219
- Gong L, He YT and Chen TY. 1996. Proterozoic Dongchuan-type Rift Cu Deposit in Yunnan. Beijing: Metallurgical Industry Publication, 1–226 (in Chinese)
- Graf JL. 1977. Rare earth elements as hydrothermal tracers during the formation of massive sulfide deposits in volcanic rocks. *Economic Geology*, 72(4): 527–548
- Greentree MR, Li ZX, Li XH and Wu HC. 2006. Late Mesoproterozoic to earliest Neoproterozoic basin record of the Sibao orogenesis in western South China and relationship to the assembly of Rodinia. *Precambrian Research*, 151(1–2): 79–100
- Greentree MR. 2007. Tectonostratigraphic analysis of the Proterozoic Kangdian iron oxide-copper Province, South-west China. Ph. D. Dissertation. Australia: University of Western Australia, 1–284
- Greentree MR and Li ZX. 2008. The oldest known rocks in south-western China: SHRIMP U-Pb magmatic crystallization age and detrital provenance analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan Group. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(5–6): 289–302
- Guan JL, Zheng LL, Liu JH, Sun ZM and Cheng WH. 2011. Zircons SHRIMP U-Pb dating of dolerite from Hekou, Sichuan Province, China and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 85(4): 482–490 (in Chinese with English abstract)
- He DF. 2009. Petrological and geochemical characteristics of the Lala copper deposit in Sichuan Province. Ph. D. Dissertation. Guiyang: Institute of Geochemistry, CAS. 1–84 (in Chinese with English summary)
- Hu AQ, Zhu BQ, Mao CX, Zhu NJ and Huang RS. 1991. Geochronology of the Dahongshan Group. *Chinese Journal of Geochemistry*, 10(3): 195–203
- Hu ZC, Liu YS, Chen L *et al.* 2011. Contrasting matrix induced elemental fractionation in NIST SRM and rock glasses during laser ablation ICP-MS analysis at high spatial resolution. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(2): 425–430
- Jenkin GRT, Ellam RM, Rogers G and Stuart FM. 2001. An investigation of closure temperature of the biotite Rb-Sr system: The importance of cation exchange. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(7): 1141–1160
- Klinkhammer GP, Elderfield H, Edmond JM and Mitra A. 1994. Geochemical implications of rare earth element patterns in hydrothermal fluids from mid-ocean ridges. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(23): 5105–5113
- Li XJ, Wu MD and Duan JS. 1984. The stratigraphic sequence of the Kunyang Group and its top and bottom boundaries. *Geological Review*, 30(5): 399–408 (in Chinese with English abstract)
- Li ZQ, Wang JZ, Liu JJ, Li CY, Du AD, Liu YP and Ye L. 2003. Re-Os dating of molybdenite from Lala Fe-Oxide-Cu-Au-Mo-REE deposit, Southwest China: Implications for ore genesis. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 18(1): 39–42 (in Chinese with English abstract)
- Li ZX, Li XH, Kinny PD and Wang J. 1999. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China? *Earth and Planetary Science Letters*, 173(3): 171–181
- Li ZX, Li XH, Zhou HW and Kinny PD. 2002. Grenvillian continental collision in South China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia. *Geology*, 30(2): 163–166
- Lottermoser BG. 1989. Rare earth element study of exhalites within the Willyama Supergroup, Broken Hill Block, Australia. *Mineralium Deposita*, 24(2): 92–99
- Lottermoser BG. 1992. Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes. *Ore Geology Reviews*, 7(1): 25–41
- Liu YS, Hu ZC, Zong KQ *et al.* 2010a. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546
- Liu YS, Gao S, Hu ZC *et al.* 2010b. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571
- Lü SK and Dai HG. 2001. A review of the set-up of Kunyang Group's sequence and the discovery of important ore-bearing horizons in Kangdian area. *Yunnan Geology*, 20(1): 1–24 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig K. 2001. Isoplot/Ex, Version 3.0: A geochronological tool kit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 43
- Michard A and Albarède F. 1986. The REE content of some hydrothermal fluids. *Chemical Geology*, 55(1–2): 51–60
- Michard A. 1989. Rare earth element systematics in hydrothermal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(3): 745–750
- Qi L, Zhou MF, Wang CY and Sun M. 2007. Evaluation of a technique for determining Re and PGEs in geological samples by ICP-MS coupled with a modified Carius tube digestion. *Geochemical Journal*, 41(6): 407–414
- Qi L, Zhou MF, Gao JF and Zhao Z. 2010. An improved Carius tube technique for determination of low concentrations of Re and Os in pyrites. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 25(4): 585–589
- Qiu HN, Zhu BQ and Sun DZ. 2002. Age significance interpreted from <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar dating of quartz samples from the Dongchuan Copper Deposits, Yunnan, SW China, by crushing and heating. *Geochemical Journal*, 36(5): 475–491
- Qiu HN, Wijbrans JR, Li XH, Zhu BQ, Zhu CL and Zeng BC. 2002.

- New  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  evidence for ore-forming process during Jinning-Chengjiang Period in Dongchuan type copper deposits, Yunnan. *Mineral Deposits*, 21 (2): 129 - 136 (in Chinese with English abstract)
- Ran CY. 1989. Formation Mechanism of Stratabound Copper Deposit in Kangdian Axis. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 45 (in Chinese with English abstract)
- Rogers JJW and Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent. *Gondwana Research*, 5(1): 5 - 22
- Stein HJ, Sundblad K, Markey RJ, Morgan JW and Motuza G. 1998. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittila-Kivisuo, Finland and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting. *Mineralium Deposita*, 33(4): 329 - 345
- Stein HJ, Morgan JW and Schersten A. 2000. Re-Os dating of Low-level highly radiogenic (LLHR) sulfides: The Harnas gold deposit, southwest Sweden, records continental-scale tectonic events. *Economic Geology*, 95(8): 1657 - 1671
- Sun Y, Shu XL and Xiao YF. 2006. Isotopic geochemistry of the Lala copper deposit, Sichuan Province, China and its metallogenetic significance. *Geochimica*, 35(5): 553 - 559 (in Chinese with English abstract)
- Sun ZM, Yin FG, Guan JL, Liu JH, Liu JM, Geng QR and Wang LQ. 2009. SHRIMP U-Pb dating and its stratigraphic significance of tuff zircons from Heishan Formation of Kunyang Group, Dongchuan area, Yunnan Province, China. *Geological Bulletin of China*, 28(7): 896 - 900 (in Chinese with English abstract)
- Wang LJ, Yu JH, Griffin WL and O'Reilly SY. 2012. Early crustal evolution in the western Yangtze Block: Evidence from U-Pb and Lu-Hf isotopes on detrital zircons from sedimentary rocks. *Precambrian Research*, 222 - 223: 368 - 385
- Wu KW. 2008. A study on geochemistry and ore-forming mechanism of the Dahongshan stratiform copper deposit in Yunnan Province. Master Degree Thesis. Guiyang: Institute of Geochemistry, CAS, 1 - 95 (in Chinese with English summary)
- Wu MD, Duan JS, Song XL, Chen LZ and Shan XP. 1990. Geology of Kunyang Group in Yunnan Province. Kunming: Scientific Press of Yunnan Province, 1 - 223 (in Chinese)
- Xue BG. 1999. A discussion about the stratigraphic sequence of Kunyang Group according to the Fe ore horizon of Tiejianshan in Dongchuan. *Yunnan Geology*, 18(4): 469 - 475 (in Chinese with English abstract)
- Yang H, Liu FL, Du LL, Liu PH and Wang F. 2012. Zircon U-Pb dating for metavolcanites in the Laochanghe Formation of the Dahongshan Group in southwestern Yangtze Block, and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2294 - 3014 (in Chinese with English abstract)
- Yang YM. 2004. Study on geochemistry of Fe-Cu-REE deposit in Kunyang Group in Mid-Proterozoic-exemplified by the Yinachang Fe-Cu-REE deposit. Ph. D. Dissertation. Guiyang: Institute of Geochemistry, CAS, 1 - 86 (in Chinese with English summary)
- Yang YM, Tu GZ and Hu RZ. 2004. REE and trace element geochemistry of Yinachang Fe-Cu-REE deposit, Yunnan Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 23(3): 265 - 274
- Yang YM, Tu GZ and Hu RZ. 2004. REE geochemistry of Yinachang Fe-Cu-REE deposit in Yunnan Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(3): 301 - 308 (in Chinese with English abstract)
- Yang YM, Tu GZ, Hu RZ and Shi XF. 2005. Sm-Nd isotopic geochronology of the Yinachang Fe-Cu-REE deposit at Wuding, Yunnan Province and its geologic significance. *Chinese Science Bulletin*, 50(18): 2090 - 2096
- Ye L, Liu YP, Li CY and Liu JJ. 2004a. Ar-Ar isotopic age of Yinachang copper deposit, Wuding, Yunnan Province, China and its implications. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(4): 411 - 414 (in Chinese)
- Ye L, Liu YP, Li CY and Liu JJ. 2004b. The Ar-Ar isotopic age in Dongchuan Taoyuan type copper deposit, Yunnan Province and its significance. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(2): 57 - 60 (in Chinese)
- Yin FG, Sun ZM and Bai JK. 2011. Stratigraphic framework of the mesoproterozoic in Dongchuan and central Yunnan region. *Journal of Stratigraphy*, 35(1): 49 - 54 (in Chinese with English abstract)
- Yu JH, O'Reilly SY, Zhou MF, Griffin WL and Wang LJ. 2012. U-Pb geochronology and Hf-Nd isotopic geochemistry of the Badu Complex, southeastern China: Implications for the Precambrian crustal evolution and paleogeography of the Cathaysia Block. *Precambrian Research*, 222 - 223: 424 - 449
- Zhang CH, Gao LZ, Wu ZJ, Shi XY, Yan QR and Li DJ. 2007. SHRIMP U-Pb zircon age of tuff from the Kunyang Group in central Yunnan: Evidence for Grenvillian orogeny in south China. *Chinese Science Bulletin*, 52(11): 1517 - 1525
- Zhang SB, Zheng YF, Wu YB, Zhao ZF, Gao S and Wu FY. 2006. Zircon U-Pb age and Hf isotope evidence for 3.8Ga crustal remnant and episodic reworking of Archean crust in South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(1-2): 56 - 71
- Zhang YB, Wang H, Xu CY and Wei QR. 1996. Discovery and significance of the carbonatite of Kunyang Group in the central of Yunnan. *Geological Science and Technology Information*, 15(3): 14 - 18 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YB, Bi H, Yu LS, Sun SH, Qiu JX, Xu CY and Wang RJ. 2008. The evidence of ore-bearing dolomite replaces mantle carbonatite magma and eruption in the middle of Kunyang rift, central Yunnan. *Progress in Natural Science*, 18(7): 778 - 788 (in Chinese)
- Zhao GC, Cawood PA, Wilde SA and Sun M. 2002. Review of global 2.1 ~ 1.8Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth-Science Reviews*, 59: 125 - 162
- Zhao XF. 2010. Paleoproterozoic crustal evolution and Fe-Cu metallogeny of the western Yangtze Block, SW China. Ph. D. Dissertation. Hong Kong: University of Hong Kong, 1 - 192
- Zhao XF, Zhou MF, Li JW *et al.* 2010. Late Paleoproterozoic to Early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: Implications for tectonic evolution of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 182(1-2): 57 - 69
- Zhao XF and Zhou MF. 2011. Fe-Cu deposits in the Kangdian region, SW China: A Proterozoic IOCG (iron-oxide-copper-gold) metallogenic province. *Mineralium Deposita*, 46(7): 731 - 747
- Zhao XF, Zhou MF, Hitzman MW *et al.* 2012. Late Paleoproterozoic to Early Mesoproterozoic Tangdan sedimentary rock-hosted strata-bound copper deposit, Yunnan Province, Southwest China. *Economic Geology*, 107(2): 357 - 375
- Zhao XK and Shan WG. 1993. The Yinachang Formation belongs to and the characteristic of structure and metamorphic. *Yunnan Geology*, 12(1): 60 - 66 (in Chinese)
- Zhong SH. 1993. To distinguish the top of Kunyang Group in Dongchuan-Yimen region from the geophysical achievements. *Yunnan Geology*, 12(1): 123 - 125 (in Chinese)

#### 附中文参考文献

- 常向阳, 朱炳泉, 孙大中, 邱华宁, 邹日. 1997. 东川铜矿床同位素地球化学研究: I. 地层年代与铅同位素化探应用. *地球化学*, 26(2): 32 - 38
- 陈好寿. 1994. 同位素地球化学研究. 杭州: 浙江大学出版社, 28 - 39
- 陈天佑. 1993. 东川地区昆阳群地层层序研究的评述及今后工作建议. *云南地质*, 12(1): 126 - 129
- 陈文, 万渝生, 李华芹, 张宗清, 戴樟谟, 施泽恩, 孙敬博. 2011. 同位素地质年龄测定技术及应用. *地质学报*, 85(11): 1917 - 1947
- 戴恒贵. 1997. 康滇地区昆阳群和会理群地层、构造及找矿靶区研究. *云南地质*, 16(1): 1 - 39

- 龚琳, 何毅特, 陈天佑. 1996. 云南东川元古宙裂谷型铜矿. 北京: 冶金工业出版社, 1-226
- 关俊雷, 郑来林, 刘建辉, 孙志明, 程万华. 2011. 四川省会理县河口地区辉绿岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 地质学报, 85(4): 482-490
- 何德锋. 2009. 四川省拉拉铜矿床岩石学及地球化学研究. 博士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1-84
- 李希勤, 吴懋德, 段锦荪. 1984. 昆阳群的层序及顶底问题. 地质论评, 30(5): 399-408
- 李泽琴, 王奖臻, 刘家军, 李朝阳, 杜安道, 刘玉平, 叶琳. 2003. 拉拉铁氧化物-铜-金-钼-稀土矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 地质找矿论丛, 18(1): 39-42
- 吕世琨, 戴恒贵. 2001. 康滇地区建立昆阳群(会理群)层序的回顾和重要赋矿层位的发现. 云南地质, 20(1): 1-24
- 邱华宁, Wijbrans JR, 李献华, 朱炳泉, 朱崇林, 曾保成. 2002. 东川式层状铜矿<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 成矿年龄研究: 华南地区晋宁-澄江期成矿作用新证据. 矿床地质, 21(2): 129-136
- 冉崇英. 1989. 康滇地轴层控铜矿床的成矿机理. 北京: 地质出版社, 1-45
- 孙燕, 舒晓兰, 肖渊甫. 2006. 四川省拉拉铜矿床同位素地球化学特征及成矿意义. 地球化学, 35(5): 553-559
- 孙志明, 尹福光, 关俊雷, 刘建辉, 李军敏, 耿全如, 王立全. 2009. 云南东川地区昆阳群黑山组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地层学意义. 地质通报, 28(7): 896-900
- 吴孔文. 2008. 云南大红山层状铜矿床地球化学及成矿机制研究. 硕士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1-95
- 吴懋德, 段锦荪, 宋学良, 陈良忠, 单沛尧. 1990. 云南昆阳群地质. 昆明: 云南科技出版社, 1-223
- 薛步高. 1999. 从东川铁架山铁矿层位探讨昆阳群层序. 云南地质, 18(4): 469-475
- 杨红, 刘福来, 杜利林, 刘平华, 王舫. 2012. 扬子地块西南缘大红山群老厂河组变质火山岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报, 28(9): 2994-3014
- 杨耀民. 2004. 中元古代昆阳群 Fe-Cu-REE 矿床地球化学研究-以武定迤纳厂矿床为例. 博士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1-86
- 杨耀民, 涂光炽, 胡瑞忠. 2004. 迤纳厂稀土铁铜矿床稀土元素地球化学. 矿物学报, 24(3): 301-308
- 杨耀民, 涂光炽, 胡瑞忠, 石学法. 2005. 武定迤纳厂 Fe-Cu-REE 矿床 Sm-Nd 同位素年代学及其地质意义. 科学通报, 50(12): 1253-1258
- 叶霖, 刘玉平, 李朝阳, 刘家军. 2004a. 云南武定迤纳厂铜矿含矿石英脉<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄及其意义. 科学通报, 24(4): 411-414
- 叶霖, 刘玉平, 李朝阳, 刘家军. 2004b. 东川桃园式铜矿 Ar-Ar 同位素年龄及意义. 矿物岩石, 24(2): 57-60
- 尹福光, 孙志明, 白建科. 2011. 东川、滇中地区中元古代地层格架. 地层学杂志, 35(1): 49-54
- 张传恒, 高林志, 武振杰, 史晓颖, 阎全人, 李大建. 2007. 滇中昆阳群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 华南格林威尔期造山的证据. 科学通报, 52(7): 818-824
- 张永北, 王豪, 徐成彦, 魏启荣. 1996. 滇中昆阳群火成碳酸岩的发现及其意义. 地质科技情报, 15(3): 14-18
- 张永北, 毕华, 余龙师, 孙世华, 邱家骥, 徐成彦, 王人镜. 2008. 滇中昆阳裂谷中段含矿白云石岩的交代地幔碳酸盐岩浆喷发证据. 自然科学进展, 18(7): 778-788
- 赵秀鲲, 单卫国. 1993. 武定迤纳厂组的层位归属及其滑覆-变质. 云南地质, 12(1): 60-66
- 钟寿华. 1993. 从物探成果判断东川-易门地区昆阳群的顶界面. 云南地质, 12(1): 123-125