

# 云南德钦羊拉大型铜矿区花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义\*

王彦斌<sup>1</sup> 韩娟<sup>1</sup> 曾普胜<sup>2</sup> 王登红<sup>3</sup> 侯可军<sup>3</sup> 尹光侯<sup>4</sup> 李文昌<sup>4</sup>

WANG YanBin<sup>1</sup>, HAN Juan<sup>1</sup>, ZENG PuSheng<sup>2</sup>, WANG DengHong<sup>3</sup>, HOU KeJun<sup>3</sup>, YIN GuangHou<sup>4</sup> and LI WenChang<sup>4</sup>

1. 中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心, 北京 100037

2. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 100025

3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

4. 云南省地质调查局, 昆明 650051

1. Beijing SHRIMP Lab, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Institute of Mineral Resources Research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 100025, China

3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

4. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650051, China

2010-02-28 收稿, 2010-04-30 改回.

Wang YB, Han J, Zeng PS, Wang DH, Hou KJ, Yin GH and Li WC. 2010. U-Pb dating and Hf isotopic characteristics of zircons from granodiorite in Yangla copper deposit, Deqin County, Yunnan, Southwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (6): 1833–1844

**Abstract** Granodiorite intrusions (from south to north, namely, Lunong, Linong, Jiangbian, and Beiwu pluton) and diabase dyke are spatially and temporally associated with the copper mineralization in Yangla copper deposit, Deqin County, Yunnan, Southwest China. They commonly distributed in Yangla copper deposit. To constrain the age of a number of major granodioritic plutons and diabase dyke related to Cu mineralization, U-Pb analysis of zircon was conducted. Hafnium isotope data was also acquired through laser-ablation multicollector ICPMS analysis of zircon, with the aim of gaining insight into the age and nature of the source region of the plutons. Four age groups have been identified from five igneous samples: Middle Triassic (238 ~ 239Ma, Linong pluton, Lunong pluton), Middle-Late Triassic (228Ma, Jiangbian pluton), Late Triassic (222Ma, diabase dyke) and Late Triassic (214Ma, Beiwu pluton). While the Re-Os isochron age for molybdenite from Linong Cu ore body was 228Ma to 230Ma. These data suggest that the formation of different granodiorite plutons by multi-stages of gushing emplacement of the magmas. The ore-forming of Yangla copper is developed in Middle Triassic. Hafnium analysis shows the Triassic granodiorites having negative and positive and variable  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values ( -4.3 ~ +2.4 ) and Mesoproterozoic ( 1.1 ~ 1.5Ga ) depleted-mantle model ages, which is interpreted to reflect the derivation from an isotopically heterogeneous, mixing source of mantle with crust source. The source region for these magmas may be tentatively correlated with the Mesoproterozoic material of Yangtze Craton, which has been suggested to underlie the Yangla; however, further work is necessary to demonstrate this suggestion.

**Key words** Granodiorite; Yangla copper deposit; U-Pb dating; Hf isotope; Yunnan

**摘要** 云南德钦羊拉大型铜矿隶属我国著名的羊拉-鲁春铜多金属矿化集中区,其铜矿产与区内印支期侵入岩有着密切的时空、成因联系。云南德钦羊拉大型铜矿区与花岗闪长岩岩体密切共生,花岗闪长岩由南往北依次出露路农、里农、江边、贝吾岩体,其中里农花岗闪长岩可见辉绿岩墙侵入。锆石原位 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析结果表明,4 组年龄分别为 238 ~ 239Ma(里农和路农岩体),228Ma(江边岩体),222Ma(辉绿岩墙),214Ma(贝吾岩体)。这些年龄代表锆石的结晶年龄,对应

\* 本文受国家重点基础研究发展规划(2009CB421001)、国家科技支撑计划课题(2006BAB01A07-4)和中国地质调查局项目(1212010633901)联合资助。

第一作者简介:王彦斌,男,1966年生,博士,研究员,同位素年代学和地球化学专业, E-mail: yanbinw@cags.ac.cn

路农、里农、江边、辉绿岩墙、贝吾花岗岩闪长岩岩体的形成年龄,同时显示该岩带由南往北年龄由老到新的侵位序列。显示羊拉大型铜矿区花岗岩闪长岩体是三叠纪时期的花岗岩质浆多次涌动侵入形成的,其中伴随辉绿岩墙的侵入,岩浆活动持续时间约 15Ma。里农铜矿体辉钼矿成矿(Re-Os)年龄为 228~230Ma,显然羊拉铜矿床的成矿作用也在该时期完成。羊拉大型铜矿区花岗岩闪长岩体的全岩  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $-5.0 \sim -5.5$ , 中元古代(1.24~1.39Ga)的亏损地幔模式年龄,锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-4.3 \sim +2.4$ , 锆石 Hf 同位素地壳模式年龄(1.1~1.5Ga),  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值主要为负值揭示其源区可能主要为陆壳物质,部分锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为正值,说明在其形成过程中有一定比例的亏损地幔物质的加入,源区同位素的不均一,是壳幔相互作用的结果,中元古代模式年龄说明其源区主要以扬子克拉通下地壳物质为主。这些新资料为理解滇西古特提斯构造演化提供了重要的地球化学制约。

**关键词** 花岗岩闪长岩;德钦羊拉大型铜矿;U-Pb 定年;Hf 同位素;云南

**中图分类号** P597.3; P588.12

## 1 引言

羊拉大型铜矿床位于青藏高原东缘的金沙江边,所处构造位置为中咱地块与昌都—思茅地块之间的金沙江结合带中段(图 1)。其铜矿产与区内侵入岩有着密切的时空、成因联系,矿体围绕岩体产出,既产于外接触带围岩之中,也见于岩体内部破碎(裂隙)带及内接触带。产于围岩之中的主矿体是顺层的,但局部地段也出现穿层现象。岩体内部矿体呈大脉状产出,切穿围岩,成矿类型为与岛弧钙碱性岩浆活动有关的矽卡岩矿床(魏君奇等,1997;陈开旭等,2002;王安建等,2009)。但在羊拉铜矿里农矿段还发现铜矿体产于矽卡岩、变石英砂岩、绢云板岩中,顶板为大理岩,具明显的层控特征,故提出羊拉铜矿是在喷流沉积基础上叠加了岩浆接触交代和后期的构造热液成矿作用的复合成因的铜多金属矿床(何龙清等,1998;路远发等,1999, 2004;陈开旭等,2002;魏君奇等,2004;王安建等,2009)。但曲晓明等(2004)从赋矿岩系岩石类型的多样性论证羊拉铜矿为与花岗岩闪长岩有关的矽卡岩铜矿,而不是海底喷流沉积形成的。显然,不可否认,云南德钦羊拉大型铜矿区与花岗岩闪长岩岩体关系密切,花岗岩闪长岩由北往南依次出露分别为贝吾、江边、里农、路农、加仁岩体,其中里农花岗岩闪长岩可见辉绿岩墙侵入。里农、江边岩体中沿节理密集地段发育细脉状、浸染状铜矿化,贝吾、里农、江边、加仁岩体的外接触带有矽卡岩型矿体产出,路农斑岩体全岩铜金矿化,现在羊拉铜矿由云南迪庆矿业公司开采。因此,准确厘定与成矿关系密切的花岗闪长岩的成岩时代是深入研究矿床的成矿物质来源、成矿作用、成矿机制、成矿动力学构造背景以及在外围勘察找矿的基础。

该铜矿最早于 1965~1967 年由云南地质局 18 地质队对德钦县甲功(羊拉)等地的普查评价时首次发现。虽然该矿床已被矿床学家广泛注意,但其同位素定年工作程度不高,仅报道了岩体同位素 Rb-Sr 年龄,但它们的 MSWD 值较大,如魏君奇等(1997)报道里农岩体的全岩-黑云母-长石 Rb-Sr 年龄  $227 \pm 1\text{Ma}$ (笔者依据原始数据重新计算其年龄为  $227.4 \pm 3.5\text{Ma}$ , MSWD = 63),加仁岩体的全岩-角闪石-长石

Rb-Sr 年龄  $208 \pm 5\text{Ma}$ (笔者依据原始数据重新计算其年龄为  $196 \pm 50\text{Ma}$ , MSWD = 18)。魏君奇等(2000)文中提到里农含矿斑岩的全岩 Rb-Sr 年龄  $202 \pm 21\text{Ma}$ (笔者依据原始数据重新计算其年龄为  $202 \pm 58\text{Ma}$ , MSWD = 105)。

为此,本文选择羊拉大型铜矿中花岗岩闪长岩和辉绿岩脉开展锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析,获得花岗岩闪长岩岩体的侵位时代和 Hf 同位素特征,为研究羊拉铜矿床成岩与成矿作用岩浆作用演化过程及动力学背景提供同位素地球化学制约。

## 2 岩体特征

羊拉大型铜矿位于云南省德钦县羊拉乡,紧邻金沙江西侧,位于加仁花岗岩闪长岩体北倾伏端。区内出露古生界一套碎屑岩-碳酸盐岩-火山沉积岩组合,发育断裂、次级褶皱构造以及层间破碎(裂隙)带,广泛分布中酸性侵入岩浆岩。岩浆活动、构造、围岩性质等控制了本矿床的产出。成矿元素以铜为主,伴有金、银、锡、钨、硫等多种有用组分,全区铜资源量已达大型以上规模。

羊拉铜矿内侵入岩主要产出花岗岩闪长岩,与矿化关系密切,矿床大部分围绕其分布。从属于加仁花岗岩带,展布方向与区域构造线方向一致,沿金沙江断裂西侧呈近北北东向展布。矿区由南向北依次称为路农、里农、江边、贝吾花岗岩闪长岩岩体及相应的矿段,这些岩体侵入于泥盆-石炭系变砂板岩、板岩、大理岩中(图 1)。路农和里农岩体主体岩石类型为花岗岩闪长岩,而岩体边缘则由石英二长岩和二长花岗岩构成,二者为渐变接触关系,其中里农岩体边缘还见到围岩顶垂体及捕虏体,江边和贝吾岩体内部见围岩捕虏体,路农矿段 TC202(E)附近还见强烈硅化、绢云母化、褐铁矿化的正长斑岩体,里农矿段西侧也见黑云母二长花岗岩斑岩,斑岩体强烈硅化、绢云母化,并具星点状黄铁矿化。江边岩体主体为花岗岩闪长岩,边缘为斜长花岗岩,且多见钾长石斑晶,它们之间为渐变接触关系。贝吾岩体中南部为花岗岩闪长岩,北部边缘为二长花岗岩,二者渐变接触。里农、路农、里农、江边、贝吾岩体的周边,与围岩接触处不同程度出现角岩化、矽卡岩化,特征矽卡岩矿物石榴子石、透辉石在路农矿段出露丰

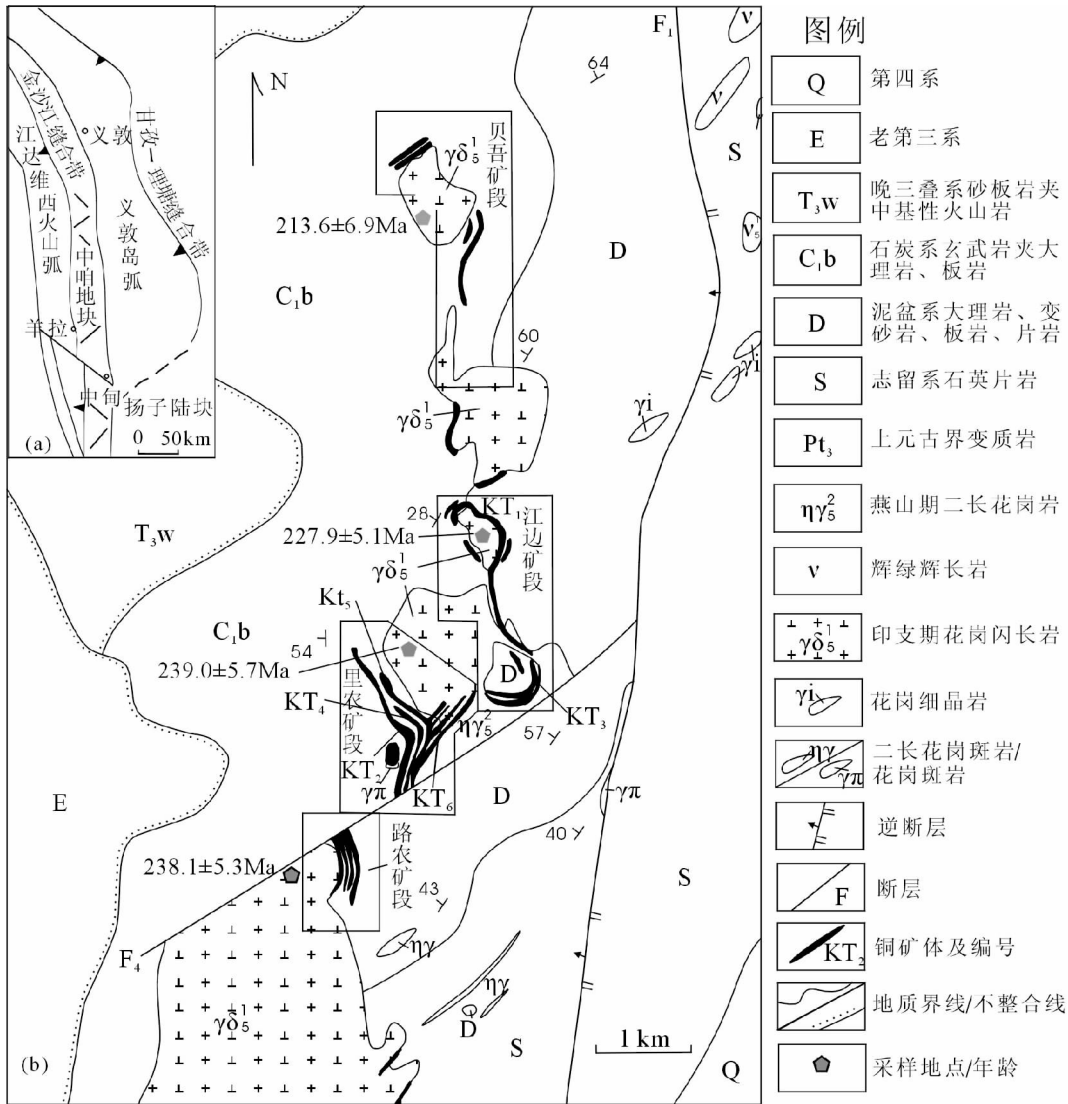


图1 羊拉铜矿区地质简图

(a)-羊拉铜矿所在的大地构造位置图(据莫宣学等,1993 修编);(b)-羊拉铜矿地质图(据曲晓明等,2004 修编)

Fig.1 Simplified geological map of the Yangla copper deposit

(a)-Tectonic map of the Yangla copper deposit (after Mo *et al.*, 1993); (b)-Geological map of the Yangla copper deposit (after Qu *et al.*, 2004)

富。里农、江边岩体中沿节理密集地段发育细脉状、浸染状铜矿化,贝吾、里农、江边、加仁岩体的外接触带有矽卡岩型矿体产出,路农斑岩体全岩铜金矿化,在里农大沟剖面可见灰白色中粒花岗闪长岩节理裂隙发育的构造破碎带内见有细脉状、浸染状铜矿化,数条宽 40cm 辉绿岩墙侵入。路农、里农、江边、贝吾花岗闪长岩岩体与围岩碳酸盐岩和变质碎屑岩的外接触带有矽卡岩型矿体产出,形成羊拉铜矿的重要矿床类型。

本次研究的样品分别采自路农、里农、江边、贝吾花岗闪长岩岩体的主要岩石花岗闪长岩,它们呈灰白色,具中粗粒花岗结构,块状构造和条带状构造。主要由普通角闪石 8%~15%、黑云母 5%、斜长石 40%~55% (An = 32~48)、钾长石 10%~15%、石英 20%~25% 组成;所含副矿物为磷灰

石、锆石。其化学成分为 SiO<sub>2</sub>: 64.87%~67.48%, TiO<sub>2</sub>: 0.38%~0.43%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 15.05%~15.80%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 0.58%~1.27%, FeO: 2.39%~3.43%, MnO: 0.08%~0.14%, MgO: 1.43%~1.85%, CaO: 3.05%~3.85%, Na<sub>2</sub>O: 2.50%~4.51%, K<sub>2</sub>O: 1.98%~4.77%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 0.09%~0.11%, H<sub>2</sub>O: 0.96%~2.38%, CO<sub>2</sub>: 0.04%~1.48%。花岗闪长岩高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,路农、里农岩体富钾 (K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O > 1.0),江边、贝吾岩体富钠 (Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O > 1.0),岩石化学上属钙碱性,铝不饱和系列,为 I 型花岗岩 (Chappell and White, 1974),Sr 同位素初始比值 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> = 0.7103~0.7106,为与俯冲有关的岛弧型花岗闪长岩 (魏君奇等,1997;陈开旭等,2002;王安建等,2009),ε<sub>Nd</sub>(t) = -5.0~-5.5, t<sub>DM</sub> = 1.24~1.39Ga(王彦斌未刊资料)。所采四个样品的锆石特

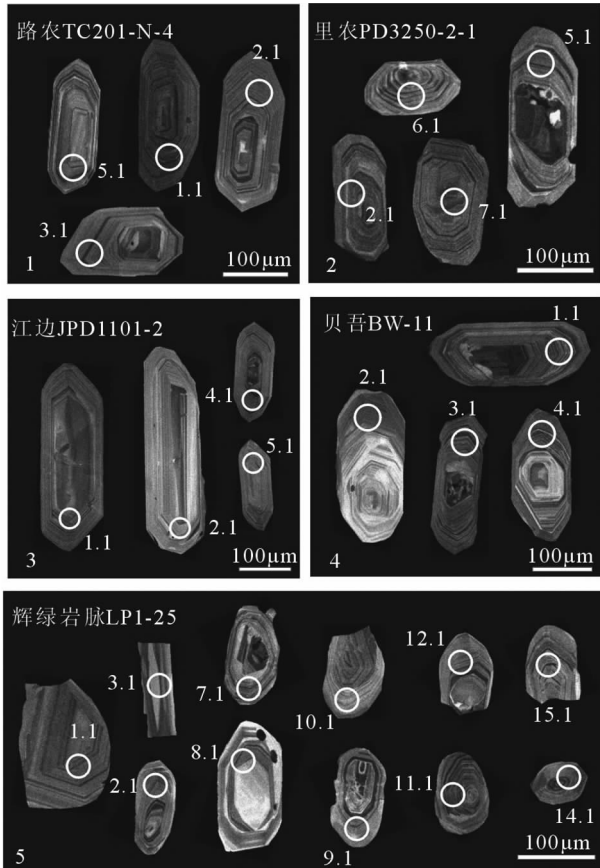


图2 羊拉铜矿花岗闪长岩和辉绿岩锆石阴极发光照片  
Fig.2 CL images of zircons from granodiorite and diabase from Yangla copper deposit

征基本相同,长约100~300 $\mu\text{m}$ ,宽约50~100 $\mu\text{m}$ ,浅黄色透明,主要为长柱状,四方双锥发育,晶面平直,阴极发光照片可见振荡环带,具岩浆结晶锆石的特点(图2)。

本次研究的辉绿岩墙样品采自里农大沟,40cm宽的辉绿岩墙侵入里农花岗闪长岩。

### 3 样品采集和实验手段及方法

#### 3.1 SHRIMP U-Pb 锆石 U-Pb 定年实验方法

羊拉铜矿路农、里农、江边、贝吾岩体的四个花岗闪长岩样品中锆石应用SHRIMP U-Pb定年技术。把锆石从2.5kg的样品中分选出来,在双目镜下挑纯。将待测锆石与数粒锆石标样TEM置于环氧树脂中做成样品靶(Mount)。将靶上的锆石磨至约一半,以使锆石内部暴露,用于锆石透射光、反射光和阴极发光(CL)研究及随后的SHRIMP U-Pb分析。CL图象在北京离子探针中心电镜室完成,其目的是在进行SHRIMP U-Pb分析时,需参考锆石颗粒剖面的阴极发光图像,以便对锆石颗粒的不同区域U、Th、Pb同位素成分进行分析。

SHRIMP U-Pb分析在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心的SHRIMP II上完成。一次离子源气体为氧气,将其电离后,由 $\text{O}_2^-$ 打击锆石颗粒,激发出锆、铅、铀、钍的氧化物离子或金属离子。测定 $\text{Zr}_2\text{O}$ 、 $^{204}\text{Pb}$ 、背景、 $^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{ThO}$ 、 $^{254}\text{UO}$ 质量峰的强度,每个峰的积分时间分别为2.0s、10.0s、10.0s、10.0s、15.0s、5.0s、5.0s、2.0s、2.0s,每个点的数据是5次扫描后的平均值。一次离子为约4.5nA,10kV的 $\text{O}_2^-$ ,打到锆石上束斑的直径为~25 $\mu\text{m}$ ,质量分辨率约5400(1%峰高)(Compston *et al.*, 1984, 1992; Williams and Claesson, 1987; Williams, 1998)。待分析未知点与标样TEM的点交叉进行分析。应用RSES的锆石SL13(572Ma,  $238 \times 10^{-6}$ )标定样品的U、Th、Pb含量,TEM(417Ma)进行年龄校正。数据处理采用Ludwig的SQUID1.02及ISOPLOT程序。普通铅根据实测的 $^{204}\text{Pb}$ 进行校正,单个分析点数据误差为 $1\sigma$ ,加权平均年龄具95%的置信度。

#### 3.2 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析实验方法

羊拉铜矿里农大沟花岗闪长岩中辉绿岩墙锆石激光剥蚀等离子体质谱U-Pb定年及花岗闪长岩Hf同位素测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所MC-ICP-MS实验室完成,所用仪器为Finnigan Neptune型MC-ICP-MS及与之配套的Newwave UP 213激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为25 $\mu\text{m}$ ,频率为10Hz,能量密度约为 $2.5\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,以He为载气。信号较小的 $^{207}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}$ 、 $^{204}\text{Pb}$ (+ $^{204}\text{Hg}$ )、 $^{202}\text{Hg}$ 用离子计数器(multi-ion-counters)接收, $^{208}\text{Pb}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{238}\text{U}$ 信号用法拉第杯接收,实现了所有目标同位素信号的同时接收并且不同质量数的峰基本上都是平坦的,进而可以获得高精度的数据,均匀锆石颗粒 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 的测试精度( $2\sigma$ )均为2%左右,对锆石标准的定年精度和准确度在1%( $2\sigma$ )左右。LA-MC-ICP-MS激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,数据分析前用锆石GJ-1进行调试仪器,使之达到最优状态,锆石U-Pb定年以锆石GJ-1为外标,U、Th含量以锆石M127(U:  $923 \times 10^{-6}$ ; Th:  $439 \times 10^{-6}$ ; Th/U: 0.475; Nasdala *et al.*, 2008)为外标进行校正。测试过程中在每测定5~7个样品前后重复测定两个锆石GJ1对样品进行校正,并测量一个锆石Plesovice,观察仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用ICPMS DataCal 4.3程序(Liu *et al.*, 2008),数据进行了普通铅校正, $^{204}\text{Pb}$ 由离子计数器检测, $^{204}\text{Pb}$ 含量异常高的分析点可能受包体等普通Pb的影响,对 $^{204}\text{Pb}$ 含量异常高的分析点在计算时剔除,锆石年龄谱和图用Isoplot 3.0程序获得。详细实验测试过程可参见侯可军等(2009)。样品分析过程中,Plesovice标样作为未知样品的分析结果 $337.0 \pm 2.3\text{Ma}$ ,  $2\sigma$ ,  $n=4$ ,  $\text{MSWD}=0.09$ ,对应的年龄推荐值为 $337.13 \pm 0.37\text{Ma}$  ( $2\sigma$ ) (Slama *et al.*, 2008),两者在误差范围内完全一致。

表 1 羊拉铜矿花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果

Table 1 SHRIMP data of zircons from Yangla granodiorite

点号	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U ( $\times 10^{-6}$ )	Th ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$^{206}\text{Pb}^*$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ 年龄 (Ma)	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ 年龄 (Ma)	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm \%$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	$\pm \%$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm \%$
路农 TC201-N-4															
1.1	0.62	1374	380	0.29	44.9	239.0	7.2	346	72	0.0534	3.2	0.278	4	0.0378	3.1
2.1	1.04	1380	353	0.26	45.1	238.3	7.0	443	150	0.0558	6.9	0.290	8	0.0377	3.0
3.1	1.87	1199	256	0.22	39.7	239.3	7.0	201	240	0.0501	10	0.261	11	0.0378	3.0
4.1	1.60	738	164	0.23	24.2	237.8	7.2	390	250	0.0545	11	0.282	11	0.0376	3.1
5.1	1.78	1092	303	0.29	35.6	235.6	7.0	344	250	0.0534	11	0.274	11	0.0372	3.0
6.1	0.55	1192	495	0.43	38.4	236.0	7.0	385	81	0.0543	3.6	0.279	5	0.0373	3.0
7.1	1.01	1233	458	0.38	40.7	240.5	7.1	224	160	0.0506	7.0	0.265	8	0.038	3.0
里农 PD3250-2-1															
1.1	1.04	1043	287	0.28	33.5	234.4	8.1	216	150	0.0504	6.5	0.258	7	0.0370	3.5
2.1	1.34	1034	262	0.26	33.5	235.3	7.2	296	150	0.0522	6.6	0.268	7	0.0372	3.1
3.1	0.87	1692	637	0.39	53.1	229.3	8.2	389	230	0.0544	10	0.272	11	0.0362	3.6
4.1	0.68	1466	502	0.35	49	244.1	7.2	323	74	0.0529	3.2	0.281	4	0.0386	3.0
5.1	1.54	1654	508	0.32	47.8	210.0	6.2	248	210	0.0512	8.9	0.234	9	0.03311	3.0
6.1	0.15	1199	320	0.28	39.7	243.2	7.8	762	160	0.0646	7.5	0.343	8	0.0385	3.2
7.1	0.27	1382	417	0.31	45	239.1	7.0	657	160	0.0615	7.5	0.320	8	0.0378	3.0
8.1	0.26	1476	510	0.36	49.2	244.9	7.1	742	190	0.064	9.1	0.342	10	0.0387	3.0
江边 JPD1101-2															
1.1	3.19	703	235	0.35	22.3	227.0	6.9	82	460	0.0477	19	0.235	19	0.0358	3.1
2.1	1.07	1041	321	0.32	32.7	229.3	6.8	376	210	0.0541	9.5	0.270	10	0.0362	3.0
3.1	1.72	1457	435	0.31	44.5	221.4	6.5	263	150	0.0515	6.7	0.248	7	0.0349	3.0
4.1	1.46	1282	420	0.34	38.8	219.9	6.6	-7	270	0.0459	11	0.220	11	0.0347	3.1
5.1	1.58	1593	660	0.43	50.6	230.6	6.7	311	130	0.0526	5.6	0.264	6	0.0364	3.0
6.1	1.18	1176	356	0.31	38.6	238.8	7.0	291	160	0.0521	6.8	0.271	7	0.0377	3.0
7.1	1.52	1000	288	0.30	31.7	230.0	7.0	496	320	0.0571	15	0.286	15	0.0363	3.1
贝吾 BW-11															
1.1	0.15	1446	437	0.31	44.2	225.1	6.6	645	89	0.0612	4.2	0.300	5	0.03550	3.0
2.1	0.00	850	218	0.26	26.9	232.7	6.9	670	82	0.0619	3.8	0.314	5	0.03680	3.0
3.1	0.87	1114	258	0.24	33.5	219.6	6.5	318	120	0.0527	5.2	0.252	6	0.03470	3.0
4.1	1.92	1210	276	0.24	33.4	200.3	6.2	134	410	0.0487	17	0.212	18	0.03160	3.2
5.1	1.22	1181	370	0.32	36.2	223.1	7.0	351	190	0.0535	8.5	0.260	9	0.03520	3.2
6.1	1.40	1013	254	0.26	29.7	212.9	6.6	414	380	0.055	17	0.255	17	0.03360	3.1
7.1	1.29	1093	386	0.36	31.4	209.5	6.2	263	240	0.0515	11	0.235	11	0.03300	3.0
8.1	1.16	1020	309	0.31	28	200.8	6.1	114	230	0.0483	9.8	0.211	10	0.03164	3.1
9.1	0.25	2646	1207	0.47	74.5	207.4	6.0	188	48	0.0499	2.1	0.225	4	0.03270	2.9
10.1	1.01	560	176	0.32	16.4	213.5	6.5	494	240	0.0571	11	0.265	11	0.03370	3.1
11.1	2.36	1034	303	0.30	29	202.4	6.1	-111	300	0.044	12	0.193	12	0.03189	3.0
12.1	1.21	955	277	0.30	29.8	226.9	7.0	359	150	0.0537	6.7	0.265	7	0.03580	3.1

注:  $\text{Pb}_c$  和  $\text{Pb}^*$  分别为普通铅和放射成因铅; 标准校正值的误差为 1.03%; 普通铅校正为  $^{204}\text{Pb}$  实测值

Hf 同位素激光束斑直径为  $40\mu\text{m}$ , 激光剥蚀时间为 27s, 测定时采用锆石 GJ-1 和 TEM 做外标,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值分别为  $0.282013 \pm 19 (2\sigma)$  (Elhlou *et al.*, 2006) 和  $0.282680 \pm 31 (2\sigma)$  (Wu *et al.*, 2006)。本次实验测试其  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  的平均值分别为  $0.282004 \pm 0.000032 (2\sigma, n=30)$  和  $0.282672 \pm 0.000044 (2\sigma, n=54)$ , 分析流程及校正参见侯可军等(2007)。

#### 4 锆石 U-Pb 定年实验结果

羊拉铜矿路农、里农、江边、贝吾岩体的四个花岗闪长岩

样品锆石的阴极发光图像见图 2, SHRIMP U-Pb 同位素测定结果见表 1, 其谱和图见图 3。

路农花岗闪长岩样品 TC201-N-4 中锆石主要为长柱状, 四方双锥发育, 晶面平直, 阴极发光图像显示锆石具清晰的岩浆震荡环带, 属典型的岩浆锆石。这些锆石的 U 含量较高, 达  $738 \times 10^{-6} \sim 1380 \times 10^{-6}$ , Th/U 范围 0.22 ~ 0.43, 具岩浆锆石的地球化学特征 (Williams and Claesson, 1987)。它们的 7 个分析点在一致曲线中成群分布,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均值年龄为  $238.1 \pm 5.3\text{Ma}$  (图 3), 解释为路农花岗闪长岩的侵位年龄; 里农样品 PD3250-2-1 中同类锆石的 U 含量也

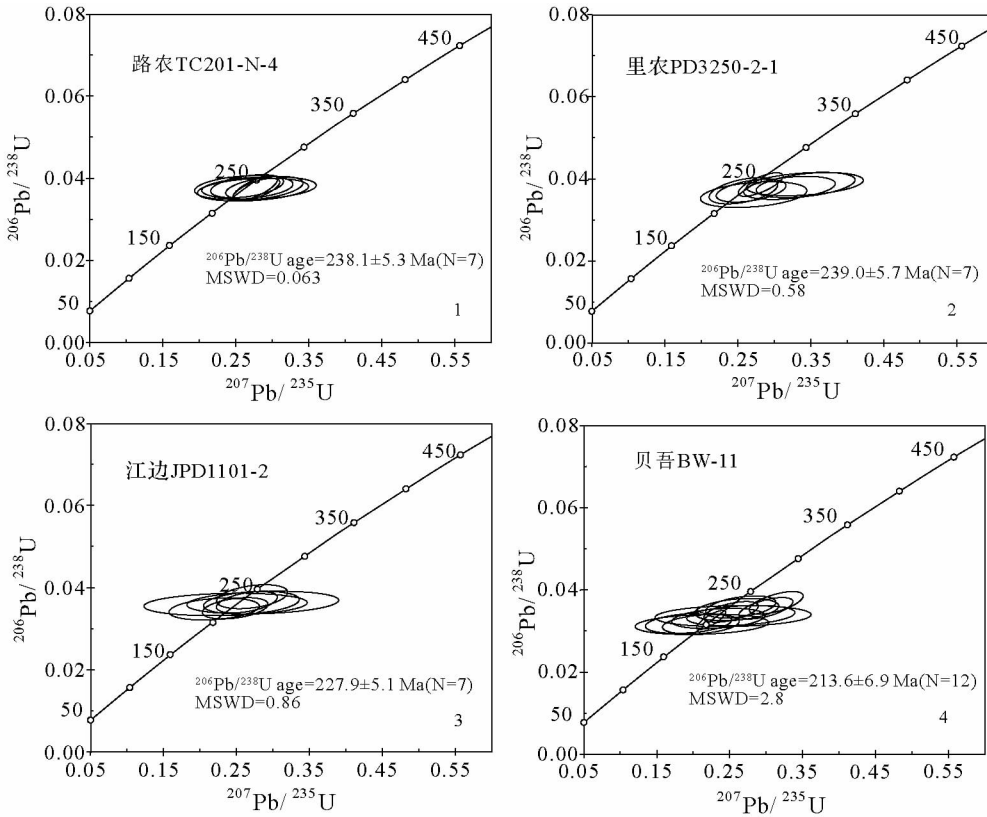


图3 羊拉铜矿花岗闪长岩锆石 U-Pb 一致线曲线图

Fig. 3 U-Pb concordia diagrams showing SHRIMP data for granodiorite from Yangla copper deposit

较高,达  $1034 \times 10^{-6} \sim 1692 \times 10^{-6}$ , Th/U 范围 0.26 ~ 0.39, 也具有岩浆锆石的地球化学特征 (Williams and Claesson, 1987)。它们的 7 个分析在一致曲线中成群分布,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均值年龄为  $239.0 \pm 5.7\text{Ma}$ , 解释为里农花岗闪长岩的侵位年龄; 江边样品 JPD1101-2 中同类锆石的 U 含量较高, 达  $703 \times 10^{-6} \sim 1593 \times 10^{-6}$ , Th/U 范围 0.30 ~ 0.43, 具岩浆锆石的地球化学特征 (Williams and Claesson, 1987)。它们的 7 个分析在一致曲线中成群分布,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均值年龄为  $227.9 \pm 5.1\text{Ma}$ , 解释为江边花岗闪长岩的侵位年龄。贝吾样品 BW-11 中同类锆石的 U 含量较高, 达  $560 \times 10^{-6} \sim 2646 \times 10^{-6}$ , Th/U 范围 0.24 ~ 0.47, 具岩浆锆石的地球化学特征 (Williams and Claesson, 1987)。它们的 12 个分析在一致曲线中成群分布,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均值年龄为  $213.6 \pm 6.9\text{Ma}$ , 解释为贝吾花岗闪长岩的侵位年龄。

羊拉铜矿里农大沟花岗闪长岩中辉绿岩脉锆石主要为长柱状、和短柱状, 有的锆石颗粒边缘有圆化现象, 阴极发光照片可见振荡环带, 属典型的岩浆锆石。这些锆石的 U 含量为  $176 \times 10^{-6} \sim 1141 \times 10^{-6}$ , Th/U 范围 0.23 ~ 0.84, 具岩浆锆石的地球化学特征 (Williams and Claesson, 1987)。它们的 16 个分析点在一致曲线中成群分布,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均值年龄为  $222.0 \pm 1.0\text{Ma}$  (表 2, 图 4), 该年龄解释为辉绿岩脉的侵位年龄。

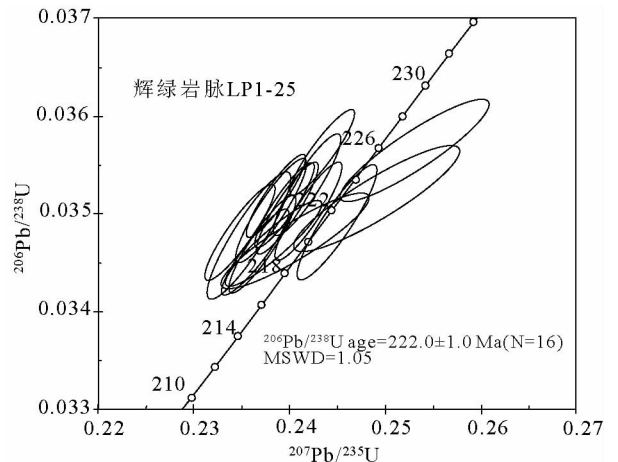


图4 羊拉铜矿辉绿岩锆石 U-Pb 一致线曲线图

Fig. 4 U-Pb concordia diagram showing SHRIMP data for diabase from Yangla copper mineral deposit

## 5 花岗闪长岩锆石 Hf 同位素特征

对羊拉铜矿路农、里农、江边、贝吾花岗闪长岩岩体的 60 粒锆石的  $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$  和  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值范围分别为 0.022029 ~ 0.063678 和 0.000434 ~ 0.002604 (表 3),  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值

表 2 羊拉铜矿辉绿岩(LP1-25) 锆石 U-Pb 分析结果

Table 2 U-Pb data of zircons from Yangla diabase rocks (LP1-25)

点号	含量( $\times 10^{-6}$ )			Th/U	U-Th-Pb 同位素比值			年龄(Ma)		
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
1. 1	26	195	853	0. 23	0. 04952 $\pm$ 0. 00020	0. 24343 $\pm$ 0. 00223	0. 03563 $\pm$ 0. 00029	173 $\pm$ 10	221 $\pm$ 2	226 $\pm$ 2
2. 1	31	285	934	0. 30	0. 04968 $\pm$ 0. 00021	0. 24181 $\pm$ 0. 00236	0. 03530 $\pm$ 0. 00034	180 $\pm$ 10	220 $\pm$ 2	224 $\pm$ 2
3. 1	37	547	812	0. 67	0. 05013 $\pm$ 0. 00021	0. 24201 $\pm$ 0. 00233	0. 03503 $\pm$ 0. 00033	201 $\pm$ 10	220 $\pm$ 2	222 $\pm$ 2
4. 1	11	148	176	0. 84	0. 05138 $\pm$ 0. 00074	0. 24907 $\pm$ 0. 00575	0. 03516 $\pm$ 0. 00036	258 $\pm$ 35	226 $\pm$ 5	223 $\pm$ 2
5. 1	21	263	493	0. 53	0. 04950 $\pm$ 0. 00019	0. 23944 $\pm$ 0. 00205	0. 03509 $\pm$ 0. 00029	172 $\pm$ 9	218 $\pm$ 2	222 $\pm$ 2
6. 1	27	325	902	0. 36	0. 04917 $\pm$ 0. 00018	0. 23859 $\pm$ 0. 00202	0. 03519 $\pm$ 0. 00028	156 $\pm$ 9	217 $\pm$ 2	223 $\pm$ 2
7. 1	26	303	893	0. 34	0. 04957 $\pm$ 0. 00021	0. 23712 $\pm$ 0. 00230	0. 03469 $\pm$ 0. 00033	175 $\pm$ 10	216 $\pm$ 2	220 $\pm$ 2
8. 1	13	149	436	0. 34	0. 04918 $\pm$ 0. 00027	0. 23573 $\pm$ 0. 00287	0. 03478 $\pm$ 0. 00043	157 $\pm$ 13	215 $\pm$ 2	220 $\pm$ 3
9. 1	22	257	742	0. 35	0. 04891 $\pm$ 0. 00022	0. 23484 $\pm$ 0. 00244	0. 03481 $\pm$ 0. 00032	143 $\pm$ 11	214 $\pm$ 2	221 $\pm$ 2
10. 1	8	81	221	0. 37	0. 04983 $\pm$ 0. 00036	0. 23834 $\pm$ 0. 00330	0. 03470 $\pm$ 0. 00029	187 $\pm$ 18	217 $\pm$ 3	220 $\pm$ 2
11. 1	34	433	1141	0. 38	0. 04929 $\pm$ 0. 00022	0. 23807 $\pm$ 0. 00242	0. 03503 $\pm$ 0. 00035	161 $\pm$ 11	217 $\pm$ 2	222 $\pm$ 2
12. 1	22	212	700	0. 30	0. 05121 $\pm$ 0. 00063	0. 25299 $\pm$ 0. 00513	0. 03565 $\pm$ 0. 00035	250 $\pm$ 29	229 $\pm$ 4	226 $\pm$ 2
13. 1	16	191	402	0. 47	0. 05092 $\pm$ 0. 00025	0. 24495 $\pm$ 0. 00274	0. 03492 $\pm$ 0. 00039	237 $\pm$ 12	222 $\pm$ 2	221 $\pm$ 2
14. 1	19	245	669	0. 37	0. 05014 $\pm$ 0. 00069	0. 24062 $\pm$ 0. 00514	0. 03473 $\pm$ 0. 00032	201 $\pm$ 33	219 $\pm$ 4	220 $\pm$ 2
15. 1	26	346	872	0. 40	0. 04962 $\pm$ 0. 00019	0. 23981 $\pm$ 0. 00209	0. 03506 $\pm$ 0. 00031	177 $\pm$ 9	218 $\pm$ 2	222 $\pm$ 2
16. 1	17	209	664	0. 31	0. 04950 $\pm$ 0. 00021	0. 23638 $\pm$ 0. 00232	0. 03461 $\pm$ 0. 00029	172 $\pm$ 10	215 $\pm$ 2	219 $\pm$ 2

表 3 羊拉铜矿花岗闪长岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Hf isotopic compositions of Yangla granodiorite

点号	年龄 (Ma)	$\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$	$\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$	$\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$	$2\sigma_m$	$\left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}\right)_t$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM}}$ (Ma)	$t_{\text{DM}}^c$ (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
路农 TC201-N-4												
1. 1	238. 1	0. 026569	0. 000828	0. 282575	0. 000017	0. 282571	-7. 0	-1. 9	0. 6	954	1387	-0. 98
2. 1	238. 1	0. 027019	0. 000779	0. 282585	0. 000018	0. 282582	-6. 6	-1. 5	0. 6	938	1364	-0. 98
3. 1	238. 1	0. 031048	0. 000909	0. 282637	0. 000019	0. 282633	-4. 8	0. 3	0. 7	869	1248	-0. 97
4. 1	238. 1	0. 024965	0. 000771	0. 282607	0. 000021	0. 282604	-5. 8	-0. 7	0. 7	908	1315	-0. 98
5. 1	238. 1	0. 040419	0. 001261	0. 282657	0. 000019	0. 282651	-4. 1	1. 0	0. 7	848	1207	-0. 96
6. 1	238. 1	0. 057558	0. 002174	0. 282668	0. 000030	0. 282658	-3. 7	1. 2	1. 1	854	1191	-0. 93
7. 1	238. 1	0. 045085	0. 001782	0. 282556	0. 000029	0. 282548	-7. 6	-2. 7	1. 0	1005	1439	-0. 95
8. 1	238. 1	0. 053106	0. 001698	0. 282510	0. 000033	0. 282502	-9. 3	-4. 3	1. 2	1070	1542	-0. 95
9. 1	238. 1	0. 034570	0. 001178	0. 282590	0. 000023	0. 282585	-6. 4	-1. 4	0. 8	941	1357	-0. 96
10. 1	238. 1	0. 046421	0. 001280	0. 282557	0. 000025	0. 282551	-7. 6	-2. 6	0. 9	991	1432	-0. 96
11. 1	238. 1	0. 038164	0. 001268	0. 282557	0. 000024	0. 282552	-7. 6	-2. 6	0. 9	990	1431	-0. 96
12. 1	238. 1	0. 044249	0. 001443	0. 282605	0. 000021	0. 282599	-5. 9	-0. 9	0. 7	926	1325	-0. 96
13. 1	238. 1	0. 047100	0. 001414	0. 282601	0. 000019	0. 282595	-6. 0	-1. 0	0. 7	931	1334	-0. 96
14. 1	238. 1	0. 035476	0. 001182	0. 282693	0. 000021	0. 282687	-2. 8	2. 2	0. 7	796	1126	-0. 96
15. 1	238. 1	0. 044678	0. 001310	0. 282533	0. 000018	0. 282528	-8. 4	-3. 4	0. 6	1025	1485	-0. 96
16. 1	238. 1	0. 023592	0. 000687	0. 282621	0. 000016	0. 282618	-5. 3	-0. 2	0. 6	886	1282	-0. 98
17. 1	238. 1	0. 034469	0. 001152	0. 282541	0. 000022	0. 282536	-8. 2	-3. 1	0. 8	1010	1466	-0. 97
里农 PD3250-2-1												
1. 1	239. 0	0. 025665	0. 000697	0. 282559	0. 000019	0. 282556	-7. 5	-2. 4	0. 7	972	1421	-0. 98
2. 1	239. 0	0. 037752	0. 001022	0. 282589	0. 000020	0. 282585	-6. 5	-1. 4	0. 7	938	1356	-0. 97
3. 1	239. 0	0. 035644	0. 001012	0. 282563	0. 000019	0. 282559	-7. 4	-2. 3	0. 7	975	1414	-0. 97
4. 1	239. 0	0. 030936	0. 000846	0. 282570	0. 000016	0. 282566	-7. 2	-2. 0	0. 6	962	1399	-0. 97
5. 1	239. 0	0. 032910	0. 000900	0. 282636	0. 000019	0. 282632	-4. 8	0. 3	0. 7	870	1250	-0. 97
6. 1	239. 0	0. 036164	0. 001090	0. 282588	0. 000018	0. 282584	-6. 5	-1. 4	0. 6	941	1359	-0. 97

续表 3

Continued Table 3

点号	年龄 (Ma)	$\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$	$\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$	$\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$	$2\sigma_m$	$\left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}\right)_t$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM}}$ (Ma)	$t_{\text{DM}}^{\text{C}}$ (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
7.1	239.0	0.063678	0.001648	0.282699	0.000020	0.282692	-2.6	2.4	0.7	797	1115	-0.95
8.1	239.0	0.030075	0.000847	0.282595	0.000020	0.282591	-6.3	-1.1	0.7	926	1341	-0.97
9.1	239.0	0.028834	0.000807	0.282617	0.000020	0.282613	-5.5	-0.4	0.7	894	1292	-0.98
10.1	239.0	0.040290	0.001098	0.282687	0.000019	0.282682	-3.0	2.1	0.7	803	1138	-0.97
11.1	239.0	0.035431	0.000982	0.282588	0.000021	0.282584	-6.5	-1.4	0.7	939	1358	-0.97
12.1	239.0	0.039658	0.001236	0.282604	0.000021	0.282598	-6.0	-0.9	0.7	924	1326	-0.96
13.1	239.0	0.033832	0.000947	0.282598	0.000018	0.282594	-6.2	-1.1	0.6	925	1336	-0.97
14.1	239.0	0.040456	0.001358	0.282658	0.000023	0.282651	-4.0	1.0	0.8	850	1206	-0.96
15.1	239.0	0.037647	0.001074	0.282637	0.000018	0.282632	-4.8	0.3	0.6	873	1250	-0.97
江边 JPD1101-2												
1.1	227.9	0.030691	0.000851	0.282621	0.000021	0.282617	-5.3	-0.5	0.8	890	1290	-0.97
2.1	227.9	0.055809	0.001504	0.282706	0.000018	0.282700	-2.3	2.4	0.6	784	1105	-0.95
3.1	227.9	0.044867	0.001276	0.282595	0.000019	0.282590	-6.3	-1.4	0.7	937	1352	-0.96
4.1	227.9	0.033881	0.001135	0.282544	0.000021	0.282540	-8.0	-3.2	0.7	1005	1465	-0.97
5.1	227.9	0.027004	0.000820	0.282618	0.000018	0.282614	-5.5	-0.6	0.6	894	1298	-0.98
6.1	227.9	0.049219	0.001709	0.282550	0.000025	0.282543	-7.9	-3.1	0.9	1012	1458	-0.95
7.1	227.9	0.052462	0.001714	0.282573	0.000023	0.282566	-7.0	-2.3	0.8	979	1406	-0.95
8.1	227.9	0.034861	0.001038	0.282595	0.000018	0.282591	-6.3	-1.4	0.6	931	1350	-0.97
9.1	227.9	0.043722	0.001329	0.282516	0.000020	0.282511	-9.0	-4.2	0.7	1050	1530	-0.96
10.1	227.9	0.025581	0.000851	0.282570	0.000020	0.282566	-7.2	-2.3	0.7	962	1406	-0.97
11.1	227.9	0.040930	0.001318	0.282545	0.000022	0.282539	-8.0	-3.2	0.8	1009	1466	-0.96
12.1	227.9	0.046800	0.001362	0.282614	0.000020	0.282608	-5.6	-0.8	0.7	912	1311	-0.96
13.1	227.9	0.039401	0.001376	0.282553	0.000026	0.282547	-7.8	-3.0	0.9	1000	1449	-0.96
14.1	227.9	0.039415	0.001069	0.282548	0.000024	0.282544	-7.9	-3.1	0.9	997	1455	-0.97
15.1	227.9	0.026790	0.000749	0.282567	0.000023	0.282564	-7.2	-2.3	0.8	962	1410	-0.98
贝吾 BW-11												
1.1	214.0	0.034014	0.000958	0.282578	0.000015	0.282574	-6.9	-2.3	0.5	953	1396	-0.97
2.1	214.0	0.023662	0.000690	0.282670	0.000016	0.282667	-3.6	1.0	0.6	818	1188	-0.98
3.1	214.0	0.027212	0.000810	0.282592	0.000015	0.282589	-6.4	-1.8	0.5	929	1363	-0.98
4.1	214.0	0.033088	0.000983	0.282604	0.000018	0.282600	-6.0	-1.4	0.6	917	1339	-0.97
5.1	214.0	0.022029	0.000703	0.282628	0.000016	0.282625	-5.1	-0.5	0.6	877	1282	-0.98
6.1	214.0	0.029481	0.000921	0.282578	0.000015	0.282574	-6.9	-2.3	0.5	952	1396	-0.97
7.1	214.0	0.034550	0.001054	0.282662	0.000025	0.282658	-3.9	0.7	0.9	837	1208	-0.97
8.1	214.0	0.024051	0.000772	0.282665	0.000018	0.282662	-3.8	0.8	0.6	826	1198	-0.98
9.1	214.0	0.055196	0.001823	0.282623	0.000027	0.282616	-5.3	-0.8	1.0	910	1302	-0.95
10.1	214.0	0.036574	0.001109	0.282707	0.000016	0.282703	-2.3	2.2	0.6	774	1107	-0.97
11.1	214.0	0.034772	0.001081	0.282585	0.000023	0.282581	-6.6	-2.1	0.8	946	1382	-0.97
12.1	214.0	0.046260	0.001737	0.282574	0.000024	0.282567	-7.0	-2.6	0.9	979	1413	-0.95
13.1	214.0	0.032737	0.001081	0.282623	0.000019	0.282619	-5.3	-0.7	0.7	892	1296	-0.97

$$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10000 \times \left\{ \left[ \left( \frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{S}} - \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1) \right] / \left[ \left( \frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR},0} - \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1) \right] - 1 \right\} \cdot t_{\text{DM}} = 1/\lambda \times \ln \left\{ 1 + \left[ \left( \frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{S}} - \left( \frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} \right] / \left[ \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{S}} - \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} \right] \right\} \cdot t_{\text{DM}}^{\text{C}} = t_{\text{DM}} - (t_{\text{DM}} - t) \times \left[ (f_{\text{CC}} - f_{\text{S}}) / (f_{\text{CC}} - f_{\text{DM}}) \right].$$

$$f_{\text{Lu/Hf}} = \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{S}} / \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} - 1. \text{ 其中: } \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{S}} \text{ 和 } \left( \frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{S}} \text{ 为样品测量值; } \lambda = 1.867 \times 10^{-11} / \text{a (Soderlund et al., 2004)}; \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} = 0.0332, \left( \frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR},0} = 0.282772 \text{ (Blichert-Toft et al., 1997)}; \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} = 0.0384, \left( \frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} = 0.28325 \text{ (Griffin et al., 2002)}; \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{平均地壳}} = 0.015; f_{\text{CC}} = \left[ \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{平均地壳}} / \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} \right] - 1; f_{\text{S}} = f_{\text{Lu/Hf}}; f_{\text{DM}} = \left[ \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} / \left( \frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} \right] - 1; t \text{ 为锆石结晶年龄}$$



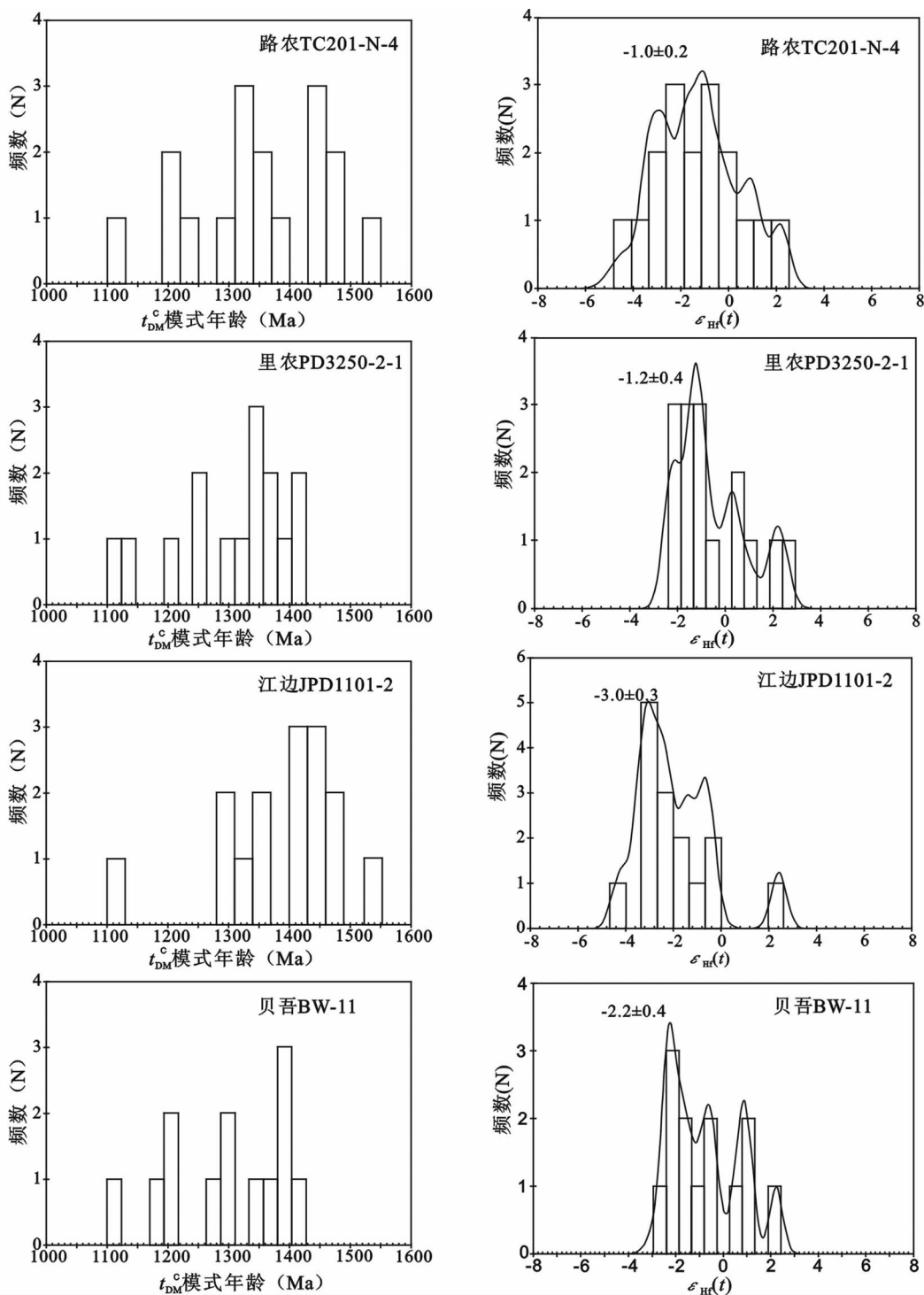


图5 羊拉铜矿花岗闪长岩地壳模式年龄( $t_{DM}^c$ )和  $\epsilon_{Hf}(t)$  直方图

Fig. 5 Histogram of initial Hf isotope ratio and Hf model age for zircons from Yangla granodiorite

非常接近或小于 0.002, 表明这些锆石在形成以后, 仅具有较少的放射成因 Hf 的积累, 因而可以用初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值代表锆石形成时的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值 (吴福元等, 2007)。这 60 粒锆石的  $\epsilon_{Hf}(t)$  值为  $-4.3 \sim +2.42$ , 模式年龄为 1104 ~

1530Ma (表 3)。路农花岗闪长岩 TC201-N-4 中锆石的  $\epsilon_{Hf}(t)$  值在  $-2.4 \sim +2.42$  之间, 其主体为  $-1.0 \pm 0.2$  (图 5), 模式年龄为 1115 ~ 1423Ma。里农花岗闪长岩 PD3250-2-1 中锆石的  $\epsilon_{Hf}(t)$  值在  $-4.3 \sim +2.2$  之间, 其主体为  $-1.2 \pm 0.4$  (图

5), 模式年龄为 1126 ~ 1485Ma。江边花岗闪长岩 JPD1101-2 中锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值在 -0.48 ~ -4.23 之间, 其主体为 -3.0 ± 0.3 (图 5), 模式年龄为 1104 ~ 1530Ma。贝吾花岗闪长岩 BW-11 中锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值在 -2.31 ~ +2.23 之间, 其主体为 -2.2 ± 0.4 (图 5), 模式年龄为 1107 ~ 1406Ma。其中 Hf 同位素变化范围明显高于数据测试过程中所引起的变化范围, 因此, 这些花岗闪长岩样品中锆石具有不均一的 Hf 同位素组成。

## 6 讨论和结论

### 6.1 羊拉铜矿花岗闪长岩岩体侵位时代序列的厘定

羊拉铜矿花岗闪长岩锆石原位 U-Pb 定年获得 4 组年龄分别为 238 ~ 239Ma (里农和路农岩体), 228Ma (江边岩体), 222Ma (里农花岗闪长岩体中辉绿岩墙), 214Ma (贝吾岩体), 这些年龄代表锆石的结晶年龄, 对应路农、里农、江边、辉绿岩墙、贝吾花岗闪长岩岩体的形成年龄。同时显示该岩带由南往北年龄由老到新的侵位序列, 显示羊拉大型铜矿区花岗闪长岩体是三叠世时期的花岗岩岩浆多次涌动侵入形成的, 其中伴随辉绿岩墙的侵入, 岩浆活动持续时间约 15Ma。

### 6.2 成矿时代的制约

现在普遍认为羊拉铜矿是在喷流沉积基础上叠加了岩浆接触交代和后期的构造热液成矿作用的复合成因的铜多金属矿床 (何龙清等, 1998; 路远发等, 1999, 2004; 陈开旭等, 2002; 魏君奇等, 2004; 王安建等, 2009)。如: 路农砂卡岩矿体为喷流-沉积叠加接触交代改造复合特征, 铜矿主矿体具有一定的层位、呈层状或似层状, 存在块状硫化物矿石等, 具有海底喷流沉积矿床的一些特点; 岩体侵入后叠加了围绕岩体产出内外接触带砂卡岩型铜矿, 又具砂卡岩矿床的特征。因此, 初步认为, 海西期的喷流沉积作用可能形成金属的初步富集 (矿源层), 花岗闪长岩岩体带来了富含 Cu、Pb、Zn 等矿化元素的热液, 在近岩体的围岩发生交代、充填作用, 于构造有利地段富集成矿, 形成喷流-沉积叠加了岩浆接触交代的改造矿床。

显然, 羊拉铜矿花岗闪长岩体与铜金属成矿作用关系密切, 由于印支期本区构造-岩浆活化, 使得岩浆侵入, 原始沉积岩受到热接触变质形成大理岩和角岩, 而沉积黄铁矿遭受变质而成磁黄铁矿。后期的热液活动, 形成夕卡岩, 最后是铜矿化的交代充填作用和有关蚀变。可见接触交代以及围岩蚀变在时间和空间上都与花岗闪长岩的侵入作用有关, 而且富矿体主要产在岩体接触带及其附近。

羊拉铜矿里农矿体产于绢云板岩中, 我们对绢云板岩进行的碎屑锆石 U-Pb 年龄分析, 可知其沉积年龄可能为 306 ~ 343Ma (王彦斌未刊资料)。羊拉铜矿花岗闪长岩体和脉岩形成于 239 ~ 214Ma 的年龄限定了羊拉铜矿主成矿作用的年龄时段。岩浆活动持续时间约 15Ma, 与岩浆活动相对应的

是发生了印支期大规模的流体迁移和铜多金属成矿作用, 形成了铜矿床, 联系新获得的羊拉铜矿里农矿段铜矿体中辉钨矿 (Re-Os 等时线) 年龄为 228 ~ 230Ma (曾普胜面告), 与里农和路农岩体 (238 ~ 239Ma) 相比较则年轻, 可能代表成矿成矿存在时差, 岩浆活动时间与成矿的关系还需精细的成矿年龄制约。但总体上羊拉铜矿成矿的最重要时期应该在 239 ~ 214Ma 期间, 该矿区岩浆热液系统持续时间达 15Ma 可能是该大型铜矿床形成的重要原因。

### 6.3 成因指示及构造意义

羊拉铜矿花岗闪长岩由南向北锆石 U-Pb 的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均值年龄依次变年轻, 里农平坝花岗闪长岩锆石年龄 239 ± 6Ma, 路农东矿段岩体锆石年龄 238 ± 5Ma, (金沙) 江边岩体锆石年龄 228 ± 5Ma, 贝吾岩体锆石年龄 215 ± 4Ma, 显示该复式岩体是岩浆多次活动形成的, 且岩浆活动持续时间约 15Ma。该矿花岗闪长岩岩石化学上属钙碱性, 铝不饱和系列, 为 I 型花岗岩。前人认为羊拉铜矿花岗闪长岩为与金沙江缝合带与俯冲有关的岛弧型花岗闪长岩 (魏君奇等, 1997; 陈开旭等, 2002; 王安建等, 2009), 其 Sr 同位素初始比值 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> = 0.7103 ~ 0.7106 (魏君奇等, 1997), 介于原始地幔值 (> 0.705 左右) 和大陆地壳平均值 (< 0.719) 之间, 花岗闪长岩岩体具高的 Rb/Sr (0.38 ~ 0.76) 比值, 表明成岩物质来源于上部陆壳, 显示壳-幔混合的特点。  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -5.0 \sim -5.5$ ,  $t_{\text{DM}} = 1240 \sim 1390\text{Ma}$  (王彦斌未刊资料)。锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -4.3 ~ +2.42, 模式年龄为 1104 ~ 1530Ma, 与全岩 Nd 同位素二阶段模式年龄相当, 显示中元古代是该区地壳生长的主要时期。花岗闪长岩全岩  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  和该岩石中锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  大部分具负值, 揭示其源区可能主要为陆壳物质, 部分锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  为正值, 说明在其形成过程中有一定比例的亏损地幔物质的加入, 源区同位素的不均一, 是壳幔相互作用的结果, 这些变化的 Hf 同位素说明其源区可能为混合岩浆源区, 这是岛弧岩浆的同位素特征 (图 6)。大量研究发现铜矿成矿是壳幔物质交换的结果, 地幔作为 Cu 的来源越来越受重视, 地幔可能是铜矿中 Cu 的重要来源之一 (Mungall, 2002)。中元古代模式年龄说明其源区主要以扬子克拉通下地壳物质为主, 暗示该区中元古代时期曾发生一次重要的地壳增生事件。

羊拉发生了持续较长时间 (持续时间 ~ 15Ma) 的带状岩浆作用, 为与俯冲有关的岛弧型花岗闪长岩与金沙江缝合带地质演化有关 (魏君奇等, 1997; 陈开旭等, 2002; 王安建等, 2009)。金沙江缝合带的研究表明, 金沙江洋盆推测在早泥盆纪时期源于冈瓦纳裂解, 其堆晶辉长岩的年龄 344Ma, 代表早石炭纪海底扩展 (Jian *et al.*, 2009), 羊拉矿区的石炭纪贝吾玄武岩表示该时期的基性火山活动, 晚石炭纪板块-二叠纪洋盆开始俯冲消减, 到三叠纪闭合碰撞, 即金沙江-哀牢山特提斯洋闭合、昌都-思茅地块与扬子地块碰撞 (255 ± 8Ma ~ 227 ± 5Ma) (莫宣学等, 1993; Wang *et al.*, 2000; Hou

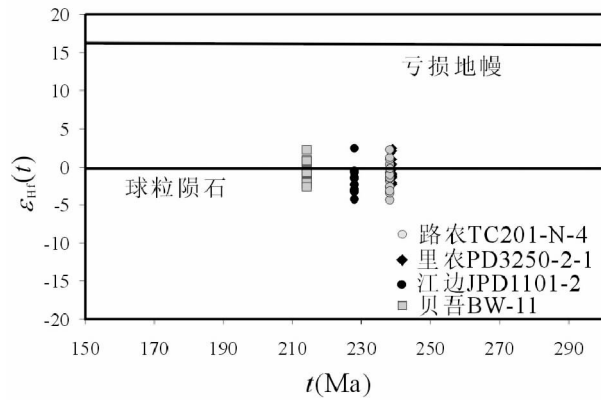


图6 羊拉铜矿花岗闪长岩锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $t$  图解

Fig. 6  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $t$  plot for the zircons of Yangla granodiorite

*et al.*, 2003)。与羊拉铜矿岛弧钙碱性岩浆活动同时期的岩浆活动在相邻区域也有记录,如滇西北白马雪山花岗闪长岩和鲁甸黑云母花岗岩的锆石 U-Pb SHRIMP 年龄分别为  $239 \pm 6\text{Ma}$  和  $214 \pm 6\text{Ma}$ , 临沧北花岗岩锆石 U-Pb 年龄为  $239 \pm 1\text{Ma}$ (简平等, 2003a, b; Henning *et al.*, 2009)。上述区域地质演化是羊拉大型铜矿形成的地质背景。

**致谢** 野外工作期间,得到羊拉铜矿牛春林、邓云清、龙斐、刘月东工程师,东华理工大学的王勇教授,云南地质调查局的余海军、朱俊、董涛的指导和帮助,作者表示诚挚的感谢,孙晓明教授和梁华英研究员对本文提出了建设性修改意见,赵志丹教授的热情帮助,在此表示诚挚感谢。

## References

Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173 - 174

Chen KX, Lu YF, Wei JQ *et al.* 2002. Geological background and polychrome mineralization of Yangla copper deposit, in Deqing, northwestern Yunnan. *Mineral Deposits*, 21 (Supp.): 361 - 364 (in Chinese with English abstract)

Compston W, Williams IS and Meyer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe. *Journal of Geophysical Research*, 89 (Supp.): B325 - B534

Compston W, Williams IS, Kirschvink JL *et al.* 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time scale. *Journal of the Geological Society, London*, 149: 171 - 184

Elhoul S, Belousova E, Griffin WL *et al.* 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, (Supp.): A158

Griffin WL, Wang X, Jackson SE *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China; In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61: 237 - 269

He LQ, Zhan MG and Lu YF. 1998. Division of sequence stratigraphy and study on ore-bearing beds in Yangla copper orefield, western Yunnan. *Geology and Mineral Resources of South China*, 3: 37 - 41 (in Chinese with English abstract)

Henning D, Lehmann B, Frei D *et al.* 2009. Early Permian seafloor to continental arc magmatism in the eastern Paleo-Tethys: U-Pb age and

Nd-Sr isotope data from the southern Lancanjiang zone, Yunnan, China. *Lithos*, 113: 408 - 422

Hou KJ, Li YH, Zou TR *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (10): 2595 - 2604 (in Chinese with English abstract)

Hou KJ, Li YH and Tian YY. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28 (4): 481 - 492 (in Chinese with English abstract)

Hou Z, Wang L, Zaw K *et al.* 2003. Post-collisional crustal extension setting and VHMS mineralization in the Sanjiang orogenic belt, southwest China. *Ore Geology Reviews*, 22: 177 - 199

Jian P, Liu DY and Sun XM. 2003a. SHRIMP dating of Baimaxueshan and Ludian granitoid batholiths, northeastern Yunnan Province, and its geological implications. *Acta Geoscientia Sinica*, 24 (4): 337 - 342 (in Chinese with English abstract)

Jian P, Liu DY and Sun XM. 2003b. SHRIMP dating of Carboniferous Jinshajiang ophiolite in western Yunnan and Sichuan: Geochronological constraints on the evolution of the Paleo-Tethys oceanic crust. *Acta Geologica Sinica*, 77 (2): 217 - 228 (in Chinese with English abstract)

Jian P, Liu DY, Kroner A *et al.* 2009. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys orogen in southwest China (II): Insights from zircon ages of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province. *Lithos*, 113 (3-4): 767 - 784

Liu YS, Hu ZC, Gao S *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257: 34 - 43

Lu YF, Chen KX and Zhan MG. 1999. Geochemical evidence of exhalative-sedimentary ore-bearing skarns in Yangla copper mineralization concentrated area, Deqing County, northwestern Yunnan Province. *Earth Science*, 24 (3): 298 - 303 (in Chinese with English abstract)

Lu YF, Chen KX and Huang HL. 2004. Fluid inclusions of various types of copper deposits in Yangla region, Yunnan Province. *Geological Science and Technology Information*, 23 (2): 13 - 20 (in Chinese with English abstract)

Mo XX, Lu FX, Sheng SY *et al.* 1993. Sanjiang Tethyan Volcanism and Related Mineralization. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 267 (in Chinese with English abstract)

Mungall JE. 2002. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*, 30 (10): 915 - 918

Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U *et al.* 2008. Zircon M257: A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32: 247 - 265

Qu XM, Yang YQ and Li YG. 2004. A discussion on origin of Yangla copper deposit in light of diversity of ore-hosting rock types. *Mineral Deposits*, 23 (4): 431 - 442 (in Chinese with English abstract)

Sláma J, Kosler J, Condon DJ *et al.* 2008. Plesovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249: 1 - 35

Soderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD *et al.* 2004. The  $^{176}\text{Lu}$  decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 219: 311 - 324

Wang AJ, Cao DH, Guan Y *et al.* 2009. Metallogenic belts of south Three Rivers region, southwest China: Distribution, characteristics and discussion. *Acta Geologica Sinica*, 83 (10): 1365 - 1375 (in Chinese with English abstract)

Wang XF, Metcalfe I, Jian P *et al.* 2000. The Jinshajiang-Ailaoshan suture zone, China: Tectonostratigraphy, age and evolution. *Journal of Asia Earth Sciences*, 18 (6): 675 - 690

Wei JQ, Zhan MG, Lu YF *et al.* 1997. Geochemistry of granitoids in Yangla ore district, western Yunnan. *Geology and Mineral Resources of South China*, 4: 50 - 56 (in Chinese with English abstract)

Wei JQ, Chen KX and Wei FY. 2000. Tectonism-magmatism-

mineralization Yangla region, western Yunnan. *Geology and Mineral Resources of South China*, 1: 59 – 62 (in Chinese with English abstract)

- Wei JQ and Chen KX. 2004. Minerogenetic series of copper ore in Yangla region, Yunnan Province. *Geological Science and Technology Information*, 23(2): 21 – 24 (in Chinese with English abstract)
- Williams IS and Claesson S. 1987. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides: II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97: 205 – 217
- Williams IS. 1998. U-Th-Pb Geochronology by ion microprobe. In: McKibben MA, Shanks IIIWC and Ridley WI (eds.). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Reviews in Economic Geology*, 7: 1 – 35
- Wu FY, Yang YH, Xie LW *et al.* 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chem. Geol.*, 234: 105 – 126
- Wu FY, Li XH, Zheng YF *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185 – 220 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 陈开旭, 路远发, 魏君奇等. 2002. 滇西北羊拉铜矿区成矿地质背景及多期成矿作用. *矿床地质*, 21(增刊): 361 – 364
- 何龙清, 战明国, 路远发. 1998. 滇西羊拉铜矿区层序地层划分及赋矿层位研究. *华南地质与矿产*, 3: 37 – 41
- 侯可军, 李延河, 邹天人等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. *岩石学报*, 23(10): 2595 – 2604
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb

- 定年技术. *矿床地质*, 28(4): 481 – 492
- 简平, 刘敦一, 孙晓猛. 2003a. 滇西北白马雪山和鲁甸花岗岩基 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. *地球学报*, 24(4): 337 – 342
- 简平, 刘敦一, 孙晓猛. 2003b. 滇川西部金沙江石炭纪蛇绿岩 SHRIMP 测年: 古特提斯洋壳演化的同位素年代学制约. *地质学报*, 77(2): 217 – 228
- 路远发, 陈开旭, 战明国. 1999. 羊拉地区含矿矽卡岩成因的地球化学证据. *地球科学*, 24(3): 298 – 303
- 路远发, 陈开旭. 2004. 云南羊拉地区不同类型铜矿床流体包裹体研究. *地质科技情报*, 23(2): 13 – 20
- 莫宣学, 路风香, 沈上越等. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿. 北京: 地质出版社, 1 – 267
- 曲晓明, 杨岳清, 李佑国. 2004. 从赋矿岩系岩石类型的多样性论证羊拉铜矿的成因. *矿床地质*, 23(4): 431 – 442
- 王安建, 曹殿华, 管焯等. 2009. 西南三江成矿带中南段金属矿床成矿规律与若干问题探讨. *地质学报*, 83(10): 1365 – 1375
- 魏君奇, 战明国, 路远发等. 1997. 滇西德钦羊拉矿区花岗岩类地球化学. *华南地质与矿产*, 4: 50 – 56
- 魏君奇, 陈开旭, 魏福玉. 2000. 滇西羊拉地区构造-岩浆-成矿作用分析. *华南地质与矿产*, 1: 59 – 62
- 魏君奇, 陈开旭. 2004. 云南羊拉地区铜矿成矿系列. *地质科技情报*, 23(2): 21 – 24
- 吴福元, 李献华, 郑永飞等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 23(2): 185 – 220