

编号: 0258-7106 (2011) 02-0292-13

西藏玉龙铜钼矿区斑岩体 Hf 同位素特征 及其地质意义*

王成辉¹, 唐菊兴¹, 侯可军¹, 高一鸣¹, 陈建平², 郝金华², 应立娟¹,
章奇志³, 刘耀文⁴, 凡 韬⁵

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2 中国地质大学, 北京 100083; 3 西藏第六地质大队, 西藏 堆龙德庆 8514003; 4 西藏玉龙铜业股份有限公司, 西藏 昌都 854000; 5 四川省地质矿产勘查开发局 403 地质队, 四川 峨眉 614200)

摘 要 文章对西藏玉龙斑岩铜钼矿含矿斑岩体及外围岩体进行了系统的锆石 Hf 同位素原位分析, 测得玉龙含矿斑岩体的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282\ 681\sim 0.282\ 884$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $1.60\sim 4.86$, 矿区外围北部甘龙拉石英二长斑岩体 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282\ 812\sim 0.282\ 884$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $2.39\sim 4.92$, 矿区外围南部的纳加扎 Y_3 石英二长斑岩体 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282\ 449\sim 0.282\ 894$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $0.81\sim 10.51$, Hf 同位素测试结果与亏损地幔地球化学储库的 Hf 同位素特征较为相似, 表明本区成矿斑岩的源岩或源区可能来自亏损地幔, 结合区域地球物理资料, 认为玉龙斑岩铜钼矿斑岩体是由软流圈上涌及其诱发的强烈底侵作用, 使得本区地壳增厚继而发生部分熔融而形成。

关键词 地球化学 玉龙铜钼矿 斑岩 Hf 同位素 岩石成因

中图分类号: P618.41; P618.65

文献标志码: A

Hf isotopic characteristics of Yulong copper-molybdenum porphyry deposit in Tibet and their geological significance

WANG ChengHui¹, TANG JuXing¹, HOU KeJun¹, GAO YiMing¹, CHEN JianPing², HAO JinHua²,
YING LiJuan¹, ZHANG QiZhi³, LIU YaoWen⁴ and FAN Tao⁵

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 China University of Geoscience, Beijing 100083, China; 3 No. 6 Geological Party, Tibet Bureau of Geological Exploration and Exploitation of Mineral Resources, Doilungdeqen 851400, Tibet, China; 4 Yulong Copper Industry Co. Ltd., Changdu 854000, Tibet, China; 5 No. 403 Geological Party, Sichuan Bureau of Geological Exploration and Exploitation of Mineral Resources, Emei 614200, Sichuan, China)

Abstract

The Yulong ore deposit is a superlarge porphyry copper-molybdenum deposit in the Sanjiang region. Zircon in-situ analysis gives $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios ranging from $0.282\ 681$ to $0.282\ 884$, and the average $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ of $1.60\sim 4.86$ (Yulong rock); $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios ranging from $0.282\ 812$ of $0.282\ 884$, and the average $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of $2.39\sim 4.92$ (Ganlongla rock); $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios ranging from $0.282\ 449$ to $0.282\ 894$, and the average

* 本文为中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(编号 K0923)、国家基础研究计划“印度-亚洲大陆主碰撞带成矿作用”973 项目(编号 2002CB412607)、中国地质大调查项目(编号 1212010633903、1212010634002、1212010535804)和西藏玉龙铜业股份有限公司勘探项目“玉龙铜矿 I、II、V 号矿体地质特征及其外围成矿规律和成矿预测研究”共同资助的成果

第一作者简介 王成辉, 男, 1982 年生, 在读博士生, 矿产普查与勘探专业。Tel: 010-68999064; Email: wangchenghui131@sina.com

收稿日期 2010-09-15; 改回日期 2010-12-29。张绮玲编辑。

$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of 0.81~10.51 (Najiazha Y_3 rock). These data indicate that the source rock or source region of the Yulong porphyry copper-molybdenum belt might have been the depleted upper mantle. Combined with geophysical data, the authors hold that, along with the asthenosphere upwelling, the Yulong porphyry rocks might have been derived from the partial melting of the thickened crust resulting from the underplating.

Key words: geochemistry, Yulong copper-molybdenum deposit, porphyry, Hf isotope, petrogenesis

玉龙斑岩铜(钼)矿带是中国重要的铜矿成矿远景区及铜资源最为丰富的地区之一,也是世界上三大主要斑岩铜矿带之一的特提斯-喜马拉雅成矿带的一个组成部分。综合来看,区域内的成矿作用与区内的岩浆活动和演化密不可分,特别是一系列大致呈南北向分布的花岗质斑岩体。而关于玉龙斑岩成矿带含矿斑岩的成因到目前为止仍然存在较大的争议。如陈文明(1984)认为是来自上地壳砂页岩的“变岩浆”;或再生岩浆。芮宗瑶等(1984)认为是洋壳与陆壳混合而形成的岩浆系列;马鸿文(1990)认为玉龙成矿带含矿斑岩大致相当于由74%~89%的幔源物质和26%~14%的上部壳源物质组成,或是19%~57%的幔源物质和43%~81%的下部壳源物质的混合产物;王增(1991)认为是由幔源衍生而来的中基性岩浆与地壳沉积物质经同熔、混染作用所形成的花岗岩;丁朝建等(1990)认为成矿岩体的母岩浆均源于上地幔局部熔融的产物,物质来源于交代型地幔源区(张玉泉等,1998);姜耀辉等(2006)则认为本区含矿斑岩属于钾玄质岩石,同时具有埃达克岩某些地球化学特征,岩石是由至少100 km深处的二辉橄榄质岩石圈地幔中交代成因的金云母石榴子石单斜辉石岩脉发生低程度部分熔融而形成的。

目前,玉龙斑岩铜钼矿已经进入开采阶段,其外围岩体的找矿工作也已展开。根据最新进展,在矿区外围北部甘龙拉地区已发现矿化迹象,而这是否与玉龙含矿斑岩具有相同的岩石成因也引起了关注。本文选择玉龙斑岩铜钼矿区的含矿斑岩和矿区外围岩体作为研究对象,在进行 SHRIMP U-Pb 同位素年龄测定的基础上,以 LA-ICP-MS 为技术手段对这些岩体的 Hf 同位素进行了测定,结合其他资料,对玉龙斑岩成矿带含矿斑岩的成因进行了初步探讨。

1 区域地质背景

玉龙斑岩铜钼矿带位于特提斯-喜马拉雅构造

域东部三江构造带的中段,向北撒开延至青海境内,在青藏交界处宽达90 km,向南变窄延至云南,在滇藏交界地带宽约20 km,南北延长达400 km,大地构造位置独特。矿带所处的构造单元是夹持在扬子陆块与印度板块之间的羌塘-昌都中间地块,东邻义敦岛弧带,西连怒江结合带(唐仁鲤等,1995)。从震旦纪开始,劳亚超大陆发生裂解,至寒武纪古特提斯洋基本形成,奥陶纪特提斯洋壳开始向北俯冲消减,北部塔里木地块和华北陆块向南增生;古特提斯洋在晚二叠世以后停止扩张,变成死洋的同时,其南侧的冈瓦纳大陆却发生了裂解,这些因大陆裂解而产生的洋盆规模不大,又很快发生俯冲消减而消失,两侧的陆块(板块)发生碰撞,之间形成含蛇绿岩的增生杂岩带(缝合带)和碰撞造山带,如中国境内的羌塘-昌都地块和拉萨地块之间的班公湖-怒江增生杂岩带、拉萨地块和喜马拉雅地块之间的雅鲁藏布江增生杂岩带。玉龙斑岩成矿带即形成于班公湖-怒江增生杂岩带北东侧的羌塘-昌都地块边缘岩浆弧中(马鸿文,1990)。

区域内地层从元古宇到新生界均有出露。元古宇为变质基底,仅局部出现在北部的夏日多;下古生界为低绿片岩相砂泥质复理石夹碳酸盐岩建造的地槽沉积,分布于隆起区;上古生界以浅海相沉积为主,为较稳定的碎屑岩建造、碳酸盐岩建造、海相碎屑岩建造及海陆交互相的含煤碎屑岩、碳酸盐岩建造,出露在隆起区和复背斜核部;中生界以海相为主的海陆交互相沉积广泛分布于带内,并主要分布于玉龙复向斜区,上三叠统为玉龙铜矿床含矿斑岩体的直接围岩。新生界仅在矿带之东部的断陷盆地中堆积,有陆相红色碎屑岩建造(马鸿文,1990;唐仁鲤等,1995;芮宗瑶等,1984)。北西向断裂褶皱系统是成矿带内主要的控岩控矿构造,重要的控矿背斜有夏日多背斜、恒星错-甘龙拉背斜、莽总-马拉松多背斜。玉龙成矿带内断层的构造线方向与昌都地块中的区域构造线方向基本一致,最大的断裂是成矿带东缘的觉拥(温泉)断裂和西缘的妥坝-芒康断裂,由于这2条断裂的活动,派生出一系列次级断层。觉

拥(温泉)断裂是青泥洞-海通隆起和玉龙-徐中中生代盆地的分界构造。

2 矿区地质

矿区及其外围出露的地层除第四系外,还有下奥陶统、泥盆系-石炭系和上三叠统,前两者仅分布于工作区东部边缘,后者广泛出露于整个矿区。上三叠统是玉龙铜矿床的直接围岩,因玉龙含矿斑岩体的侵入,矿区内岩石发生强烈蚀变。上三叠统由甲丕拉组、波里拉组和阿堵拉组组成,波里拉组在矿区大片分布,其余两者出露不多。

甲丕拉组(T_{3j})原岩为紫红色泥质粉砂岩和粉砂质泥岩夹石英砂岩,岩石均已蚀变,近岩体蚀变为灰—深灰色致密石英黑云母角岩,略远离岩体,蚀变主要为呈灰紫—紫灰色坚硬状的青磐岩化角岩,近岩体地带带细脉浸染状铜、钼、钨等矿化,顶部有工业矿体产出。

波里拉组(T_{3b}),可分 3 个岩性段:下段(T_{3b}^1)为灰岩、白云质灰岩夹白云岩透镜体,区内大部分地段已蚀变为大理岩和白云质大理岩;中段(T_{3b}^2)上部为深灰—灰色(偶见褐红色)细粒夹中粒含长石含岩屑钙质石英砂岩与同成分之砂质灰岩呈互层,中部为灰、深灰色中—厚层状含泥质灰岩和生物碎屑灰岩,夹钙质砂岩和泥页岩条带,岩石具大理岩化、硅化、砂卡岩化蚀变现象,下部为灰色夹紫灰色石英砂岩、钙质砂岩与页岩互层,近岩体处和西部已蚀变为砂卡岩;上段(T_{3b}^3)为深灰、浅灰色中厚层至中层状灰岩,含燧石团块、条带及生物碎屑,已蚀变成大理岩,局部是石榴子石、绿帘石砂卡岩,具铜、铁、铋等矿化现象,厚 105 m。

阿堵拉组(T_{3a})为灰色斑点状板岩、页岩,新生矿物为呈斑点状之堇青石,沿裂隙具绿泥石脉和碳酸盐岩脉充填,沿破碎带具角岩和砂卡岩化^①。

玉龙矿区及其外围,所出露的岩浆岩为成群分布的中酸性浅成、超浅成小型斑岩类,主要有玉龙含矿斑岩体、甘龙拉岩体和纳加扎 Y_1 至 Y_{10} 岩体等(图 1)。岩性以二长花岗斑岩、石英二长斑岩和花岗闪长斑岩为主,属花岗岩类中的二长花岗岩亚类。此外,还发现 40 余个更小的岩体,一般均呈脉状、透镜状产出,出露宽度多数在 0.5~5 m 间,长数米到数

十米,少数达百余米,岩性为石英钠长斑岩、石英二长斑岩、花岗闪长斑岩和长英岩。它们是同源异相之产物,含矿斑岩体形成较早,其侵入演化顺序为:二长花岗斑岩→花岗斑岩→石英二长斑岩→钠长斑岩→长英岩。

区域上的恒星错—甘龙拉背斜的南端延入矿区。该背斜是由温泉断裂顺时针走向滑动复合近南北向挤压应力所形成的,背斜轴向 NNW,延长约 30 km,在甘龙拉山脊开始向南倾伏;至玉龙南山顶倾伏端的阿堵拉组(T_{3a})粉砂质泥岩,产状为 $150^\circ \angle 32^\circ$,表明背斜已倾伏,从而从甘龙拉到玉龙南山顶形成了一个总体向北开口的鼻状圈闭构造(唐菊兴等,2006)。背斜轴线靠近玉龙含矿斑岩体东侧, SSE 端的倾伏角为 $8 \sim 10^\circ$,两翼倾角 $10 \sim 30^\circ$,西翼比东翼平缓,轴部和翼部还发育有次级挠曲。背斜由上、下三叠统组成,在区域上核部为下三叠统马拉松多组(T_{1m}),在矿区内核部为上三叠统甲丕拉组(T_{3j}),两翼为上三叠统的波里拉组(T_{3b})和阿堵拉组(T_{3a})。玉龙斑岩体恰位于该背斜的倾伏端,因此,岩浆结晶分异出的含矿流体为斑岩铜矿周边的似层状铜矿体的形成提供了丰富的物质来源^②。另一方面在背斜形成时,由于甲丕拉组砂岩和波里拉组灰岩的岩性及物性差异,在两地层的接触部位发生层间滑动,形成层间破碎带。层间破碎带的形成为矿液的运移和储集创造了良好的空间,Ⅱ号、Ⅴ号似层状矿体就赋存于背斜南东翼的层间破碎带中,呈层状展布。

3 岩体地质

3.1 玉龙二长花岗斑岩体

玉龙斑岩体侵位于甘龙拉背斜的南端倾伏端,含矿斑岩为二长花岗斑岩,岩体呈复式岩株状浅成—超浅成侵位于恒星错—甘龙拉背斜轴部的上三叠统地层中(图 2)。出露地貌为一向东开口的藤椅形,最高点在南端和西端,相对高差 240 m。岩体空间形态呈“蘑菇”状,在地表展布形态为“梨形”,其长轴为近南北向,已控制长约 1.6 km,短轴为近东西向,宽约 0.9 km,面积约 0.85 km^2 ;从剖面上可以看出,斑岩体东侧与围岩接触界线产状总体较陡,在西侧 4 500 m 标高以上,与围岩接触界线产状总体较缓,向岩体

① 西藏玉龙铜业股份有限公司. 2007. 西藏自治区江达县玉龙铜矿勘探 2007 年年度报告. 西藏昌都. 内部报告. 30-54.

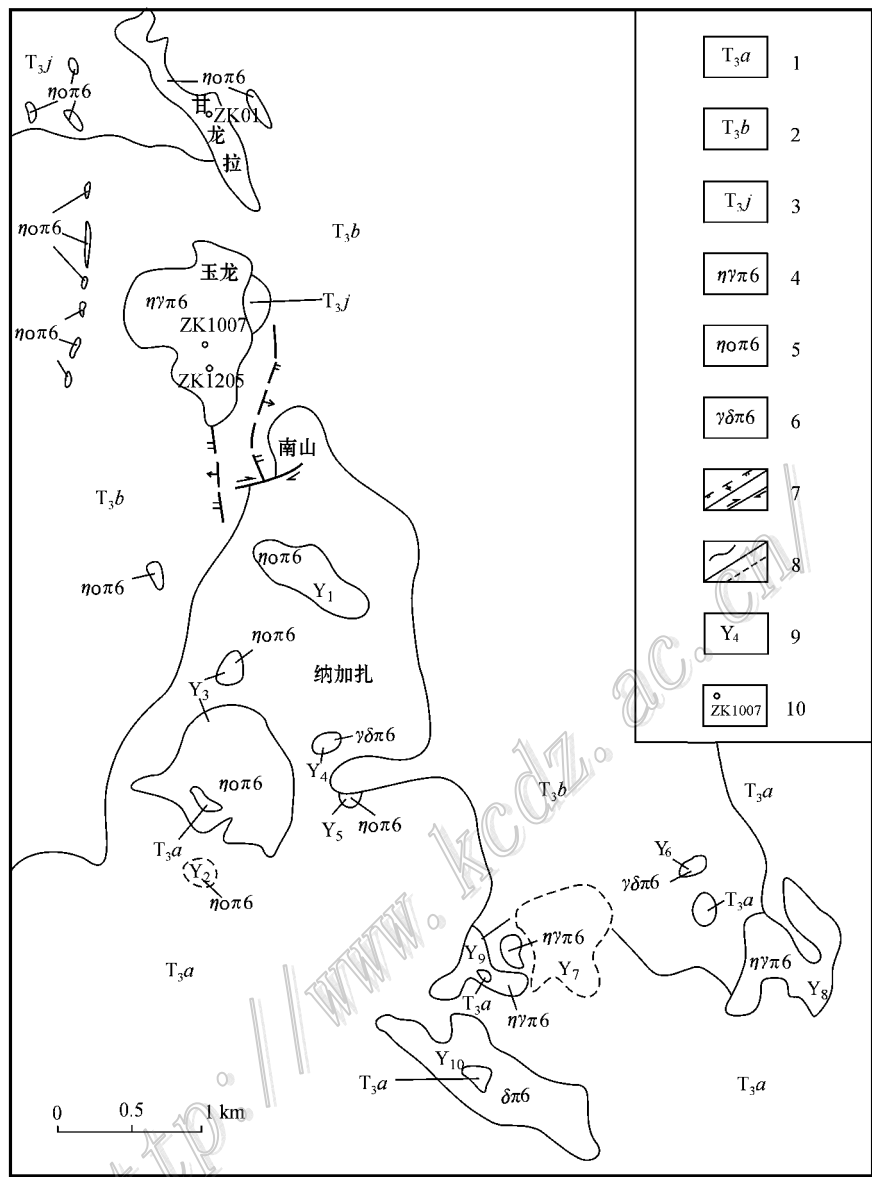


图 1 玉龙铜钼矿及其外围地质略图^①

1—上三叠统阿堵拉组粉砂岩、泥岩；2—上三叠统波里拉组灰岩、大理岩；3—上三叠统甲丕拉组碎屑岩；4—二长花岗斑岩；5—石英二长斑岩；6—花岗闪长斑岩；7—推测张性与实测扭性断裂；8—实测及推测地质界线；9—岩体名称；10—钻孔及编号

Fig. 1 Sketch map of the Yulong copper-molybdenum porphyry deposit

1—Siltstone and mudstone of Upper Triassic Adula Formation；2—Limestone and marble of Upper Triassic Bolila Formation；3—Clastic rock of Upper Triassic Jiapila Formation；4—Monzonitic granite-porphry；5—Quartz monzonite porphyry；6—Granodiorite porphyry；7—Measured and inferred faults；8—Measured and inferred geological boundary；9—Rock body name；10—Borehole and its serial number

内倾斜,倾角 30~60°,且覆盖于上三叠统甲丕拉组和波里拉组地层之上,形成“蘑菇”的“盖”,至 4 500 m 标高岩体与围岩界线向岩体方向收缩,在 10 勘探线收缩距离最大,达 400 m 左右,至 4 500 m 标高以下斑岩与围岩接触界线产状变陡,总体呈筒状。岩

石呈带肉红色的浅灰色,少数因黏土化呈灰白色。常见块状构造、网脉状构造,有时见“碎斑”状构造,偶见条带状构造和角砾状构造。岩体具斑状结构,边缘见似斑状和不等粒结构,基质显微花岗结构、显微嵌晶结构等。岩石中主要造岩矿物为斜长石、钾

① 西藏玉龙铜业股份有限公司. 2007. 西藏自治区江达县玉龙铜矿勘探 2007 年年度报告. 西藏昌都. 内部报告. 30-54.

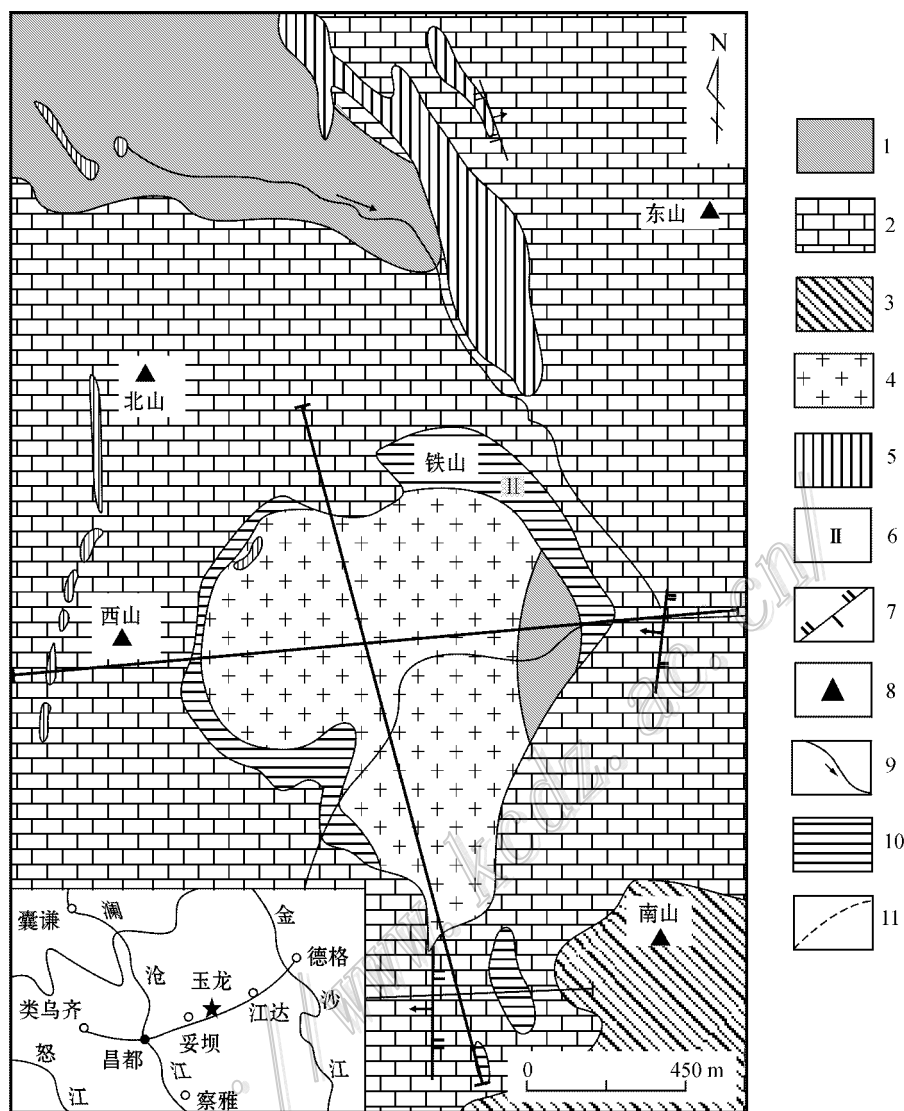


图2 玉龙斑岩铜矿矿区地质图(据唐菊兴等,2006 修改)

1—上三叠统甲丕拉组碎屑岩;2—上三叠统波里拉组灰岩、大理岩;3—上三叠统阿堵拉组粉砂岩、泥岩;4—二长花岗斑岩;5—石英二长斑岩;6—矿体编号;7—逆断层;8—山峰;9—溪沟及流向;10—铁帽;11—推测地质界线

Fig. 2 Generalized geological map of the Yulong porphyry copper ore district (modified after Tang et al., 2006)

1—Clastic rock of Upper Triassic Jiapila Formation; 2—Limestone and marble of Upper Triassic Bolila Formation; 3—Siltstone and mudstone of Upper Triassic Adula Formation; 4—Monzonitic granite-porphyry; 5—Quartz monzonite porphyry; 6—Serial number of ore body; 7—Reversed fault; 8—Peak; 9—Stream and its flow direction; 10—Limonite gossan; 11—Inferred geological boundary

长石、石英、暗色矿物(黑云母、角闪石)以及其他副矿物,为蚀变黑云母角闪二长花岗斑岩,局部为石英二长斑岩。斑晶主要为斜长石(更中长石),次为钾长石(主要为正长石)、石英、黑云母(属镁质黑云母)和普通角闪石,含量一般占全岩总量的40%~60%,粒度可分为大斑晶(5~30 mm)和小斑晶(0.3~5.0 mm)2种,基质主要由钾长石和石英组成,两者之比约为3:2,次为斜长石(西侧),偶见黑云母和角闪石,粒径0.02~0.1 mm。钾长石呈他形粒状,粒度一般

在0.05 mm左右,无双晶,不含钠长石条纹,少数为半自形粒状,显卡斯巴双晶。石英,一般为他形粒状,粒径小于0.1 mm,同钾长石、斜长石组成显微花岗结构,与钾长石组成显微文象结构和粒晶结构。斜长石主要为更钠长石,粒径一般不足0.1 mm,无熔蚀现象,常发育聚片双晶,并常见绢云母化。副矿物主要为磁铁矿(基本上属纯磁铁矿)、榍石、磷灰石(属含少量氯和羟基的氟磷灰石)和锆石,其次有金绿宝石,偶见褐帘石。副矿物含量在岩体边部比中

心高,而在蚀变强烈地段,含量却大为减少,榍石变为白钛石、次生金红石。

3.2 甘龙拉石英二长斑岩体

甘龙拉地区位于玉龙铜钼矿区外围的北部。区内主要出露地层为上三叠统甲丕拉组(T_{3j}) (图2)、波里拉组(T_{3b}),次为矿区东部小面积出露的上三叠系阿堵拉组(T_{3a})。

区内主要出露岩体为石英二长斑岩,以岩脉形式呈浅成-超浅成侵入位于恒星错-甘龙拉背斜轴部的上三叠统中。甘龙拉地区南部的石英二长斑岩呈北西向展布的长条状,向南延入玉龙铜钼矿区,长轴长约1550 m,短轴长约250 m,出露面积0.12 km²。矿区北部石英二长斑岩呈北东-南西向展布,长约500 m,宽约65 m,出露面积约0.03 km²。在甘龙拉地区北西部亦有少量分布,呈近椭圆状,出露面积较小。石英二长花岗斑岩浅黄色至灰白色,斑状结构,块状构造。斑晶为斜长石、钾长石及石英。斜长石呈浅黄色至灰白色,约占斑晶含量的60%,粒径0.1~0.3 cm,多以椭圆形、圆形及长方形产出,分布较均匀。钾长石新鲜面呈肉红色,风化后呈浅灰白色,约占斑晶含量的15%,粒径多为0.1~0.2 cm,不规则分布于斜长石斑晶之间。石英呈他形粒状集合体,约占斑晶含量的25%,多呈0.2~0.6 cm大小的椭圆形不均匀分布于岩石中。基质主要为斜长石、钾长石及少量石英,呈细晶结构,约占基质含量的95%。斑岩中见少量后期石英沿岩石节理裂隙呈细小网脉状产出,分布无规律。矿石矿物主要为褐铁矿及少量黄铁矿、赤铁矿。褐铁矿呈褐黄色,主要为黄铁矿分解而成,沿节理裂隙面不均匀分布。黄铁矿呈浅铜黄色,他形粒状,沿节理裂隙呈薄膜状或脉状产出。赤铁矿呈褐红色,在岩石中呈团块状集合体不均匀分布。

区内中部有少量石英钠长斑岩分布,呈岩株状产出。

目前在甘龙拉岩体已经发现一些矿化,在ZK01矿体穿越厚度共计88.25 m, Cu 平均品位为0.40%,最高为1.16%,最低为0.21%。其余地段如H53~H57、H60~H66为矿化体, Cu 平均品位分别为0.28%、0.29%,钼矿化较差,最高品位为0.021%,预示了甘龙拉地区有一定的铜资源潜力。

3.3 纳加扎岩体

在玉龙铜钼矿区外围所出露的岩浆岩为成群分

布的中酸性浅成-超浅成小型斑状侵入岩类,在矿床南部纳加扎地区主要分布有 Y_1 至 Y_{10} 岩体等(图1),岩性以黑云母二长花岗斑岩、石英二长斑岩和花岗闪长斑岩为主,本文称之为纳加扎岩体。

其中的二长花岗斑岩,与玉龙含矿斑岩在岩性特征上十分相似。岩石呈带肉红色的浅灰色,常见块状构造、网脉状构造,斑状结构。岩石中主要造岩矿物为斜长石、钾长石、石英、暗色矿物(黑云母、角闪石)以及其他副矿物,局部为石英二长斑岩。斑晶主要为斜长石(更中长石),次为钾长石(主要为正长石)、石英、黑云母(属镁质黑云母)和普通角闪石,含量一般占全岩总量的40%~60%,基质主要由钾长石和石英组成,钾长石呈他形粒状,粒度一般在0.05 mm左右,无双晶,不含钠长石条纹,少数为半自形粒状,显卡斯巴双晶。石英,一般为他形粒状,粒径小于0.1 mm,同钾长石、斜长石组成显微花岗结构,与钾长石组成显微文象结构和粒晶结构。

在这些岩体当中,尤以 Y_1 、 Y_3 规模较大,且从斑岩体的划分单元来讲, Y_1 、 Y_3 岩体与玉龙斑岩体、夏日多斑岩体同属夏日多侵入岩单元。同时,据区调资料^①, Y_1 、 Y_3 岩体包含在玉龙地区铜钼异常范围内,是目前矿区外围找矿的靶区之一。

4 样品采集及测试结果

本次工作在玉龙铜钼矿含矿岩体、外围北部甘龙拉岩体及南部纳加扎地区 Y_3 岩体进行了系统的采样。在矿区,采集了ZK1205钻孔深268 m处的二长花岗斑岩样品及ZK1007钻孔311 m处的二长花岗斑岩,两组样品的采样位置坐标分别为东经97°43′12″、北纬31°24′12″和东经97°43′01″、北纬31°23′53″。两组样品均可见较强的硅化、钾化、黄铁矿化等蚀变。在甘龙拉地区,主要采集了ZK01钻孔深50 m处的石英二长斑岩样品,采样位置坐标为东经97°43′52″、北纬31°25′46″。在纳加扎地区,采集了具有代表性的 Y_3 岩体样品,其岩性为石英二长斑岩,采样位置坐标为东经97°42′12″、北纬31°24′13″。

首先对所采样品进行了锆石单矿物挑选,并送样进行SHRIMP U-Pb同位素年龄测定,测试工作在中国地质科学院北京离子探针中心完成。从阴极发光照片可以看出,所测样品韵律环带结构发育,均

① 西藏玉龙铜业股份有限公司. 2007. 西藏自治区江达县玉龙铜矿勘探 2007 年年度报告. 西藏昌都. 内部报告. 30-54.

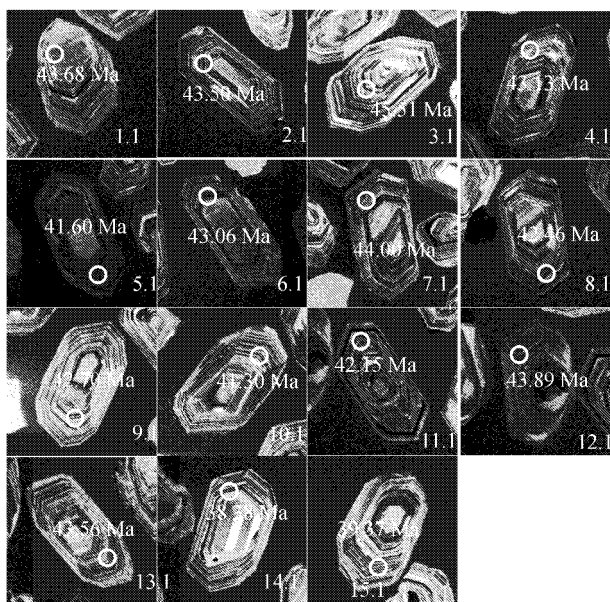


图 3 玉龙铜钼矿床 ZK1007 二长花岗岩岩中锆石样品阴极发光照片及测点位置

Fig. 3 Cathodoluminescence images and analytical points of zircons in monzogranite porphyry from ZK1007

为典型的岩浆锆石。样品测试过程中尽量选择阴极发光生长环带明显、无包裹体、无裂纹的锆石晶体或避开锆石中的裂纹和包裹体。在完成同位素定年后,将所测锆石进行了原位 Hf 同位素分析。锆石 Lu-Hf 同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 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,分析点与 U-Pb 定年分析点位于同一颗锆石(见图 3、图 4、图 5、图 6)。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。分析过程中锆石标准 GJ1 和 Plesovice 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值分别为 $0.282007 \pm 0.000007 (2\sigma, n=36)$ 和 $0.282476 \pm 0.000004 (2\sigma, n=27)$,与文献报道值(侯可军等,2007;Morel et al.,2008;Sláma et al.,2008)在误差范围内完全一致。测试结果见表 1、表 2、表 3、表 4。

5 关于岩石成因的探讨

近年来,关于陆陆碰撞造山环境下的斑岩型铜矿的研究取得了很大的进展,但对含矿斑岩的

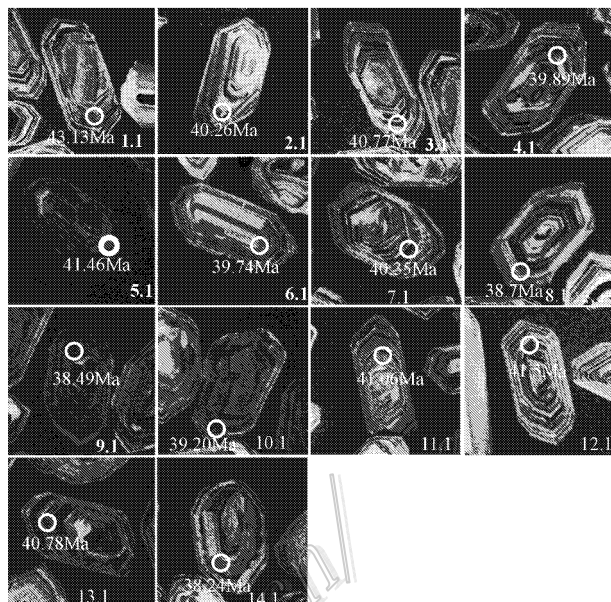


图 4 玉龙铜钼矿床 ZK1205 二长花岗岩岩中锆石样品阴极发光照片及测点位置

Fig. 4 Cathodoluminescence images and analytical points of zircons in monzogranite porphyry from ZK1205

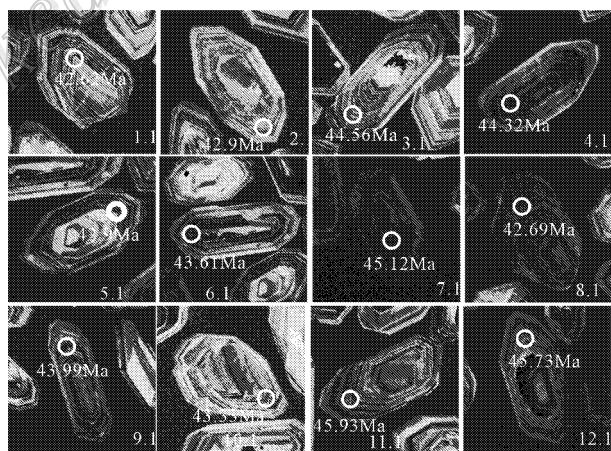


图 5 甘龙拉石英二长斑岩中锆石样品阴极发光照片及测点位置

Fig. 5 Cathodoluminescence images and analytical points of porphyry zircons from Ganlongla quartz monzonite

成因仍存在争论。正如引言所述,对于玉龙斑岩成矿带的成因,尚存在较多不同的认识。随着 Hf 同位素测试技术的成熟,近年来锆石原位 Hf 同位素示踪研究越来越受到人们的重视(Vervoort et al.,1996;Amelin et al.,2000;Scherer et al.,2000;Griffin et al.,2002)。Hf 同位素也被应用于岩石成因的探讨。其原因在于 Zr 和 Hf 具有相似的地球化学性质,锆石是一种非常稳定的矿物,封闭温度高,具有较高的

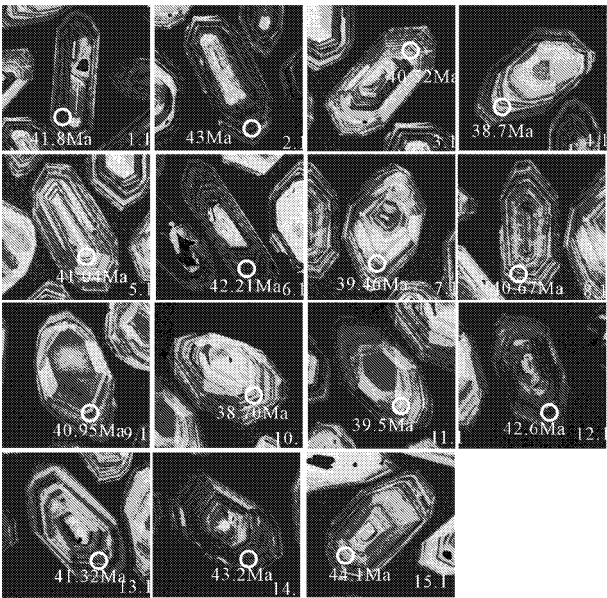


图 6 纳加扎 Y₃ 石英二长斑岩中锆石样品阴极发光照片及测点位置

Fig. 6 Cathodoluminescence images and analytical points of porphyry zircons from Najiazha Y₃ quartz monzonite

Hf 含量(1%~2%的 HfO₂),极低的 Lu 含量,从而导致¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 的比值非常低(通常小于 0.002),由 Lu 衰变而成的¹⁷⁶Hf 很少,锆石在形成以后基本没有明显的放射性成因 Hf 的积累,且很少受到后期岩浆热事件的影响。再者,锆石形成后随时间积累的由放射性同位素¹⁷⁶Lu衰变而形成的¹⁷⁶Hf 很少,因此所

测样品的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值基本上可以代表其形成时体系的 Hf 同位素组成,因此锆石可以记录岩浆源区不同性质源岩的特征。研究表明(吴福元等, 2007),不同地球化学储库其¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 组成明显不同,如球粒陨石和亏损地幔的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值为 ≥0.282 772,ε_{Hf}(*t*)值为负、零或者正值,而富集地幔及地壳的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 相对确定的比值为 0.2835,且ε_{Hf}(*t*)值一般为负值。基于此,Hf 同位素目前已经广泛应用于重要地球化学储库的源区判别,成为研究其源区的一种重要手段。以下主要从玉龙铜钼矿区 Hf 同位素特征及区域地球物理方面的一些信息对玉龙斑岩成矿带的岩石成因进行初步的探讨。

5.1 玉龙铜矿 Hf 同位素组成

从表 1、表 2 可以看出,玉龙矿区含矿二长花岗岩¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282 681~0.282 884,平均值为 0.282 783。采用 43.4 Ma,经年龄校正后的 ε_{Hf}(*t*)为 1.60~4.86,平均值为 3.23,模式年龄(*T*_{DM1})和二阶段模式年龄(*T*_{DM2})分别变化于 0.544~0.812 Ga 和 0.808~1.269 Ga(表 1、表 2)。

矿区北部甘龙拉石英二长斑岩岩体 12 个测点的 Hf 组成较为一致,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282 812~0.282 884,平均值为 0.282 848,*f*_{Lu/Hf} 值介于 0.943 92~0.975 53,采用 43.9 Ma 经年龄校正后的 ε_{Hf}(*t*)为 2.39~4.92,平均值为 3.65,模式年龄和二阶段模式年龄分别变化于 0.524~0.628 和 0.807~

表 1 西藏玉龙斑岩铜钼矿床 ZK1007 含矿二长花岗岩斑岩中锆石 Lu-Hf 同位素原位分析结果

Table 1 ICP-MS in-situ zircon Lu-Hf isotopic analytical results of monzogranite porphyry from ZK1007

序号	点号	<i>t</i> /Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf _i	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (<i>t</i>)	<i>T</i> _{DM1} /Ma	<i>T</i> _{DM2} /Ma	<i>f</i> _{Lu/Hf}
01	1007-B45-1.1	43.68	0.026539	0.000719	0.282860	0.000021	0.28286	3.1	4.04	552	862	-0.97834
02	1007-B45-2.1	43.56	0.031075	0.000821	0.282854	0.000018	0.28285	2.9	3.84	561	875	-0.97526
03	1007-B45-3.1	45.51	0.036992	0.000969	0.282847	0.000018	0.28285	2.6	3.61	574	891	-0.97081
04	1007-B45-4.1	43.13	0.043340	0.001480	0.282833	0.000022	0.28283	2.2	3.08	601	923	-0.95541
05	1007-B45-5.1	41.60	0.051507	0.001194	0.282825	0.000018	0.28282	1.9	2.76	608	943	-0.96402
06	1007-B45-6.1	43.06	0.030564	0.000775	0.282845	0.000016	0.28284	2.6	3.49	574	897	-0.97666
07	1007-B45-7.1	44.00	0.038551	0.001042	0.282864	0.000018	0.28286	3.2	4.18	551	853	-0.96861
08	1007-B45-8.1	42.46	0.035493	0.000899	0.282867	0.000018	0.28287	3.4	4.28	544	846	-0.97292
09	1007-B45-9.1	42.70	0.039094	0.000946	0.282821	0.000017	0.28282	1.7	2.63	610	951	-0.97149
10	1007-B45-10.1	41.30	0.035631	0.000862	0.282884	0.000019	0.28288	4.0	4.86	519	808	-0.97405
11	1007-B45-11.1	42.15	0.043000	0.001327	0.282844	0.000019	0.28284	2.6	3.45	583	899	-0.96003
12	1007-B45-12.1	43.89	0.037151	0.001009	0.282805	0.000017	0.2828	1.2	2.08	634	987	-0.96961
13	1007-B45-13.1	43.56	0.038251	0.001017	0.282838	0.000023	0.28284	2.3	3.25	587	912	-0.96938
14	1007-B45-14.1	38.87	0.033502	0.000906	0.282820	0.000017	0.28282	1.7	2.52	611	956	-0.9727
15	1007-B45-15.1	39.37	0.037006	0.000965	0.282796	0.000018	0.2828	0.9	1.69	646	1009	-0.97095

测试者 中国地质科学院矿产资源研究所侯可军。Hf 同位素分析过程中采用的标准值为球粒陨石(¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{CHUR} = 0.0332, (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{CHUR} = 0.282772(Blichert-Toft et al., 1997); 亏损地幔(¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{DM} = 0.0384, (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM} = 0.28325(Griffin et al., 2000); λ_{Lu} 衰变常数(λ_{Lu} = 1.86 × 10⁻¹¹ a⁻¹(吴福元等, 2007))。表 2~表 4 说明同此。

表 2 西藏玉龙斑岩铜钼矿床 ZK1205 含矿二长花岗斑岩中锆石 Lu-Hf 同位素原位分析结果

Table 2 ICP-MS in-situ zircon Lu-Hf isotopic analytical results of monzogranite porphyry from ZK1205

序号	点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
01	1205-268-1.1	43.13	0.036876	0.000919	0.282791	0.000019	0.28279	0.7	1.60	652	1018	-0.97232
02	1205-268-2.1	40.26	0.048193	0.001401	0.282826	0.000031	0.28283	1.9	2.76	610	941	-0.9578
03	1205-268-3.1	40.77	0.032999	0.000838	0.282827	0.000017	0.28283	1.9	2.81	600	939	-0.97476
04	1205-268-4.2	39.89	0.046123	0.001359	0.282827	0.000017	0.28283	1.9	2.78	608	940	-0.95908
05	1205-268-5.1	41.46	0.042785	0.001081	0.282830	0.000021	0.28283	2.0	2.92	600	932	-0.96744
06	1205-268-6.1	39.74	0.052646	0.001394	0.282795	0.000032	0.28279	0.8	1.66	654	1011	-0.958
07	1205-268-7.2	40.35	0.048739	0.001180	0.282690	0.000028	0.28269	-2.9	(2.05)	800	1249	-0.96446
08	1205-268-8.1	38.70	0.045223	0.001078	0.282849	0.000021	0.28285	2.7	3.55	572	890	-0.96753
09	1205-268-9.1	38.49	0.041875	0.001043	0.282821	0.000018	0.28282	1.7	2.54	612	954	-0.96857
10	1205-268-10.1	39.20	0.038683	0.001177	0.282826	0.000023	0.28282	1.9	2.73	607	943	-0.96456
11	1205-268-12.1	41.50	0.043924	0.001390	0.282868	0.000023	0.28287	3.4	4.27	550	845	-0.95814
12	1205-268-13.1	40.78	0.041021	0.001142	0.282681	0.000028	0.28268	-3.2	(2.36)	812	1269	-0.96559
13	1205-268-14.1	37.00	0.044903	0.001383	0.282848	0.000016	0.28285	2.7	3.46	579	894	-0.95835

表 3 西藏玉龙斑岩铜钼矿床外围北部甘龙拉岩体锆石锆石 Lu-Hf 同位素原位分析结果

Table 3 ICP-MS in-situ zircon Lu-Hf isotopic analytical results of quartz-monzonite porphyry from Ganlongla rock body

序号	点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
01	GLL01-50-1-1.1	42.62	0.036485	0.001056	0.282868	0.000025	0.28287	3.4	4.29	545	845	-0.96821
02	GLL01-50-1-2.1	42.90	0.031611	0.000812	0.282872	0.000018	0.28287	3.6	4.47	535	834	-0.97553
03	GLL01-50-1-3.1	44.56	0.041149	0.001118	0.282849	0.000022	0.28285	2.7	3.67	573	886	-0.96632
04	GLL01-50-1-4.1	44.32	0.032718	0.000875	0.282853	0.000019	0.28285	2.9	3.80	564	878	-0.97365
05	GLL01-50-1-5.1	42.90	0.062027	0.001862	0.282882	0.000030	0.28288	3.9	4.78	537	814	-0.94392
06	GLL01-50-1-6.1	43.61	0.060361	0.001377	0.282834	0.000025	0.28283	2.2	3.13	598	920	-0.95852
07	GLL01-50-1-7.1	45.12	0.045578	0.001301	0.282884	0.000027	0.28288	4.0	4.92	525	807	-0.96081
08	GLL01-50-1-8.1	42.69	0.033519	0.000895	0.282820	0.000018	0.28282	1.7	2.61	610	953	-0.97304
09	GLL01-50-1-9.1	43.99	0.043652	0.001093	0.282842	0.000019	0.28284	2.5	3.43	582	902	-0.96708
10	GLL01-50-1-10.1	43.33	0.038100	0.000954	0.282882	0.000018	0.28288	3.9	4.81	524	812	-0.97126
11	GLL01-50-1-11.1	45.93	0.042269	0.001296	0.282812	0.000017	0.28281	1.4	2.39	628	970	-0.96095
12	GLL01-50-1-12.1	45.73	0.038009	0.000874	0.282851	0.000017	0.28285	2.8	3.77	566	881	-0.97366

表 4 西藏玉龙斑岩铜钼矿床外围南部纳加扎 Y3 石英二长斑岩中锆石锆石 Lu-Hf 同位素原位分析结果

Table 4 ICP-MS in-situ zircon Lu-Hf isotopic analytical results of quartz monzonite porphyry from Najiazha Y3 distrit

序号	点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
01	NJZY1-1-1.1	41.80	0.03072	0.0007	0.282851	0.000022	0.28285	2.8	3.68	564	884	-0.97901
02	NJZY1-1-2.1	43.00	0.03715	0.00086	0.282877	0.000018	0.28288	3.7	4.63	530	824	-0.97398
03	NJZY1-1-3.1	40.52	0.04717	0.00119	0.282839	0.000027	0.28284	2.4	3.21	589	912	-0.96425
04	NJZY1-1-4.1	38.70	0.04235	0.0011	0.282772	0.000028	0.28277	-0.0	0.81	682	1065	-0.96684
05	NJZY1-1-5.1	41.04	0.03783	0.00083	0.282867	0.000017	0.28287	3.4	4.23	543	848	-0.97511
06	NJZY1-1-6.1	42.21	0.04789	0.00111	0.282449	0.000037	0.28245	-11.4	10.51	1138	1788	-0.96652
07	NJZY1-1-7.1	39.46	0.04856	0.00135	0.282803	0.000020	0.2828	1.1	1.94	642	993	-0.95924
08	NJZY1-1-8.1	40.67	0.04182	0.00113	0.282875	0.000019	0.28287	3.6	4.49	537	831	-0.96604
09	NJZY1-1-9.1	40.90	0.04371	0.00109	0.282858	0.000020	0.28286	3.0	3.90	560	869	-0.96718
10	NJZY1-1-10.1	38.73	0.03113	0.00067	0.282859	0.000021	0.28286	3.1	3.92	552	866	-0.97968
11	NJZY1-1-11.1	39.50	0.03664	0.00082	0.282870	0.000020	0.28287	3.4	4.29	540	843	-0.97529
12	NJZY1-1-12.1	42.60	0.06918	0.00142	0.282547	0.000018	0.28255	-8.0	7.07	1009	1570	-0.95719
13	NJZY1-1-13.1	41.32	0.05172	0.00112	0.282812	0.000022	0.28281	1.4	2.30	625	972	-0.96636
14	NJZY1-1-14.1	43.20	0.04492	0.00104	0.282894	0.000017	0.28289	4.3	5.23	508	786	-0.96869
15	NJZY1-1-15.1	44.10	0.03304	0.0008	0.282850	0.000017	0.28285	2.8	3.71	566	883	-0.97577

0.970 Ga(表3)。

矿区南部的纳加扎 Y3 石英二长斑岩中锆石 15 个测点的 Hf 组成同样较为一致, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 449~0.282 894,平均值为 0.282 672, $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值介于 -0.957 19~-0.979 68,采用 41.4 Ma 经年龄校正后的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 0.81~10.51,平均值为 5.66,模式年龄和二阶段模式年龄分别变化于 0.508~1.138 和 0.786~1.788 Ga(表4)。

从本矿区 Hf 同位素的测试结果来看,玉龙铜矿区的 Hf 同位素特征为矿区含矿斑岩体及外围岩体的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值均较大,而 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值,幔源特征较为明显。将所测 Hf 同位素进行投图(见图7),所有测点均落入亏损地幔范围之内。

对比青藏高原区域上的 Hf 同位素特征,如李皓扬等(2007)对藏南林周盆地内典中组最底部的英安质火山角砾岩和年波组下段的流纹质熔结凝灰岩所测试的岩浆锆石的 Hf 同位素特征 [$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 +9.0~+0.5 和 +11.0~+4.8] 及杨志明(2008)对冈底斯驱龙铜矿区各岩相的 Hf 同位素研究结果(矿区西部斑岩 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 0.282 744~0.282 897 之间,对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值,变化于 +2.6~+8.2,闪长岩包体 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282 94~0.283 059 之间,对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 +6.4~+10.6 花岗闪长岩 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282 966~0.283 049 之间,对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 7.3~10.2;X 斑岩 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282 937~0.283 041 之间,对

应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 6.2~9.9)。可以发现玉龙斑岩成矿带与藏南冈底斯成矿带在 Hf 同位素组成上具有一定的相似性, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值也较为相近。印度-亚洲大陆的碰撞造就了青藏高原。它由一系列呈近 EW 向展布的古生代-新生代地体组成,由北而南分别为松潘-甘孜地体、羌塘地体和拉萨地体。玉龙斑岩铜矿带位于青藏高原东部羌塘地体内,冈底斯成矿带则位于拉萨地体内。从侵入时代来说,以驱龙、甲玛等矿床为代表的冈底斯成矿带侵入较晚,如驱龙含矿斑岩的年龄为 16.35~17.38 Ma(芮宗瑶等,2003;Hou et al.,2003;汪亮亮等,2006) 甲玛含矿斑岩为 15.31~16.27 Ma(秦志鹏等,2011);且这一成矿带被认为是印-亚碰撞后伸展背景下形成的斑岩体(Hou et al.,2003)。而玉龙斑岩铜矿带的含矿斑岩成岩年龄为 37.0~43.9 Ma(唐仁鲤等,1995;芮宗瑶等,2002;王成辉等,2008),为印-亚碰撞期侵入形成。二者较为相似的 Hf 同位素表明,印度-亚洲大陆从碰撞到碰撞后伸展阶段,深部岩浆可能存在一个持续演化的过程,并可能在地下壳底部发生了大规模的底侵作用。

对于玉龙斑岩铜矿带,姜耀辉等(2006)通过对含矿斑岩 Sr-Nd-Pb-Hf 较系统的研究,提出含矿斑岩为钾玄质岩石,直接起源于富集岩石圈地幔的低程度部分熔融。在这种模式中,岩浆来自地幔的直接熔融,并且只能在极低部分熔融程度的情况下才有这种可能性,但这样低的熔体分数是否足以使熔体聚集并上侵尚存在一定的争议。青藏高原东部含矿斑岩的 Nb/Y 比值出现明显变化而 LILE(Ba) 保持不变(侯增谦等,2004) 以及含矿斑岩的 Sr-Nd 同位素资料(侯增谦等,2007),反映岩浆源区熔融前经历的深部过程是一种岩浆过程,而不是流体交代过程,这种岩浆过程可能与软流圈地幔物质向下地壳的添加有关,并导致了地壳增生和新生地壳的形成。本次对玉龙铜矿所做的系统的 Hf 同位素测定进一步证明了这个推断,同时,几个岩体的二阶段模式年龄变化较大及上限值较老,则暗示可能发生过地壳混染作用。

5.2 来自地球物理的信息

如前述,玉龙斑岩成矿带含矿斑岩的成因尚具有较大的争议,综合研究发现这些不同的观点大多是根据地球化学数据提供的信息。事实上,在本区也做了大量的地球物理方面的工作来揭示地壳结构、岩石圈结构等科学问题(赵永贵等,1992;刘福田

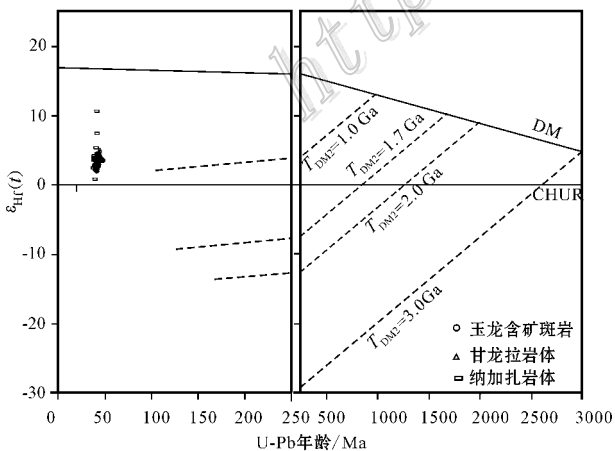


图7 玉龙斑岩铜钼矿区各岩体锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 与 U-Pb 年龄图解(底图据吴福元等,2007 修改)

Fig. 7 Plot of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ versus U-Pb ages of igneous zircons from the Yulong Cu-Mo deposit(modified after Wu et al.,2007)

等,2000;钟大赉等,2000;2001;朱介寿等,2003)。而这些研究成果从层圈结构的角度为探讨本区岩石成因提供了一定的信息。通过对这些资料的综合分析,可以初步提取出本区层圈结构的几个特点 ① 地壳厚度较大(50~80 km),具有南薄北厚特点,岩石圈地幔厚度不大,但存在厚 20 km(60~80 km 深度)的壳幔混合体(壳幔过渡带),软流圈厚度大(100~200 km),存在软流圈上涌体;②“壳幔过渡带”、“软流圈上涌体”在晚三叠世就开始出现,在陆内造山期得以强化并定型为现在的格局;③壳幔混合体具有 V_p (地震纵波)高低相间成层的复杂结构,可能是深部底侵层状基性岩浆、热流体与原地壳岩石不同程度交代混合而成,既包括来自软流圈地幔部分熔融基性岩浆,又有壳幔交代混合形成的中性为主兼具幔源和壳源两种印记的岩浆,加之高温软流层地幔物质上涌,底侵增温,使地温线切割固相线,壳幔过渡带内保存或残留的老地幔岩石层和下地壳也同样发生部分熔融;④地震波在 10~100 km 范围内持续的低速特征,反映了本区存在软流圈的上涌和强烈的底侵作用,中上地壳范围也可能存在部分熔融;⑤软流圈上涌及其诱发的强烈底侵作用及受其影响发生的地壳物质部分熔融,使得江达构造带的岩浆作用为多种组合构成的复杂系列,既具有壳的特征,又具有幔的性质;⑥深部具有 NE 向构造,而在造山作用下,这些 NE 向构造处于引张状态,使得岩浆活动易于沿此构造带上侵活动,形成一系列近东西向的侵入岩带(唐菊兴,2005)。这些资料 and 认识表明,本区可能存在软流圈上涌并诱发底侵作用,及受此影响发生地壳物质部分熔融,并引发复杂系列岩浆的侵入作用。

对于斑岩铜矿的岩浆演化而言,主要可以分为岩浆弧环境和大陆环境 2 种。前一种环境的岩浆模式观点主要以 Richard(1991)为代表,认为大洋板片俯冲至一定深度后发生脱水作用,后者携带大量的大离子不相容元素(K、Rb、Ba)交代楔形地幔,并诱发其熔融产生玄武质钙碱性岩浆。因密度差,这些岩浆上升并底侵于下地壳底部,发育 MASH 带(M 熔融、A 混染、S 储积、H 混合),产生富水、金属和硫的安山质-英安质混和岩浆,其上升侵位形成含矿斑岩(Richards, 2003)。而对于大陆环境,侯增谦等(2007)依据加厚下地壳的物质组成和熔融时的状态,分为 3 种情况,即新生的加厚下地壳、软流圈物质注入的下地壳和拆沉的加厚下地壳的部分熔融;

并认为玉龙斑岩成矿带含矿斑岩来源于加厚下地壳的镁铁质部分。参考上述地球物理资料,这一加厚下地壳的镁铁质部分可能是存在的。

6 结 论

Hf 同位素测试结果显示,玉龙含矿斑岩体的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 681~0.282 884, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 1.60~4.86,矿区外围北部甘龙拉石英二长斑岩岩体 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 812~0.282 884, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 2.39~4.92,矿区外围南部的纳加扎 Y_3 石英二长斑岩岩体 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 449~0.282 894, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 0.81~10.51,与亏损地幔地球化学储库的 Hf 同位素特征较为相似,表明本区成矿斑岩的源岩或源区可能来自亏损地幔。Hf 同位素对比研究表明,虽然侵入阶段不同,印度-亚洲大陆从碰撞到碰撞后伸展阶段,深部岩浆可能存在一个持续演化的过程。地壳层圈结构的地球物理资料表明,本区存在“软流圈上涌体”,中上地壳范围也可能存在部分熔融,可能在下地壳底部发生了大规模的底侵作用;深部具有 NE 向构造并控制了区域岩浆的侵位。综合来看,玉龙斑岩铜矿带斑岩体可能是由软流圈上涌及其诱发的强烈底侵作用,使得本区地壳增厚继而发生部分熔融所形成。

References

- Amelin Y, Lee D C and Hailiday A N. 2000. Early-middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. *Geochim [J]. Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 4205-4225.
- Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148: 243-258.
- Chen W M. 1984. Ineternal relations in mineralization between the Yulong porphyry copper deposit and stratiform copper deposits of sandstone-shale type [J]. *Geological Review*, 30(3): 239-252.
- Ding C J, Wang Z and Shen T B Y. 1990. Sr-Nd isotopic characteristics of main ore-bearing rocks from Yulong copper ore belt in east Tibet [M]. Beijing: China University of Geosciences Publishing House. 226-230 (in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Person N J, Belousova E, Jackson S E, van Acherterbergh E, O'Reilly S Y and Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of craton mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in Kimberlites [J]. *Geochim. cosmochim. Acta*, 64: 133-147.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu X

- and Zhou X. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61: 237-269.
- Hou K J, Li Y H, Zou T R, Qu X M, Shi Y and Xie G Q. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595-2604 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Zhong D L and Deng W M. 2004. A tectonic model for porphyry copper-molybdenum-gold metallogenic belts on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geology in China*, 31(1): 1-14 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Pan X F, Yang Z M and Qu X M. 2007. Porphyry Cu-(Mo-Au) deposit on related to oceanic-slab subduction: Examples from Chinese porphyry deposits in continental settings[J]. *Geoscience*, 21(2): 332-351 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Ma H W, Zaw K, Zhang Y Q, Wang M J, Wang Z, Pan G T and Tang R L. 2003. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Produced by large-scale strike-slip faulting at eastern Tibet[J]. *Econ. Geol.*, 98: 125-145.
- Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F and Dai B Z. 2006. Petrogenesis of Cu-bearing porphyry associated with continent-continent collisional setting: Evidence from the Yulong porphyry Cu ore-belt, east Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 697-706 (in Chinese with English abstract).
- Li H Y, Zhong S L, Wang Y B, Zhu D C, Yang J H, Song B, Liu D Y and Wu F Y. 2007. Age, petrogenesis and geological significance of the Linzong volcanic Successions in the Linzhou Basin, Southern Tibet: Evidence from zircon U-Pb dates and Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 493-500 (in Chinese with English abstract).
- Liang H Y. 2002. New progress of studies on rock-forming and ore-forming processes of porphyry copper deposits in the Southeastern Qinghai-Tibet plateau[J]. *Mineral Deposits*, 21(4): 365 (in Chinese with English abstract).
- Liu F T, Liu J H, He J K and You Q Y. 2000. Subducted slab of lower Yangtze block in Tethys orogenic belt, west of Yunnan Province[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29(1): 20-24 (in Chinese with English abstract).
- Ma H W. 1990. Granitoid and mineralization of the Yulong porphyry copper belt in eastern Tibet[M]. Beijing: China University of Geosciences Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Morel M L A, Nebel O, Nebel-Jacobsen Y J, Jacobsen N, Miller J S and Vroon P Z. 2008. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICPMS[J]. *Chemical Geology*, 255: 231-235.
- Qu X M, Hou Z Q and Huang W. 2001. Is Gangdise porphyry copper belt: the second "Yulong" copper belt[J]? *Mineral Deposits*, 20(4): 356-366 (in Chinese with English abstract).
- Qin Z P, Wang X W, Dor J, Tang X Q, Zhou Y and Peng H J. 2011. LA-ICP-MS U-Pb zircon age of intermediate-acid intrusive rocks in Jiama of Tibet and its metallogenic significance[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 339-348 (in Chinese with English abstract).
- Richards J P, McCulloch M T, Chappell B W and Kerrich R. 1991. Sources of metals in the Porgera gold deposit, Papua New Guinea: evidence from alteration, isotope, and noble metal geochemistry[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55: 565-580.
- Richards J D. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation[J]. *Econ. Geol.*, 98: 1515-1533.
- Rui Z Y, Huang C K, Qi G M, Xu J and Zhang M T. 1984. The porphyry Cu-(Mo) deposits in China [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 350p (in Chinese with English abstract).
- Rui Z Y, Li G M, Wang L S, Wang L S and Wang Y T. 2002. Porphyry copper deposits in Tibet [J]. *Tibet Geol.*, 21(2): 3-12 (in Chinese with English abstract).
- Rui Z Y, Lu Y, Li G M, Wang L S and Wang Y T. 2003. Prospect of Tibet porphyry copper deposits[J]. *Geology in China*, 30(3): 302-308 (in Chinese with English abstract).
- Sláma J, Kosler J, Condon D J, Crowley J L, Gerdes A, Hancher J M, Horstwood M S A, Morris G A, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett M N and Whitehouse M J. 2008. Plesovice zircon - A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. *Chemical Geology*, 249: 1-35.
- 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.
- Tang R L and Luo H S. 1995. The geology of Yulong porphyry copper (molybdenum) ore belt, Tibet [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 320p (in Chinese with English abstract).
- Tang J X. 2005. The study on metallogeny and localizing forecast of Yulong porphyry copper-molybdenum mineralization, Tibet (dissertation for Doctor degree) [D]. Chengdu University of Technology. 1-172 (in Chinese with English abstract).
- Tang J X, Zhang L, Li Z J, Chen J P, Huang W and Wang Q. 2006. Porphyry copper deposit controlled by structural nose trap: Yulong porphyry copper deposit in eastern Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 25(6): 654-662 (in Chinese with English abstract).
- Vervoort J D, Pachel P J, Gehrels G E and Nutman A P. 1996. Constraints on earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes[J]. *Nature*, 379: 624-627.
- Wang C H, Tang J X, Chen J P, Hao J H, Gao Y M, Liu Y W, Fan T, Zhang Q Z, Ying L J and Chen Z J. 2008. Chronological research of Yulong copper-molybdenum porphyry deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1445-1455 (in Chinese with English abstract).
- Wang L L, Mo X X, Li B, Dong G C and Zhao Z D. 2006. Geochronology and geochemistry of the ore-bearing porphyry in Qulong Cu(Mo) ore deposit, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(14): 1001-1008 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z. 1991. Material source and genetic mechanisms of Yulong porphyry copper belt [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Publishing House. 270-271 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematic and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185-220 (in Chinese with English abstract).

- Yang Z M. 2008. The Qulong giant porphyry copper deposit in Tibet : Magmatism and mineralization (dissertation for Doctor degree) [D]. Chinese Academic of Geological Sciences. 1-145 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y Q, Xie Y W and Tu G Z. 1987. Preliminary studies of the alkali-ich intrusive rocks in the Ailaoshan-Jinshajiang belt and their bearing on rift tectonics [J]. Acta Petrologica Sinica, (1) : 17-26 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y Q, Xie Y W, Liang H Y, Qiu H N, Li X H and Zhong S L. 1998. Petrogenesis series and the ore-bearing porphyries of the Yulong copper ore belt in eastern Tibet [J]. Geochimica, 27(3) : 236-243 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y G, Zhong D L, Liu J H, Wu H and Liu F T. 1992. Fundamentals of geological interpretation for seismic tomography and its application to studying of west Yunnan's deep structure [J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 2 : 105-113 (in Chinese with English abstract).
- Zhong D L, Ding L, Liu F Q, Zhang J J, Ji J Q and Chen H. 2000. Multi-oriented and layered structures of lithosphere in orogenic belt and their effects on Cenozoic magmatism [J]. Science in China (Series D), 30 : 1-9 (in Chinese).
- Zhong D L, Ding L, Ji J Q, Zhang J J, Liu F T, Liu J H and Yan X W. 2001. Coupling of the lithospheric convergence of west china and dispersion of east china in Cenozoic : Link with paleoenvironmental changes [J]. Quaternary Sciences, 21(4) : 303-312 (in Chinese with English abstract).
- Zhu J S, Cao J M, Cai X L and Yan Z Q. 2003. Study for three-dimensional structure of earth interior and geodynamics in china and adjacent land and sea regions [J]. Advance in Earth Sciences, 18(4) : 497-503 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈文明. 1984. 玉龙斑岩铜矿与砂页岩层状铜矿成矿作用的内在联系 [J]. 地质论评, 30(3) : 239-252.
- 丁朝建, 王 增, 申屠保涌. 1990. 藏东玉龙斑岩(钼)矿带主要成矿岩体 Nd-Sr 同位素特征 [A]. 青藏高原地质文集 (20) [C]. 北京 : 地质出版社. 226-230.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用 [J]. 岩石学报, 23(10) : 2595-2604.
- 侯增谦, 钟大赉, 邓万明. 2004. 青藏高原东缘斑岩铜钼金成矿带的构造模式 [J]. 中国地质, 31 : 1-16.
- 侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 曲晓明. 2007. 初论大陆环境斑岩铜矿 [J]. 现代地质, 21(2) : 332-351.
- 姜耀辉, 蒋少涌, 凌洪飞, 戴宝章. 2006. 陆-陆碰撞造山环境下含铜斑岩岩石成因——以藏东玉龙斑岩铜矿带为例 [J]. 岩石学报, 22(3) : 697-706.
- 李皓扬, 钟孙霖, 王彦斌, 朱弟成, 杨进辉, 宋 彪, 刘敦一, 吴福元. 2007. 藏南林周盆地林子宗火山岩的时代、成因及其地质意义 : 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据 [J]. 岩石学报, 23(2) : 493-500.
- 梁华英. 2002. 青藏高原东南缘斑岩铜矿成岩成矿研究取得新进展 [J]. 矿床地质, 21(4) : 365.
- 刘福田, 刘建华, 何建坤, 游庆瑜. 2000. 滇西特提斯造山带下扬子地块的俯冲板片 [J]. 科学通报, 45(1) : 79-84.
- 马鸿文. 1990. 藏东玉龙斑岩铜矿带花岗岩类与成矿 [M]. 北京 : 中国地质大学出版社.
- 曲晓明, 侯增谦, 黄 卫. 2001. 冈底斯斑岩铜矿(化)带 : 西藏第二条“玉龙”铜矿带 [J]. 矿床地质, 20(4) : 355-366.
- 秦志鹏, 汪雄武, 多 吉, 唐晓倩, 周 云, 彭慧娟. 2011. 西藏甲玛中酸性侵入岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及成矿意义 [J]. 矿床地质, 30(2) : 339-348.
- 芮宗瑶, 黄崇柯, 齐国明, 等. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床 [M]. 北京 : 地质出版社. 320-360.
- 芮宗瑶, 李光明, 王龙生, 王义天. 2002. 西藏斑岩铜矿 [J]. 西藏地质, 21 : 3-12.
- 芮宗瑶, 陆 彦, 李光明, 王龙生, 王义天. 2003. 西藏斑岩铜矿的前景展望 [J]. 中国地质, 30(3) : 303-308.
- 唐仁鲤, 罗怀松. 1995. 西藏玉龙斑岩铜(钼)矿带地质 [M]. 北京 : 地质出版社. 1-320.
- 唐菊兴. 2005. 西藏玉龙斑岩铜(钼)矿成矿作用及矿床定位预测研究(博士论文) [D]. 成都 : 成都理工大学. 1-172.
- 唐菊兴, 张 丽, 李志军, 陈建平, 黄 卫, 王 乾. 2006. 西藏玉龙铜矿床——鼻状构造圈闭控制的特大型矿床 [J]. 矿床地质, 25(6) : 654-662.
- 王成辉, 唐菊兴, 陈建平, 郝金华, 高一鸣, 刘耀文, 凡 韬, 章奇志, 应立娟, 陈志皎. 2008. 西藏玉龙铜钼矿同位素年代学研究 [J]. 地质学报, 83(10) : 1445-1455.
- 王亮亮, 莫宣学, 李 冰, 董国臣, 赵志丹. 2006. 西藏驱龙斑岩铜矿含矿斑岩的年代学与地球化学 [J]. 岩石学报, 22(4) : 1001-1008.
- 王 增. 1991. 玉龙斑岩铜矿带的物质来源及其形成机理 [A]. 见 : 地质矿产部成都地质矿产研究所主编. 中国西部特提斯构造演化及成矿作用 [M]. 成都 : 电子科技大学出版社. 270-271.
- 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.
- 杨志明. 2008. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床——岩浆作用及矿床成因(博士论文) [D]. 北京 : 中国地质科学院. 1-145.
- 张玉泉, 谢应雯, 涂光炽. 1987. 哀牢山-金沙江富碱侵入岩及其与裂谷构造关系初步研 [J]. 岩石学报, (1) : 17-26.
- 张玉泉, 谢应雯, 梁华英, 邱华宁, 拿献华, 钟孙霖. 1998. 藏东玉龙铜矿带含矿斑岩及其成岩系列 [J]. 地球化学, 27(3) : 236-243.
- 赵永贵, 钟大赉, 刘建华, 吴 华, 刘福田. 1992. 地震层析地质解释原理及其在滇西深部构造研究中的应用 [J]. 地质科学, 2 : 105-113.
- 钟大赉, 丁 林, 刘凤清, 张进江, 季建清, 陈 辉. 2000. 造山带岩石层多向层架构造及其对新生代岩浆活动约束——以三江及邻区为例 [J]. 中国科学(D 辑), 30(1) : 1-8.
- 钟大赉, 丁 林, 季建清, 张进江, 刘福田, 刘建华, 闫晓蔚. 2001. 中国西部新生代岩石圈汇聚和东部岩石圈离散的耦合关系与古环境格局演变的探讨 [J]. 第四纪研究, 21(4) : 303-312.
- 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 严忠琼. 2003. 中国及邻近陆域海域地球内部三维结构及动力学研究 [J]. 地球科学进展, 18(4) : 497-503.