

西藏多不杂铜矿床硫铅同位素地球化学示踪

何阳阳^{1,2}, 温春齐², 刘显凡²

(1. 内江师范学院 地理与资源科学学院, 四川 内江 641112; 2. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: 多不杂铜矿床的发现是西藏地质找矿工作取得的重大突破, 前人对其做了大量的研究, 但始终未能合理解释该矿床的形成过程, 究其原因主要是因为成矿物质和成矿流体来源认识上存在争议。本次研究指出了前人在多不杂铜矿床成因机制认识中存在的问题, 并测试了岩矿石及单矿物的硫铅同位素组成。研究表明, 矿床中硫主要来源于深源岩浆, 幔源岩浆和流体在参与成岩成矿过程中伴随岩浆结晶成岩交代岩石而致自身流体性质演变, 进而引发壳幔物质混染; 铅同位素具有由岩浆作用形成的地壳与地幔混合的俯冲带铅的特征, 伴随着含矿地幔流体的上升侵位, 不可避免的混染了地壳铅, 导致了多不杂铜矿床铅同位素组成的变化。综合分析认为该矿床的成矿物质和成矿流体主要来源于地幔, 成矿动力主要来自深部地质过程, 矿床的形成与地幔流体作用有关。

关键词: 硫铅同位素; 地球化学示踪; 多不杂铜矿床; 西藏

中图分类号: P597; P618.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)05-0855-08

Sulfur and lead isotope geochemical tracing of the Duobuza copper deposit, Tibet

HE Yang-yang^{1,2}, WEN Chun-qi² and LIU Xian-fan²

(1. College of Geography & Resource Science, Neijiang Normal University, Neijiang 641112, China; 2. College of Geosciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The discovery of the Duobuza copper deposit is a major breakthrough of geological prospecting work in Tibet. Previous studies have done a lot of research, but failed to explain the formation process of the deposit. The reason is mainly because of the controversy in the understanding of the source of ore-forming materials and ore-forming fluids. In this study, the authors pointed out the problems existing in the understanding of the genetic mechanism of the Duobuza copper deposit, and investigated the sulfur and lead isotopic compositions of rocks and minerals. It is shown that, in the ore-forming and rock-forming process, the major source of sulfur in magma, mantle-derived magma and fluid experienced component evolution resulting from magmatic crystallization and rock metasomatism, thus triggering the contamination of the crust and the mantle. Lead isotope was characterized by the subduction zone lead formed by the magma activity of the crust and the mantle, which was accompanied by the increase of the ore-bearing mantle fluid and led to the change of lead isotopic composition of the Duobuza copper deposit. Comprehensive analysis shows that the ore-forming material and the ore-forming fluid were mainly derived from the mantle, the metallogenic dynamics was mainly from deep geological process, and the formation of the ore deposits was related to mantle fluid metasomatism.

Key words: sulfur-lead isotope; geochemical tracing; Duobuza copper deposit; Tibet

Fund support: Ministry of Land and Resources of Public Industry Research and Special Projects (201011013); PhD Research Funding of Neijiang Normal University (15B09)

收稿日期: 2016-05-17; 接受日期: 2016-08-10

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项资助项目(201011013); 内江师范学院博士科研启动费资助项目(15B09)

作者简介: 何阳阳(1984-), 男, 博士, 讲师, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: yangyang.he@qq.com; 通讯作者: 温春齐(1945-), 男, 教授, 主要从事矿床学研究, E-mail: wecq@cdut.edu.cn.

多不杂铜矿床隶属于西藏阿里地区改则县物玛乡,是班公湖-怒江成矿带西段上发现的超大型铜矿床。前人对其成矿物质来源做了大量的研究,主要成果如下:李光明等(2007)、田毅(2009)、Li等(2011a, 2011b, 2011c)、李玉彬等(2012)、祝向平等(2012)、王红星(2013)基于矿床地质及流体包裹体等多方面的研究,认为成矿物质和成矿流体来源于斑岩岩浆,他们支持正岩浆成因模式。曲晓明等(2006)基于矿床地质及地球化学等多方面的分析,认为含矿岩浆生成于地壳较浅的部位。余宏全等(2006, 2009)、Zhou等(2015)、Fei等(2015)基于流体包裹体及成岩成矿时代等多方面的研究,认为成矿物质和成矿流体部分来源于岩浆,部分来源于围岩,他们支持混合成因模式。综上所述,关于多不杂铜矿床成矿物质来源主要包括幔源、壳源、壳幔混源3种认识,这样势必导致多不杂铜矿床成因认识存在分歧,给找矿勘探带来困惑。鉴于此,本文结合前人研究基础,补充分析了岩矿石和单矿物的硫铅同位素组成,为多不杂铜矿床成矿物质来源提供了新的依据。

1 矿床地质

多不杂铜矿床所在大地构造位置隶属于班公湖-怒江缝合带、羌塘“三江”复合板片以及冈底斯-念青唐古拉板片。该区经历了拉萨地体、羌塘地体之间的大陆聚合、裂解以及造山、造陆等构造演化过程。

矿区出露地层主要为下侏罗统曲色组二岩段(J_1q^2)、下白垩统美日切组(K_1m)、新近系康托组(N_1k)以及第四系(Q)(图1)。下侏罗统曲色组二岩段(J_1q^2)地层均已蚀变,是多不杂铜矿床的主要围岩地层,主要岩性为变质砂岩,呈灰白色,伴有浸染状和细脉状铜矿化现象。下白垩统美日切组(K_1m)地层主要分布于变质砂岩的北侧,地层产状为 $202^\circ \angle 55^\circ$,呈近北东方向展布,与康托组和曲色组均呈断层接触关系,岩性主要为安山质火山碎屑岩,呈紫红色。新近系康托组(N_1k)地层分布于矿区北部,和曲色组呈角度不整合接触关系,出露面积较小,地层产状为 $22^\circ \angle 15^\circ$ 。岩性主要为紫红色砂砾岩,其次

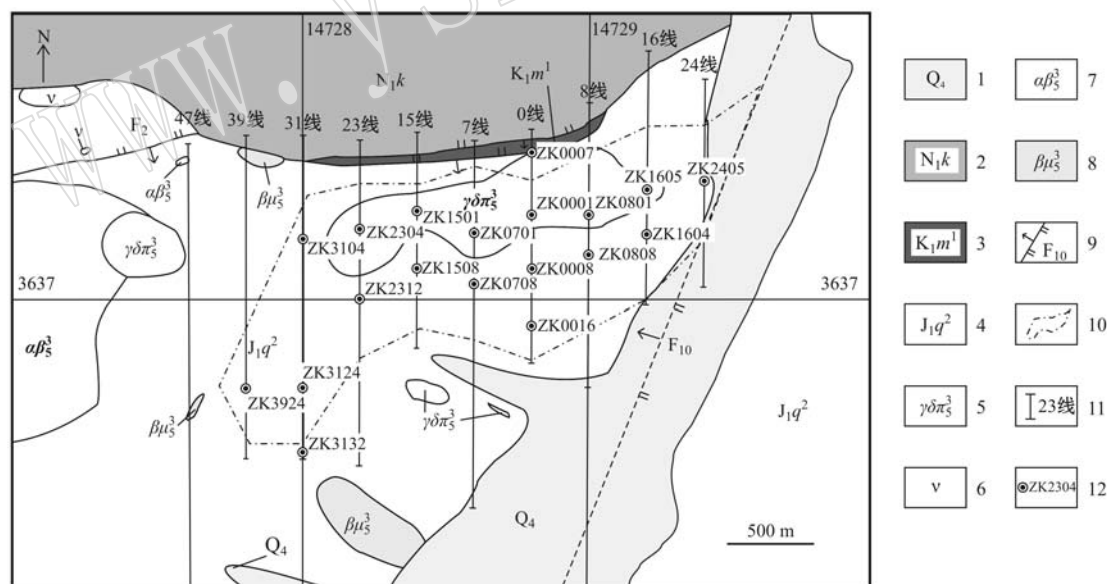


图1 多不杂铜矿床矿体平面图(据陈红旗等, 2011^①修改)

Fig. 1 Plan view of orebody in the Duobuza copper deposit (after Chen Hongqi *et al.*, 2011^①)

1—第四系; 2—新近系康托组; 3—下白垩统美日切组一段; 4—下侏罗统曲色组二段; 5—花岗闪长斑岩; 6—灰绿色辉长岩; 7—玄武质安山岩; 8—墨绿色辉绿岩; 9—断层; 10—矿体范围; 11—勘探线; 12—钻孔

1—Quaternary; 2—Neogene Kangtuo Formation; 3—1st member of Lower Cretaceous Meirique Formation; 4—2nd member of Lower Jurassic Quse formation; 5—granodiorite porphyry; 6—grayish green gabbro; 7—basaltic andesite; 8—dark green diabase; 9—fault; 10—orebody range; 11—exploration line; 12—drill hole

① 陈红旗, 张天平, 李玉昌, 等. 2011. 西藏班公湖-怒江成矿带西段铜多金属资源调查报告.

为粉砂岩,底部夹有基性火山岩。第四系(Q)沿沟谷及缓坡地带广泛分布的残坡积物堆积层和松散砂砾堆积层。

在该矿区见北东向展布的 F_{10} 断层和近东西向展布的 F_2 断层;次级裂隙构造主要发育在 F_{10} 断层和 F_2 断层的两侧及花岗闪长斑岩的内外接触带中。 F_2 断层贯穿整个矿区,断层面南倾,走向 200° 左右,倾角 $40^\circ\sim 50^\circ$ 之间,美日切组地层位于该断层破碎带内,出露长度约 200 m 左右,出露宽度约 30~40 m 左右,岩性主要为安山质火山碎屑岩,不含矿。该断层具有多期多阶段活动的特点,且后期的断裂活化对铜矿体有破坏作用。它控制了花岗闪长斑岩的侵入和展布,并为成矿作用的发生提供了有利的空间和通道。钻孔 ZK001、钻孔 ZK007、钻孔 ZK801 等探矿工程揭露了 F_2 断层。 F_{10} 断层被第四系覆盖,主要沿萨玛隆沟展布,形成时间较晚,并对矿体有破坏作用。钻孔 ZK2405 施工深度为 431.88 m,从 379.60 m 开始揭露 F_{10} 断层,推测其为一逆断层,倾向约 305° 左右,倾角约 75° 左右,北西盘上升,将 F_2 断面向北错移约 350 m。破碎带中主要为断层角砾和断层泥,成分分别为变质砂岩和黄色粘土。

矿区出露的岩浆岩主要为侵入岩和火山岩,其中,侵入岩包括花岗闪长斑岩($\gamma\delta\pi_3^3$)、辉绿玢岩($\beta\mu_5^3$)等;火山岩包括玄武安山岩、安山岩等;它们均形成

于早白垩世。其中,花岗闪长斑岩($\gamma\delta\pi_3^3$)是本区主要的含矿地质体之一,与曲色组地层中的变质砂岩呈侵入接触关系,被康托组红层掩盖。

矿体产于花岗闪长斑岩及斑岩体附近的变质砂岩中,被多个钻探工程控制,走向西,倾向南。目前已控制矿体长度约 1 600 m 左右,厚度约 500 m,延深约 600 m。

2 分析方法和测试结果

硫是矿床中成矿金属元素沉淀的重要矿化剂,铅同位素组成一般不随成矿过程的进行而发生变化,因此,在矿床成因研究中人们常常利用硫铅同位素来示踪其成矿物质来源。本次研究所取岩石全部来自多不杂铜矿床 2304 号钻孔和 2312 号钻孔,分别采集围岩和斑岩样品,在室内挑选出相关单矿物,测试其硫铅同位素组成。

2.1 硫同位素

委托核工业北京地质研究院完成硫同位素分析测试,所用仪器为 MAT-251 气体同位素质谱计,检测的方法和参考的规范为《硫化物中硫同位素组成的测定》DZ/T0184.14-1997 和《硫酸盐中硫同位素组成的测定》DZ/T0184.15-1997。测试结果如表 1 所示。

表 1 多不杂铜矿床 S 同位素测试结果

Table 1 S isotope test results of the Duobuza copper deposit

%o

序号	样号	测试对象	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$	序号	样号	测试对象	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$
1	DBZ004py	黄铁矿	0.9	19	DBZ059mt	磁铁矿	-0.4
2	DBZ025py	黄铁矿	-0.7	20	DBZ060mt	磁铁矿	-0.7
3	DBZ025cp	黄铜矿	-1.1	21*	Zk001-89-2	石膏	12.5
4	DBZ029py	黄铁矿	0.8	22*	Zk001-89-2	黄铜矿	0.5
5	DBZ029cp	黄铜矿	0.6	23*	ZK001-78-2	石膏	10.6
6	DBZ029anh	硬石膏	10.2	24*	ZK001-78-2	黄铜矿	0.5
7	DBZ032py	黄铁矿	0.8	25*	ZK001-140-2	石膏	12.2
8	DBZ032anh	硬石膏	8.5	26*	ZK001-140-2	黄铜矿	0.6
9	DBZ041py	黄铁矿	1.9	27*	Dbz001-91	黄铜矿	-0.5
10	DBZ041cp	黄铜矿	-1.3	28*	ZK002-185	石膏	8.8
11	DBZ044py	黄铁矿	-0.1	29*	Dbz1502-257	黄铁矿	0.6
12	DBZ044cp	黄铜矿	-1.0	30*	Dbz802-337	黄铁矿	2.1
13	DBZ045py	黄铁矿	-1.4	31*	Dbz1502-234	黄铁矿	0.9
14	DBZ045cp	黄铜矿	-0.9	32	DBZ046	花岗闪长斑岩	-6.1
15	DBZ056py	黄铁矿	-0.1	33	DBZ048	花岗闪长斑岩	-0.5
16	DBZ056anh	硬石膏	1.9	34	DBZ052	花岗闪长斑岩	-2.0
17	DBZ059py	黄铁矿	-0.4	35	DBZ057	花岗闪长斑岩	-1.0
18	DBZ059cp	黄铜矿	-0.7	36	DBZ062	花岗闪长斑岩	-1.9

注:带*数据来自李金祥(2008)。

从表 1 中可以看到,多不杂铜矿床的硫同位素组成范围较大, $\delta^{34}S_{V-CDT}$ 值变化范围为 $-6.1‰\sim 12.5‰$,平均值为 $1.5‰$;31 件矿物的硫同位素变化范围为 $-1.4‰\sim 12.5‰$,平均值为 $2.1‰$;5 件含矿斑岩的硫同位素变化范围为 $-6.1‰\sim -0.5‰$,平均值为 $-2.3‰$,亦具有较低的 $\delta^{34}S$ 值。对表 1 中所列 31 件矿物 $\delta^{34}S$ 值进行统计学分析,发现 $\delta^{34}S$ 在矿物中的分布服从以下顺序:硬石膏(石膏)($1.9‰\sim 12.5‰$,平均 $9.2‰$, $n=7$)>黄铁矿($-1.4‰\sim 2.1‰$,平均 $0.4‰$, $n=12$)>黄铜矿($-1.3‰\sim 0.6‰$,平均 $-0.3‰$, $n=10$)>磁铁矿($-0.4‰\sim -0.7‰$,平均 $-0.55‰$, $n=2$)。这种 $\delta^{34}S$ 在矿物中的含量大小顺序与硫化物结晶时的 $\delta^{34}S$ 富集顺序基本一致,说明多不杂铜矿床成矿流体中硫化物间和硫化物-硫酸盐间的硫同位素基本达到了平衡。

根据表 1,作出了多不杂铜矿床硫同位素统计直方图(图 2)。可以看到,硫同位素集中在 $-2‰\sim 1‰$ 之间,呈较明显的塔式分布, $\delta^{34}S$ 值较低,非常接近地幔硫同位素组成($0‰\pm 3‰$)(郑永飞等,2000)。

2.2 铅同位素

测试单位为核工业北京地质研究院,所选用的仪器为 ISOPROBE-T 热电离质谱仪,参考规范和检测方法为《岩石中铅锶钨同位素测定方法》GB/T17672-1999,测试结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看到,多不杂铜矿床矿物铅 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 变化范围为 $18.561\sim 18.598$,岩石铅

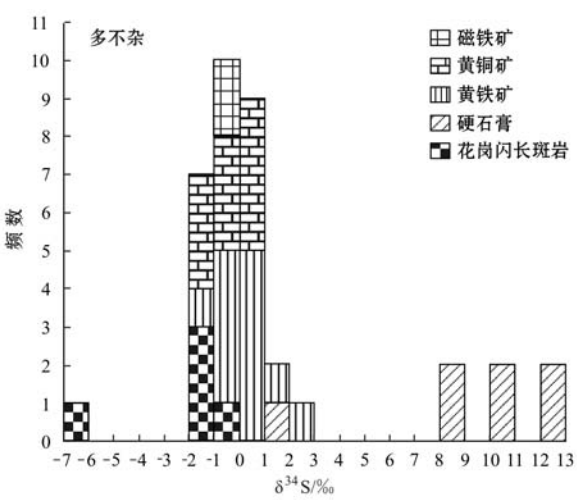


图 2 多不杂铜矿床硫同位素统计直方图

Fig. 2 Sulfur isotope statistical histogram of the Duobuza copper deposit

$^{206}Pb/^{204}Pb$ 变化范围为 $17.942\sim 18.631$;矿物铅 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 变化范围为 $15.598\sim 15.657$,岩石铅 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 变化范围为 $15.534\sim 15.601$;矿物铅 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 变化范围为 $38.711\sim 38.847$,岩石铅 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 变化范围为 $37.997\sim 38.770$;大部分样品铅同位素比值变化很小,显示其具有正常铅同位素的特征。通常认为,铅同位素源区特征值可以反映铅同位素的来源,特别是 μ 值的变化记录了地质体所经历的地质过程,且来自地壳或地幔铅具低 μ 值($\mu<9.58$)(温春齐等,2009)。多不杂铜矿床铅同

表 2 多不杂铜矿床铅同位素测试结果

Table 2 Pb isotope test results of the Duobuza copper deposit

序号	样号	测试对象	测试结果			参数计算					
			$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{208}Pb/^{204}Pb$	μ	ω	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
1	DBZ004	黄铁矿	18.570	15.628	38.749	9.50	37.17	3.79	76.47	19.53	37.82
2	DBZ019	黄铁矿	18.577	15.630	38.782	9.51	37.28	3.79	76.67	19.65	38.59
3	DBZ027	黄铁矿	18.561	15.613	38.741	9.47	37.05	3.79	74.99	18.5	37.06
4	DBZ802-337	黄铁矿	18.598	15.657	38.847	9.56	37.69	3.82	79.38	21.51	41.20
5	DBZ1502-234	黄铁矿	18.577	15.611	38.730	9.47	36.90	3.77	74.81	18.30	36.13
6	DBZ001-91	黄铜矿	18.561	15.598	38.711	9.44	36.79	3.77	73.51	17.44	35.41
7	DBZ046	花岗闪长斑岩	18.212	15.574	38.280	9.43	36.71	3.77	70.67	16.86	33.69
8	DBZ048	花岗闪长斑岩	18.227	15.587	38.322	9.46	36.93	3.78	71.95	17.73	35.04
9	DBZ052	花岗闪长斑岩	18.327	15.575	38.371	9.42	36.46	3.75	70.90	16.54	32.51
10	DBZ057	花岗闪长斑岩	17.942	15.574	37.997	9.47	37.04	3.79	70.46	17.9	34.65
11	DBZ062	花岗闪长斑岩	18.251	15.575	38.289	9.43	36.54	3.75	70.81	16.79	32.74
12	Zk1-06	花岗闪长斑岩	18.514	15.534	38.554	9.33	35.82	3.72	67.17	13.08	29.13
13	Zk2-11	花岗闪长斑岩	18.611	15.585	38.689	9.42	36.31	3.73	72.37	16.39	32.51
14	Zk2-13	花岗闪长斑岩	18.631	15.601	38.770	9.44	36.68	3.76	73.96	17.46	34.93

注: 序号 4~6 据李金祥(2008), 序号 12~14 据辛洪波等(2009)。

位素比值变化比较稳定, μ 值亦如此,反映成矿物质可能是单一来源或以一种来源占绝对优势;其他特征值具有相似的变化规律,反映来源的相似性。

3 讨论

3.1 硫的来源

单种矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 并不等同于成矿流体的总硫同位素组成,但可据矿床的矿物共生组合关系大致估计成矿流体的S同位素组成,确定成矿流体的总硫同位素组成($\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$)是应用S同位素方法探讨成矿物质来源的主要依据。

前文研究表明,多不杂铜矿床中磁铁矿-辉钨矿、黄铜矿-黄铁矿、硬石膏-黄铁矿矿物对在硫同位素分馏过程中均达到了平衡。根据4组黄铜矿-黄铁矿、3组硬石膏-黄铁矿同位素组成,通过Pinckney

等(1972)图解计算其流体的总硫同位素 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 组成(图3),发现具有地幔硫的特点($0\text{‰} \pm 3\text{‰}$)(郑永飞等,2000),表明矿床中的硫可能来自深源岩浆。

花岗岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-13.4\text{‰} \sim +28.7\text{‰}$,平均为 5.1‰ ,酸性岩的硫同位素组成明显不同于陨硫,可以是地幔岩浆分异的产物,也可以是地壳物质的部分熔融(温春齐等,2009)。由此表明,多不杂铜矿床硫同位素可能主要来自上地幔或下部地壳的深源岩浆,在花岗岩结晶分异的过程中没有发生明显的硫同位素分馏,而且具有相对均一的硫源,暗示其成矿物质来源于深部岩浆。另外,Ishihara等(2010)认为斑岩型矿床斑岩中的S与Cu的含量具有明显的正向相关性,暗示S和Cu可能为同一来源。本文硫同位素组成特征及直方图均显示矿床中S主要来源于深部岩浆,从这里也可以推断出多不杂铜矿床的Cu主要来源于深部岩浆。

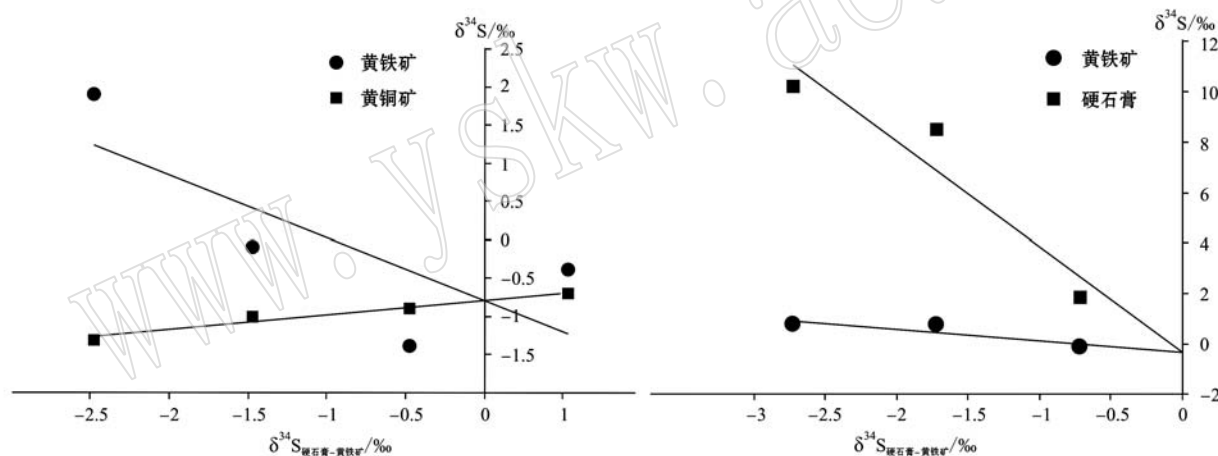


图3 多不杂铜矿床矿物对总硫同位素图解

Fig. 3 Total sulfur isotope diagram of the Duobuza copper deposit

3.2 铅的来源

Zartman等(1981)根据不同铅源区的铅同位素组成特征作出了不同源区铅的平均增长曲线,将表2中铅同位素比值投入图解,可以看到无论是矿物铅还是岩石铅,它们均位于下地壳和地幔之间,且靠近造山带演化曲线(图4),表明多不杂铜矿床铅具有壳幔混染特征。同时,Zartman等(1981)根据全世界不同构造显生宙岩石和矿床的全部铅同位素组成,划定了不同地质环境所处的独特的同位素范围,将表2中铅同位素比值投入图解(图5),可以看到绝大部分样品投影点落入成熟弧,暗示其形成的构造背景是弧环境。

朱炳泉(1998)认为钼铅的变化及钼铅与铀铅同位素组成的相互关系对于地质过程与物质来源提供了更丰富的信息,为了突出这种变化关系,他做出了铅同位素的 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ 成因分类图解(图6)。根据表2数据投图,可以看到,大部分样品位于由岩浆作用形成的上地壳与地幔混合的俯冲带铅区域,亦表明多不杂铜矿床铅同位素具有壳幔混染特征。

3.3 幔源组分参与成矿

上文分析表明多不杂铜矿床的成矿物质和成矿流体来自深源岩浆,具有壳幔混染特征,且幔源组分参与了成矿。幔源组分不仅为地壳物质熔融形成长英质岩浆提供热能,而且也为花岗质岩石成岩成矿

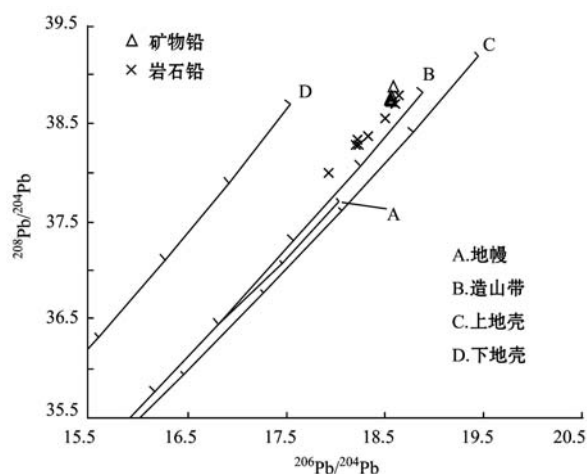


图4 铅同位素源区判别图解(底图据 Zartman 等, 1981)

Fig. 4 Lead isotope source discrimination
(after Zartman *et al.*, 1981)

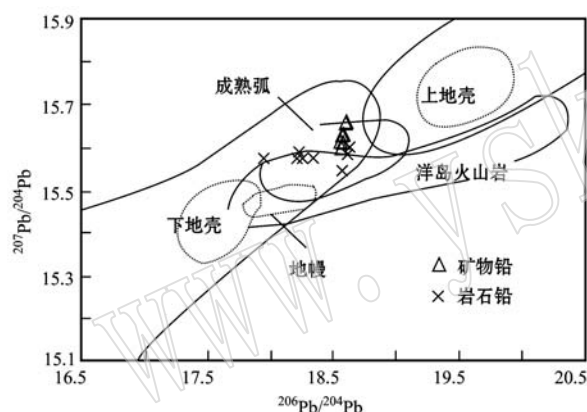
图5 铅同位素源区及构造背景判别图解
(底图据 Zartman 等, 1981)

Fig. 5 Lead isotope source region and tectonic setting
discrimination diagrams (after Zartman *et al.*, 1981)

提供物质来源。

运用正岩浆成因模式、对流成因模式以及混合成因模式等传统成矿模式无法合理解释多不杂铜矿床花岗闪长斑岩壳幔混染以及变质砂岩含矿这一特征。与传统成矿模式相比,运用“透岩浆流体成矿理论”(罗照华等, 2007, 2008)和“地幔流体作用成矿理论”(刘显凡等, 2009a, 2009b, 2010, 2012)来解释多不杂铜矿床的形成过程较之已有研究更为接近客观实际。班公湖-怒江成矿带西段构造运动-岩浆活动-流体作用强烈而且频繁,还具有长期性,经历了二叠纪裂谷和初始大洋阶段,三叠纪班公湖-怒江洋盆阶段,早-中侏罗世班公湖-怒江残留海盆地,晚侏罗

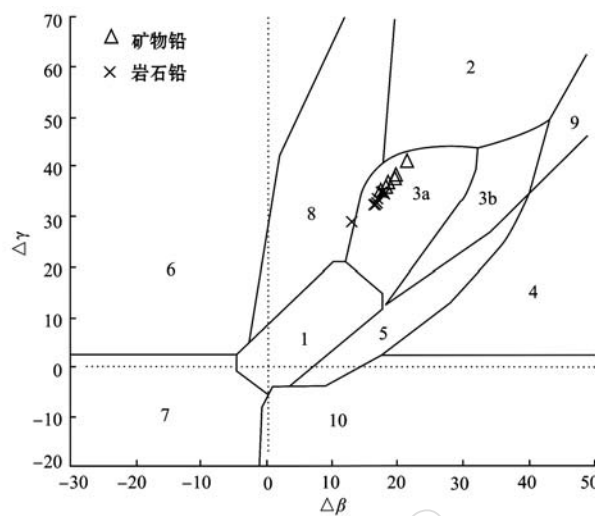
图6 铅同位素 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因分类图解
(底图据朱炳泉, 1998)

Fig. 6 Lead isotope $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ genetic classification
diagram (after Zhu Bingquan, 1998)

1—地幔源铅; 2—上地壳铅; 3—上地壳与地幔混合的俯冲带铅(a 岩浆作用, b 沉积作用); 4—化学沉积型铅; 5—海底热水作用铅; 6—中深变质作用铅; 7—深变质下地壳铅; 8—造山带铅; 9—古老页岩上地壳铅; 10—退变质铅

1—mantle source lead; 2—Upper crust lead; 3—crust mantle mixed with the subduction zone lead (3a magmatism; 3b sedimentation); 4—chemical deposition type lead; 5—submarine hot water lead; 6—plutonic metamorphism lead; 7—deep metamorphic crustal lead; 8—orogenic lead; 9—upper crust lead of old shale; 10—retrograded lead

世-白垩世双向俯冲碰撞缝合。因羌塘地块与拉萨地块之间怒江洋盆的碰撞闭合,导致了班-怒洋洋壳向南羌塘地块的俯冲作用,使得班公湖-怒江缝合带发育大规模逆冲推覆、走滑断裂以及深部地质作用。随着这一过程的进行,原始地幔逐渐向交代富集地幔转化并发生部分熔融,形成硅不饱和的基性岩浆、碱性岩浆以及具熔浆性质的含矿地幔流体。它们与板块俯冲作用造成的富铜钙碱性熔浆溶解在一起,构成了多相熔浆,随后驱动地幔底侵,使热点升高,导致深部地壳熔融形成富硅的长英质岩浆,随后进一步溶解,构成了壳幔混染的多相熔浆。它们顺着深大断裂通道上升侵位到地壳浅部由于压力降低,流体从岩浆中溶离出来结晶成岩形成壳幔混染的花岗闪长斑岩。同时,沿通道进入有利赋矿的岩石界面或流动条件不好的次级裂隙中,并不断地与变质砂岩进行相互作用引发壳幔之间物质和能量的交换,促进壳幔物质混染叠加成矿,进而形成变质砂岩型矿体。

4 结论

(1) 通过对多不杂铜矿床的野外实地调查, 结合硫铅同位素地球化学示踪研究, 初步揭示了地幔流体作用及其演化引发壳幔物质混染叠加成矿的成因机制。

(2) 深部地质过程引发了地壳重熔, 进而幔源岩浆或含矿地幔流体与地壳重熔形成的长英质岩浆溶解在一起并随其结晶过程作用于岩石而致花岗闪长斑岩具有壳幔混染甚至成矿特征。

(3) 含矿地幔流体不仅可以伴随富硅碱岩浆结晶成岩过程进行同步交代和能量转换蚀变成矿, 而且还能从岩浆或岩体中分离出来, 与变质砂岩进行充填交代, 从而导致变质砂岩含矿。

致谢 野外工作中得到费光春博士、周玉博士的帮助, 成文过程中和赵甫峰博士、周雄博士有诸多有益的探讨, 论文修改过程中匿名评审专家提出了宝贵的建议, 在此一并致谢!

References

- Fei Guangchun, Zhou Xiong, Duo Ji, *et al.* 2015. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of ore-bearing granodiorite porphyry in the Duobuza porphyry copper deposit, Tibet[J]. *Journal Geological Society of India*, 86(2): 223~232.
- Ishihara Shunso and Chappell Bruce W. 2010. Petrochemistry of I-type magnetite-series granitoids of the northern Chile, Highland Valley, southern BC, Canada, Erdenet mine, Mongolia, Dexing mine, China, Medet mine, Bulgaria, and Ani mine, Japan[J]. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 61(11/12): 383~415.
- Li Jinxiang, Li Guangming, Qin Kezhang, *et al.* 2011a. High-temperature magmatic fluid exsolved from magma at the Duobuza porphyry copper-gold deposit, Northern Tibet [J]. *Geofluids*, 11: 134~143.
- Li Jinxiang, Li Guangming, Qin Kezhang, *et al.* 2011b. Mineralogy and mineral chemistry of the Cretaceous Duolong Gold-Rich porphyry copper deposit in the Bangongco Arc, Northern Tibet[J]. *Resource Geology*, 62(1): 19~41.
- Li Jinxiang, Qin Kezhang, Li Guangming, *et al.* 2011c. Magmatic-hydrothermal evolution of the Cretaceous Duolong gold-rich porphyry copper deposit in the Bangongco metallogenic belt, Tibet: Evidence from U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41: 525~536.
- Li Guangming, Li Jinxiang, Qin Kezhang, *et al.* 2007. High temperature, salinity and strong oxidation ore-forming fluid at Duobuza gold-rich porphyry copper deposit in the Bangonghu tectonic belt, Tibet: Evidence from fluid inclusions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 935~952(in Chinese with English abstract).
- Li Jinxiang. 2008. Geochronology, petrology and metallogenesis of strong oxidation magma-hydrothermal fluid of Duobuza gold-rich porphyry copper deposit in Bangonghu belt, Northern Tibet[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences(in Chinese).
- Li Yubin, Duo Ji, Zhong Wanting, *et al.* 2012. An exploration model of the Duobuza porphyry Cu-Au deposit in Gaize Country, Northern Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 48(2): 274~287(in Chinese with English abstract).
- Liu Xianfan, Cai Yongwen, Lu Qiuxia, *et al.* 2010. Actual traces of mantle fluid from alkali-rich porphyries in western Yunnan, and associated implications to metallogenesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 114~136(in Chinese with English abstract).
- Liu Xianfan, Chu Yating, Lu Qiuxia, *et al.* 2012. Deep geological processes on Laowangzhai gold deposit in Yunnan: Evidence from petrography and element geochemistry[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(4): 1 026~1 038(in Chinese with English abstract).
- Liu Xianfan, Zhao Fufeng, Tao Zhuan, *et al.* 2009a. Mantle fluid metasomatism in Jinhe intrusive body of Jianchuan, Yunnan Province, and its ore-forming implication[J]. *Mineral Deposits*, 28(2): 185~194(in Chinese with English abstract).
- Liu Xianfan, Zhu Laiming, Zhao Fufeng, *et al.* 2009b. Petrography and geochemistry of mineralization for carbonatite in Yangjiaba polymetal field of South Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1 216~1 224(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua, Lu Xinxiang, Guo Shaofeng, *et al.* 2008. Metallogenic systems on the transmagmatic fluid theory[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2 669~2 678(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, Lu Xinxiang, *et al.* 2007. Metallogeny by trans-magmatic fluids-theoretical analysis and field evidence[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 165~183(in Chinese with English abstract).
- Pinckney D M and Rafter T A. 1972. Fractionation of sulfur isotopes during ore deposition in the Upper Mississippi Valley zinc-lead district [J]. *Economic Geology*, 67(3): 315~328.
- Qu Xiaomin and Xin Hongbo. 2006. Ages and tectonic environment of the Bangong Co porphyry copper belt in western Tibet, China[J].

- Geological Bulletin of China, 25(4): 792~799(in Chinese with English abstract).
- She Hongquan, Li Jinwen, Feng Chengyou, *et al.* 2006. The high-temperature and hypersal in fluid inclusions and its implications to the metallogenesis in Duobuza porphyry copper deposit, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 80(9): 1434~1447(in Chinese with English abstract).
- She Hongquan, Li Jinwen, Ma Dongfang, *et al.* 2009. Molybdenite Re-Os and SHRIMP zircon U-Pb dating of Duobuza porphyry copper deposit in Tibet and its geological implications[J]. Mineral Deposits, 28(6): 737~746(in Chinese with English abstract).
- Tian Yi. 2009. Study on geochemical characteristics of copper(gold), iron deposits in the western section of Bangonghu-Nujiang metallogenic belt, Tibet[D]. Changchun: Jilin University(in Chinese).
- Wang Hongxing. 2013. The comparative study on deposit geochemical characteristics of Gaerqiong, Duobuza copper-gold deposit, Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese).
- Wen Chunqi and Duo Ji. 2009. Research Methods of Mineral Deposit [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press(in Chinese).
- Xin Hongbo, Qu Xiaoming, Wang Ruijiang, *et al.* 2009. Geochemistry and Pb, Sr, Nd isotopic features of ore-bearing porphyries in Bangong Lake porphyry copper belt, western Tibet[J]. Mineral Deposits, 28(6): 785~792(in Chinese with English abstract).
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics-the model[J]. Tectonophysics, 75(1~2): 135~162.
- Zheng Yongfei and Chen Jiangfeng. 2000. Stable Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Zhou Xiong, Fei Guangchun, Zhou Yu, *et al.* 2015. Chronology and Crust-Mantle Mixing of Ore-forming Porphyry of the Bangongco: Evidence from Zircon U-Pb Age and Hf Isotopes of the Naruo Porphyry Copper-Gold Deposit[J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 89(1): 217~228.
- Zhu Bingquan. 1998. The Theory and Application of Isotope System in the Earth Science-on the Crust Mantle Evolution in China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Zhu Xiangping, Chen Huaan, Ma Dongfang, *et al.* 2012. Geology and alteration of the Duobuza porphyry copper-gold deposit in Tibet[J]. Geology and Exploration, 48(2): 199~206(in Chinese with English abstract).
- 岩石学报, 23(5): 935~952.
- 李金祥. 2008. 班公湖带多不杂超大型富金斑岩铜矿床的成岩成矿年代学、岩石学及高氧化岩浆-流体-成矿作用[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所.
- 李玉彬, 多吉, 钟婉婷, 等. 2012. 西藏改则县多不杂斑岩型铜金矿床勘查模型[J]. 地质与勘探, 48(2): 274~287.
- 刘显凡, 蔡永文, 卢秋霞, 等. 2010. 滇西地区富碱斑岩中地幔流体作用踪迹及其成矿作用意义[J]. 地学前缘, 17(1): 114~136.
- 刘显凡, 楚亚婷, 卢秋霞, 等. 2012. 云南老王寨金矿的深部地质过程-来自显微岩相学和元素地球化学的证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(4): 1026~1038.
- 刘显凡, 赵甫峰, 陶专, 等. 2009a. 云南剑川金河岩体中地幔流体交代特征及其成矿作用意义[J]. 矿床地质, 28(2): 185~194.
- 刘显凡, 朱赖民, 赵甫峰, 等. 2009b. 南秦岭杨家坝多金属矿区中的碳酸岩岩相学及成矿地球化学[J]. 岩石学报, 25(5): 1216~1224.
- 罗照华, 卢欣祥, 郭少丰, 等. 2008. 透岩浆流体成矿体系[J]. 岩石学报, 24(12): 2669~2678.
- 罗照华, 莫宣学, 卢欣祥, 等. 2007. 透岩浆流体成矿作用-理论分析与野外证据[J]. 地学前缘, 14(3): 165~183.
- 曲晓明, 辛洪波. 2006. 藏西班公湖斑岩铜矿带的形成时代与成矿构造环境[J]. 地质通报, 25(4): 792~799.
- 余宏全, 李进文, 丰成友, 等. 2006. 西藏多不杂斑岩铜矿床高温高盐度流体包裹体及其成因意义[J]. 地质学报, 80(9): 1434~1447.
- 余宏全, 李进文, 马东方, 等. 2009. 西藏多不杂斑岩铜矿床辉钼矿 Re-Os 和锆石 U-Pb SHRIMP 测年及地质意义[J]. 矿床地质, 28(6): 737~746.
- 田毅. 2009. 西藏班公湖-怒江成矿带西段铜(金)、铁矿床岩石地球化学特征研究[D]. 长春: 吉林大学硕士论文.
- 王红星. 2013. 西藏杂尔穷、多不杂铜金矿床地球化学特征对比研究[D]. 成都: 成都理工大学硕士论文.
- 温春齐, 多吉. 2009. 矿床研究方法[M]. 成都: 四川科学技术出版社.
- 辛洪波, 曲晓明, 王瑞江, 等. 2009. 藏西班公湖斑岩铜矿带成矿斑岩地球化学及 Pb、Sr、Nd 同位素特征[J]. 矿床地质, 28(6): 785~792.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用-兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社.
- 祝向平, 陈华安, 马东方, 等. 2012. 西藏多不杂斑岩铜金矿床地质与蚀变[J]. 地质与勘探, 48(2): 199~206.

附中文参考文献

- 李光明, 李金祥, 秦克章, 等. 2007. 西藏班公湖带多不杂超大型富金斑岩铜矿的高温高盐高氧化成矿流体: 流体包裹体证据[J].