

文章编号: 0258-7106(2012)04-0758-17

西藏纳如松多铅锌矿床成矿岩体形成机制： 岩浆锆石证据*

纪现华¹ 杨竹森^{2**} 于玉帅³ 申俊峰¹ 田世洪² 孟祥金² 李振清² 刘英超⁴

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

3 武汉地质矿产研究所, 湖北 武汉 430205; 4 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘 要 纳如松多铅锌矿床位于拉萨地块中部隆格尔-工布江达断隆带中段, 以发育隐爆角砾岩型和矽卡岩型铅锌矿化为特征。西矿段与矽卡岩型铅锌矿化相关的岩体为粗斑和细斑两种石英正长斑岩, 对其锆石进行的 U-Pb 定年、稀土元素、Lu-Hf 同位素和锆石群型特征分析表明, 粗斑石英正长斑岩侵位于 (62.54 ± 0.77) Ma, 细斑石英正长斑岩侵位于 (62.47 ± 0.91) Ma, 锆石稀土元素具有相似的左倾配分模式和 Ce 正异常、Eu 负异常, 在 U/Yb-Y 图解上均落于陆壳锆石范围, 粗斑石英正长斑岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 介于 $0.282577 \sim 0.282803$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化于 $-5.58 \sim +2.21$, 反映岩浆来源于地壳物质的部分熔融, 并有地幔物质的加入。锆石群型特征显示粗斑和细斑石英正长斑岩为地壳地幔混合岩浆成因的花岗岩。上述结果说明纳如松多铅锌矿床的岩浆侵入与成矿作用发生于印度-亚洲大陆碰撞造山的主碰撞期。由于印度陆壳随回转的新特提斯洋壳板片一起向拉萨地块之下陡俯冲, 并产生异常热源, 诱发了地幔物质上涌和上覆地壳部分熔融, 形成的地幔地壳混合成因岩浆经结晶分异演化后上升侵位, 形成矿区内粗斑和细斑两种石英正长斑岩及相关的铅锌矿化。

关键词 地球化学; 锆石 U-Pb 定年; 锆石稀土元素; Hf 同位素; 锆石形态; 石英正长斑岩; 纳如松多铅锌矿床; 西藏

中图分类号: P618.41; P618.42

文献标志码: A

Formation mechanism of magmatic rocks in Narusongduo lead-zinc deposit of Tibet: Evidence from magmatic zircon

Ji XianHua¹, YANG ZhuSen², YU YuShuai³, SHEN JunFeng¹, TIAN ShiHong², MENG XiangJin²,
LI ZhenQing² and LIU YingChao⁴

(1 China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3 Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, Wuhan 430205, Hubei, China; 4 Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract

The Narusongduo Pb-Zn deposit, located in the Longgeer-Gongbujiangda fault-block uplift belt of middle Lhasa Terrane, is characterized by two types of mineralization, namely the cryptoexplosive breccia type in the eastern part and skarn type in the western part. The magmatic rock related to the skarn type mineralization includes two kinds of quartz syenite porphyries with coarse and fine phenocrysts respectively. The results of zircon

* 本文受到国家重点基础研究发展计划(973 项目(2011CB403100))“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAB01A04)和地质调查计划项目(1212010918014)联合资助

第一作者简介 纪现华, 女, 1986 年生, 硕士, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: jixianhua1001@163.com

** 通讯作者 杨竹森, 男, 1964 年生, 博士, 研究员, 从事矿床学和矿床地球化学研究。Email: yangzhusen@vip.sina.com

收稿日期 2012-03-27; 改回日期 2012-05-28。张绮玲编辑。

U-Pb dating by LA-ICP-MS show that the age of quartz syenite porphyry with coarse phenocrysts is (62.54 ± 0.77) Ma, while that with the fine phenocrysts is (62.47 ± 0.91) Ma. The REE patterns of zircon from both porphyries have conspicuous fractionation with low ratios of LREE/HREE and distinct anomalies of negative Eu and positive Ce, with the zircons similar to continental zircons in U/Yb-Y discriminant diagram. The Hf isotopic compositions of zircon from the coarse porphyry display $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios ranging from 0.282577 to 0.282803 and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ranging from -5.58 to $+2.21$, suggesting that the magma was mainly derived from partial melting of the crust, with the mixture of some materials from depleted mantle in different proportions. The features of zircon group indicate that both quartz syenite porphyries are hybrid granites that originated from the crust and the mantle. All the data above suggest that the emplacement and related mineralization of quartz syenite porphyries in the Narusongduo Pb-Zn deposit occurred in the main collisional stage of Indo-Asia continental collision, which resulted from the upwelling of mixed magma derived from partial melting of the asthenospheric mantle and overlying crust due to the tremendous heat and fluid flow released from the asthenosphere during the steep subduction of Indian continental crust with the roll-back of the subducted Neo-Tethyan oceanic slab.

Key words: geochemistry, zircon U-Pb dating, zircon REE, zircon Hf isotope, zircon morphology, quartz-syenite-porphyry, Narusongduo Pb-Zn deposit, Tibet

自印度与亚洲大陆于 65 Ma 碰撞以来,经历了主碰撞期(65~41 Ma)、晚碰撞期(40~26 Ma)和后碰撞期(25~0 Ma)的演化历程(侯增谦等,2006a;2006b;2006c;2006d),形成了以藏南前陆冲断带、冈底斯主碰撞构造-岩浆带和藏北陆内冲断褶皱带为特征的青藏高原碰撞造山带(Yin et al., 1994)。伴随大规模的碰撞造山,发育有大规模的成矿作用,形成了冈底斯巨型成矿带。继著名的冈底斯斑岩铜矿带被识别(侯增谦等,2001)之后,近年来在其北侧又识别出一条东西长约 500 km、南北宽 90 km 的铅锌银矿化带(孟祥金等,2007)。带内已发现亚贵拉、洞中松多、洞中拉、蒙亚啊、勒青拉、纳如松多等一批大型铅锌银矿床,不少学者对其成矿特征、地球化学特征和成矿构造环境进行了研究(孟祥金等,2007;臧文栓等,2007;程文斌等,2010;高一鸣等,2011)。然而,对该成矿带的岩浆活动及成矿作用仍缺乏足够的研究。

纳如松多铅锌矿床作为冈底斯北侧银铅锌成矿带的典型矿床之一,以隐爆角砾岩型铅锌矿化为主,其西侧发育有同期的矽卡岩型铅锌矿化。本文针对与矽卡岩型矿化密切相关的两种石英正长斑岩,进行了锆石形态特征、U-Pb 定年、稀土元素和 Lu-Hf 同位素研究,初步探讨其成岩年龄、岩浆源区特征和岩浆演化过程,以期对该矿床和冈底斯中部 Pb-Zn-Ag 矿化带的深入研究起到一定的促进作用。

1 矿区地质概况

纳如松多铅锌矿床位于西藏日喀则地区谢通门县娘热乡东部,地处拉萨地块中部隆格尔—工布江达断隆带中段(图 1A)。该带以发育石炭纪—二叠纪冈瓦纳北缘海相碎屑岩—碳酸盐岩沉积为特征,东部夹巨厚的火山岩组合,局部发育三叠纪碎屑岩夹火山岩,代表了晚古生代末至三叠纪的弧间裂谷盆地沉积。侏罗纪—白垩纪受班公湖—怒江和雅鲁藏布江新特提斯洋壳向南和向北俯冲的影响,发育火山岩、碎屑岩夹碳酸盐岩沉积和大规模酸性侵入岩。新生代伴随印度—亚洲大陆强烈的碰撞造山,主碰撞期(65~41 Ma)发育大规模林子宗群(E_{1-2})火山岩和中酸性侵入岩,晚碰撞期(40~26 Ma)发育措勤—旁多大规模逆冲-推覆构造系,后碰撞期(25~0 Ma)发育乌郁群碎屑岩和钾质火山岩。

矿区内广泛分布林子宗群典中组(E_1)英安质晶屑凝灰岩、火山角砾岩、凝灰质砂岩、复成分砾岩和少量英安岩、玄武安山岩,西部出露昂杰组(P_1)变质粉砂岩、粉砂质板岩、灰黑色板岩互层夹灰岩,下拉组(P_2)浅灰色厚层状结晶灰岩和生物碎屑结晶灰岩(图 1B)。区内仅见石英正长斑岩,但外围发育有花岗闪长岩、石英二长闪长岩、二长花岗岩和黑云母花岗岩岩体。石英正长斑岩呈岩株和岩枝状产出,早

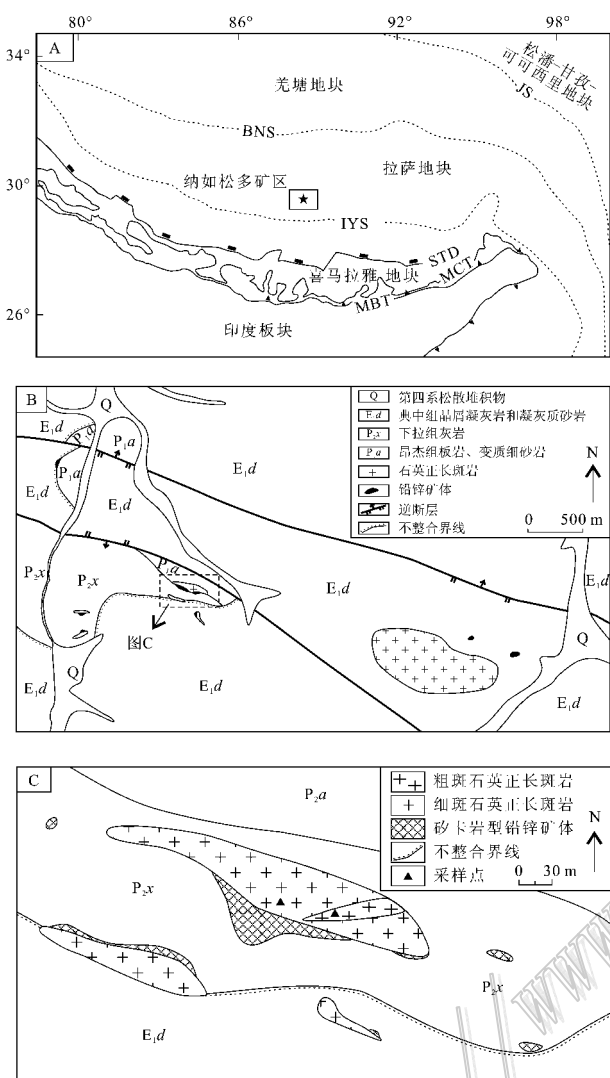


图 1 纳如松多铅锌矿床地质简图

A. 青藏高原碰撞造山带构造格架 (STD—藏南拆离系; MCT—主中央逆冲断裂; MBT—主边界逆冲断裂; JS—金沙江缝合线; BNS—班公湖-怒江缝合带; IYS—雅鲁藏布江缝合带); B. 纳如松多矿区图; C. 纳如松多西矿段Ⅲ号矿区图

Fig. 1 Sketch geological map of the Narusongduo Pb-Zn deposit

A. Tectonic framework of the Tibetan collisional orogenic belt (STD—South Tibetan Detachment System; MCT—Main Central Thrust; MBT—Main Boundary Thrust; JS—Jinsha River suture; BNS—Bangong-Nujiang River Suture; IYS—Yarlung-Zangbo River Suture); B. Geological map of the Narusongduo Pb-Zn deposit; C. Geological map of western Narusongduo Pb-Zn deposit

期为细斑石英正长斑岩,晚期为粗斑石英正长斑岩,两者间界线模糊,呈涌动接触关系,形成时代相近。区内构造线总体呈 NWW 向,以发育逆冲断层为特色,北部逆断层倾向 NNE,倾角 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$,南部逆断

层倾向 SSW,倾角 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。

矿区内铅锌矿化构成东、西 2 个矿段。东矿段形成隐爆角砾岩型铅锌银矿体,产于向南陡倾的隐爆角砾岩筒中,分布于粗斑石英正长斑岩株北东侧的典中组火山岩内(图 1B)。角砾岩筒中角砾呈棱角状,大小混杂,大者直径达 3 m,小者直径 $1 \sim 10$ cm,成分主要为典中组晶屑凝灰岩和凝灰质砂岩,边部发育宽 $1 \sim 3$ cm 的高岭土化、绢云母化和硅化蚀变带,被方铅矿、闪锌矿和少量黄铁矿、黄铜矿、银黝铜矿、石英、方解石和绢云母胶结,构成筒状矿体,外围发育窄的硅化带和大范围的高岭土化带。西矿段形成砂卡岩型铅锌矿体,产于向北陡倾的石英正长斑岩与下拉组灰岩接触带上发育的砂卡岩带中(图 1C)。砂卡岩由阳起石、蔷薇辉石和少量透闪石、硅灰石、石英、方解石组成,方铅矿、闪锌矿和少量黄铜矿、黄铁矿呈浸染状和团块状分布其中,构成不规则透镜状矿体,外围发育宽 $0.5 \sim 2$ m 的弱大理岩化带。

2 样品特征和分析方法

所采样品为纳如松多西矿段的粗斑和细斑两种石英正长斑岩,具体采样位置见图 1C。细斑石英正长斑岩含 $15\% \sim 20\%$ 的石英和正长石斑晶,偶见黑云母斑晶,粒度 $1 \sim 2$ mm,基质为具有隐晶球粒结构的长英质。石英斑晶熔蚀结构常见,并含大量熔融包裹体及矿物包裹体。正长石斑晶常发生泥化和绢云母化,黑云母斑晶发生绿泥石化。粗斑石英正长斑岩含 $20\% \sim 25\%$ 的石英和正长石斑晶,粒度 $5 \sim 10$ mm,个别达 2 cm,基质为具有微晶结构的长英质。石英斑晶熔蚀结构非常发育,熔融包裹体及矿物包裹体稀少,正长石斑晶大部分发生泥化。此外,粗斑石英正长斑岩中局部含有 $10\% \sim 20\%$ 的细晶黄铁矿团斑,呈浸染状分布。

两件粗斑石英正长斑岩(样号为 NRSDⅢ09-1-1 和 NRSD-3)和一件细斑石英正长斑岩(样号为 NRSD-1-1)样品经粉碎后分别挑选出约 1 000 粒锆石单矿物,将挑选出的锆石清洗后制成环氧树脂样品靶,用于锆石透射光、反射光、阴极发光显微照相和 U-Pb 定年、稀土元素、Lu-Hf 同位素分析。样品 NRSDⅢ09-1-1 和 NRSD-1-1 的显微照相与 LA-ICP-MS U-Pb 定年、稀土元素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,所用仪器、工作条件和具体

实验步骤见袁洪林等(2003)和 Yuan 等(2008)文献。采用国际标准锆石 91500 和美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST610(Pearce et al., 1997)分别进行 Th-U-Pb 同位素比值和元素含量校正。所获原始数据通过 GLITTER(ver4.0, Macquarie University)程序计算样品的同位素比值及元素含量,普通铅校正采用 Anderson(2002)提出的方法进行,年龄计算及作图采用 Isoplot(ver3.70)(Ludwig, 2008)。样品 NRSD-3 的显微照相和 SHRIMP U-Pb 定年在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成,具体测试流程和数据分析过程见文献(宋彪等, 2002; 2006),采用国际标准锆石 91500 进行同位素歧视校正,数据处理采用 SQUID1.03d 和 ISOPLOT 程序,年龄和同位素比值用 ^{204}Pb 校正。该样品的 Lu-Hf 同位素测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 Neptune 多接收等离子质谱和 New wave U P213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行,实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,根据锆石大小,剥蚀直径采用 55 μm 或 40 μm ,测定时使用锆石国际标样 GJ1 和 Plesovice 作为参考物质,分析所获标样数据均在误差范围之内。

3 分析结果

3.1 锆石特征

粗斑、细斑两种石英正长斑岩的锆石形态及阴极发光图像如图 2 所示。其中粗斑石英正长斑岩锆

石多具有核-边结构,其 Th/U 比值均大于 0.4,为岩浆复合型锆石(吴元保等, 2004)。整体上单颗粒锆石可分为 4 组:第一组阴极发光强度中等,呈灰白至灰黑色,无分带或弱分带,边部发生溶蚀现象而呈不均匀块状或被蚕食成空洞或骨架状,产于锆石核部,为捕获的古老锆石, Th/U 比值为 1.18;第二组阴极发光强度中等,呈灰白色,具典型的岩浆震荡细环带,因发生溶蚀多为半环带,产于锆石核心部位,或包围第一组锆石共同产于核部;第三组阴极发光强度中等,呈灰白色,具典型岩浆震荡环带,震荡环带明暗程度不均匀,可能是锆石结晶之初 U、Th 含量不均匀所致(Hanchar et al., 1993; 1995; Crofu et al., 2003),包围在前两组锆石环带外侧,外围多发生轻微的溶蚀,再被第四组锆石环带所环绕,其 Th/U 比值为 0.60~0.96;第四组阴极发光较强,呈浅灰白色,典型的岩浆震荡细环带,偶见有暗色细条纹出现,围绕前 3 组锆石生长, Th/U 比值为 0.43~0.87。同样地,细斑石英正长斑岩锆石明显分为 4 组:第一组:阴极发光强度弱,呈灰黑-深灰色,不均匀块状或弱环带状, Th/U 比值为 0.52~1.14,属岩浆成因锆石,该组锆石不具核-边结构,以独立形式产出,其边部发生部分溶蚀;第二组:阴极发光强度中等,而呈灰白色,具典型的岩浆震荡细环带或板状环带,位于锆石核部,其边部发生部分溶蚀现象;第三组:多为浅灰白色,典型岩浆震荡细环带,条带明暗程度较均匀,产于锆石核部或包围第二组锆石,常见其外围发生溶蚀,被第四组生长锆石环绕, Th/U 比

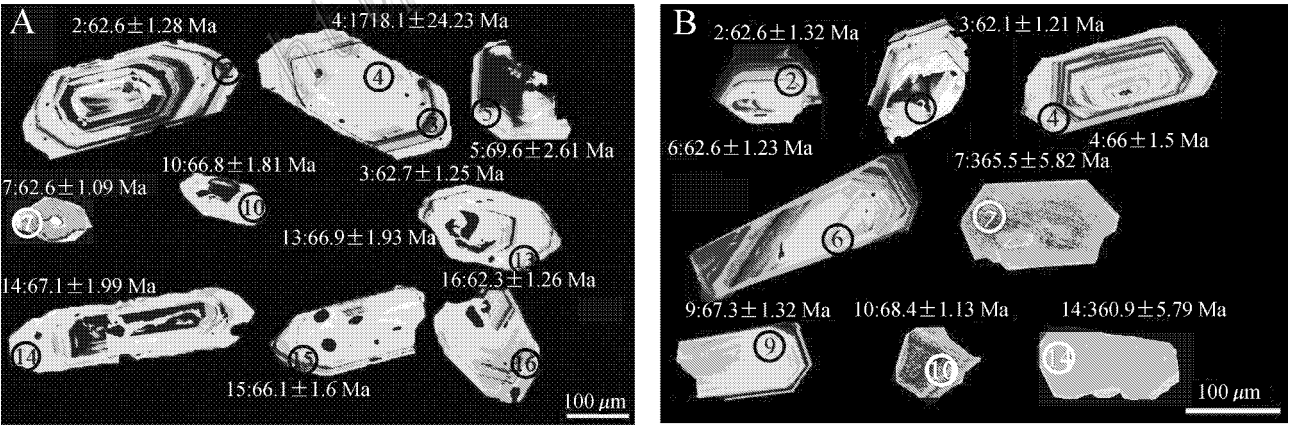


图 2 纳如松多铅锌矿床两种石英正长斑岩锆石阴极发光图像
A. 粗斑石英正长斑岩; B. 细斑石英正长斑岩

Fig. 2 Cathodoluminescence images of zircon grains from quartz-syenite-porphyries with coarse and fine phenocrysts in the Narusongduo Pb-Zn deposit
A. Quartz-syenite-porphyry with coarse phenocrysts; B. Quartz-syenite-porphyry with fine phenocrysts

值为 0.39~2.08;第四组:发光强度弱,多呈深灰色至灰黑色,多环绕在第二、第三组锆石外,典型岩浆震荡细环带, Th/U 比值为 0.42~1.60。细斑石英正长斑岩具核-边结构的各组锆石的 Th/U 比值同样大于等于 0.4,属于岩浆成因锆石(吴元保等, 2004),为岩浆复合型锆石。

粗斑、细斑两种石英正长斑岩中锆石均呈半自形到自形。根据汪相(1998)提出的柱面指数(I_{pr})、锥面指数(I_{py})和延长指数(I_{el})可以很好的描述锆石的晶体形态。柱面指数 $I_{\text{pr}} = W_{(110)}/W_{(100)} + W_{(110)}$, 式中 $W_{(110)}$ 和 $W_{(100)}$ 分别代表(110)柱面、(100)柱面的宽度,当 $I_{\text{pr}}=0$ 时,表示柱体仅由(100)柱面构成;当 $I_{\text{pr}}=1$ 时,表示柱体仅由(110)柱面构成;当 I_{pr} 介于 0~1 时,表示柱体由(110)柱面和(100)柱面共同构成。锥面指数 $I_{\text{py}} = (M_{\text{py}} - L_{\text{py}})/(M_{\text{py}} - N_{\text{py}})$, 式中 M_{py} 为假设锥体只发育(211)面时的高度, N_{py} 为假设锥体只发育(101)面时的高度, L_{py} 为实测锥体的高度,当 $I_{\text{py}}=0$ 时,表示锥体上仅发育(211)锥面;当 $I_{\text{py}}=1$ 时,表示锥体上仅发育(101)锥面;当 I_{py} 介于 0~1 时,表示锥体上发育(211)和(101)两种锥面。延长指数 $I_{\text{el}} = L_{\text{pr}}/(W_{\text{pr}} + L_{\text{pr}})$, 式中 W_{pr} 为柱体宽度, L_{pr} 为柱体长度,当 $I_{\text{el}}=0$ 时,表示锆石为柱面不发育的双锥体;当 $I_{\text{el}}=1$ 时,表示锆石为锥面相对不发育的细针状体;当 I_{el} 为 0~1 时,表示锆石形态介于双锥体与细针状体之间。因粗斑、细斑两种石英正长斑岩分别对应的最后两组锆石的阴极发光图像及形态特征极为相似,不易区分,且两者为同一岩浆演化过程中的不同阶段形成(下文分析讨论得出),因此,本文将两种石英正长斑岩后两组锆石晶体形态分别作为一整体进行统计(图 3)结果显示粗斑石英正长斑岩锆石的柱面指数变化为 0.13~0.48,锥面指数为 0.21~0.98,延长指数为 0.42~0.69;而细斑石英正长斑岩锆石的柱面指数变化为 0.23~0.81,锥面指数为 0.83~0.98,延长指数为 0.38~0.72。

3.2 锆石 U-Pb 年龄

对粗斑石英正长斑岩锆石的 20 个点进行 LA-ICP-MS U-Pb 测年,结果(表 1)显示,除去普通铅含量过高的点(NRSD-09-1-1-10)外,与锆石特征相对应的各组锆石年龄分别为:第一组的锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $(1809.0 \pm 55.7) \text{ Ma}$;第三组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄主要介于 66.6~69.6 Ma 之间,加权平均年龄为 $(66.8 \pm 1.1) \text{ Ma}$ (MSWD=0.20, $n=8$);第四组的

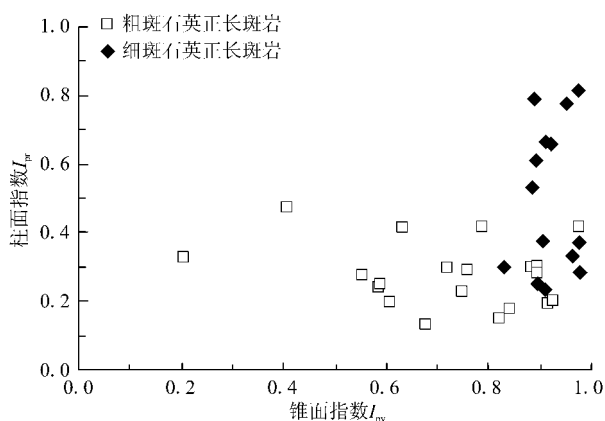


图 3 纳如松多铅锌矿床粗斑和细斑两种石英正长斑岩锆石形态特征图

Fig. 3 Characteristics of zircon morphology from quartz-syenite-porphyrries with coarse phenocrysts and fine phenocrysts in the Narusongduo Pb-Zn deposit

锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 61.9~63.3 Ma 之间,加权平均年龄为 $62.54 \pm 0.77 \text{ Ma}$ (MSWD=0.13, $n=10$)。另外,对该岩体第三、第四组锆石的 14 个点进行了 SHRIMP U-Pb 测年,结果(表 2)显示,除去普通铅含量过高的点(NRSD-3-04)外,所测锆石年龄分别为:第三组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(66.2 \pm 1.8) \text{ Ma}$ 、 $(67.4 \pm 1.7) \text{ Ma}$;第四组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 59.3~63.7 Ma 之间,加权平均年龄为 $(61.7 \pm 1.0) \text{ Ma}$ (MSWD=0.79, $n=11$)。由此可见,两种方法测得的年龄数据一致,且具有同一数量级的精度。并且,两种方法所测有效锆石年龄在 U-Pb 谐和图(图 4A、C)上均落于谐和线上,具有较好的谐和年龄。因此所测年龄可以分别代表各组锆石的结晶年龄。

对细斑石英正长斑岩锆石的 18 个点进行 LA-ICP-MS 测年,所测年龄结果如表 1 所示,除去普通铅含量过高的 3 个点外(NRSD-1-1-04、NRSD-1-1-10、NRSD-1-1-16),与锆石特征相对应的各组锆石年龄为:第一组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 $(365.5 \pm 5.8) \text{ Ma}$ 、 $(373.6 \pm 6.0) \text{ Ma}$ 、 $(360.9 \pm 5.8) \text{ Ma}$ 、 $(71.5 \pm 1.6) \text{ Ma}$;第三组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 66.0~68.4 Ma 之间,加权平均年龄为 $(67.3 \pm 1.3) \text{ Ma}$ (MSWD=0.13, $n=4$);第四组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 62.1~62.7 Ma 之间,加权平均年龄为 $(62.47 \pm 0.91) \text{ Ma}$ (MSWD=0.041, $n=7$)。在 U-Pb 谐和图上(图 4B)所测有效锆石年龄均落于谐和线上,具有很好的谐和性,分别代表了各组锆石的结晶年龄。

表 1 纳如松多铅锌矿西矿段石英正长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating result of quartz-syenite-porphyrates with coarse and fine phenocryst in western Narusongduo Pb-Zn deposit

样品号	$^{238}\text{U}/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ
粗斑石英正长斑岩													
NRSDIII 09-1-1-01	431.92	356.78	0.83	0.05313	0.00292	0.07070	0.00337	0.00965	0.00018	334.3	119.7	69.4	3.2
NRSDIII 09-1-1-02	499.15	428.26	0.86	0.04955	0.00362	0.06666	0.00448	0.00976	0.00020	173.9	162.3	65.5	4.3
NRSDIII 09-1-1-03	518.32	358.27	0.69	0.05118	0.00340	0.06894	0.00414	0.00977	0.00020	248.8	146.1	67.7	3.9
NRSDIII 09-1-1-04	199.27	235.88	1.18	0.11058	0.00345	4.65728	0.08201	0.30541	0.00491	1809.0	55.7	1759.6	14.7
NRSDIII 09-1-1-05	258.15	231.73	0.90	0.04811	0.00939	0.07207	0.01372	0.01086	0.00041	104.8	405.5	70.7	13.0
NRSDIII 09-1-1-06	266.67	231.53	0.87	0.05057	0.00768	0.06852	0.01008	0.00983	0.00032	221.2	317.4	67.3	9.6
NRSDIII 09-1-1-07	3286.18	1451.43	0.44	0.05021	0.00186	0.06717	0.00177	0.00970	0.00016	204.9	83.7	66.0	1.7
NRSDIII 09-1-1-08	438.95	343.95	0.78	0.05022	0.00321	0.07213	0.00415	0.01041	0.00020	205.4	141.6	70.7	3.9
NRSDIII 09-1-1-09	333.26	318.95	0.96	0.04993	0.00378	0.07149	0.00501	0.01038	0.00022	191.9	167.1	70.1	4.7
NRSDIII 09-1-1-10	295.89	257.52	0.87	0.09814	0.00813	0.14091	0.01068	0.01041	0.00028	1589.0	147.3	133.9	9.5
NRSDIII 09-1-1-11	921.79	397.75	0.43	0.05174	0.00233	0.06967	0.00253	0.00977	0.00017	273.9	99.7	68.4	2.4
NRSDIII 09-1-1-12	453.55	375.72	0.83	0.05187	0.00410	0.06936	0.00508	0.00970	0.00021	279.5	171.1	68.1	4.8
NRSDIII 09-1-1-13	267.78	198.19	0.74	0.05156	0.00624	0.07416	0.00860	0.01043	0.00030	266.0	256.1	72.6	8.1
NRSDIII 09-1-1-14	279.16	243.37	0.87	0.04916	0.00677	0.07087	0.00943	0.01046	0.00031	155.4	293.6	69.5	8.9
NRSDIII 09-1-1-15	409.89	282.12	0.69	0.05129	0.00476	0.07291	0.00637	0.01031	0.00025	253.8	200.0	71.5	6.0
NRSDIII 09-1-1-16	285.23	226.09	0.79	0.04848	0.00377	0.06493	0.00471	0.00971	0.00020	122.7	173.8	63.9	4.5
NRSDIII 09-1-1-17	477.62	395.13	0.83	0.05034	0.00270	0.06853	0.00319	0.00987	0.00018	210.8	119.90	67.3	3.03
NRSDIII 09-1-1-18	352.05	280.68	0.80	0.05178	0.00363	0.07436	0.00478	0.01041	0.00021	275.8	153.00	72.8	4.52
NRSDIII 09-1-1-19	985.97	594.91	0.60	0.05217	0.00248	0.07470	0.00296	0.01038	0.00019	292.7	105.26	73.1	2.79
NRSDIII 09-1-1-20	347.26	254.49	0.73	0.05006	0.00399	0.06785	0.00504	0.00983	0.00021	198.0	175.27	66.7	4.79

续表 1
Continued Table 1

样品号	$^{238}\text{U}/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ
细斑石英正长斑岩													
NRSD-1-1-01	1034.33	1822.5	1.76	0.05296	0.00301	0.07130	0.00358	0.00976	0.00019	327.1	123.9	69.9	3.4
NRSD-1-1-02	284.57	226.43	0.80	0.05031	0.00358	0.06760	0.00442	0.00974	0.00021	209.3	156.9	66.4	4.2
NRSD-1-1-03	902.02	1879.81	2.08	0.05197	0.00296	0.06934	0.00348	0.00968	0.00019	284.1	125.2	68.1	3.3
NRSD-1-1-04	863.8	628.06	0.73	0.13709	0.00738	0.19448	0.00880	0.01029	0.00023	2190.7	90.7	180.4	7.5
NRSD-1-1-05	192.87	151.54	0.79	0.05084	0.00465	0.07389	0.00640	0.01054	0.00024	233.7	198.1	72.4	6.1
NRSD-1-1-06	344.36	359.33	1.04	0.05052	0.00313	0.06801	0.00379	0.00976	0.00019	219.0	137.1	66.8	3.6
NRSD-1-1-07	7741.40	8260.08	1.07	0.73556	0.02173	5.91763	0.09552	0.05834	0.00096	4801.8	41.7	1963.8	14.0
NRSD-1-1-08	470.57	253.58	0.54	0.05265	0.00327	0.07556	0.00423	0.01041	0.00021	313.8	135.2	74.0	4.0
NRSD-1-1-09	312.87	294.7	0.94	0.05316	0.00318	0.07696	0.00411	0.01050	0.00021	335.8	129.5	75.3	3.9
NRSD-1-1-10	5130.16	2168.34	0.42	0.10116	0.00312	0.14874	0.00270	0.01066	0.00018	1645.4	56.1	140.8	2.4
NRSD-1-1-11	1535.58	1545.24	1.01	0.72980	0.02173	6.00516	0.09842	0.05967	0.00099	4790.5	42.0	1976.6	14.3
NRSD-1-1-12	2199.41	857.59	0.39	0.04958	0.00179	0.06671	0.00172	0.00976	0.00017	175.3	81.9	65.6	1.6
NRSD-1-1-13	1030.95	431.96	0.42	0.05397	0.00334	0.07274	0.00403	0.00977	0.00020	369.6	133.3	71.3	3.8
NRSD-1-1-14	9853.98	11210.73	1.14	0.75684	0.02254	6.01055	0.09845	0.05759	0.00095	4842.6	41.9	1977.4	14.3
NRSD-1-1-15	570.66	557.55	0.98	0.05548	0.00369	0.07409	0.00446	0.00968	0.00021	431.3	141.9	72.6	4.2
NRSD-1-1-16	390.57	625.04	1.60	0.07113	0.00433	0.10104	0.00545	0.01030	0.00022	961.2	119.68	97.7	5.03
NRSD-1-1-17	177.16	149.03	0.84	0.04828	0.00283	0.07040	0.00366	0.01057	0.00020	113.2	132.59	69.1	3.48
NRSD-1-1-18	1531.29	802.11	0.52	0.12966	0.00688	0.19938	0.00887	0.01115	0.00025	2093.4	90.34	184.6	7.51

表 2 纳如松多铅锌矿西矿段粗斑石英正长斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 及 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 2 Zircon SHRIMP U-Pb data and Lu-Hf isotopic compositions for quartz-syenite-porphyry with coarse phenocrysts in western Narusongduo Pb-Zn deposit

样品号	U/ 10 ⁻⁶	Th/ 10 ⁻⁶	²³² Th/ ²³⁸ U ±1σ	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U ±1σ	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb* ±1σ	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U ±1σ	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U 年龄±1σ/Mε _u	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	T _{DM} /Mε _u	T _{DM} ^C /Mε _u	f _{Lu/Hf}
NRSD-3-01	8451.46	4064.30	0.50	0.04791±1.5	0.0651±2.8	0.00986±2.4	0.00986±2.4	63.2±1.5	0.282696	0.000022	0.003059	0.000015	-2.70	-1.44	834	1227	-0.9079
NRSD-3-02	697.49	453.80	0.67	0.0439±9.3	0.0598±9.6	0.00988±2.5	0.00988±2.5	63.4±1.6	0.282719	0.000027	0.002049	0.000024	-1.88	-0.58	777	1172	-0.9383
NRSD-3-03	334.16	358.85	1.11	0.0427±13	0.0561±13	0.00950±3.1	0.00950±3.1	60.8±1.9	0.282594	0.000027	0.001003	0.000010	-6.29	-4.99	931	1452	-0.9698
NRSD-3-04	8348.01	5720.48	0.71	0.1280±26	0.1680±27	0.00980±4.7	0.00980±4.7	58.7±3.0	0.282803	0.000026	0.004676	0.000070	1.11	2.21	705	990	-0.8592
NRSD-3-05	931.47	747.78	0.83	0.0505±5.0	0.0719±5.7	0.01032±2.7	0.01032±2.7	66.2±1.8	0.282602	0.000022	0.001168	0.000007	-6.03	-4.63	925	1432	-0.9648
NRSD-3-06	703.94	1125.44	1.65	0.0468±6.6	0.0611±7.0	0.00946±2.5	0.00946±2.5	60.6±1.5	0.282602	0.000028	0.001205	0.000020	-6.02	-4.74	926	1436	-0.9637
NRSD-3-07	395.04	450.22	1.18	0.0282±12	0.0369±12	0.00946±2.7	0.00946±2.7	60.5±1.6	0.282665	0.000041	0.002750	0.000010	-3.80	-2.58	873	1298	-0.9172
NRSD-3-08	3943.62	13906.43	3.64	0.0524±6.1	0.0718±6.5	0.00994±2.4	0.00994±2.4	63.7±1.5	0.282796	0.000036	0.005001	0.000120	-0.84	2.03	723	1005	-0.8494
NRSD-3-09	1377.21	707.29	0.53	0.0547±5.8	0.0697±6.3	0.00924±2.5	0.00924±2.5	59.3±1.5	0.282638	0.000028	0.001213	0.000015	-4.76	-3.50	875	1356	-0.9635
NRSD-3-10	5607.43	1869.04	0.34	0.0461±7.5	0.0613±7.9	0.00964±2.5	0.00964±2.5	61.7±1.5	0.282704	0.000019	0.003372	0.000020	-2.40	-1.18	828	1209	-0.8984
NRSD-3-11	1129.15	3209.95	2.94	0.0720±19	0.0960±19	0.00963±3.0	0.00963±3.0	61.6±1.9	0.282750	0.000034	0.001625	0.000031	-0.77	0.51	723	1101	-0.9510
NRSD-3-12	4742.74	1845.48	0.40	0.0478±8.5	0.0642±8.8	0.00972±2.4	0.00972±2.4	62.2±1.5	0.282577	0.000050	0.001051	0.000049	-6.90	-5.58	957	1490	-0.9683
NRSD-3-13	3199.23	2285.26	0.74	0.0630±16	0.0840±16	0.00969±2.7	0.00969±2.7	61.7±1.7	0.282610	0.000028	0.001695	0.000065	-5.74	-4.46	926	1418	-0.9489
NRSD-3-14	754.01	446.74	0.61	0.0500±7.6	0.0726±8.0	0.01052±2.6	0.01052±2.6	67.4±1.7	0.282640	0.000028	0.001079	0.000003	-4.67	-3.24	868	1345	-0.9675
NRSD-3-15								61.7±1.0	0.282634	0.000025	0.001154	0.000008	-4.89	-3.58	879	1362	-0.9652
NRSD-3-16								61.7±1.0	0.282712	0.000026	0.002342	0.000039	-2.11	-0.85	793	1188	-0.9295
NRSD-3-17								61.7±1.0	0.282720	0.000023	0.001707	0.000010	-1.83	-0.55	768	1169	-0.9486
NRSD-3-18								61.7±1.0	0.282751	0.000025	0.003000	0.000029	-0.73	0.50	749	1102	-0.9096
NRSD-3-19								61.7±1.0	0.282719	0.000193	0.004879	0.000022	-1.88	-0.72	842	1179	-0.8530
NRSD-3-20								61.7±1.0	0.282673	0.000031	0.002244	0.000022	-3.51	-2.25	849	1277	-0.9324

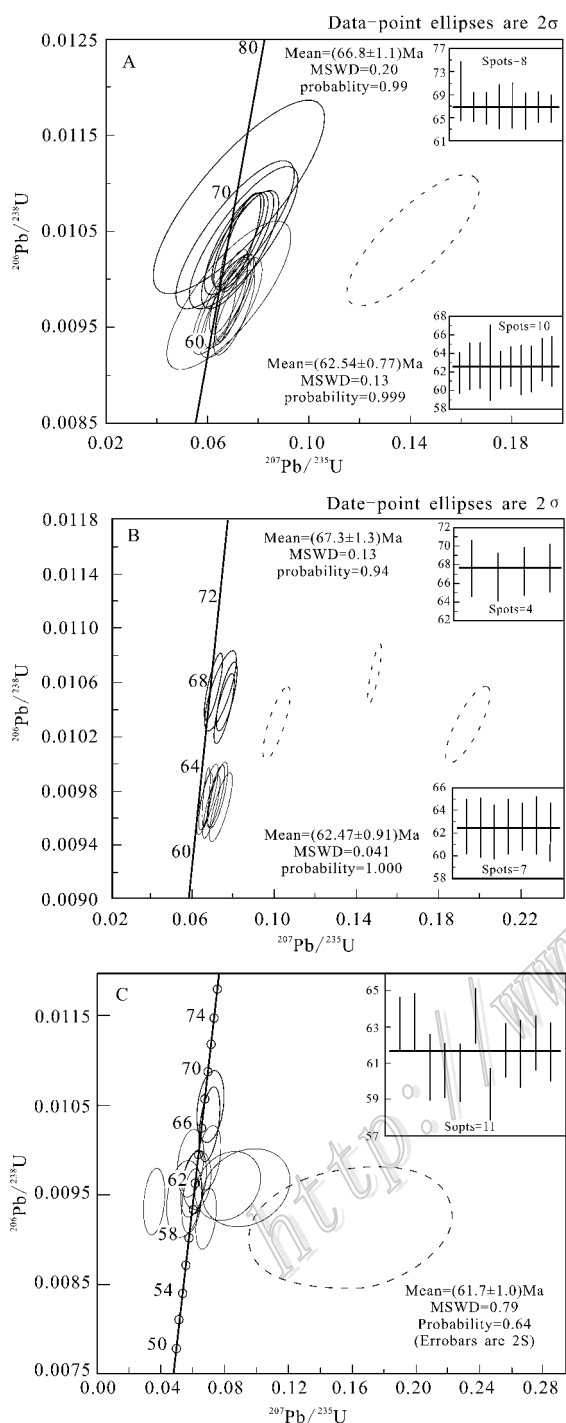


图4 纳如松多铅锌矿床两种石英正长斑岩锆石 U-Pb 年龄谱和图

A. 粗斑石英正长斑岩 (LA-ICP-MS); B. 细斑石英正长斑岩 (LA-ICP-MS); C. 粗斑石英正长斑岩 (SHRIMP)

Fig. 4 U-Pb concordia plots of zircon from quartz-syenite porphyries with coarse phenocrysts and fine phenocrysts in the Narusongduo Pb-Zn deposit

A. Quartz-syenite-porphyry with coarse phenocrysts (analyzed by LA-ICP-MS); B. Quartz-syenite-porphyry with fine phenocrysts (analyzed by LA-ICP-MS); C. Quartz-syenite-porphyry with coarse phenocrysts (analyzed by SHRIMP)

3.3 锆石稀土元素地球化学特征

锆石的稀土元素分析结果(表3、表4、图5)显示粗斑、细斑两种石英正长斑岩锆石均表现为 LREE 亏损、HREE 富集的左倾配分模式和明显的负 Eu 异常和正 Ce 异常的特征。然而粗斑、细斑两种石英正长斑岩各组锆石稀土元素特征又不尽相同。其中粗斑石英正长斑岩各组锆石稀土元素特征表现为第一组: $\sum \text{REE} = 1\,068.26 \times 10^{-6}$ ($\text{Nd}/\text{Yb}_N = 0.009\,22$, $\delta \text{Eu} = 0.29$, $\delta \text{Ce} = 3.72$); 第三组: $\sum \text{REE} = 560.995 \times 10^{-6} \sim 823.15 \times 10^{-6}$ ($\text{Nd}/\text{Yb}_N = 0.000\,75 \sim 0.0129$, $\delta \text{Eu} = 0.13 \sim 0.22$, $\delta \text{Ce} = 1.99 \sim 38.95$); 第四组: $\sum \text{REE} = 519.88 \times 10^{-6} \sim 2\,233.61 \times 10^{-6}$ ($\text{Nd}/\text{Yb}_N = 0.000\,40 \sim 0.012\,50$, $\delta \text{Eu} = 0.07 \sim 0.19$, $\delta \text{Ce} = 2.16 \sim 50.16$)。细斑石英正长斑岩各组锆石稀土元素特征为第一组: $\sum \text{REE} = 1\,742.52 \times 10^{-6} \sim 10\,087.83 \times 10^{-6}$ ($\text{Nd}/\text{Yb}_N = 0.003\,97 \sim 0.011\,38$, $\delta \text{Eu} = 0.05 \sim 0.07$, $\delta \text{Ce} = 1.96 \sim 4.45$); 第三组: $\sum \text{REE} = 708.20 \times 10^{-6} \sim 3\,057.68 \times 10^{-6}$ ($\text{Nd}/\text{Yb}_N = 0.000\,36 \sim 0.004\,74$, $\delta \text{Eu} = 0.02 \sim 0.14$, $\delta \text{Ce} = 4.75 \sim 61.29$); 第四组: $\sum \text{REE} = 719.48 \times 10^{-6} \sim 4\,759.99 \times 10^{-6}$ ($\text{Nd}/\text{Yb}_N = 0.000\,27 \sim 0.005\,52$, $\delta \text{Eu} = 0.02 \sim 0.22$, $\delta \text{Ce} = 6.60 \sim 112.11$)。明显地,粗斑石英正长斑岩第三组锆石(年龄为 $(66.8 \pm 1.1)\text{Ma}$)与细斑石英正长斑岩第三组锆石(年龄为 $(67.3 \pm 1.3)\text{Ma}$)稀土元素配分模式相似(图5A);同时,粗斑石英正长斑岩第四组锆石(年龄为 $(62.54 \pm 0.77)\text{Ma}$)稀土元素与细斑石英正长斑岩第四组锆石(年龄为 $(62.47 \pm 0.91)\text{Ma}$)的稀土元素配分模式相似(图5B)。即:两种斑岩相同年龄段的锆石稀土元素配分模式相似。并且两组不同年龄段的锆石稀土元素配分模式也具有极高的相似性(图5A、5B),仅在稀土元素总量上,较年轻锆石的稀土元素总量相对高于较老锆石的稀土元素总量。

3.4 锆石 Hf 同位素地球化学特征

在粗斑石英正长斑岩单颗粒锆石 SHRIMP 定年的基础上,对相同颗粒及另加的 6 个锆石颗粒进行了原位 Hf 同位素分析。结合锆石阴极发光图像、形态特征及锆石年龄表明,另加的 6 个锆石颗粒显示出与第四组锆石(加权平均年龄为 $(61.7 \pm 1.0)\text{Ma}$)的特征相同,故以 $(61.7 \pm 1.0)\text{Ma}$ 作为其 U-Pb 年龄进行 Hf 同位素分析。与 SHRIMP 测年结果相对应的各组锆石 Hf 同位素特征(表2)表现为:第三组: $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.001168、0.001079, $^{176}\text{Hf}/$

表 3 纳如松多西矿段粗斑和细斑两种石英正长斑岩锆石稀土元素含量
Table 3 Content of REE in zircon grains for the quartz-syenite-porphyries with coarse and fine phenocrysts in western Narusongduo Pb-Zn deposit

样品号	$w(B)/10^{-6}$														Lu
	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	
粗斑石英正长斑岩															
NRSDIII 09-1-1-01	868.81	0.04	23.52	0.06	0.81	2.13	0.39	12.49	5.22	68.81	28.98	143.73	32.25	324.91	66.05
NRSDIII 09-1-1-02	886.93	0.58	23.66	0.19	1.50	2.32	0.28	12.44	5.12	68.10	29.46	146.23	33.29	342.15	68.95
NRSDIII 09-1-1-03	885.05	6.51	34.49	2.41	11.55	4.49	0.37	14.22	5.28	68.56	29.10	144.33	33.27	336.31	69.66
NRSDIII 09-1-1-04	1495.77	0.09	25.01	0.71	10.09	12.98	2.68	47.32	14.51	155.67	54.91	228.90	44.67	398.36	72.36
NRSDIII 09-1-1-05	739.40	0.08	20.57	0.05	0.83	1.81	0.33	10.89	4.33	56.22	24.45	122.37	27.59	285.66	58.02
NRSDIII 09-1-1-06	611.06	1.56	22.32	0.42	2.31	1.83	0.31	9.22	3.60	47.19	20.22	100.58	22.95	237.72	49.65
NRSDIII 09-1-1-07	2966.01	0.42	29.74	0.75	5.40	6.40	0.47	36.17	16.76	231.10	98.22	455.50	109.34	1033.65	209.69
NRSDIII 09-1-1-08	996.77	0.04	15.83	0.05	1.07	1.95	0.31	13.81	5.77	76.48	33.63	167.23	37.96	391.26	77.76
NRSDIII 09-1-1-09	776.01	4.28	30.55	1.12	5.62	3.12	0.53	13.17	4.87	61.57	25.30	126.92	28.72	290.23	59.85
NRSDIII 09-1-1-10	703.19	0.09	20.26	0.05	0.82	1.77	0.31	10.37	4.30	54.07	23.55	116.04	25.95	270.13	55.09
NRSDIII 09-1-1-11	1285.51	<0.01	17.98	0.02	0.55	1.85	0.19	15.05	6.91	95.75	42.38	214.34	49.37	502.40	100.58
NRSDIII 09-1-1-12	948.43	8.33	41.04	2.47	11.22	4.36	0.51	15.18	5.80	73.90	31.09	156.08	35.70	364.44	72.21
NRSDIII 09-1-1-13	711.40	0.04	17.73	0.06	0.61	1.30	0.23	9.32	3.78	52.81	23.52	120.68	27.63	294.30	59.53
NRSDIII 09-1-1-14	670.77	0.06	19.87	0.04	0.71	1.61	0.29	10.07	3.97	53.22	22.17	111.07	25.39	259.54	52.99
NRSDIII 09-1-1-15	890.48	8.09	36.48	2.67	12.05	4.68	0.48	15.29	5.57	69.72	29.16	146.73	32.87	340.09	68.92
NRSDIII 09-1-1-16	637.28	6.59	31.75	1.66	7.08	2.83	0.33	9.99	3.92	49.22	20.88	105.19	23.86	244.81	50.22
NRSDIII 09-1-1-17	848.77	6.31	33.64	1.82	8.69	3.30	0.30	12.68	4.86	64.38	27.67	138.73	31.86	324.88	66.51
NRSDIII 09-1-1-18	751.89	3.83	29.96	0.98	4.66	2.60	0.42	12.00	4.66	59.81	25.04	124.71	28.04	279.98	57.28
NRSDIII 09-1-1-19	1295.24	<0.01	18.51	0.02	0.64	2.10	0.24	15.49	7.08	95.75	41.40	212.11	48.20	483.06	97.44
NRSDIII 09-1-1-20	907.65	1.56	21.59	0.44	2.45	2.13	0.44	12.06	5.22	69.82	29.81	151.28	34.20	351.19	72.06

续表 3
Continued Table 3

样品号	$w(B)/10^{-6}$														
	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
细斑石英正长斑岩															
NRSD-1-1-01	6371.22	0.11	114.88	1.01	14.95	27.56	9.19	131.78	47.28	538.73	212.47	969.11	219.33	2064.22	409.36
NRSD-1-1-02	825.18	0.28	23.84	0.12	0.77	1.39	0.37	9.91	4.60	62.30	27.68	146.12	33.06	340.15	68.88
NRSD-1-1-03	3300.13	9.05	134.11	2.69	16.24	18.04	4.72	78.53	26.63	301.50	113.12	501.68	114.02	1071.38	214.57
NRSD-1-1-04	1417.78	0.98	32.59	0.43	2.91	3.44	0.47	18.90	8.70	115.85	49.10	250.90	54.62	540.29	104.50
NRSD-1-1-05	921.04	0.52	20.34	0.21	1.56	2.09	0.64	13.12	5.47	72.88	31.15	161.99	36.43	371.51	76.79
NRSD-1-1-06	1075.47	0.08	31.01	0.07	1.00	2.52	0.50	15.11	6.41	85.26	36.57	187.89	41.31	414.24	81.25
NRSD-1-1-07	9651.04	6.63	122.06	5.86	33.85	44.65	3.30	172.17	80.33	923.00	342.82	1549.54	346.39	3105.43	548.16
NRSD-1-1-08	1444.75	<0.01	23.68	<0.0062	0.59	2.04	0.32	15.38	7.36	111.48	49.53	254.84	58.76	589.49	117.83
NRSD-1-1-09	806.67	3.32	33.74	0.88	4.14	2.47	0.52	11.84	4.86	64.87	27.30	141.25	31.14	317.73	64.14
NRSD-1-1-10	4121.57	0.38	37.32	0.27	2.79	7.41	0.50	53.78	25.32	349.79	140.50	656.58	147.81	1368.40	266.83
NRSD-1-1-11	2104.12	6.74	49.64	2.94	14.51	10.46	0.92	36.27	15.28	192.41	74.01	362.00	79.46	757.07	140.81
NRSD-1-1-12	2881.96	<0.01	21.62	0.03	0.79	3.00	0.23	28.74	14.94	223.07	97.09	473.87	111.76	1048.79	209.15
NRSD-1-1-13	1498.49	0.02	20.38	0.05	1.07	3.15	0.48	21.25	9.19	127.03	53.05	270.19	59.46	586.95	112.00
NRSD-1-1-14	13351.08	11.34	159.94	13.52	78.84	93.25	6.71	293.03	125.45	1409.39	488.03	2113.87	465.78	4125.48	703.20
NRSD-1-1-15	1703.36	0.96	31.11	0.39	3.52	5.62	0.82	30.30	11.84	153.10	61.02	296.09	62.43	596.53	113.63
NRSD-1-1-16	1056.23	<0.01	47.54	0.09	1.50	3.15	0.82	18.40	7.23	93.66	36.99	181.48	38.84	382.53	74.68
NRSD-1-1-17	1064.99	0.10	20.23	0.06	1.32	2.48	0.70	14.60	6.09	84.39	35.80	189.29	42.46	443.08	92.63
NRSD-1-1-18	1984.02	11.79	59.36	4.70	22.81	8.99	0.58	29.44	12.18	164.30	67.29	332.49	75.04	729.94	141.74

表 4 纳如松多西矿段粗斑和细斑石英正长斑岩锆石 U/Yb 比值及稀土元素分析结果

Table 4 Analytical result of U/Yb and REE in zircon grains for quartz-syenite-porphyrries with coarse and fine phenocrysts in western Narusongduo Pb-Zn deposit

样品号	U/Yb	ΣREE	δEu	δCe	(Nd/Yb) _N	样品号	U/Yb	ΣREE	δEu	δCe	(Nd/Yb) _N
NRSDⅢ 09-1-1-01	1.33	709.40	0.18	39.97	0.00091	NRSD-1-1-01	0.50	4759.99	0.22	33.75	0.00264
NRSDⅢ 09-1-1-02	1.46	734.27	0.13	13.64	0.00160	NRSD-1-1-02	0.84	719.48	0.10	31.92	0.00083
NRSDⅢ 09-1-1-03	1.54	760.55	0.13	2.16	0.01250	NRSD-1-1-03	0.84	2606.28	0.20	6.60	0.00552
NRSDⅢ 09-1-1-04	0.50	1068.26	0.29	3.72	0.00922	NRSD-1-1-04	1.60	1183.69	0.06	12.24	0.00196
NRSDⅢ 09-1-1-05	0.90	613.19	0.18	32.11	0.00105	NRSD-1-1-05	0.52	794.70	0.14	15.11	0.00153
NRSDⅢ 09-1-1-06	1.12	519.88	0.19	6.32	0.00354	NRSD-1-1-06	0.83	903.21	0.09	95.64	0.00088
NRSDⅢ 09-1-1-07	3.18	2233.61	0.07	7.29	0.00190	NRSD-1-1-07	2.49	7284.19	0.05	4.45	0.00397
NRSDⅢ 09-1-1-08	1.12	823.15	0.13	21.08	0.00100	NRSD-1-1-08	0.80	1231.30	0.05	0.00	0.00036
NRSDⅢ 09-1-1-09	1.15	655.85	0.22	3.32	0.00705	NRSD-1-1-09	0.98	708.20	0.12	4.75	0.00474
NRSDⅢ 09-1-1-10	1.10	582.80	0.17	30.88	0.00111	NRSD-1-1-10	3.75	3057.68	0.02	27.59	0.00074
NRSDⅢ 09-1-1-11	1.83	1047.37	0.08	50.16	0.00040	NRSD-1-1-11	2.03	1742.52	0.07	2.73	0.00698
NRSDⅢ 09-1-1-12	1.24	822.33	0.17	2.27	0.01121	NRSD-1-1-12	2.10	2233.07	0.02		0.00027
NRSDⅢ 09-1-1-13	0.91	611.55	0.15	38.95	0.00075	NRSD-1-1-13	1.76	1264.27	0.06	112.11	0.00066
NRSDⅢ 09-1-1-14	1.08	560.99	0.17	37.19	0.00099	NRSD-1-1-14	2.39	10087.83	0.06	2.75	0.00696
NRSDⅢ 09-1-1-15	1.21	772.79	0.16	1.99	0.01290	NRSD-1-1-15	0.96	1367.36	0.08	12.50	0.00215
NRSDⅢ 09-1-1-16	1.17	558.33	0.17	2.41	0.01053	NRSD-1-1-16	1.02	886.92	0.13		0.00143
NRSDⅢ 09-1-1-17	1.47	725.63	0.12	2.43	0.00974	NRSD-1-1-17	0.40	933.23	0.13	61.29	0.00108
NRSDⅢ 09-1-1-18	1.26	633.97	0.19	3.75	0.00606	NRSD-1-1-18	2.10	1660.65	0.05	1.96	0.01138
NRSDⅢ 09-1-1-19	2.04	1022.04	0.09	43.86	0.00049	NRSDⅢ 09-1-1-20	0.99	754.26	0.21	5.96	0.00254

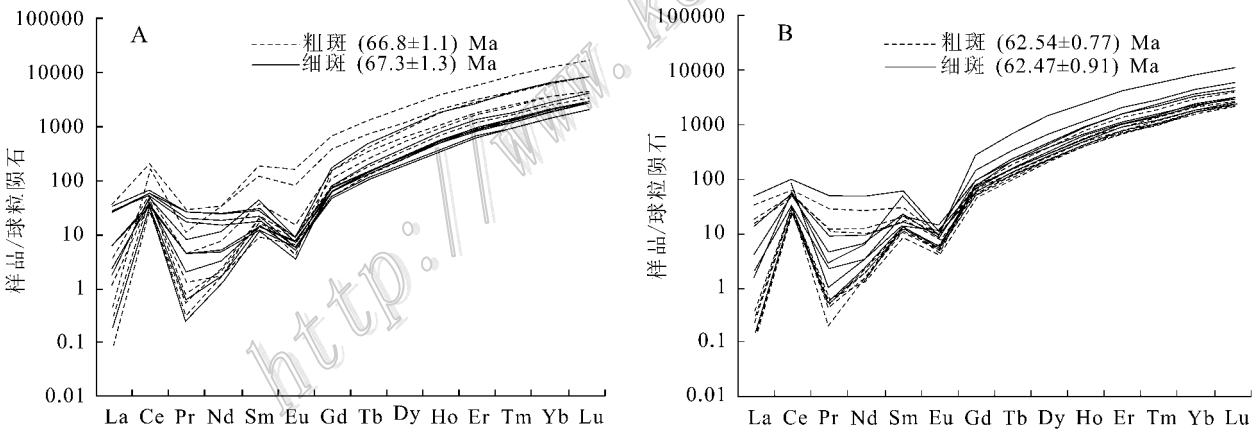


图 5 纳如松多铅锌矿床西矿段两种石英正长斑岩锆石稀土元素球粒陨石标准化配分模式图
(标准化数据引自 Sun et al. ,1989)

A. 粗斑第四组与细斑第四组锆石稀土元素 ;B. 粗斑第三组与细斑第三组锆石稀土元素

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of zircons from quartz syenite porphyries with coarse phenocrysts and fine phenocrysts in western Narusongduo Pb-Zn deposit(normalized REE data after Sun et al. ,1989)

A. REE of young zircon in quartz syenite porphyries ;B. REE in old zircon in quartz syenite porphyries

^{177}Hf 值为 0.282602、0.282640 ,计算所得的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -4.63 、 -3.24 ,单阶段模式年龄 T_{DM} 为 705 Ma、868 Ma ;两阶段模式年龄 T_{DM}^{C} 为 990 Ma、1345 Ma。第四组 : $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 在 0.001 003~0.005 001 之间变化 ,平均值为 0.002 446(略大于 0.002) ,显示

出锆石形成以后有很少量的放射成因 ^{177}Hf 积累 ,分析获得的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值可以近似代表锆石的原始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 在 0.282 577~0.282 803 之间变化。计算所得的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-5.58 \sim -2.21$,除 NRSD-3-4、NRSD-3-8、NRSD-3-11、NRSD-

3-18 四个点值大于 0 之外,其他点值均小于 0。单阶段模式年龄 T_{DM} 在 705~957 Ma 之间;两阶段模式年龄 T_{DM}^C 介于 990~1490 Ma。

4 讨论

4.1 岩石形成年龄

不同类型锆石具有不同的微量元素组成。对锆石不同区域进行系统的内部结构、形态特征、微量元素特征等综合研究,可以使年龄结果更加准确合理(吴元保等,2004;汪清海等,2008)。分析结果表明,粗斑、细斑两种石英正长斑岩各组锆石 Th/U 比值均大于 0.4,为岩浆成因锆石。由图 5A、5B 知粗斑石英正长斑岩和细斑石英正长斑岩中分别对应的后两组锆石 REE 特征相似,暗示粗斑和细斑两种石英正长斑岩具有相同的岩浆源区。两种斑岩锆石内部结构特征与 U-Pb 年龄表现出的一致性表明,两种斑岩可能具有相同的演化过程。因此,笔者将粗斑、细斑两种石英正长斑岩锆石总的划分为 4 期:第 I 期锆石为继承锆石,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $(1\,809.0 \pm 55.7 \text{ Ma})$ 。该期锆石呈浑圆状存于锆石核部,为岩浆源区部分熔融过程中残留的锆石。相关研究发现,羊八井东北侧容尼多古近纪碱玄质白榴石斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄分布于 2 282~2 506 Ma 和 1 795~1 877 Ma 两个区间,分别代表拉萨地块最古老基底原岩形成年龄和区域变质年龄(江万等,2003);在纳木错西岸发现的土那片麻岩(T_{gn})岩浆锆石的 U-Pb 年龄为 1 766 Ma,同样为拉萨地块早前寒武纪岩浆热事件发生时代(吴道珍等,2004)。本文所测数据正好处于该变质年龄范围内,从而证实了该处有古老基底的存在。第 II 期锆石为捕获锆石,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(365.5 \pm 5.8) \text{ Ma}$ 、 $(373.6 \pm 6.0) \text{ Ma}$ 、 $(360.9 \pm 5.8) \text{ Ma}$ 和 $(71.5 \pm 1.6) \text{ Ma}$,均以独立锆石形态产出,为岩浆上升过程中从地壳捕获的锆石。其中,年龄为 $(365.5 \pm 5.8) \text{ Ma}$ 、 $(373.6 \pm 6.0) \text{ Ma}$ 、 $(360.9 \pm 5.8) \text{ Ma}$ 的三颗锆石与董昕等(2010)在拉萨地体南部加查地区发现的花岗岩的年龄相当,为该地区在晚泥盆世存在岩浆活动的直接证据。年龄为 $(71.5 \pm 1.6) \text{ Ma}$ 的锆石相对于第 III、第 IV 期锆石,稀土元素含量较高,且轻重稀土分异不明显,表明与后期锆石为不同岩浆来源,仍为捕获锆石。该年龄的出现反映出该地区存在晚白垩世岩浆活动。第 III 期锆石年龄为 $(66.8 \pm 1.1) \text{ Ma}$

(粗斑)和 $(67.3 \pm 1.3) \text{ Ma}$ (细斑),该期锆石化学成分及结构的稳定性表明其形成于岩浆的热动力稳定期,在稀土元素组成上与第 IV 期锆石具有很好的一致性,并被第 IV 期锆石包围,因此推断为岩浆演化早期或于岩浆房中结晶形成。第 IV 期锆石年龄为 $(62.54 \pm 0.77) \text{ Ma}$ (粗斑)和 $(62.47 \pm 0.91) \text{ Ma}$ (细斑),该期锆石 REE 与第 III 期锆石 REE 分布特征相似,但总量高于第 III 期锆石,说明其为岩浆经结晶分异后上升侵位结晶形成,其 U-Pb 年龄可代表粗斑、细斑两种石英正长斑岩的结晶年龄。

4.2 岩石结晶条件

锆石群型与结晶环境有关(Pupin,1980;廖忠礼等,2006),在过铝或低碱环境中生成的锆石(211)锥面发育良好;反之在过碱或低铝、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值大的环境中生成的锆石(101)锥面发育良好;结晶温度高时柱面(100)发育,结晶温度低时则(110)相对发育。由前节讨论知粗斑、细斑两种石英正长斑岩的第 III 期、第 IV 期锆石为相同来源的岩浆在演化过程中于不同阶段形成的锆石,因此将该两期锆石作为整体来讨论不同斑岩的整个岩浆演化过程中的结晶环境。通过分别对两种石英正长斑岩具有的锆石群型进行统计和计算,结果(图 2)显示,细斑石英正长斑岩锆石中锥面指数分布集中,锥体上主要发育(101)面,表明锆石形成于过碱质或弱铝质环境中;而粗斑石英正长斑岩锆石锥面指数变化范围较大,从过碱质或弱铝质的结晶环境向弱碱或高铝环境过渡,暗示了壳源物质明显增加。对于柱面指数,细斑石英正长斑岩锆石较分散(0.23~0.81),指示出温度形成的不均一性,通过计算(Pupin,1980)得出该石英正长斑岩后两期锆石平均结晶温度为 743°C 。粗斑石英正长斑岩后两期锆石分布范围相对集中(0.13~0.48),其平均结晶温度为 819°C ,高于细斑石英正长斑岩锆石结晶温度。由此可见,粗斑、细斑两种石英正长斑岩壳源物质含量与斑岩体的形成温度呈正相关。即粗斑石英正长斑岩形成温度较高,壳源物质含量高;细斑石英正长斑岩形成温度低,壳源物质含量也低。

此外,锆石的稀土元素特征对其结晶环境也具有一定的指示意义。纳如松多铅锌矿床粗斑和细斑两种石英正长斑岩分别对应的后两期锆石稀土元素均出现 Ce 的正异常,说明锆石在相对氧化条件下结晶形成(梁华英等,2010;韩吟文等,2003),而存在明显的负 Eu 异常暗示了源区有斜长石残留(韩吟文

等 2003)。

4.3 岩浆源区特征

Lu-Hf 同位素体系与锆石 U-Pb 定年相结合,使得其在揭示地壳演化和示踪、判别岩浆源区等方面具有一定的优势,在地质研究中越来越受到重视 (Vervoort et al., 1996; Scherer et al., 2000; 吴福元等 2007)。本文重点对第Ⅳ期锆石的 Hf 同位素特征进行讨论分析。粗斑石英正长斑岩中锆石 Hf 同位素单阶段模式年龄 T_{DM} 远大于 U-Pb 年龄,具有古老的 Hf 同位素模式年龄,且锆石颗粒 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值多数显示为负值,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测知其具有老的继承锆石存在,从而反映了其成岩物质主要来源于成熟地壳物质的部分熔融 (Zhu et al., 2011)。另外出现 4 个锆石颗粒 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为正值,且整体上 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值介于 $-5.58 \sim 2.21$, 变化范围大,说明有地幔物质混入。对应的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 与 U-Pb 图解 (图 6) 上,投点均在球粒陨石演化线附近,而绝大多数投点位于球粒陨石演化线之下,表明岩浆来自于地幔和地壳两个不同源区,但以地壳物质来源为主。Zhu 等 (2011) 通过 Hf 同位素研究表明,拉萨地块中部地区 (南边缘以落巴堆-米拉山断裂带为界,北边缘以狮泉河-纳木错混杂岩带为界) 在 70~60 Ma 之间无新生地壳的形成。本文研究区正好处于拉萨地块中部地区范围内,因此所形成的岩浆中不可能有新生地壳物质的加入。该论点与上述研究观点相一致,即成岩物质主要为地壳、地幔两个端员物质共同作用的结果。

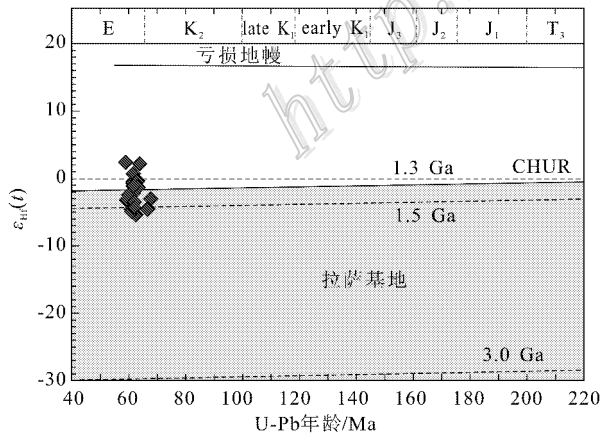


图 6 纳如松多铅锌矿床西矿段粗斑石英正长斑岩的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ vs. U-Pb 年龄图解 (底图据 Zhu et al., 2011)

Fig. 6 Diagram of $\epsilon_{Hf}(t)$ versus U-Pb ages of zircons from quartz syenite porphyry with coarse phenocrysts in the Naru-songduo Pb-Zn deposit (after Zhu et al., 2011)

同样地,锆石类型群作为岩体成因类型研究的工具也越来越受到人们的重视 (范春方等, 2000; 廖忠礼等, 2006)。在 Pupin 总结出的锆石群型成因演化图解 (图 7) 中,通过对两种不同斑岩主岩浆时期形成的两期锆石 (即第Ⅲ、第Ⅳ期锆石) 进行投图,可以看出粗斑石英正长斑岩和细斑石英正长斑岩锆石均落于 4c 区域,为地壳地幔混合岩浆成因花岗岩,反映了形成粗斑和细斑两种石英正长斑岩的岩浆来源于地壳和地幔两个不同的端员。杨勇等 (2010b) 通过对两种石英正长斑岩的 Pb 同位素进行研究,也得出了相似的结论。在 Grimes 等 (2007) 总结出的 U/Yb-Y 图解 (图 8) 中,粗斑、细斑两种石英正长斑岩

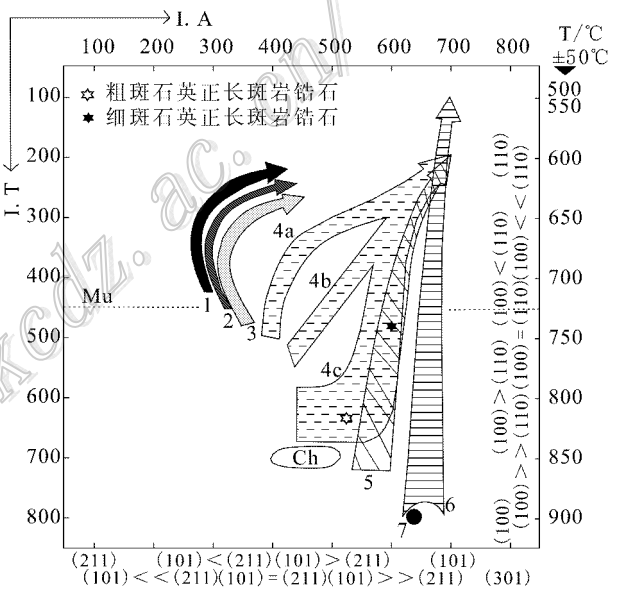


图 7 锆石平均点和不同成因类型锆石的演化趋势 (据 Pupin, 1980)

1—壳源高铝淡色花岗岩; 2—壳源半原地二长花岗岩和花岗闪长岩; 3—壳源异地侵入高铝二长花岗岩和花岗闪长岩; 4a~4c—地壳地幔成因钙碱性花岗岩; 5—地壳地幔成因亚碱性系列花岗岩; 6—地幔成因和主要为地幔的碱性系列花岗岩; 7—地幔成因拉斑玄武岩系列花岗岩; Ch—紫苏花岗岩区; Mu—白云母, Mu 虚线以上为低温区, Mu 虚线以下为高温区。I.T 为温度指数, I.A 为碱度指数

Fig. 7 Distribution of mean point and mean T.E.T. of zircon populations from different origins (after Pupin, 1980)

Granites of crustal or mainly crustal origin: 1—Aluminous leucogranites; 2—(Sub)autochthonous monzogranites and granodiorite; 3—Intrusive aluminous monzogranites and granodiorites. Granites of crustal + mantle origin, hybrid granite: (4a, 4b, 4c) calc-alkaline series granites; 5—Sub-alkaline series granites. Granites of mantle or mainly mantle origin; 6—Alkaline series granites; 7—Tholeiitic series granites. Ch—Magmatic charnockites area; Mu—Limit of muscovite granites

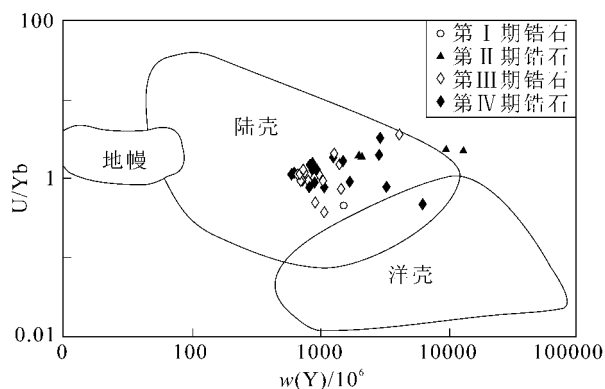


图 8 陆壳-洋壳锆石 U/Yb-Y 微量元素图解
(底图据 Grimes et al., 2007)

Fig. 8 Discriminant diagrams of continental and oceanic crust zircon by U/Yb-Y (after Grimes et al., 2007)

第Ⅲ期、第Ⅳ期锆石均落于陆壳区,显示其主要结晶于陆壳环境。因此,粗斑、细斑两种石英正长斑岩具有壳幔不同岩浆混合的特征,并于陆壳环境中结晶形成。

4.4 岩浆活动的地质背景及成矿意义

青藏高原造山带是中-新生代大陆汇聚-碰撞导致一系列地体不断拼贴增生形成的巨型碰撞造山带 (Maheo et al., 1998; 侯增谦等, 2006e)。印-亚大陆碰撞造山始于 65 Ma (莫宣学等, 2003; 王成善等, 2003; 侯增谦等, 2006a), 先后经历了主碰撞期 (65~41 Ma)、晚碰撞期 (40~26 Ma) 和后碰撞期 (<25 Ma) 过程, 形成了全球最大的和最典型的碰撞造山带 (侯增谦等, 2006a; 2006b; 2006c)。其中在主碰撞期内, 52 Ma 为新特提斯洋板片断离时期 (Zhu et al., 2011; 侯增谦等, 2006d), 因此, 有相关研究 (于玉帅等, 2011) 将主碰撞时期按地球动力学演化分为早、晚两阶段: 早阶段 (65~53 Ma) 印度陆壳在新特提斯洋壳的拖曳下向拉萨地块之下陡深俯冲, 造成印度陆壳沉积物的部分熔融并交代上覆地幔楔, 产生具有弧型地球化学性质的岩浆; 晚阶段 (52~41 Ma), 发生印度陆壳与新特提斯洋板片的断离, 导致印度陆壳的折返和软流圈地幔物质的减压熔融, 引发了上覆地壳的侧向伸展和部分熔融, 形成了地壳地幔混合成因岩浆。

粗斑、细斑两种石英正长斑岩锆石的结晶年龄 67.0 Ma 和 62.5 Ma, 分别对应于印亚大陆碰撞初始阶段的岩浆演化和主碰撞初始阶段冻结岩浆房的再活化。前人研究发现, 在白垩纪末期 (70~67.5 Ma)

印亚大陆会聚速率发生明显的变化, 表现为会聚速率由 110 mm/a 迅速增加到 170 mm/a, 并持续到 60 Ma (Lee et al., 1995), 之后, 会聚速率由 170 mm/a 又明显地降为 110 mm/a 左右 (Lee et al., 1995), 造成该现象产生的原因为印亚大陆初始碰撞时新特提斯洋壳板片发生回转 (Chung et al., 2005; 侯增谦等, 2006d) 及之后的印度陆壳随新特提斯洋壳板片发生向北的陡俯冲 (侯增谦等, 2006d)。本文中粗斑、细斑两种石英正长斑岩锆石的两阶段结晶年龄处于上述两个地质事件之间。由于两种斑岩不具有埃达克岩的特征 (杨勇等, 2010b)。因此, 笔者推断: 在晚白垩世末期, 因俯冲的新特提斯洋壳板片发生回转, 引起软流圈物质向地幔楔上涌, 产生异常热源, 诱发地幔楔和上覆地壳部分熔融, 形成以壳源物质为主的原始岩浆房, 并结晶形成第Ⅲ期 (67 Ma) 锆石。之后, 印度陆壳随回转的新特提斯洋壳板片一起向拉萨地块之下陡俯冲, 进一步诱发地幔流体上涌和上覆地壳部分熔融, 形成壳幔混合成因流体上升活化早期岩浆房, 导致斑岩侵位, 结晶形成第Ⅳ期 (62 Ma) 锆石。

野外地质调查发现细斑石英正长斑岩与昂杰组灰岩接触带上形成矽卡岩型矿床, 说明该斑岩与成矿密切相关, 而岩浆的侵位时间应为矽卡岩型铅锌矿成矿年龄的上限。因此, 纳如松多西矿段的矽卡岩型铅锌矿床的成矿年龄应略小于 (62.54 ± 0.77) Ma。粗斑和细斑石英正长斑岩侵位年龄在误差范围内一致, 几乎同时形成, 并且两者具有同一岩浆源区和相同岩浆演化历史。因此, 粗斑石英正长斑岩与灰岩的接触带上也可能存在着矽卡岩型矿床。

5 结 论

(1) 纳如松多粗斑、细斑两种石英正长斑岩的侵位年龄分别为 (62.54 ± 0.77) Ma、 (62.47 ± 0.91) Ma, 细斑石英正长斑岩与昂杰组灰岩接触带上的矽卡岩铅锌矿床形成于 (62.47 ± 0.91) Ma;

(2) 粗斑和细斑两种石英正长斑岩在相对氧化条件下于陆壳中结晶形成, 具有壳幔混合岩浆成因特征;

(3) 粗斑和细斑两种石英正长斑岩具有同一岩浆源区和相同的演化历史。纳如松多铅锌矿床的岩浆侵入与成矿作用发生于印-亚大陆碰撞造山的主碰撞期。在该时期, 由于印度陆壳随回转的新特提

斯洋壳板片一起向拉萨地块之下陡俯冲,产生异常热源,诱发地幔物质上涌和上覆地壳部分熔融,形成壳幔混合成因岩浆经斜长石的分异结晶后上升侵位,形成矿区内粗斑和细斑两种石英正长斑岩及相关的铅锌矿化。

志 谢 野外工作得到了纳如松多矿区工作人员的大力支持和帮助,锆石 U-Pb 定年、稀土元素及 Hf 同位素分析分别在西北大学大陆动力学国家重点实验室、中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心相关研究人员的大力协助下完成,在此一并表示衷心感谢!

参考文献/References

程文斌,顾雪祥,唐菊兴,王立强,吕鹏瑞,钟康惠,刘晓吉,高一鸣. 2010. 西藏冈底斯-年青唐古拉成矿带典型矿床硫化物 Pb 同位素特征-对成矿元素组合分带性的指示[J]. 岩石学报, 26(11): 3350-3362.

董 昕,张泽明,耿官升,刘 峰,王 伟,于 飞. 2010. 青藏高原拉萨地体南部的泥盆纪花岗岩[J]. 岩石学报, 26(7): 2226-2232.

范春方,陈培荣. 2000. 赣南不同类型花岗岩体的锆石形态群特征及其意义[J]. 地质找矿论丛, 15(4): 299-306.

高一鸣,陈毓川,王成辉,侯可军. 2011. 亚贵拉-沙让-洞中拉矿集区中生代岩浆岩 Hf 同位素特征与岩浆源区示踪[J]. 矿床地质, 30(2): 279-291.

韩吟文,马振东,张宏飞,张本仁,李方林,高山,鲍征宇. 2003. 地球化学[M]. 北京:地质出版社. 189-197.

侯增谦,曲晓明,黄 卫,高永丰. 2001. 冈底斯斑岩铜矿成矿带有望成为西藏第二条“玉龙”铜矿带[J]. 中国地质, 28(10): 27-30.

侯增谦,杨竹森,徐文艺,莫宣学,丁 林,高永丰,董方浏,李光明,曲晓明,李光明,赵志丹,江思宏,孟祥金,李振清,秦克章,杨志明. 2006a. 青藏高原碰撞造山带:I. 主碰撞造山成矿作用[J]. 矿床地质, 25(4): 337-358.

侯增谦,潘桂棠,王安建,莫宣学,田世红,孙晓明,丁 林,王二七,高永丰,谢玉玲,增普胜,秦克章,徐继峰,曲晓明,杨志明,杨竹森,费红彩,孟祥金,李振清. 2006b. 青藏高原碰撞造山带:II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 25(5): 521-533.

侯增谦,曲晓明,杨竹森,孟祥金,李振清,杨志明,郑绵平,郑有业,聂凤军,高永丰,王思宏,李光明. 2006c. 青藏高原碰撞造山带:III. 后碰撞伸展成矿作用[J]. 矿床地质, 25(6): 629-651.

侯增谦,莫宣学,高永丰,杨志明,董国臣,丁 林. 2006d. 印度大陆与亚洲大陆早期碰撞过程与动力学模型:来自西藏冈底斯新生代火成岩证据[J]. 地质学报, 80(9): 1233-1248.

侯增谦,赵志丹,高永丰,杨志明,江 万. 2006e. 印度大陆板片前缘撕裂与分段俯冲:来自冈底斯新生代火山-岩浆作用证据[J]. 岩石学报, 22(4): 761-774.

江 万,胡道功,吴珍汉,叶培盛. 2003. 拉萨地块基底时代及分布讨论[A]. 见:青藏高原及邻区地质与资源环境学术讨论会论文摘要汇编[C]. 青藏高原及邻区地质与资源环境学术讨论会. 四川成都:中国地质学会. 53.

梁华英,魏启荣,许继峰,胡光黔,Charlotte Allen. 2010. 西藏冈底斯矿带南缘矽卡岩型铜矿床含矿岩体锆石 U-Pb 年龄及意义[J]. 岩石学报, 26(6): 1692-1698.

廖忠礼,莫宣学,潘桂棠,朱弟成,王立全,赵志丹. 2006. 西藏过铝花岗岩锆石群型的成因信息[J]. 大地构造与成矿学, 30(1): 63-71.

孟祥金,侯增谦,叶培盛,杨竹森,李振清,高永丰. 2007. 西藏冈底斯银多金属矿化带的基本特征与成矿远景分析[J]. 矿床地质, 26(2): 153-162.

莫宣学,赵志丹,邓晋福,董国臣,周 肃,郭铁鹰,张双全,王亮亮. 2003. 印度-亚洲大陆碰撞过程的火山响应[J]. 地学前缘, 10: 135-148.

宋 彪,张玉海,万渝生,简 平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 48(增刊): 26-30.

宋 彪,张拴宏,王彦斌,赵 越. 2006. 锆石 SHRIMP 年龄测定数据处理时系统偏差的避免-标准锆石分段校正的必要性[J]. 岩矿测试, 25(1): 9-14.

汪 相. 1998. 锆石形态的定量描述及其动力学分析[J]. 中国科学(D辑), 28(3): 232-238.

王成善,李祥辉,胡修棉. 2003. 再论印度-亚洲大陆碰撞的启动时间[J]. 地质学报, 77(1): 16-24.

王清海,许文良,杨德彬,裴福萍. 2008. 锆石中铀温度计在鲁西-苏北地区中生代侵入杂岩中的应用[J]. 岩石学报, 24(10): 2331-2342.

吴道珍,孟宪刚,胡道功,江 万,叶培盛,朱大岗,刘琦胜,杨欣德,邵兆刚,吴中海. 2004. 当雄县幅地质调查新成果及主要进展[J]. 地质通报, 23(5-6): 484-491.

吴福元,李献华,郑永飞,高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185-220.

吴元保,郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1590-1604.

杨 勇,罗泰义,黄智龙,杨竹森,田世洪,钱志宽. 2010a. 西藏纳如松多银铅矿 S、Pb 同位素组成对成矿物质来源的指示[J]. 矿物学报, 30(3): 311-318.

杨 勇,罗泰义,杨竹森,黄智龙,田世洪,钱志宽. 2010b. 冈底斯造山带两套不同成矿体系的含矿斑岩对比研究[J]. 矿床地质, 29(2): 195-206.

于玉帅,杨竹森,多 吉,侯增谦,田世洪,孟祥金,刘鸿飞,张金树,王海平,刘英超. 2011. 西藏加多捕勒铁铜矿成矿岩体时代与成因:锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素与稀土元素证据[J]. 矿床地质, 30(3): 420-434.

袁洪林,吴福元,高山,柳晓明,徐 平,孙德友. 2003. 东北地区新生代侵入岩体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素分析[J]. 科学通报, 48(14): 1512-1520.

臧文栓,孟祥金,杨竹森,叶培胜. 2007. 西藏冈底斯成矿带铅锌银矿床的 S、Pb 同位素组成及其地质意义[J]. 地质通报, 26(10): 1393-1397.

- Anderson T. 2002. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chem. Geol.*, 192: 59-79.
- Chung S L, Chu M F, Zhang Y Q, Xie Y W, Lo C H, Lee T Y, Lan C Y, Li X H, Zhang Q and Wang Y Z. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism [J]. *Earth-Science Reviews*, 68: 173-196.
- Crofu F, Hanchai J M, Hoskin P W O and Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 469-500.
- Grimes C B, John B E, Kelemen P B, Mazdab F K, Wooden J L, Cheddle M J, Hanchai J K and Schwartz J J. 2007. Trace element chemistry of zircon from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance [J]. *Geology*, 35(7): 643-646.
- Hanchai J M, Miller C F. 1993. Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: Implications for interpretation of complex crustal histories [J]. *Chemical Geology*, 110: 1-13.
- Hanchai J M and Rudnick R L. 1995. Revealing hidden structures: The application of cathodoluminescence and back-scatter electrical imaging to dating zircons from lower crustal xenoliths [J]. *Lithos*, 36: 289-303.
- Lee T Y and Lawrence A L. 1995. Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia [J]. *Tectonophysics*, 251: 85-138.
- Ludwig R K. 2008. User's manual for Isoplot 3.70 [M]. Berkeley: Geochronology Center Special Publication. (4): 1-76.
- Maheo G, Guillot S, Blichert-Toft J, Rolland Y and Pecher A. 1998. A slab breakoff model for the Neogene thermal evolution of Southern Karakorum and South Tibet [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 195: 45-58.
- Pearce M J G, Perkins W T, Wesgate J A, Gorton M P, Jackson S E, Neal C R and Chenery S P. 1997. A compilation of new and published major and trace element data for NIST SRM610 and NIST SRM612 glass reference materials [J]. *Geostandards Newsletters*, 21(1): 115-144.
- Pupin J P. 1980. Zircon and petrology [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 73: 207-220.
- Scherer E E, Cameron K L and Blichert-Toft J. 2000. Lu-Hf garnet geochronology: Closure temperature relative to the Sm-Nd system and the effects of trace mineral inclusions [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 3413-3432.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in ocean basins* [C]. London: Geol. Soc. Spec. Publ. 313-345.
- Vervoort J D and Patchett P J. 1996. Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: Constraints from Precambrian crustally derived granites [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 3717-3733.
- Yin A., Harrison T M, Ryerson F J, Chen W J, Kidd W S F and Copeland P. 1994. Tertiary structural evolution of the Gangdese thrust system, southeastern Tibet [J]. *Jour. Geophys. Res.*, 99: 18175-18201.
- Yuan H L, Gao S and Dai M N. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS [J]. *Chemical Geology*, 247: 100-117.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, Mo X X, Chung S L, Hou Z Q, Wang L Q and Wu F Q. 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 301: 241-255.