移动阅读

高轲，宋扬，刘治博，等，2023. 西藏拿若铜(金)矿床硫、铅同位素组成及成矿物质来源[J]. 沉积与特提斯地质，43(1)：145−155. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.05002

GAO K，SONG Y，LIU Z B，et al.，2023. Sulfur and lead isotope composition and tracing for sources of ore-forming materials in the Naruo Cu(Au) deposit, in Tibet[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology，43(1)：145−155. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.05002

西藏拿若铜（金）矿床硫、铅同位素组成及成矿物质来源

高　轲[1]，宋　扬[2]，刘治博[2]，杨欢欢[2]，王艺云[1]

（1. 中国地质调查局成都地质调查中心，四川　成都　610081；2. 中国地质科学院矿产资源研究所，北京　100037）

摘要：为探讨多龙矿集区拿若铜（金）矿床的成矿物质来源，研究矿床成矿机制，本文在详细的野外地质调查和矿石学研究基础上对矿石样品进行硫和铅同位素分析，并对成因意义进行讨论。研究结果表明，17 件金属硫化物的 $\delta^{34}S$ 值变化于−2.3‰~2.3‰之间，均值为−0.1‰；其中 13 件黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值变化范围为−2.3‰~2.3‰，均值为 0.2‰；4 件黄铜矿的 $\delta^{34}S$ 值变化范围为−1.5~−0.8‰，均值为−1.1‰。$\delta^{34}S$ 值频率直方图总体具有塔式分布特征，平均值接近于零，具幔源硫特征。金属硫化物的 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 介于 38.209~38.854 之间，平均值为 38.635；$^{207}Pb/^{204}Pb$ 变化范围为 15.541~15.665，平均值为 15.605；$^{206}Pb/^{204}Pb$ 为 17.942~18.580，平均值为 18.461，具有正常铅的特征。铅同位素 μ 值变化范围为 9.40~9.57，均小于 9.58，表明矿床铅主要来自幔源物质。拿若矿床的硫和铅同位素特征与多龙矿集区斑岩型矿床类似，成矿物质主要来源于岛弧环境下幔源物质，可能存在壳源物质的混入。

关　键　词：硫同位素；铅同位素；成矿物质来源；拿若铜(金)矿；班怒成矿带

中图分类号：P618.41　　**文献标识码：**A

Sulfur and lead isotope composition and tracing for sources of ore-forming materials in the Naruo Cu(Au) deposit, in Tibet

GAO Ke[1]，SONG Yang[2]，LIU Zhibo[2]，YANG Huanhuan[2]，WANG Yiyun[1]

（1. *Chengdu Center*, *China Geological Survey*, *Chengdu* 610081, *China*；2. *Institute of Mineral Resources*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *China*）

Abstract：On the basis of detailed field geological survey and mineralogical research, in order to discuss the source of ore-forming materials from the Naruo copper (gold) deposit in the Duolong ore-concentrated area and study the metallogenic mechanism, we analyzed the sulfur and lead isotope from the orebody, discussed the significance. The results show that the $\delta^{34}S$ values of the seventeen metal sulfides vary from −2.3‰ to 2.3‰, with an average of 0.13‰. The $\delta^{34}S$ values of thirteen pieces of pyrite vary from −2.3‰ to 2.3‰, with an average of 0.17‰. $\delta^{34}S$ values of four pieces of chalcopyrite vary from −1.5‰ to 0.8‰, with an average of −1.1‰. The $\delta^{34}S$ histogram is distributed approximately in a tower shape, with an average nearly zero, which indicates a mantle source. $^{208}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$, $^{206}Pb/^{204}Pb$ isotopic composition of metal sulfides respectively are 38.209~38.854, 15.541~15.665 and 17.942~18.58, with average of 38.635, 15.605 and 18.641. These data show the normal lead characteristics. Lead isotope μ values range from 9.40 to 9.57, less than 9.58. The feature shows that lead mainly comes from mantle material. Sulfur and lead isotopic

收稿日期： 2020-10-21；**改回日期：** 2021-04-14；**责任编辑：** 黄春梅

作者简介： 高轲（1987—），男，博士，主要从事矿床学与成矿规律研究。Email：gaokely@163.com

资助项目： 本文受国家自然科学基金（41702080），中国地质调查局项目（DD20190167，DD20190147），国家重点研发计划深地资源开采项目（2018YFC0604103）联合资助

characteristics of theNaruo deposit are identical with those of other porphyry deposits in the Duolong ore-concentrated area. The ore-forming materials of theNaruo deposit was mainly derived from mantle materials in an island arc environment, and there may be a mix of shell-derived materials.

Key words：sulfur isopote；lead isotope；ore-forming source；Naruo Cu(Au) deposit；Bannu metallogenic belt

0 引言

同位素地球化学对示踪成矿物质来源具有非常重要的作用(zhang et al., 2011; Donoghue et al., 2014; 张良等, 2014)，其中硫同位素是成矿物质来源的重要指示剂，可以有效确定成矿物质中硫的来源(Chinnasamy and Mishra, 2013)。此外，除放射性和混合作用影响外，铅同位素组成在矿质运移和沉淀过程中基本保持不变(沈渭洲和黄耀生, 1987)，且黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和黄铜矿等基本不含 U、Th 等放射成因铅的母体放射性元素(张静等, 2009)。因此，硫、铅同位素研究能够为探讨矿床成因提供重要证据(张静等, 2009)。

班公湖–双湖–怒江–昌宁–孟连对接带是青藏高原中部一条重要的原古特提斯大洋自北向南后退式俯冲消亡的巨型增生杂岩带(潘桂棠等, 2020)，而班公湖–怒江成矿带(简称班怒成矿带)是这一对接带的组成部分。该成矿带发育大量矿产，其中以多龙矿集区为代表发育斑岩型、斑岩–浅成低温热液型及隐爆角砾岩型矿床。多龙矿集区是班怒成矿带上最重要的矿集区，而拿若矿床是该矿集区的重要组成部分。拿若矿床于 2013 年开始开展商业性勘查，现已探明铜资源量 243 万吨，伴生金 76 吨，达到超大型矿床规模。该矿床为斑岩型-隐爆角砾岩型矿床，以斑岩型矿体为主。前人对拿若矿床的成岩成矿时代、地球化学特征等方面进行了研究，确定成岩与成矿关系紧密(吕丽娜, 2012; 丁帅, 2014; 祝向平等, 2015)。硫和铅同位素研究作为探讨成矿物质来源和源区背景最有效的方法之一(Zhang et al., 2011; Donoghue et al., 2014; 张良等, 2014)，前人对拿若矿床的硫、铅同位素研究仅有黄铁矿(吕丽娜, 2012)，且样品数量非常少，亟需更多种硫化物和样品数量的支撑。笔者在详细的野外地质调查和岩芯编录的基础上，通过开展金属硫化物的硫、铅同位素特征研究，对探讨矿床成矿物质来源及源区特征具有非常重要的意义。

1 区域地质背景

班怒成矿带包括拉萨地体北缘和南羌塘保山地体南缘及班公湖–怒江缝合带，多龙矿集区位于班公湖–怒江缝合带的北缘，南羌塘–保山地体南缘(图 1a)。

矿集区出露地层有上白垩统阿布山组(K_2a)、下白垩统美日切错组(K_1m)、中—下侏罗统色哇组($J_{1\text{-}2}s$)、下侏罗统曲色组(J_1q)、上三叠统日干配错组(T_3r)。阿布山组主要分布于矿集区西北侧，岩性以浅紫红色砂砾岩和砂岩为主；美日切错组分布于矿集区北侧和西南侧，沿 F10 断层展布，岩性主要为紫红色安山岩、安山玢岩；色哇组分布于矿集区北侧，岩性为灰色—灰白色长石石英砂岩和岩屑砂岩及深灰色泥质板岩；曲色组岩性为浅灰绿色—灰褐色厚层状长石石英砂岩；日干配错组分布于东北侧，岩性为厚层状灰岩。

矿集区内岩浆活动强烈，岩性主要包括酸性的花岗斑岩、花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩和中性的安山(玢)岩。区内各矿床的含矿岩体为花岗闪长斑岩，成岩时代集中于 127~119 Ma，与其他侵入岩形成时代相近；辉钼矿 Re-Os 定年结果显示各矿床成矿时代集中于 119~118 Ma，与成岩年龄接近(孙振明等, 2015)。矿集区内主要发育 4 个方向的推测断层，分别为近东西向北倾逆断层(F2)、北东向走滑断层(F10)、北西向走滑断层(F7)和近东西向南倾逆断层，控矿断层主要为北东向 F10 断层和近东西向 F2 断层。

2 矿区及矿床地质特征

2.1 矿区地质

矿区出露地层为中—下侏罗统色哇组(图 2)，岩性为长石石英砂岩、岩屑砂岩和泥质板岩，其中长石石英砂岩是主要的含矿岩石。

矿区岩浆岩主要为花岗闪长斑岩，呈岩株和岩瘤状产出，岩体分布于拿若沟谷第四系覆盖区域的两侧和矿区北侧(图 2)。祝向平等(2015)将矿区北侧的不含矿斑岩体与钻孔中两种含矿斑岩体划

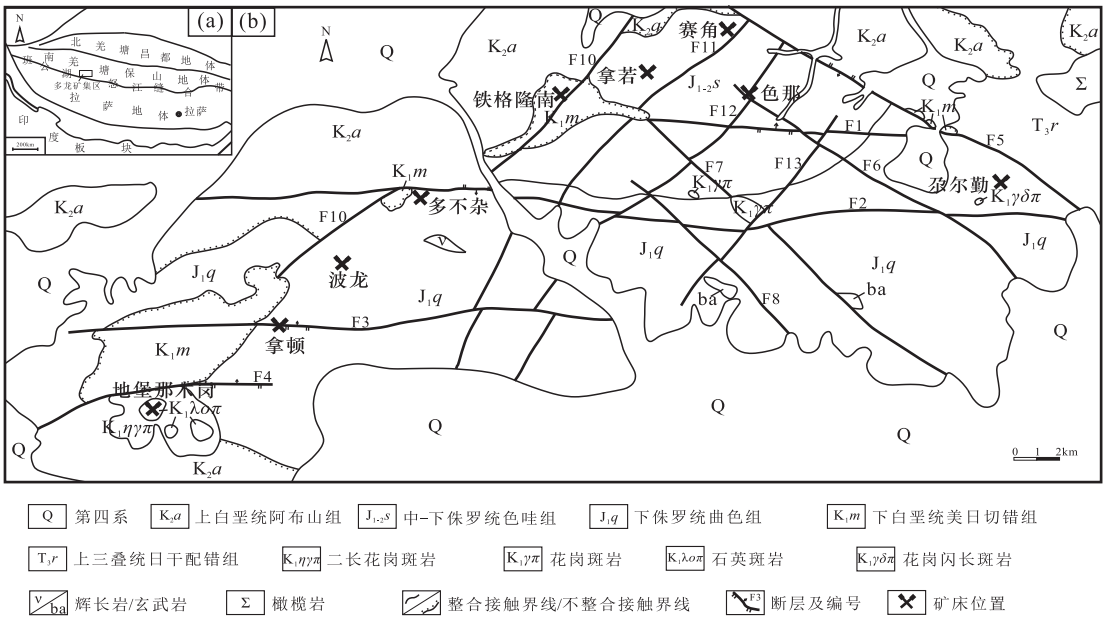


图 1　西藏多龙矿集区地质图（据杨超等，2014；Xu et al., 2015）

Fig. 1　Geological map of the Duolongoredistrict in Tibet

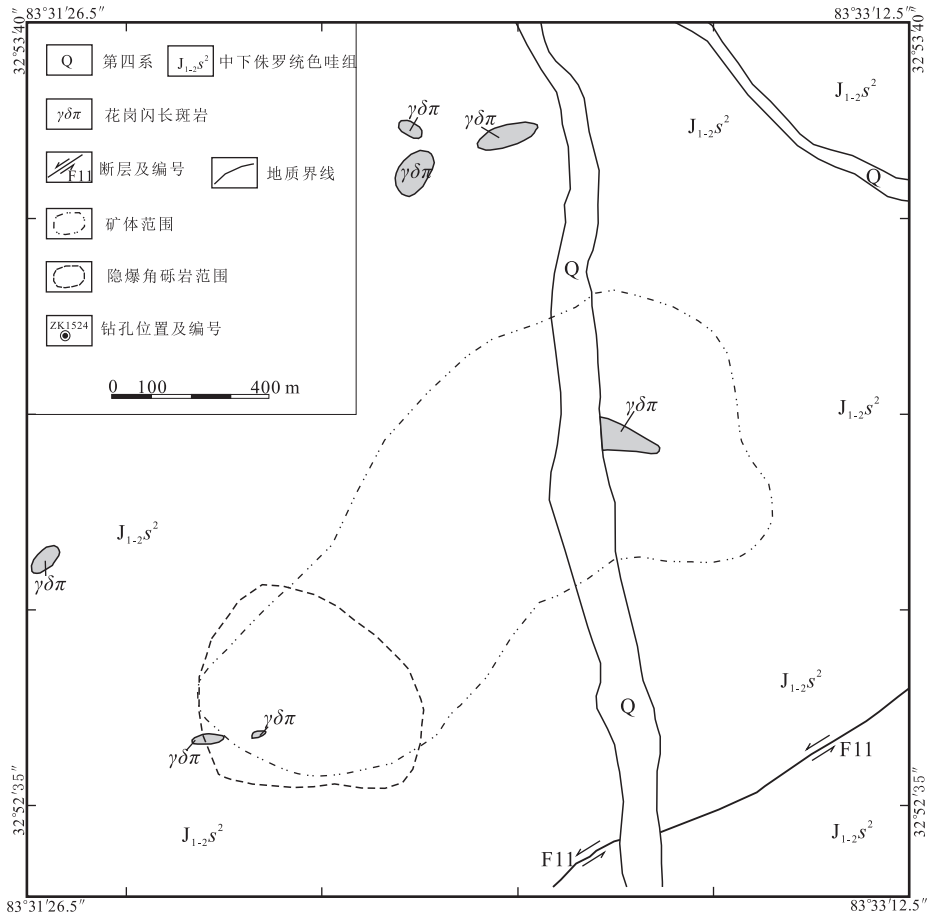


图 2　拿若铜（金）矿区地质图（高轲等，2016a，b）

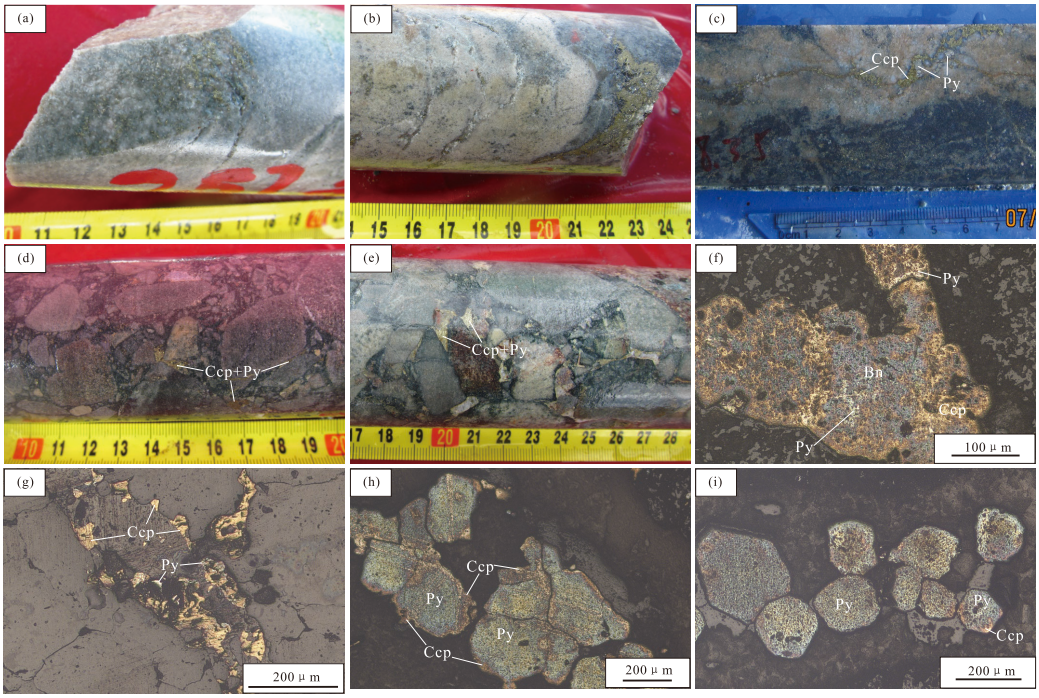
Fig. 2　Geological map of the Naruo copper（gold）deposit

分为 3 期花岗闪长斑岩侵位，3 期岩体的形成时代在误差内一致。3 期岩体的矿物成分相同，但含量有所差异，笔者更认同以上 3 期岩体属于同期岩浆作用不同分异阶段的产物。早阶段含矿岩体斑晶主要为斜长石、石英、钾长石、角闪石和少量黑云母等，含量约占 45%。石英斑晶大小主要介于 1~5 mm 之间，约占斑晶含量的 65%；斜长石斑晶含量次之，约占 30%，大小主要为 2~5 mm；钾长石和黑云母仅在深部岩体中可见，含量较少。基质成分主要为长英质矿物，以石英、斜长石为主。晚阶段含矿岩体斑晶主要为斜长石、石英和角闪石，黑云母含量减少。斑晶含量约占 35%，且斑晶粒径变小。石英斑晶大小主要为 1~4 mm，约占斑晶含量的 60%；斜长石斑晶约占 30%，斑晶大小为 2~4 mm；基质同为长英质矿物，以石英、斜长石为主(祝向平等，2015)。最晚期花岗闪长斑岩不含矿，与成矿无关。矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄为 117.62±2.3 Ma(丁帅，2014)，成矿年龄与多龙矿集区内其他矿床相近(佘宏全等，2009；祝向平等，2011)，成岩与成矿皆为早白垩世。矿区构造作用不强，南东侧存在一条北东向平移断层，未穿过矿体。破碎带中未发现明显铜矿化和岩体侵位，因此推测构造破碎可能发生在成岩成矿之后。

2.2 矿床地质

拿若斑岩型铜(金)矿床已探明铜资源量达 243 万吨，平均品位 0.38%；金以伴生状态产出，资源量达 76 吨，平均品位 0.19 g/t。成矿母岩是花岗闪长斑岩，矿体主要产于斑岩和长石石英砂岩中，少量赋存于隐爆角砾岩中，以砂岩中赋存的矿体最多(丁帅，2014)。矿体在平面上呈长条状分布，长度达 1.4 km，宽度为 0.6 km(见图 2)。

矿体厚度变化总体以 00 号、07 号和 08 号勘探线向北东和南西侧减薄，总体反映了矿体的走向。矿石类型有浸染状矿石、脉状矿石、角砾状矿石等(图 3)。矿石结构有自形结构、交代结构、碎裂结构、填隙结构和固溶体分离结构等(图 3)。矿体中金属矿物主要为黄铜矿、黄铁矿，见少量辉钼矿、赤铁矿、磁铁矿、蓝辉铜矿、铜蓝等，以原生矿物为主。其中黄铁矿在金属矿物中占比达 65% 以上，其次为黄铜矿，其他金属矿物总含量不到 5%。非金属矿物主要为斜长石、石英、方解石和绢云母，可见少量钾长石、绿泥石、绿帘石、石膏、黑云母等。



a. 浸染状矿石；b、c. 脉状矿石；d、e. 角砾状矿石；f. 固溶体分离结构；g. 填隙结构；h. 交代结构；i. 自形结构；Ccp—黄铜矿；Py—黄铁矿；Bn—斑铜矿。

图 3 拿若矿床矿石组构

Fig. 3 ore texture and structure of Naruo deposit

矿床围岩蚀变强烈，地表蚀变较单一，主要为青磐岩化和角岩化，以青磐岩化分布范围最广。岩体下部存在钾硅酸盐化、绢云母化等蚀变。钾硅酸盐化分布范围较小，以细脉状和弥漫状钾长石和黑云母为主要特征；绢云母化主要表现为长石类矿物绢云母化。矿区围岩蚀变存在叠加现象并且具有一定分带特征，表现为以钾硅酸盐化为中心向边部依次为绢云母化、青磐岩化和角岩化(高轲等，2016b)。

3　样品采集与分析方法

此次研究测试的 17 件样品均采自岩芯，所有样品均为矿体中原生金属硫化物矿石。其中，8 件样品仅完成 S 同位素测试，9 件样品完成 S、Pb 同位素测试。黄铁矿多来自石英+黄铁矿±黄铜矿脉，少量来自团块状石英+黄铁矿；黄铜矿主要来自团块状石英+黄铁矿+黄铜矿，少量来自石英+黄铁矿+黄铜矿脉；采样位置为样品编号所示的钻孔号+孔深(图 3、表 1)。

单矿物挑选由河北省地质测绘院岩矿实验测试中心完成，矿石经粉碎后过筛，在双目镜下挑选结晶较好的黄铜矿和黄铁矿，纯度大于 98%。硫、铅同位素测试由北京核工业地质分析测试研究中心完成。硫同位素由 MAT-251 同位素质谱仪进行

表 1　拿若矿床与多龙矿集区矿床硫同位素组成

Table 1　Sulfur isotope composition of sulfides from Naruo deposit

矿床	样品编号	矿物组合	测试对象	$\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$/‰	资料来源
拿若	NR0717-403.1	石英+黄铁矿	黄铁矿	0.3	本文
	NR0001-181.92		黄铁矿	−0.5	
	NR1608-422		黄铁矿	1.1	
	ZK3932-452		黄铁矿	0.9	
	NR0804-142.1		黄铁矿	0	
	NR0001-170		黄铁矿	−0.6	
	NR1609-342	石英+黄铁矿+黄铜矿	黄铁矿	−0.7	
	ZK3116-395.9		黄铁矿	−2.3	
	ZK3116-367.85		黄铁矿	2.3	
	NR0708-401.8		黄铜矿	−1.5	
	NR3116-303		黄铜矿	−1.0	
	ZK3924-301.5		黄铜矿	−0.8	
	ZK3916-495.5		黄铁矿	−1.9	
	NR3116-271.8		黄铜矿	−1.1	
	ZK3124-482.8	黄铁矿+黄铜矿+方解石	黄铁矿	0.8	
	ZK3116-456.9		黄铁矿	1.9	
	ZK3924-266		黄铁矿	0.9	
			黄铁矿	4.2~5.6	吕丽娜，2012
多不杂			黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿	−1.48~2.1	李金祥，2008；肖剑波，2012
			石膏	1.9~12.52	
波龙			黄铁矿、黄铜矿	−2.7~2.3	周玉等，2013；郭硕，2013
			石膏	0.8~3.5	
尕尔勤			黄铁矿、黄铜矿	−1.1~4.8	吕丽娜，2012
色那			黄铁矿、黄铜矿	2.6~6.2	
铁格山			黄铁矿、磁黄铁矿	0.9~2.1	
铁格隆南			金属硫化物	−9.8~0.8	王艺云等，2017；Lin et al., 2017，王艺云，2018
			石膏	0.3~6.8	
拿厅			金属硫化物	−8.8~-3.1	李玉彬等，2019
			硬石膏	10.9~13.8	
拿顿			金属硫化物	−7.1~0.7	王松等，2017

测定，采用 VCDT 国际标准，分析精度为±0.2‰；铅同位素比值利用 ISOTOPE-T 热电离质谱仪测定，$^{208}Pb/^{204}Pb$、$^{207}Pb/^{204}Pb$、$^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值误差小于 0.05‰。

4 测试结果

拿若矿床金属硫化物的硫同位素测试结果见表 1。17 件样品的 $\delta^{34}S$ 值变化范围为－2.3‰~2.3‰，平均值为－0.1‰。其中，13 件黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 值变化范围为－2.3‰~2.3‰，均值为 0.2‰；4 件黄铜矿的 $\delta^{34}S$ 值变化范围为－1.5‰~－0.8‰，平均值为－1.1‰。拿若矿床与矿集区内的多不杂（－1.5‰~2.1‰，均值 0.02‰）、波龙（－2.7‰~2.3‰，均值－0.9‰）、尕尔勤（－1.1‰~4.8‰，均值 2.07‰）、铁格山（0.9‰~2.1‰，均值 1.51‰）等斑岩型矿床金属硫化物的 $\delta^{34}S$ 值特征类似，均介于地幔硫和岩浆硫的范围（±3‰），仅个别数据大于 3‰（表 1）。色那与铁格隆南矿床的 $\delta^{34}S$ 值与拿若有所区别，色那矿床的 $\delta^{34}S$ 值变化范围介于 2.6‰~6.2‰之间，11 个样品数据中仅有 1 个数据在±3‰内；铁格隆南矿床为斑岩-浅成低温热液矿床，金属硫化物的 $\delta^{34}S$ 值介于－9.8‰~0.8‰之间，与矿集区其他矿床差别较大。前人对拿若研究获得的硫同位素数据介于 4.2‰~5.6‰之间，均值为 5.08‰（表 1）。波龙矿床中石膏的 $\delta^{34}S$ 值为 0.8‰~3.5‰，与金属硫化物接近；多不杂矿床中石膏的 $\delta^{34}S$ 值相对较高。

拿若矿床铅同位素测试结果见表 2。9 件样品的铅同位素组成 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 介于 38.209~38.854 之间，平均值为 38.635，极差为 0.645；$^{207}Pb/^{204}Pb$ 变化范围为 15.541~15.665，平均值为 15.605，极差为 0.124；$^{206}Pb/^{204}Pb$ 为 17.942~18.580，平均值为 18.461，极差为 0.638，以上比值变化范围小，显示其具有正常铅的特征。波龙矿床的铅同位素组成 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 介于 38.673~38.780 之间，极差为 0.107；$^{207}Pb/^{204}Pb$ 变化范围为 15.485~15.625，极差为 0.140；$^{206}Pb/^{204}Pb$

表 2 拿若矿床金属硫化物铅同位素组成

Table 2 Lead isotope composition of sulfides from Naruo deposit

矿床	样品编号	样品名称	$^{208}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{206}Pb/^{204}Pb$	μ	资料来源
拿若	NR3116-303	黄铜矿	38.854	15.665	18.58	9.57	本文
	NR0717-403.1	黄铁矿	38.663	15.604	18.543	9.46	
	NR0001-181.92	黄铁矿	38.588	15.587	18.421	9.44	
	NR1608-422	黄铁矿	38.685	15.614	18.543	9.48	
	NR0804-142.1	黄铁矿	38.739	15.628	18.556	9.50	
	NR0001-170	黄铁矿	38.209	15.541	17.942	9.40	
	NR0708-401.8	黄铜矿	38.633	15.594	18.528	9.44	
	NR3116-271.8	黄铜矿	38.642	15.604	18.483	9.46	
	NR1609-342	黄铁矿	38.699	15.61	18.551	9.47	
		黄铁矿	38.469~38.652	15.594~15.613	18.043~18.46	9.46~9.52	吕丽娜，2012
波龙		黄铁矿、花岗闪长斑岩	38.673~38.780	15.485~15.625	17.068~18.701	9.42~9.50	周玉等，2013
多不杂		花岗闪长斑岩、黄铁矿	37.997~38.782	15.574~15.628	17.942~18.631	9.33~9.51	李丹，2012；辛洪波等，2009；何阳阳等，2013
铁格隆南		花岗闪长斑岩、硫化物	37.926~39.007	15.529~15.707	17.959~18.681		王艺云等，2017；王艺云，2018
铁格山		黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿	38.564~39.356	15.503~15.726	17.941~18.743	9.32~9.68	李胜荣等，2005

为 17.068~18.701, 极差为 1.653。其他矿床与波龙、拿若矿床的铅同位素组成类似, 极差较小, 变化范围符合正常铅的特征。

5　讨论

5.1　硫的来源

在平衡条件下, 硫的重同位素更倾向于富集于具有较强硫键的化合物中, 由高价到低价 $\delta^{34}S$ 值依次降低, 因此各种含硫原子团在金属硫化物中富集 $\delta^{34}S$ 的顺序为: 辉钼矿＞黄铁矿＞闪锌矿(磁黄铁矿)＞黄铜矿＞铜蓝＞方铅矿＞辰砂＞辉铜矿(辉锑矿)＞辉银矿(陈俊和王鹤年, 2005)。拿若矿床中金属硫化物成分比较简单, 主要为黄铁矿和黄铜矿, 斑铜矿、辉钼矿和蓝辉铜矿含量非常少。17 件金属硫化物的 $\delta^{34}S$ 值中黄铁矿均值为 0.2‰, 黄铜矿均值为－1.1‰, 整体具有黄铁矿＞黄铜矿的特征, $\delta^{34}S$ 的含量大小与硫化物富集顺序一致, 说明拿若矿床硫同位素分馏基本达到平衡状态(陈俊和王鹤年, 2005)。

杨竞红等(1992)总结大量矿床资料认为, 根据硫来源和同位素组成特征分为三类: 塔式分布的陨石 ^{34}S 值变化范围窄(－6‰~6‰), 极差一般小于 5‰; 弥散式分布的海水硫酸盐 ^{34}S 值分散且变化范围宽(－13‰~35‰), 沉积成因; 过渡式分布的混合型 ^{34}S 值一般介于－10‰~10‰之间, 反映多期成矿作用的叠加。拿若矿床的 $\delta^{34}S$ 介于－2.3‰~2.3‰之间, 与塔式分布的陨石 ^{34}S 值变化特征吻合(图 4a), 与斑岩型矿床硫同位素组成(－6.2‰~6.5‰)(杨竞红等, 1992)特征一致(图 4b)。前人对矿集区内的波龙、多不杂、铁格隆南等矿床开展了硫同位素研究, 拿若矿床的硫同位素特征值与其他矿床基本一致, 说明矿床硫来源相似。硫同位素方法探讨成矿物质来源的前提是要确定总硫同位素组成, 单种硫化物的 $\delta^{34}S$ 无法准确获得成矿流体的总硫同位素组成。根据矿物共生组合及相对含量, 可获得总硫同位素的近似值。拿若矿床中石膏、辉钼矿等其他硫化物含量非常少, 因此黄铁矿与黄铜矿的 $\delta^{34}S$ 的平均值－0.13‰近似代表矿液总硫同位素值, 该值接近于零, 显示地幔硫的特点(0±3‰)(Chaussidon et al., 1989), 表明矿床金属硫化物的硫来自深源岩浆。

表 1 数据显示, 区内其他矿床金属硫化物与拿若矿床的 $\delta^{34}S$ 值基本一致, 大部分数据范围介于－3‰~3‰之间, 具有地幔硫特征, 与岩浆作用有关。色那矿床的 $\delta^{34}S$ 值位于 2.6‰~6.2‰之间, 与岩浆作用有关, 存在多期叠加成矿的可能。吕丽娜(2012)对拿若的黄铁矿开展过少量硫同位素研究, 获得的 $\delta^{34}S$ 值介于 4.2‰~5.6‰之间, 平均值为 5.08‰, 极差较小; 虽然该数据相对零值较大, 但具有塔式分布特征, 仍表现为岩浆作用成因的硫。波龙矿床中石膏的 $\delta^{34}S$ 值介于 0.8~3.5 之间, 与矿床内金属硫化物相近。多不杂矿床中石膏的 $\delta^{34}S$ 值部分在 10‰以上, 与世界上斑岩铜矿硫酸盐的 $\delta^{34}S$ 值一致(Ohmoto, 1979); 这种高 $\delta^{34}S$ 值代表的是岩浆在封闭体系下, 高温热液冷却过程中同位素热力学交换的结果(Zheng, 1991), 这种封闭体系下

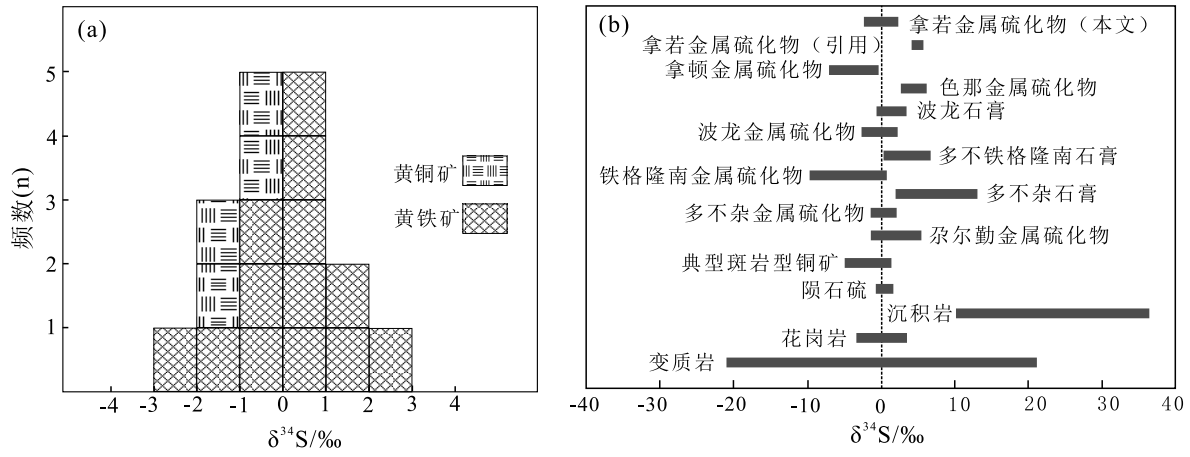


图 4　拿若矿床硫同位素（a）与矿集区其他矿床对比图（b）（参考文献同表 2）

Fig. 4　Histogram of sulfur isotope compositions from Naruo deposit (a) and comparison diagram with others from ore-concentrated area

发生的同位素交换过程，石膏会与其他金属硫化物矿物中的硫达到平衡，仍属于斑岩成矿系统。综合以上数据，拿若矿床的硫同位素与矿集区内其他矿床一致，区域上的矿床具有相同的硫来源；都具有地幔硫的特点，与岩浆作用有关，属于斑岩成矿体系。

5.2 铅的来源

Doe and Zartman（1979）提出铅同位素μ值的大小可以反映铅的大致来源，μ值＜9.58 则表示铅来自地幔，μ值＞9.58 则表示铅来自上部地壳物质。由表 2 可知，拿若矿床金属硫化物铅同位素μ值变化范围为 9.40~9.57，均小于 9.58，表明矿床铅主要为幔源。区内其他矿床的μ值也表现为相类似特征，仅铁格山矿床中的一个样品μ值＞9.58。整体而言，矿集区内主要矿床成矿物质中铅来源与幔源物质关系密切。

朱炳泉（1998）认为铅同位素组成关系可为成矿物质来源提供有效信息，并根据构造环境和成因的差异，提出不同成因的铅同位素$\triangle\beta$-$\triangle\gamma$图解，可判断矿石铅的成因。拿若铅同位素$\triangle\beta$-$\triangle\gamma$图解（图 5）中，所有样品位于岩浆作用有关的上地壳与地幔混合的俯冲带铅范围内，指示该铅的来源主要为壳幔混合作用，其成因与岩浆作用有关。

Zartman and Doe（1981）总结了不同源区的铅同位素特征，根据这些铅同位素组成特征绘制出不同源区铅的平均增长曲线。在该增长曲线模式图中，位于造山带线上方的铅必然包含上地壳成分；而位于线下方的铅则主要包含地幔或下地壳成分；线附近铅则表示为混合来源铅（Stacey and Hedlund, 1983）。拿若矿床铅同位素组成（图 6）显示，大部分点位于造山带的演化线附近，1 个点位于接近上地壳铅演化线，1 个点位于接近地幔铅演化线范围，说明铅来源比较复杂，既有地幔来源的铅，也存在地壳中的铅混入；壳幔混源的特征与图 5 所反映的投点特征一致。铅同位素源区图解（图 7）中，所有样品均位于成熟弧环境。含矿花岗闪长斑岩年代学和地球化学特征显示，拿若矿床的形成背景为洋壳俯冲条件下形成的岛弧环境（丁帅，2014；祝向平等，2015），该结果证实拿若矿床成矿物质来自岛弧环境。

多不杂、波龙等矿床铅同位素图解显示为造

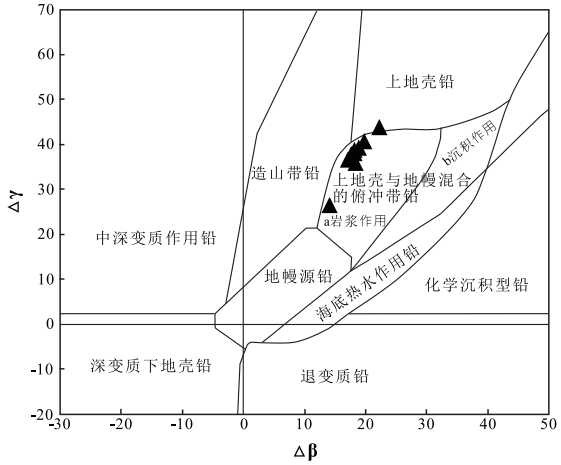


图 5 拿若矿床铅同位素$\triangle\beta$-$\triangle\gamma$成因分类图解（底图据朱炳泉，1998）

Fig. 5 $\triangle\beta$-$\triangle\gamma$ diagram of genetic classification of lead isotope from theNaruo deposit

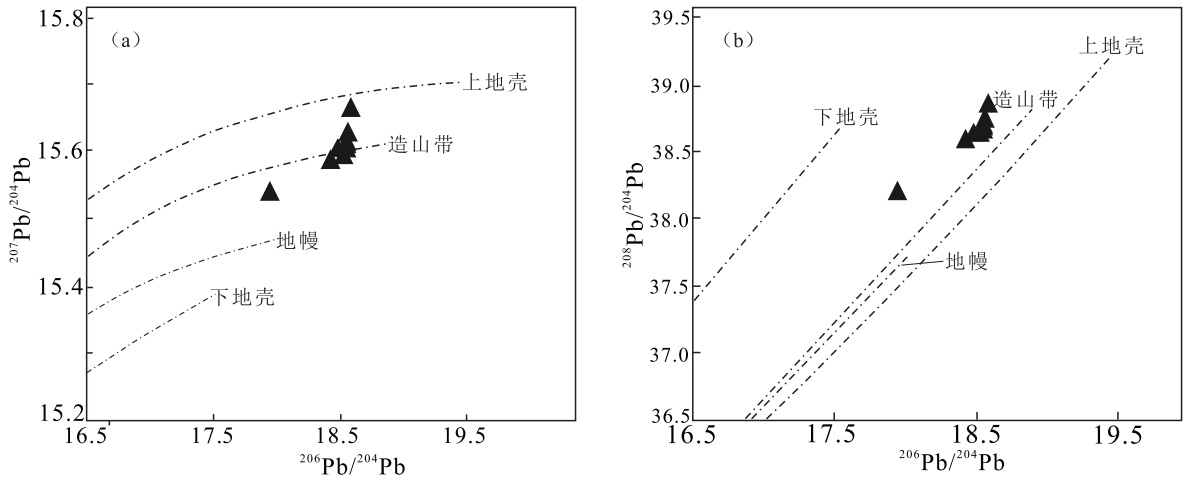


图 6 拿若矿床$^{207}Pb/^{204}Pb$–$^{206}Pb/^{204}Pb$(a) 和$^{208}Pb/^{204}Pb$–$^{206}Pb/^{204}Pb$(b) 同位素图解（底图据 Stacey and Hedlund, 1983）

Fig. 6 Digram of $^{207}Pb/^{204}Pb$–$^{206}Pb/^{204}Pb$(a) 和$^{208}Pb/^{204}Pb$–$^{206}Pb/^{204}Pb$(b) from Naruo deposit

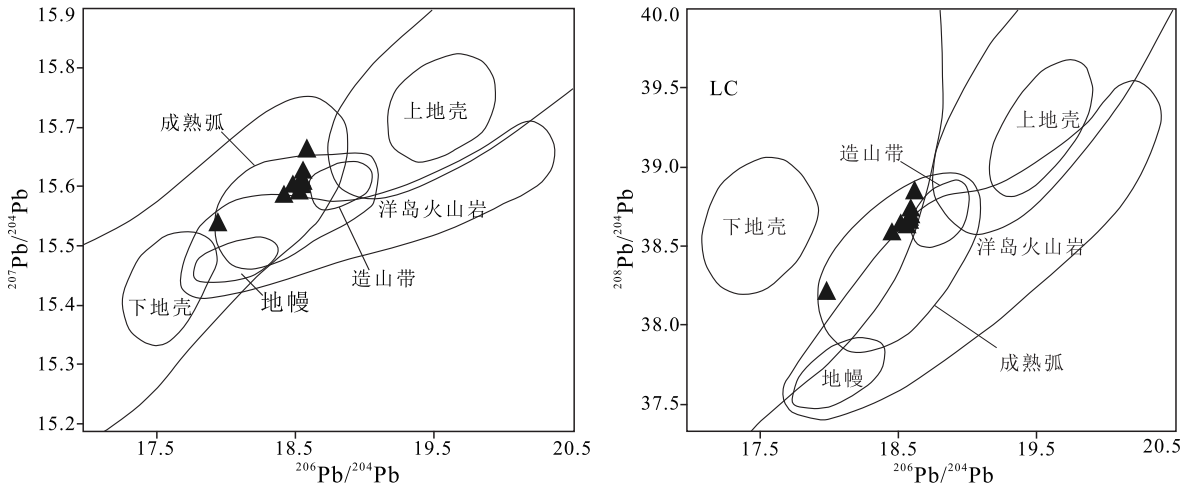


图 7　拿若矿床铅同位素源区判别图解（底图据 Stacey and Hedlund, 1983）

Fig. 7　Diagram of lead isotope from Naruo deposit

山带铅，主要来自地幔并有地壳物质加入(李胜荣等, 2005; 辛洪波等, 2009; 李丹, 2012; 何阳阳等, 2013; 周玉等, 2013)。综上所述，笔者认为包括拿若在内的整个矿集区的矿床金属硫化物的铅主要来源于地幔，并可能存在壳源物质的混入，成矿作用与岛弧环境的岩浆活动有关。

6　结论

(1)拿若矿床金属硫化物中黄铁矿 $\delta^{34}S$(均值 0.17‰)>黄铜矿 $\delta^{34}S$(−1.1‰)，硫同位素总体达到平衡。$\delta^{34}S$ 值介于−2.3‰~2.3‰之间，平均值为−0.13‰，近似代表总硫同位素，具有塔式分布特征，显示地幔硫的特点，表明矿床金属硫化物的硫来自深源岩浆。

(2)矿石铅同位素 $^{208}Pb/^{204}Pb$、$^{207}Pb/^{204}Pb$、$^{206}Pb/^{204}Pb$ 等比值显示其具有正常铅同位素的特点。铅同位素组成指示成矿金属物质与成矿岩浆关系密切，主要源自岛弧环境中的幔源物质，可能存在壳源物质的混入。

致谢：西藏金龙矿业股份有限公司和西藏地质五队为笔者野外工作提供帮助，审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见，在此一并致以诚挚的谢意。

References

Chaussidon M，Albarede F，Sheppard S M F，1989. Sulphur isotope variations in the mantle from ion microprobe analyses of micro-sulphide inclusions[J]. Earth and Planetary Science Letters, 92（2）: 144 − 156 .

Chinnasamy S S，Mishra B，2013. Greenstone metamorphism，hydrothermal alteration，and gold mineralization in the genetic context of the granodiorite-hosted gold deposit at Jonnagiri，Eastern Dharwar Craton，India[J]. Economic Geology, 108（5）: 1015 − 1036 .

Doe B R，Zartman R E，1979. Plumbotectoics，the Phanerozoic，In Barnes，H. L. ，ed. ，Geochemistryof hydrothermal ore deposits−second edition[C]. New York，John Wiley，22−70.

Donoghue K A，Ripley E M，Li C S，2014. Sulfur isotope and mineralogical studies of Ni-Cu sulfide mineralization in the bovine igneous complex intrusion，Baraga，Northern Michigan[J]. Economic Geology, 109（2）: 325 − 341 .

Lin B，Tang J X，Chen Y C，et al.，2017. Geochronology and genesis of the tiegelongnan porphyry cu（au） deposit in tibet：evidence from U−Pb，Re−Os dating and Hf，S，and H−O isotopes[J]. Resource Geology, 67（1）: 1 − 21 .

Ohmoto H，Rye R O，1979. Isotopes of sulfur and carbon [J]. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits，509 − 567.

Stacey J S，Hedlund D C，1983. Lead-isotopic compositions of diverse igneous rocks and ore deposits from southwestern New Mexico and their implications for early Proterozoic crustal evolution in the western United States[J]. Geological Society of America Bulletin, 94（1）: 1558 − 1567 .

Xu Z Q，Dilek K，Cao H，et al.，2015. Paleo-Tethyan evolution of Tibet as recorded in the East Cimmerides and West Cathaysides[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 105: 320 − 337 .

Zartman R E，Doe B R，1981. Plumbotetonics-the model （in evolution of the upper mantle）[J]. Tectonophysics, 75: 135 − 162 .

Zhang J，Chen Y J，Yang Y，et al. ，2011. Lead isotope systematics of

the Weishancheng Au−Ag belt，Tongbai Mountains，central China：Implication for ore genesis[J] International Geology Review，53（5−6）：656−676.

Zheng Y F， 1991. Sulphur isotopic fractionation between sulphate and sulphide in hydrothermal ore deposits：disequilibrium vs equilibrium processes[J]. Terra Nova, 3（5）: 510 − 516 .

Chen J， Wang H N， 2004. Geochemistry. Beijing： Science Press，129−135（in Chinese）.

Ding S， 2014. The Study of Geological characteristics of Naruo copper（gold）deposit in Gaize， Tibet[D]. Chengdu ： Chengdu University of Tecnology（in Chinese）.

Gao K， Tang J X， Song Y， et al.， 2016a. Fluid inclusion study of the cryptoexplosive breccias of the Naruo deposit in Tibet[J]. Geology and Exploration，52，815-825(in Chinese with English abstract).

Gao K， Duo J， Tang J X， et al.， 2016b. Alteration of Naruo Porphyry Cu （Au）Deposit in the Duolong Ore-concentration Area，Tibet[J]. Bulletion of Mineralogy， Petrology and Geochemist， 35（6）：1206-1217(in Chinese with English abstract).

Guo S， 2013. Mineral deposit model of the Duolong deposit cluster in Gaize County， Tibet and its application[D]. Beijing: China University of Geosciences（Beijing）(in Chinese).

He Y Y，Wen C Q，Liu X F，et al.， 2013. Geochemical Characteristics of Pb Isotopes in Duobuza Copper Deposit[J]. Metal Mine, 440（2）: 101 − 104 (in Chinese with English abstract).

Li D， 2012. Study on the Fluid Inclusions of the Bolong Copper Deposit，Tibet[D]. Chengdu： Chengdu University of Technology（in Chinese）.

Li J X， 2008. Geochronology， petrology and metallogeneses of high oxidized magma−hydrothermal fluid of Duobuza gold−rich porphyry copper deposit in Bangonghu belt， Northern Tibet[D]. Institute of Geology and Geophysics，Graduate University of Chinese Academy of Sciences（in Chinese）.

Li R S，Xiao R，Zhou S，et al.， 2005. Gold mineralization in Gaize area，Tibet[J]. MINERAL DEPOSITS, 24（1）: 1 − 14 (in Chinese with English abstract).

Li Y B，Zhong W T，Guo J C，et al.， 2019. Petrogenesis of igneous rocks and ore-forming material source of the Nating porphyry Cu （Au） deposit in the western section of the Bangong Co-Nujiang metallogenic belt，Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 35（6）: 1717 − 1737 (in Chinese with English abstract).

Lü L N， 2012. Metallogenic model of rich iron and copper（gold） deposits in Western Part of Bangong Co−Nujiang metallogenic belt，Tibet[D]. Beijing： Chinese Academy of Geological Sciences（in Chinese）.

Pan G T，Wang L Q，Geng Q R，et al.， 2020. Space-time structure of the Bangonghu-Shuanghu-Nujiang-Changning-Menglian Mega-suture zone：A discussion on geology and evolution of the Tethys Ocean[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 40（3）: 1 − 19 (in Chinese with English abstract).

She H Q， Li J W， Ma D F， et al.， 2009. Molybdenite Re-Os and SHRIMP zircon U-Pb dating of Duobuza porphyry copper deposit in Tibetandtsgeologicalimplications[J]MINERAIDEPOSITS28（6）737−746 (in Chinese with English abstract).

Shen W Z， Huang Y S， 1987. Stable isotope geology[M]. Beijing：Atomic Energy Press，1−1495（in Chinese）.

Sun Z M，2015. Copper−Gold Mineralization and Metallogenic Regularity of Duolong Mineralization Area in Western Bangongco−Nujiang[D]. Jilin：Jilin University（in Chinese）.

Wang S，Zhao Y Y，Wang A，et al.， 2017. The Study of Facieology-Mineragraphy， Fluid Inclusions， and Geochemical Characteristics and Mineralization in Nadun Cu （Au） Deposit，Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 91（7）: 1565 − 1588 (in Chinese with English abstract).

Wang Y Y，2018. Genesis of Tiegelongnan super−large copper（gold and silver） deposit in Tibet，China——mineralogy，alteration and mineralization[D]. Chengdu：Chengdu University of Technology（in Chinese）.

Wang Y Y， Tang J X， Song Y， et al.， 2017. Geochemical Characteristics of Sulfur and Lead Isotopes from the Superlarge Tiegelongnan Copper （Gold-silver） Deposit，Tibet[J]. Acta Geoscientia Sinica, 38（5）: 627 − 637 (in Chinese with English abstract).

Xiao J B，2012. Genesis of the Duobuza copper deposit in the western Bangong Co−Nujiang Metallogenic belt， Tibet[D]. Chengdu University of Technology（in Chinese）.

Xin H B，Qu X M，Wang R J，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).

Yang C， Tang J X， Wang Y Y， et al.， 2014. Fluid and geological characteristics researches of Southern Tiegelong epithermal porphyry Cu-Au deposit in Tibet[J]. Mineral deposits, 33（6）: 1287 − 1305 (in Chinese with English abstract).

Yang J H， Sun Y M， Dong Y， 1992. Sulfur isotopic composition，genetic classification and its application in prospecting evaluation：A case study of the copper，lead and zinc polymetallic deposits in North eastern China[J]. Non-ferrous mineral resources and exploration, 1（2）: 117 − 125 (in Chinese with English abstract).

Zhang J，Yang Y，Hu H Z，et al.，2009. C-S-Pb isotope geochemistry of the Yindonggou orogenic type silver deposit in Henan province[J]. Acta Petrologica Sinica， 25（11）： 2833-2842(in Chinese with English abstract).

Zhang L，Liu Y，Li R H，et al.， 2014. Lead isotope geochemistry of Dayingezhuang gold deposit，Jiaodong Peninsula，China[J]. Acta Petrologica Sinica, 30（9）: 2468 − 2480 (in Chinese with English abstract).

Zhou Y，Duo J，Wen C Q，et al.， 2013. Geochemical Characteristics of Sulfur and Lead Isotopes from the Bolong Copper Deposit，Tibet[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 33（2）: 43 − 49 (in Chinese with English abstract).

Zhu B Q，1998. Theory and Application of isotope system in Earth Science，and on crust−mantle evolution in mainland China[M]. Beijing：Science Press（in Chinese）.

Zhu X P， Chen H A， Liu H F， et al.， 2015. Geochronology and geochemistry of porphyries from the Naruo porphyry copper deposit，Tibet and their metallogenic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 89（1）: 109 − 128 (in Chinese with English abstract).

Zhu X P， Chen H A， Ma D F， et al.， 2011. Re-Os dating for the molybdenite from Bolong porphyry copper-gold deposit in Tibet，China and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 27（7）: 2159 − 2164 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈俊，王鹤年，2005. 地球化学[M]. 北京：科学出版社，129−135.

丁帅，2014. 西藏改则县拿若铜（金）矿地质特征研究[D]. 成都：成都理工大学.

高轲，唐菊兴，宋扬，等，2016a. 西藏拿若铜（金）矿床隐爆角砾岩流体包裹体研究[J]. 地质与勘探，52（5）：815-825.

高轲，多吉，唐菊兴，等，2016b. 西藏多龙矿集区拿若铜（金）矿床蚀变特征[J]. 矿物岩石地球化学通报，35（6）：1226-1237.

郭硕，2013. 西藏改则县多龙矿集区矿床模型与应用[D]. 北京：中国地质大学（北京）.

何阳阳，温春齐，刘显凡，等， 2013. 多不杂铜矿区铅同位素地球化学特征[J]. 金属矿山, 440（2）: 101 − 104.

李丹，2012. 西藏波龙铜矿床流体包裹体研究[D]. 成都：成都理工大学.

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.

李胜荣，肖润，周肃，等， 2005. 西藏改则地区金成矿作用[J]. 矿床地质, 24（1）: 1 − 14.

李玉彬，钟婉婷，郭建慈，等， 2019. 西藏班公湖-怒江成矿带西段拿厅斑岩 Cu（Au）矿床的火成岩岩石成因与成矿物质来源[J]. 岩石学报, 35（6）: 1717 − 1737.

吕丽娜，2012. 西藏班公湖−怒江成矿带西段富铁与铜（金）矿床模型[D]. 北京：中国地质科学院.

潘桂棠，王立全，耿全如，等， 2020. 班公湖-双湖-怒江-昌宁-孟连对接带时空结构——特提斯大洋地质及演化问题[J]. 沉积与特提斯地质, 40（3）: 1 − 19.

佘宏全，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.

沈渭洲，黄耀生，1987. 稳定同位素地质[M]. 北京：原子能出版社，1−495.

孙振明，2015. 西藏班—怒成矿带西段多龙矿集区铜金成矿作用与成矿规律[D]. 吉林：吉林大学.

王松，赵元艺，汪傲，等， 2017. 西藏拿顿铜（金）矿床岩矿相学、流体包裹体和地球化学特征与成矿作用研究[J]. 地质学报, 91（7）: 1565 − 1588.

王艺云，2018. 西藏铁格隆南超大型铜（金、银）矿床成因——矿物学、蚀变与成矿[D]. 成都：成都理工大学.

王艺云，唐菊兴，宋扬，等， 2017. 西藏铁格隆南超大型 Cu（Au、Ag）矿床 S、Pb 同位素地球化学研究[J]. 地球学报, 38（5）: 627 − 637.

肖剑波，2012. 班怒西段多不杂铜矿床成因浅析[D]. 成都：成都理工大学.

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.

杨超，唐菊兴，王艺云，等， 2014. 西藏铁格隆南浅成低温热液型-斑岩型 Cu-Au 矿床流体及地质特征研究[J]. 矿床地质, 33（6）: 1287 − 1305.

杨竞红，孙延绵，董毅， 1992. 硫同位素组成特征、成因分类及在找矿评价中的应用——以中国北东部铜铅锌多金属矿床为例[J]. 有色金属矿产与勘查, 1（2）: 117 − 125.

张静，杨艳，胡海珠，等，2009. 河南银洞沟造山型银矿床碳硫铅同位素地球化学[J]. 岩石学报，25（11）：2833-2842.

张良，刘跃，李瑞红，等， 2014. 胶东大尹格庄金矿床铅同位素地球化学[J]. 岩石学报, 30（9）: 2468 − 2480.

周玉，多吉，温春齐，等， 2013. 西藏波龙铜矿床 S，Pb 同位素地球化学特征[J]. 矿物岩石, 33（2）: 43 − 49.

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，刘鸿飞，等， 2015. 西藏拿若斑岩铜金矿床成矿斑岩年代学、岩石化学特征及其成矿意义[J]. 地质学报, 89（1）: 109 − 128.

祝向平，陈华安，马东方，等， 2011. 西藏波龙斑岩铜金矿床的 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 27（7）: 2159 − 2164.