

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.191>



Pb同位素对努日铜钼钨多金属矿床成矿物源的制约

闫国强^{1,2},王欣欣^{3*},黄勇⁴,李光明⁴,刘洪⁴,黄瀚霄⁴,
张志⁴,田恩源⁵,赖杨⁵

1. 中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170
2. 中国地质调查局钨矿地质重点实验室,天津 300170
3. 山西大同大学煤炭工程学院,山西大同 037003
4. 中国地质调查局成都地质调查中心,四川成都 610081
5. 中国地质调查局成都矿产综合利用研究所,四川成都 610061

摘要:西藏努日铜钼钨矿是冈底斯成矿带规模最大的首例含白钨矿多金属矿床,对于矿床的成矿物质来源还存在较大的争议。为厘定努日铜钼钨矿的成矿物质来源,对矿区的侵入岩和各类硫化物进行了Pb同位素研究,研究结果表明,矿区各类辉钼矿、黄铁矿具有较为一致的Pb同位素组成: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为17.525~18.581; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为15.621~15.661; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为37.524~38.929。黄铜矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为18.414~18.578; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为15.619~15.642; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为38.617~38.863,且黄铜矿存在明显的分组特征。S-Pb同位素特征表明:努日铜钼钨矿的成矿物质主要来源于地幔,矿床的辉钼矿Re-Os同位素特征也暗示其成矿物质主要来源于地幔。该矿床可能是在印度板块向欧亚板块俯冲—碰撞—伸展构造环境下,印度陆块下地壳部分熔融形成的熔体在其向上运移过程中与俯冲洋壳释放出的富含 Fe^{3+} 的流体发生混合后,与雅鲁藏布江MORB亏损地幔橄榄岩发生交代作用, Fe^{3+} 氧化地幔中赋存的各类硫化物后,使得成矿物质Cu、Mo等被释放进入岩浆系统;并在上升过程中萃取了部分加厚下地壳部分熔融形成黑云母花岗岩中的Cu等,最终在浅部与围岩发生接触交代形成努日铜钼钨多金属矿床。

关键词:努日铜钼钨矿床;Pb同位素;成矿物源;冈底斯;埃达克质斑岩;地球化学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2020)01-031-12

收稿日期: 2019-08-02

Constraint of Pb Isotope on Ore-Forming Source Origin of Nuri Polymetallic Deposit, Tibet

Yan Guoqiang^{1,2}, Wang Xinxin^{3*}, Huang Yong⁴, Li Guangming⁴, Liu Hong⁴,
Huang Hanxiao⁴, Zhang Zhi⁴, Tian Enyuan⁴, Lai Yang⁵

1. *Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China*
2. *Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170, China*
3. *Institute of Coal Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China*
4. *Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China*
5. *Institute of Mineral Resources Multi-Utilization, China Geological Survey, Chengdu 610061, China*

Abstract: The Nuri Polymetallic Deposit, Tibet, is the largest and first scheelite deposit in Gangdese, and there have been some

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41702080);国家重点研发计划(Nos.2016YFC0600308,SQ2018YFC060162);中国地质调查项目(No. DD20190813);中国地质调查局成都地质调查中心青藏高原国际大科学计划联合资助。

作者简介:闫国强(1985—),男,工程师,博士,从事矿床成因、矿床地球化学研究。ORCID: 0000-0002-1321-9218. E-mail:tjyguoqiang@163.com

*通讯作者:王欣欣,E-mail:sxdk217wxx@163.com

引用格式:闫国强,王欣欣,黄勇,等,2020.Pb同位素对努日铜钼钨多金属矿床成矿物源的制约.地球科学,45(1):31—42.

controversies on the ore-forming source of this deposit. The Pb isotope analyses of molybdenite, chalcopyrite, and pyrites from the mine have been carried out to determine the source. The results show that the molybdenite and pyrites have the consistent Pb isotopes, with $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios ranging from 17.525—18.581, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios ranging from 15.621—15.661, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios ranging from 37.524—38.929, and the chalcopyrite with $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios ranging from 18.414—18.578, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios ranging from 15.619—15.642, and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios ranging from 38.617—38.863, respectively, which have obvious grouping characteristics. The S and Pb isotope features indicate that the ore-forming sources are mainly derived from the mantle, and the Re-Os isotope characteristics of molybdenite indicate that the minerals are mainly derived from mantle. The melt from the lower crust of India continent partial melting migrated upward and mixed with the Fe^{3+} enriched fluid derived from the subducted oceanic crust, which metasomatized with Yarlung Zangbo MORB peridotite, and the Cu, Mo were released into the magma system after oxidized by Fe^{3+} , thus, Cu and other elements in biotite granite which partially melted in the thickened lower crust were extracted in the rising process, finally formed the deposit by contact metasomatism with the wall rock.

Key words: Nuri Polymetallic; Pb isotope; ore-forming source; Gangdese; adakite porphyry; geochemistry.

0 引言

努日铜钼钨多金属矿位于西藏冈底斯中东段南缘,是目前冈底斯成矿带发现的最大的含白钨矿矽卡岩型铜钼多金属矿床,含铜 48.72 万吨, WO_3 资源量 16.75 万吨, 钨金属资源量 2.86 万吨, 其白钨矿储量已达到大型。努日铜钼钨多金属矿床分为南矿段、中矿段、北矿段三部分, 南矿段主要产出共伴生铜钼钨矿化体, 中矿段主要以钨铜矿化体产出, 北矿段则出现独立钨矿体, 总体以铜钼共生矿体为主。前人对该矿床已开展了部分的研究(莫济海等, 2008; 黄树峰等, 2011; 江化寨等, 2011; 姜子琦等, 2011; 陈雷等, 2011, 2012; 赵珍等, 2012, 2013; 孙祥等, 2013; 闫国强等, 2014; 王立强等, 2014), 基本查明了矿区各类岩浆岩的成岩时代: 锆石 U-Pb 年龄石英闪长玢岩(93.42 ± 0.76 Ma)→安山岩(92.04 ± 0.71 Ma)→黑云母花岗岩(50.46 ± 0.56 Ma)→花岗闪长斑岩(24.83 ± 0.21 Ma)(王欣欣等, 2015; 闫国强等, 2018)和成矿时代: 辉钼矿 Re-Os 年龄 $23.46 \sim 24.94$ Ma, 黄铜矿 Re-Os 年龄 55.34 ± 0.74 Ma、 29.16 ± 0.34 Ma、 23.53 ± 0.37 Ma~ 24.94 ± 0.35 Ma(王欣欣等, 2014)。矿区多阶段岩浆演化与多期成矿事件暗示, 努日铜钼钨多金属矿床的成矿物质来源较为复杂, 特别是矿区新发现的花岗闪长斑岩(王勤等, 2018), 是否作为潜在的含矿斑岩体需要更直接的证据, 如铜、钼主要来源于经典岛弧岩浆岩(王欣欣等, 2014), 个别学者认为成矿物质来源于壳幔混源(王立强等, 2014), 还有少数学者认为来源于俯冲板片的上覆沉积物的部分熔融(梁华英等, 2010; 赵珍等, 2013; 董随亮等, 2015)。

为进一步查清楚努日铜钼钨多金属矿床的成

矿物质来源, 本文对该矿床南矿段、中矿段、北矿段中的辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿进行了 Pb 同位素的研究, 同时对矿区中新世、始新世岩体开展了全岩的 Pb 同位素分析, 结合对比矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素特征, S 同位素特征等研究成果, 对努日铜钼钨矿的成矿物质来源进行综合示踪。

1 区域地质与矿床地质特征

努日大型铜钼钨多金属矿床位于中国西藏山南乃东县内, 属于冈底斯成矿带中东段的一部分, 该矿床构造上位于冈底斯岩浆弧中东段南缘 NWW 向陆缘走滑断裂带与 NEE 向陆缘走滑断裂带的交汇部位, 冈底斯成矿带广泛发育中酸性岩浆岩(图 1)。岩浆活动高峰期始于海西晚期—燕山晚期, 火山岩也从海相过渡为陆相、类型由早期的中基性逐渐向中酸性为主过渡(闫国强等, 2018), 而伴随的火山岩岩性则主要为安山岩、英安岩、凝灰岩等; 侵入岩活动时限集中于燕山晚期—喜山期, 前者岩性组合则以中酸性为主, 后者以酸性岩为主。受印度板块向欧亚板块俯冲—碰撞—挤压—伸展等一系列构造作用影响, 区内主构造以东西向展布为主, 发育超岩石圈断裂、转换断裂构造以及热穹隆引起的环形构造等。矿区侵入岩包括石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩、黑云母花岗岩、安山岩, 少量煌斑岩脉(图 2)。矿区地层为白垩系下统比马组($K_1 b$)、第四系风成堆积物。比马组区域上分为上下 5 个岩性段, 矿区出露第三、四、五岩性段, 在矿区呈近东西走向, 地层在矿区出露面积达 60% 以上, 第三岩性段($K_1 b^3$): 主要出露于矿区中部及东部, 出露面积较大, 其中大部分被风成砂所覆盖, 根据岩性组合分

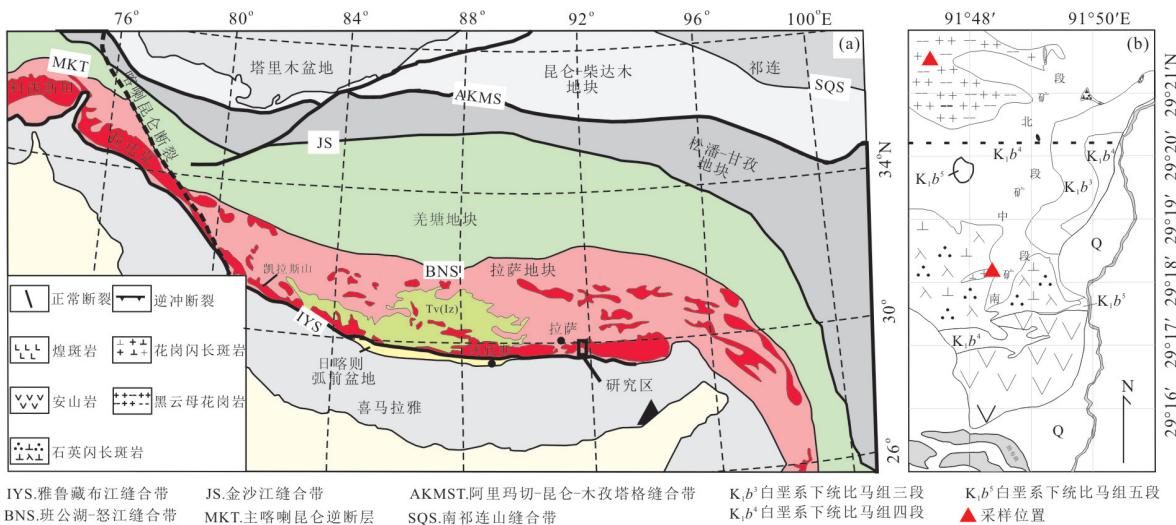


图1 西藏山南区域地质图及努日矿区地质简图

Fig.1 The regional geological map and sketch map of Nuri deposit

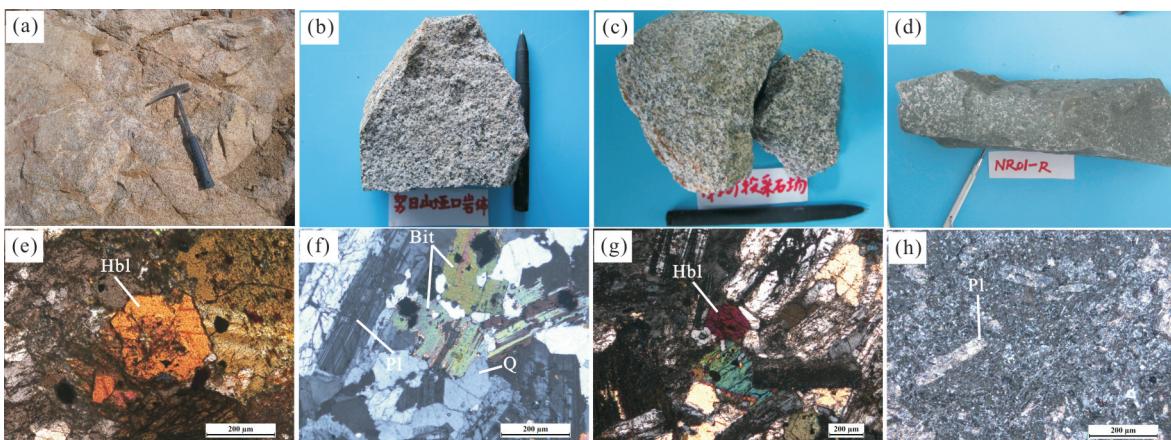


图2 西藏山南努日矿区各类岩浆岩的岩石学特征

Fig.2 The characteristics of various magmatic rocks in Nuri deposit

a. 石英闪长玢岩及镜下角闪石斑晶; b. 黑云母花岗岩及镜下见黑云母; c. 花岗闪长斑岩及镜下半自形角闪石; d. 安山岩及镜下隐晶质基质.
Hbl.普通角闪石;Bit.黑云母;Pl.斜长石;Q.石英

为上下两部分,下部(K_1b^{3-1})为浅灰色碎屑岩,出露较少,上部(K_1b^{3-2})为灰白色厚层块状结晶灰岩,可见零星的矽卡岩化、大理岩化,表明厚层块状灰岩与矽卡岩化关系不紧密.第四岩性段(K_1b^4):主要分布在矿区中部及北部,出露面积较大,岩性为一套碎屑岩与碳酸盐岩互层,岩性组合主要为砂岩、灰岩,呈薄层状,地层被岩浆大部分所吞蚀,与岩体接触边界可见较强烈的矽卡岩化及热烘烤作用.砂岩层理清晰,节理裂隙发育,并伴有后期热液充填,可见比较强烈的角岩化特征,显示其受到了较强的热烘烤作用.砂岩与灰岩层间破碎带及节理裂隙内,可见石榴子石矽卡岩呈似层状、脉状,并可见铜矿化,地表主要表现为孔雀石化、铜蓝.矿区的矽卡岩

化及矿化与本岩性段薄层灰岩关系密切,其是矿区的主要赋矿层位.在矿区南部石榴子石矽卡岩可见铜钼矿化,其结构主要为细粒结构,构造为浸染状、脉状,矿区北部矿化不明显.第五岩性段(K_1b^5)可分为上下两个部分,下部(K_1b^{5-1})为一套呈灰绿色砂砾岩,上部(K_1b^{5-2})为安山岩、角岩夹砂岩.

石英闪长玢岩呈近EW向分布于南矿段,是矿区出露最为广泛的侵入岩,岩石新鲜面为浅灰色,具斑状结构,斑晶以斜长石为主,石英呈熔蚀港湾状,基质为细粒一隐晶质,露头青磐岩化发育.

黑云母花岗岩呈网状、岩枝状侵入到早期岩体中出露于北矿段中部,新鲜面为灰白色,花岗结构,黑云母呈团斑状,含少量浅肉红色钾长石

斑晶，粒度约 2~3 mm，局部见不规则灰黑色辉长岩捕虏体散布。

花岗闪长(斑)岩：分布于矿区南部，以小岩株或岩脉的形式穿插于早期石英闪长玢岩中，岩石为灰色、灰白色，细粒结构，斑状构造(图 2g)。具有典型的花岗不等粒结构，主要矿物：斜长石(35%)、钾长石(25%)、石英(15%)；次要矿物：黑云母、绢云母、方解石、角闪石、电气石；副矿物：磷灰石、锆石、金红石。斜长石：常见聚片双晶、卡—纳复合双晶、偶尔可见巴温诺双晶，常被绢云母交代。钾长石：干涉色一级灰白，表面有较多麻点，泥化蚀变较强，局部可见碳酸盐交代钾长石，可见条纹结构，部分为条纹长石。石英：干涉色一级灰白，他形不等粒结构，常见文象结构，可见波状消光。黑云母：多色性明显，浅绿至浅褐色，部分黑云母未见解理，常呈团簇状分布，黑云母中常见不透明金属矿物，与围岩接触带可见强烈的铜钼矿化矽卡岩，岩体中可见团斑状、细脉状黄铜矿、辉钼矿化。

安山岩出露于南矿段，岩石破碎，节理发育，裂隙中可见方解石细脉、石英脉。新鲜面为墨绿色，块状构造。主要由长石、石英、晶屑组成，斜长石颗粒发生粘土化、绢云母化，但残留卡纳联晶结构，石英颗粒被熔蚀成港湾状。

努日矿区的矿化组合模式及矿化分带现象在平面和纵向上均有较为明显的表现，在平面上，努日矿区南矿段以铜钼矿化为主，矿区最大的 I # 矿体位于南矿段，且有独立的铜矿体、钼矿体、或铜钼组合矿体，矿体厚度大，产状稳定，是目前矿区重点

开采区域；中矿段则以钼矿化为主，钨矿化仅在靠近努日山附近达到品位，铜矿化普遍较弱，没有达到品位的组合矿体；北矿段以钨钼矿化为主，铜矿化依旧不明显，矿区钨矿化品位最高的矿体就位于北矿段 5 线。在纵向上，整个矿区露头可见大量矽卡岩化，矽卡岩化主要以钨、铜矿化为主，钼矿化肉眼很难见到，探槽中往往出露矽卡岩型铜矿体或铜钨组合矿体，部分角岩中可见石英硫化物脉体穿插，主要为黄铜矿、黄铁矿，在矿区中酸性侵入岩中也可见黄铜矿化，尤以中新世花岗闪长岩中最富集，且矿化随着深度的增加，矽卡岩化愈发强烈，其中黄铜矿化进一步增强，同时出现部分辉钼矿化，网状石英硫化物脉发育，逐步向着深部增加，形成铜钼组合矿体，但主体仍以黄铜矿化为主，此时出现部分白钨矿化伴随产出，随着深度的进一步加深，矽卡岩化逐渐变弱，常形成石英硫化物脉体(石英—黄铜矿—辉钼矿、石英—黄铜矿—黄铁矿)发育，钼矿化增强，钨矿化变弱。

努日矿床赋矿岩石为石榴子石矽卡岩，矿石构造为块状(图 3c)、浸染状(图 3d)、细脉状，矿石结构为放射状、鳞片状(图 3f)、交代残余结构(图 3g)等。矿石矿物为黄铜矿、辉钼矿(图 3e、3f)，散点状白钨矿(图 3a)，同时可见少量蓝辉铜矿(图 3g)，大量发育 Q+Cpy 脉(图 3b)、Q+Mo 脉、以及共生硫化物细脉(图 3h)。矿床围岩蚀变以强烈的矽卡岩化为主，可见大量石榴子石、绿帘石等硅酸盐矿物组合，少量萤石、石膏等低温矿物等。

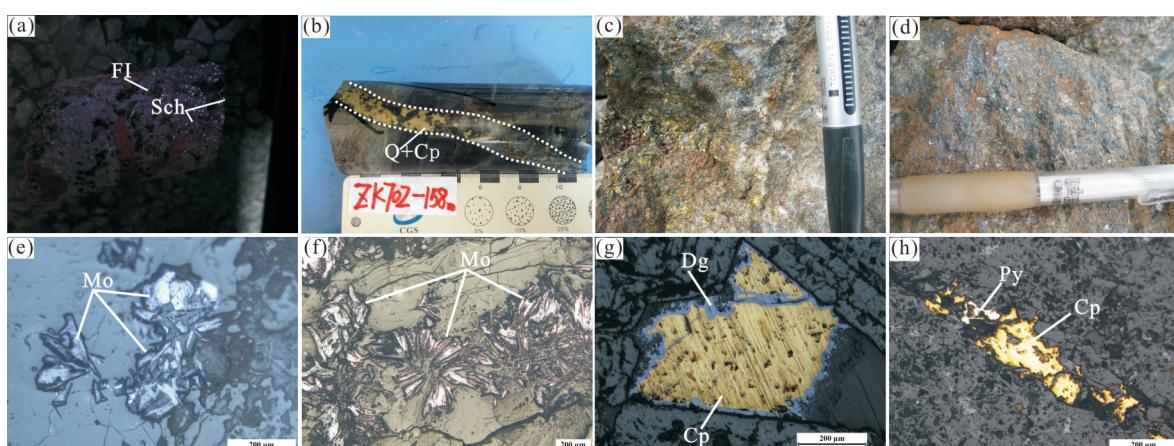


图 3 努日铜钼钨多金属矿床矿石特征及显微镜下照片

Fig.3 Photomicrographs showing ore minerals from the Nru deposit

Fl. 萤石；Sch. 白钨矿；Mo. 辉钼矿；Cp. 黄铜矿；Dg. 蓝辉铜矿；Py. 黄铁矿

2 样品采集及测试方法

本次研究对努日矿区与矽卡岩化有关的侵入岩(南矿段花岗闪长斑岩、北矿段黑云母花岗岩)样品的Pb同位素进行测定,其中石英闪长玢岩和黑云母花岗岩样品在核工业北京地质研究院实验室完成,花岗闪长斑岩样品在武汉地调中心实验室完成,实验流程简述如下:首先将200目全岩样品溶解后采用交换树脂法将Sr和Nd分离提纯,之后提纯物通过TIMS测试得到Sr和Nd的同位素比值,详细流程见张松等(2012a)。Pb同位素测试方法简述如下:称取适量样品溶解后,去除其他酸根离子,最后通过阴离子交换树脂淋洗提纯,在MAT-261多接收质谱计上完成,整个实验流程均在超净操作室内完成。Pb空白本底为 $1 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-9}$ g,采用国

际标准值监控样品误差。

3 测试结果

测试数据见表1,除铀矿床外,其他矿床中的金属硫化物往往含有较低的U、Th含量以及U/Th比值(周清等,2013),而造成放射性成因Pb(^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{208}Pb)含量低,可忽略不计其影响,特别是当矿石形成时代较年轻时,可不进行Pb同位素校正。

实验结果表明,努日铜钼钨多金属矿床黑云母花岗岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 范围为18.541~18.565(平均值为18.552), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为15.587~15.601(平均值为15.595), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为38.625~38.678(平均值为38.652);花岗闪长斑岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为18.541~18.562(平均值为18.552), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为15.640~15.653(平均值为15.649), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比

表1 西藏努日铜钼钨多金属矿床侵入岩、矿石硫化物的Pb同位素数据

Table 1 Pb isotope analysis data for intrusive rock and sulfide minerals in the Nuri polymetallic deposit

样品编号	测试对象	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	数据来源
NR-1		18.597	15.697	38.973	
NR-2		18.572	15.696	38.871	
NR-3	花岗闪长斑岩	18.597	15.744	39.029	王勤等,2018
NR-5		18.625	15.667	38.952	
NR-6		18.579	15.687	38.848	
ZK1005-384.12 m		18.589	15.655	38.984	
ZK1005-379.57 m	花岗闪长斑岩	18.571	15.641	38.912	
ZK1005-394 m		18.591	15.654	38.981	来自本文
005-R-1		18.541	15.587	38.625	
005-R-2	黑云母花岗岩	18.565	15.601	38.678	
005-R-3		18.55	15.597	38.653	
ZK4501-124.8	黄铜矿	18.441	15.619	38.617	
ZK4103-258.6	辉钼矿	18.513	15.629	38.839	
ZK4103-310.4	黄铁矿	17.525	15.549	37.524	
ZK4103-310.6	黄铜矿	18.578	15.633	38.836	
ZK4103-311.4	辉钼矿	18.533	15.635	38.871	
ZK4103-317.4	辉钼矿	18.555	15.621	38.827	
ZK4103-473.8	黄铜矿	18.568	15.642	38.863	
ZK4103-474.9	黄铁矿	18.555	15.642	38.909	
ZK4901-130.9	黄铁矿	18.539	15.63	38.871	王立强等,2014
ZK4901-153.35	黄铜矿	18.518	15.624	38.811	
ZK3701-213.5	黄铜矿	18.414	15.619	38.695	
ZK3701-355.2	黄铁矿	18.548	15.643	38.916	
ZK3701-358.31	辉钼矿	18.539	15.631	38.879	
ZK3701-399.2	辉钼矿	18.555	15.643	38.918	
ZK3701-447.7	辉钼矿	18.581	15.661	38.929	
ZK3701-513	黄铜矿	18.499	15.63	38.802	
ZK3701-513.4	黄铁矿	18.545	15.64	38.895	

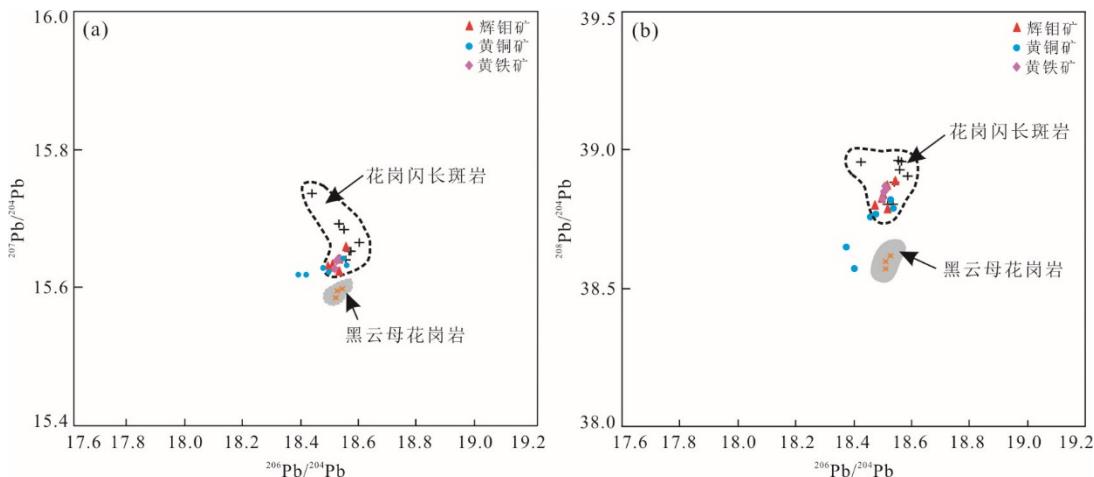


图 4 西藏努日铜钼钨多金属矿床中矿石的 Pb 同位素来源判别图解

Fig.4 Discrimination diagram for lead isotopic sources of ores from the Nuri polymetallic deposit

数据来自表 1

值为 38.885~38.960(平均值为 38.934)。前人报道的矿区各类辉钼矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 18.513~18.581(平均值为 18.546), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 15.621~15.661(平均值为 15.637), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 38.827~38.929(平均值为 38.877); 黄铜矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 18.414~18.578(平均值为 18.503), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 15.619~15.642(平均值为 15.628), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 38.617~38.863(平均值为 38.771); 黄铁矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 17.525~18.555(平均值为 18.342), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 15.630~15.649(平均值为 15.621), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 37.524~38.916(平均值为 38.623)。可见矿区各类辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿具有明显一致的 Pb 同位素组成。努日铜钼钨多金属矿的矿石 Pb 同位素组成主要与花岗闪长斑岩的大致相同,而个别发生偏移,介于花岗闪长斑岩和黑云母花岗岩的 Pb 同位素组成范围(图 4)。

4 讨论

4.1 成矿物质来源

Pb 同位素在自然界中几乎不发生分馏,其组成伴随成矿元素运移和沉淀,受成矿流体的物理化学条件影响较小(童英等,2006),矿床中的 Pb 同位素组成受源区的 U、Th 含量控制,其分布规律与 U/Pb、Th/Pb 的值具有明显的一致性,通过对矿床中各类矿石中 Pb 同位素的组成分析,可以较为直观地反映其对应的成矿物质来源。

为了有效约束努日铜钼钨多金属矿床成矿物

质来源,笔者搜集了矿床中主要的硫化物 Pb 同位素,结合矿区大面积矽卡岩化的地质事实,对南矿段花岗闪长斑岩、北矿段黑云母花岗岩开展全岩 Pb 同位素测试。前述矿区的辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿显示较为明显的分组 Pb 同位素组成,在 Pb 同位素来源判别图解中,辉钼矿、黄铁矿、部分黄铜矿全部落入花岗闪长斑岩体的 Pb 同位素范围内,而个别黄铜矿样品落入花岗闪长斑岩和黑云母花岗岩过渡区域内,而更靠近后者范围(图 4),暗示努日铜钼钨多金属矿床的成矿物质可能主要来源于花岗闪长斑岩。

由于 Pb 同位素构造环境判别图解 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 不适合中国大陆 Pb 的演化(张理刚,1992),因此,本次研究全部利用 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解进行投点。在 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 图解中,所有样品点数据投入上地壳与地幔混合的俯冲带区域,且更偏上地壳范围,个别点甚至已投进上地壳区域(图 5a),在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境演化判别图中,样品数据点则全投入造山带和上地壳过渡区域,但更接近上地壳演化线(图 5b),在 Gariépy and Allègre (1985) 的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境演化判别图解中,努日铜钼钨矿床金属硫化物铅同位素几乎全部落在了冈底斯岩基范围内(王立强等,2014),或冈底斯岩基与拉萨地块重合的范围内,暗示了矿床成矿物质可能起源于古老的拉萨地块的部分熔融。笔者在研究矿区中新世黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄时也发现了数颗新元古代寄生锆石,Hou et al.

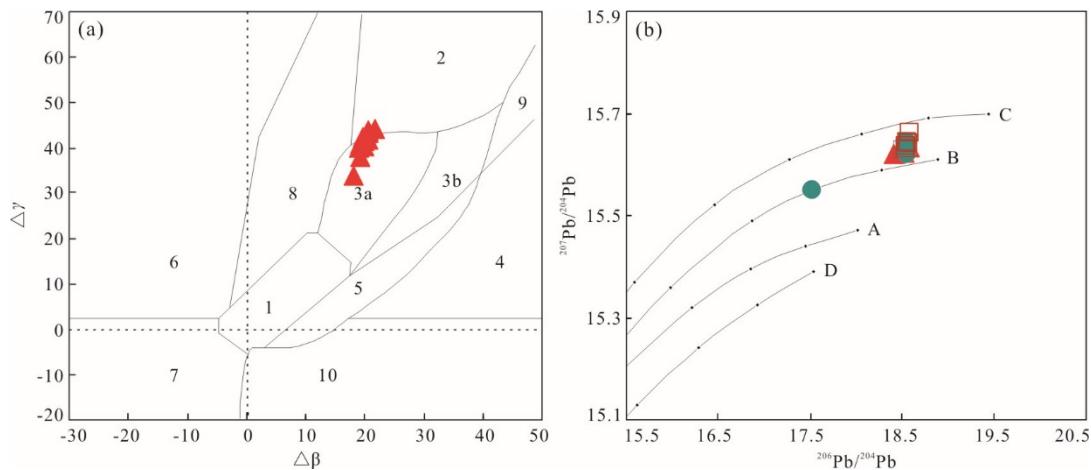


图5 西藏山南努日矿床中辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿的Pb同位素构造环境判别图解

Fig.5 Plumbotectonic framework diagrams of molybdenite, chalcopyrite and pyrites from the Nuri polymetallic deposit

数据来源于表1;底图据Zartman *et al.* (1981);1.地幔源铅;2.上地壳铅;3.上地壳与地幔混合的俯冲带铅,3a.岩浆作用,3b.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;A.地幔(Mantle);B.造山带(Orogenic);C.上地壳(Upper Crust);D.下地壳(Lower Crust)

(2004)、Guo *et al.* (2007)、纪伟强等(2009)研究冈底斯岩基中新世花岗岩也证实其岩浆源区或岩浆演化过程存在地幔物质和古老地壳物质的混入,王立强等(2014)认为这一古老地壳极可能为拉萨地块结晶基底.因此,综合分析表明,努日铜钼钨矿床的矿石Pb同位素为一混合来源,既有幔源物质的贡献也有壳源物质的加入.

上述观点也同样在矿床中矿石S同位素组成特征得到验证(表2),研究结果表明:努日铜钼钨多金属矿床黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围 $-0.5\text{\textperthousand} \sim 1.8\text{\textperthousand}$ (Mean= $0.51\text{\textperthousand}$),黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围 $-2.9\text{\textperthousand} \sim 1.0\text{\textperthousand}$, (Mean= $-0.61\text{\textperthousand}$),辉钼矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围 $-0.1\text{\textperthousand} \sim 0.6\text{\textperthousand}$ (Mean= $0.13\text{\textperthousand}$),显示成矿流体中硫同位素具有较高的均一化,伴随硫化物在运移过程中沉淀析出,硫同位素并未发生明显分馏效应,指示成矿流体中S来源较单一.通常认为, $\delta^{34}\text{S}$ 达到分馏平衡条件下,硫化物中 $\delta^{34}\text{S}$ 的含量具有良好的大小顺序,努日铜钼钨矿床矿石中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 大致表现出Mo>Py>cpy的趋势.样品总体变化范围全部介于原始地幔储库($\delta^{34}\text{S}$ 值 $0 \pm 0.5\text{\textperthousand}$)和MORB($\delta^{34}\text{S}$ 值 $0 \pm 2\text{\textperthousand}$),这些特征表明,努日铜钼钨多金属的成矿S同位素主要来源于原始地幔.

为进一步验证其成矿物质来源,笔者对矿床中辉钼矿Re-Os同位素特征进行分析,Re是一种中度不相容亲铜元素,主要赋存于地幔,由于地球化学行为与Mo类似,因此其往往集中在辉钼矿中,Zhou *et al.* (2013)、周清等(2013)通过统计国内外

30多个含钼矿床辉钼矿中的Re(及对应的放射性Os)含量及相应的物质来源,统计结果显示,幔源成因辉钼矿其Re含量一般超过 100×10^{-6} ,而壳源成因辉钼矿Re的含量一般不超过 10×10^{-6} ,壳幔混源的处于二者之间,毛景文等(1999)也曾统计部分矿床数据得出相似结论,即幔源—壳幔混源—壳源其对应辉钼矿中Re的含量呈指数递减.因此,其含量在一定程度上反映了矿床成矿物质来源.通过整理努日铜钼钨矿床中辉钼矿的Re-Os同位素定年结果(同学义等,2010;张松等,2012b),其辉钼矿中Re的含量变化范围为 $239.0 \times 10^{-6} \sim 667.3 \times 10^{-6}$,平均值为 400.08×10^{-6} ,对应的 ^{187}Os 含量普遍较高介于 $59.8 \times 10^{-9} \sim 168.4 \times 10^{-9}$,平均值为 100.77×10^{-9} ,根据上面的规律,努日铜钼钨矿床辉钼矿中具有非常高的Re含量,同时黄铜矿中Re的含量高达数千 10^{-6} ,但 ^{187}Os 含量普遍较低,暗示矿床的成矿物质来源于地幔(图6),这一结论与冈底斯成矿带上众多斑岩型矿床(如厅宫(李光明等,2005)、帮浦(Hou *et al.*, 2009)、亚贵拉(高一鸣等,2011)和雄村(黄勇等,2013))、矽卡岩型矿床(如知不拉(李光明等,2005)、甲玛(应立娟等,2010))的辉钼矿中的Re的含量一致(普遍大于 100×10^{-6});与南岭成矿带中柿竹园(李红艳等,1996)、姚岗仙(Peng *et al.*, 2006)、黄沙坪(Yao *et al.*, 2007)相应辉钼矿中所含Re含量低指示成矿物质起源于下地壳的部分熔融明显不同,暗示整个冈底斯成矿带成矿物质可能来源于统一的岩浆系统,同时也很好地与前述

表 2 西藏努日铜钼钨矿床硫化物矿石硫同位素组成			
Table 2 S isotope compositions of the sulfide minerals from the Nuri polymetallic deposit			
样品编号	测试对象	$\delta^{34}\text{S} (\text{\textperthousand})$	数据来源
ZK4501-124.8	黄铜矿	-1.2	
ZK4103-258.6	辉钼矿	-0.3	
ZK4103-310.4	黄铁矿	-0.5	
ZK4103-310.6	黄铜矿	-1.2	
ZK4103-311.4	辉钼矿	0.6	
ZK4103-317.4	辉钼矿	0.3	
ZK4103-473.8	黄铜矿	-0.6	
ZK4103-474.9	黄铁矿	0.1	
ZK4901-130.9	黄铁矿	-0.1	王立强等, 2014
ZK4901-153.35	黄铜矿	-0.8	
ZK3701-213.5	黄铜矿	-2.9	
ZK3701-355.2	黄铁矿	-1.0	
ZK3701-358.31	辉钼矿	-0.1	
ZK3701-399.2	辉钼矿	0.0	
ZK3701-447.7	辉钼矿	-0.1	
ZK3701-513	黄铜矿	-1.4	
ZK3701-513.4	黄铁矿	-0.3	
ZK4103-506	黄铁矿	0.8	
ZK4103-461	黄铁矿	0.9	
ZK4103-254	黄铁矿	0.7	
ZK4103-304	黄铁矿	-0.3	
ZK4103-471	黄铁矿	0.8	
ZK1203-198	黄铁矿	1.1	
ZK4501-194	黄铁矿	0.7	Chen et al., 2012
ZK1203-258	黄铜矿	-0.3	
ZK4501-215	黄铜矿	0.6	
ZK4103-306	黄铜矿	-0.2	
ZK4501-126	黄铜矿	-0.3	
ZK4502-306	辉钼矿	0.4	
ZK4501-194	辉钼矿	-0.4	
ZK1203-362	辉钼矿	0.3	
LB4101-194	黄铜矿	1.0	
LB4101-194-1	黄铁矿	1.8	
LB4101-67.6	黄铁矿	1.3	Li et al., 2006
LB4101-159	黄铁矿	1.7	

金属硫化物的 Pb 同位素特征吻合。

4.2 成矿机制

冈底斯埃达克质斑岩的同位素地球化学特征表明, 其岩浆源区物质组成包括印度陆壳、雅鲁藏布江 MORB 和拉萨地块成分(高成等, 2014)。前面提到努日铜钼钨多金属矿床的成矿物质主要来源于花岗闪长斑岩体, 而少部分可能来源于黑云母花岗岩。对努日矿区花岗闪长斑岩、黑云母花岗岩的

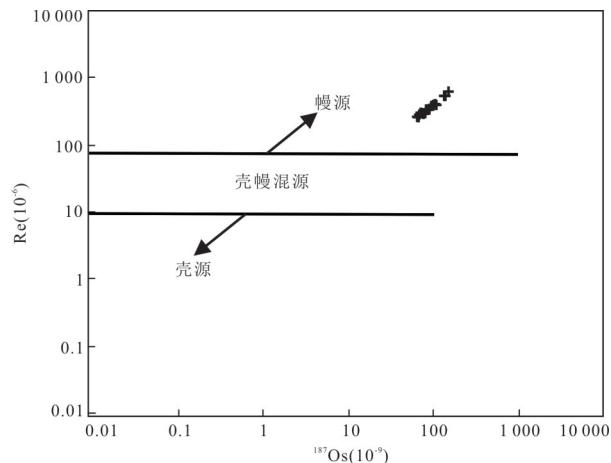


图 6 西藏山南努日矿床辉钼 ^{187}Re 同位素物源判别图解
Fig.6 The discriminant diagram of molybdenum ^{187}Re isotope from the Nuri polymetallic deposit
底图据 Zhou et al. (2013); 数据来源于张松等(2012b)、闫学义等(2010)

锆石 U-Pb 年代学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素地球化学的研究表明(王欣欣等, 2015, 王勤等, 2018), 具有埃达克质的中新世花岗闪长斑岩, 起始于印度板块与欧亚板块碰撞后伸展期, 由俯冲的印度大陆的下地壳熔融形成, 熔体在侵位过程中与雅鲁藏布江 MORB 亏损地幔之间进行了熔体—地幔的物质交换。Chen et al.(2011)、王立强等(2014)对矿石 S 同位素的研究也表明成矿物质可能来自于地幔和雅鲁藏布江 MORB。这一特征也符合冈底斯含矿埃达克质斑岩的源区特征(高成等, 2014)。具有岛弧岩浆特点的始新世黑云母花岗岩, 形成于印度板块与欧亚板块主碰撞阶段, 受新特提斯洋壳后期高角度俯冲及随后的断离作用影响, 软流圈上涌提供巨量的热烘烤效应, 使得因碰撞而加厚的拉萨地块南缘下地壳发生部分熔融。伴随着始新世强烈的地壳隆升导致下地壳拆沉作用引发弧岩浆的广泛出露的同时, 部分铜等成矿物质也逐渐从熔融玄武质下地壳中析出并富集于初始成矿流体中。

闫国强等(2015a、2015b)利用辉钼矿、白钨矿单矿物微量元素、稀土元素对矿床成矿流体物理化学条件制约, 发现主成矿期成矿流体在辉钼矿结晶沉淀的过程中不同程度混入了部分外来流体而富集 Cl, 其具有较高的氧逸度, 从而更有益于幔源岩石中的成矿物质氧化并逐步溶解于岩浆中, 结合 Re 含量变化, 努日铜钼钨矿床的成矿物质 Mo 可能来源于单一的深部幔源, 而矿区白钨矿测试表明, 富钨的原始成矿流体可能来源于深部壳源岩浆的结

晶分异,成矿流体沿着构造裂隙运移过程中与围岩比马组进行充分的水岩反应,最终赋存于热液中的 WO_4^{2-} 和钙质结合,使得大量白钨矿沉淀析出。努日铜钼钨多金属矿床其形成时代(55.34~24.77 Ma)几乎与黑云母花岗岩、花岗闪长斑岩(50.46~24.94 Ma)同时。该矿床可能是印度板块向欧亚板块俯冲—碰撞—伸展构造环境下,为印度陆块下地壳部分熔融形成的熔体在其向上运移过程中与俯冲洋壳释放出的富含 Fe^{3+} 的流体发生混合后,与雅鲁藏布江 MORB 亏损地幔橄榄岩发生交代作用, Fe^{3+} 氧化地幔中赋存的各类硫化物后,Cu、Mo 等被释放进入岩浆系统;并在上升过程中萃取加厚下地壳部分熔融形成黑云母花岗岩中的 Cu 等,最终在浅部与围岩发生接触交代形成努日铜钼钨多金属矿床。

5 结论

努日铜钼钨多金属的矿石 Pb-S-Re-Os 同位素特征表明其成矿物质主要来源于地幔,而不是来源于地壳,该矿床可能是在印度板块—欧亚板块碰撞后伸展阶段,由印度板块下地壳的部分熔融与具有幔源特征的富含 Fe^{3+} 的流体混合后与亏损地幔相互作用后,侵入过程中进一步萃取 W 等成矿物质到浅部,并与围岩比马组发生强烈的矽卡岩化沉淀形成。

致谢:野外工作得到成都地质调查中心戴婕工程师,福建冶金二院的张凯,王国峰工程师的帮助,室内工作得到四川冶金地质勘查院白景国工程师的帮助,在此表示感谢,感谢匿名评审专家和编辑的辛勤工作!

References

- Chen, L., Qin, K. Z., Li, J. X., et al., 2012. Fluid Inclusions and Hydrogen, Oxygen, Sulfur Isotopes of Nuri Cu-W-Mo Deposit in the Southern Gangdese, Tibet. *Resource Geology*, 62(1): 42–62. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2011.00179.x>
- Chen, L., Qin, K. Z., Li, G. M., et al., 2011. Geochemical Characteristics and Origin of Skarn Rocks in the Nuri Cu-Mo-W Deposit, Southern Tibet. *Geology and Prospecting*, 47(1):78–88 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L., Qin, K. Z., Li, G. M., et al., 2012. Geological and Skarn Mineral Characteristics of Nuri Cu-W-Mo Deposit in Southeast Gangdese, Tibet. *Mineral Deposits*, 31(3): 417–437 (in Chinese with English abstract).
- Dong, S. L., Huang, Y., Li, G. M., et al., 2015. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating and Geochemistry of Late Cretaceous Quartz Diorite in the Nuri Cu-Mo-W Deposit, South Tibet. *Rock and Mineral Analysis*, 34(6):712–718 (in Chinese with English abstract).
- Gao, C., Li, D. W., Liu, D. M., et al., 2014. Petrogenesis of the Miocene Ore - Bearing Granite Porphyries in the Southern Gangdese, Tibet. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(4):962–983 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y. M., Chen, Y. C., Tang, J. X., et al., 2011. Re-Os Dating of Molybdenite from the Yaguila Porphyry Molybdenum Deposit in Gongbo 'Gyamda Area, Tibet, and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 30(7): 1027–1036 (in Chinese with English abstract).
- Gariépy, C., Allègre, C. J., 1985. The Lead Isotope Geochemistry and Geochronology of Late-Kinematic Intrusives from the Abitibi Greenstone Belt, and the Implications for Late Archaean Crustal Evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(11): 2371–2383. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(85\)90237-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90237-6)
- Guo, Z. F., Wilson, M., Liu, J. Q., 2007. Post-Collisional Adakites in South Tibet: Products of Partial Melting of Subduction - Modified Lower Crust. *Lithos*, 96(1–2): 205–224. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.09.011>
- Hou, Z. Q., Gao, Y. F., Qu, X. M., et al., 2004. Origin of Adakitic Intrusives Generated during Mid-Miocene East-West Extension in Southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1–2): 139–155. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(04\)00007-x](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(04)00007-x)
- Hou, Z. Q., Yang, Z. M., Qu, X. M., et al., 2009. The Miocene Gangdese Porphyry Copper Belt Generated during Post-Collisional Extension in the Tibetan Orogen. *Ore Geology Reviews*, 36(1–3): 25–51. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.09.006>
- Huang, S. F., Jiang, S. Y., Jiang, H. Z., et al., 2011. Copper Polymetallic Ore-Forming System in Shannan Area and Analysis of Tectonic Stress Field in the Strike - Slip Transfer Zone in Tibet. *Geology and Exploration*, 47(1):1–10 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Y., Tang, J. X., Ding, J., et al., 2013. The Re-Os Isotope System of the Xiongcun Porphyry Copper-Gold Deposit, Tibet. *Geology in China*, 40(1): 302–311 (in Chinese with English abstract).
- Ji, W. Q., Wu, F. Y., Zhong, S. L., et al., 2009. Geochronology and Petrogenesis of Granitic Rocks in Gangdese Batholith, Southern Tibet. *Science in China (Series D)*,

- 39(7): 849–871 (in Chinese).
- Jiang, H. Z., Zeng, H. L., Wu, Z. S., et al., 2011. Geological Characteristics and Prospecting Prediction in Deep Area of Layer Skarn Cu-W-Mo Deposit in Shannan Nuri Ore District, Tibet. *Geology and Prospecting*, 47(1): 71–77 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z. Q., Wang, Q., Wyman, D. A., et al., 2011. Origin of ~30 Ma Chongmuda Adakitic Intrusive Rocks in the Southern Gangdese Region, Southern Tibet: Partial Melting of the Northward Subducted Indian Continent Crust?. *Geochimica*, 40(2): 126–146 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. M., Qin, K. Z., Ding, K. S., et al., 2006. Geology, Ar-Ar Age and Mineral Assemblage of Eocene Skarn Cu-Au±Mo Deposits in the Southeastern Gangdese Arc, Southern Tibet: Implications for Deep Exploration. *Resource Geology*, 56(3): 315–336. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2006.tb00286.x>
- Li, G. M., Rui, Z. Y., Wang, G. M., et al., 2005. Molybdenite Re-Os Dating of Jiama and Zhibula Polymetallic Copper Deposits in Gangdese Metallogenic Belt of Tibet and Its Significance. *Mineral Deposits*, 24(5): 481–489 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. Y., Mao, J. W., Sun, Y. L., et al., 1996. Re-Os Isotopic Chronology of Molybdenites in the Shizhuyuan Polymetallic Tungsten Deposit, Southern Hunan. *Geological Review*, 42(3): 261–267 (in Chinese with English abstract).
- Liang, H. Y., Wei, Q. R., Xu, J. F., et al., 2010. Study on Zircon LA-ICP-MS U-Pb Age of Skarn Cu Mineralization Related Intrusion in the Southern Margin of the Gangdese Ore Belt, Tibet and Its Geological Implication. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1692–1698 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Hua, R. M., Li, X. B., 1999. Preliminary Study of Large-Scale Metallogenesis and Large Clusters of Mineral Deposits. *Mineral Deposits*, 18(4): 291–299 (in Chinese with English abstract).
- Mo, J. H., Liang, H. Y., Yu, H. X., et al., 2008. Zircon U-Pb Age of Biotite Hornblende Monzonitic Granite for Chongmuda Cu-Au(Mo) Deposit in Gangdese Belt, Xizang, China and Its Implications. *Geochimica*, 37(3): 206–212 (in Chinese with English abstract).
- Peng, J. T., Zhou, M. F., Hu, R. Z., et al., 2006. Precise Molybdenite Re-Os and Mica Ar-Ar Dating of the Mesozoic Yaogangxian Tungsten Deposit, Central Nanling District, South China. *Mineralium Deposita*, 41(7): 661–669. <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0084-4>
- Sun, X., Zheng, Y. Y., Wu, S., et al., 2013. Mineralization Age and Petrogenesis of Associated Intrusions in the Mingze-Chengba Porphyry-Skarn Mo-Cu Deposit, Gangdese. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1392–1406 (in Chinese with English abstract).
- Tong, Y., Wang, T., Hong, D. W., et al., 2006. Pb Isotopic Composition of Granitoids from the Altay Orogen (China): Evidence for Mantle-Derived Origin and Continental Growth. *Acta Geologica Sinica*, 80(4): 517–528 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. Q., Tang, J. X., Chen, W., et al., 2014. Sulfur and Lead Isotopic Geochemistry of the Nuri and Chengba Cu-Mo-W Deposits in Tibet. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(1): 39–48 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Huang, Y., Dong, S. L., et al., 2018. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Geochronology, Geochemistry and Implications of Ore-Forming Porphyry in Nuri Skarn Cu-Mo-W Deposit, Eastern Gangdese. *Mineral Deposits*, 37(3): 571–586 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. X., Ding, J., Yan, G. Q., et al., 2015. Zircon U-Pb Age of the Biotite Granite of Nuri Skarn Type Cu-Mo-W Deposit in Shannan, Tibet and Its Metallogenic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(3): 549–559 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. X., Zheng, R. C., Yan, G. Q., et al., 2014. Re-Os Dating of Chalcopyrite of Nuri Cu-Mo-W Deposit and Its Significance. *Metal Mine*, 32(10): 126–129 (in Chinese with English abstract).
- Yan, G. Q., Ding, J., Huang, Y., et al., 2014. Geochronology and Significances of Bima Formation Andesite of Shannan, Tibet. *Metal Mine*, 32(8): 91–94 (in Chinese with English abstract).
- Yan, G. Q., Ding, J., Huang, Y., et al., 2015a. Geochemical Characteristics of Rare Earth Elements and Trace Elements in the Nuri Scheelite Deposit, Tibet, China—Indications for Ore-Forming Fluid and Deposit Genesis. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(1): 87–94 (in Chinese with English abstract).
- Yan, G. Q., Ding, J., Huang, Y., et al., 2015b. Geochemical Characteristics of Trace Elements and REE of Molybdenites from the Nuri Cu-Mo-W Deposit, Tibet: Constraint on Nature of the Ore-Forming Fluid. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(3): 564–570 (in Chinese with English abstract).
- Yan, G. Q., Wang, X. X., Huang, Y., et al., 2018. Evolution Characteristics of Magma in the Nuri Superlarge Polymetallic Deposit, Tibet: Implications for Regional Mineralization in the Shannan Ore Cluster Area. *Acta*

- Geologica Sinica*, 92(10): 2138—2154 (in Chinese with English abstract).
- Yan, X. Y., Huang, S. F., Du, A. D., et al., 2010. Re-Os Ages of Large Tungsten, Copper and Molybdenum Deposit in the Zetang Orefield, Gangdisê and Marginal Strike-Slip Transforming Metallogenesis. *Acta Geologica Sinica*, 84(3):398—406 (in Chinese with English abstract).
- Yao, J. M., Hua, R. M., Qu, W. J., et al., 2007. Re-Os Isotope Dating of Molybdenites in the Huangshaping Pb-Zn-W-Mo Polymetallic Deposit, Hunan Province, South China and Its Geological Significance. *Science China Earth Sciences*, 50(4): 519—526. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-2052-y>
- Ying, L. J., Wang, D. H., Tang, J. X., et al., 2010. Re-Os Dating of Molybdenite from the Jiamal Copper Polymetallic Deposit in Tibet and Its Metallogenic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 84(8): 1165—1174 (in Chinese with English abstract).
- Zartman, R. E., Doe, B. R., 1981. Plumbotectonics—The Model. *Tectonophysics*, 75(1—2): 135—162. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90213-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90213-4)
- Zhang, L. G., 1992. Present Status and Aspects of Lead Isotope Geology. *Geology and Prospecting*, 28(4):21—29 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S., Wang, Y. B., Chu, S. X., 2012a. Zircon U-Pb Ages and Sr-Nd-Hf Isotopic Composition of the Haigou Granitoids at the Northeastern Margin of North China Craton: Implications for Geodynamic Setting. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 544—556 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S., Zheng, Y. C., Huang, K. X., et al., 2012b. Re-Os Dating of Molybdenite from Nuri Cu-W-Mo Deposit and Its Geological Significance. *Mineral Deposits*, 31(2): 337—346 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Hu, D. G., Lu, L., et al., 2013. Discovery and Metallogenic Significance of the Late Cretaceous Adakites from Zetang, Tibet. *Journal of Geomechanics*, 19(1):45—52, 112 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Hu, D. G., Wu, Z. H., et al., 2012. Molybdenite Re-Os Isotope Dating of Sangbujiala Copper Deposit in the South Margin of the Eastern Gangdese Section, Tibet, and Its Geological Implications. *Journal of Geomechanics*, 18(2): 178—186 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Q., Jiang, Y. H., Zhang, H. H., et al., 2013. Mantle Origin of the Dexing Porphyry Copper Deposit, SE China. *International Geology Review*, 55(3): 337—349. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.708987>
- Zhou, Q., Jiang, Y. H., Liao, S. Y., et al., 2013. New Research Progress of the Dexing Porphyry Copper Deposit. *Geological Review*, 59(5): 933—940 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈雷,秦克章,李光明,等,2011.西藏山南努日铜钼钨矿床矽卡岩地球化学特征及成因.地质与勘探,47(1):78—88.
- 陈雷,秦克章,李光明,等,2012.西藏冈底斯南缘努日铜钼钨矿床地质特征与矽卡岩矿物学研究.矿床地质,31(3): 417—437.
- 董随亮,黄勇,李光明,等,2015.藏南努日铜—钼矿床晚白垩世石英闪长岩U-Pb定年及其地球化学特征.岩矿测试,34(6):712—718.
- 高成,李德威,刘德民,等,2014.西藏冈底斯南缘中新世含矿斑岩源区组成与成因.大地构造与成矿学,38(4): 962—983.
- 高一鸣,陈毓川,唐菊兴,等,2011.西藏工布江达地区亚贵拉铅锌钼矿床辉钼矿Re-Os测年及其地质意义.地质通报,30(7):1027—1036.
- 黄树峰,江善元,江化寨,等,2011.西藏山南铜多金属成矿系统及走滑转换构造应力场分析.地质与勘探,47(1): 1—10.
- 黄勇,唐菊兴,丁俊,等,2013.西藏雄村斑岩铜矿床辉钼矿Re-Os同位素体系.中国地质,40(1):302—311.
- 纪伟强,吴福元,钟孙霖,等,2009.西藏南部冈底斯岩基花岗岩时代与岩石成因.中国科学(D辑),39(7):849—871.
- 江化寨,曾海良,吴志山,2011.西藏山南努日矿区层矽卡岩型铜钼钨矿床地质特征及深部找矿预测.地质与勘探,47(1):71—77.
- 姜子琦,王强,Wyman, D. A., 等, 2011.西藏冈底斯南缘冲木达约30 Ma埃达克质侵入岩的成因:向北俯冲的印度陆壳的熔融?.地球化学,40(2):126—146.
- 李光明,芮宗瑶,王高明,等,2005.西藏冈底斯成矿带甲马和知不拉铜多金属矿床的Re-Os同位素年龄及其意义.矿床地质,24(5):481—489.
- 李红艳,毛景文,孙亚利,等,1996.柿竹园钨多金属矿床的Re-Os同位素等时线年龄研究.地质论评,42(3): 261—267.
- 梁华英,魏启荣,许继峰,等,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.岩石学报,26(6):1692—1698.
- 毛景文,华仁民,李晓波,1999.浅议大规模成矿作用与大型矿集区.矿床地质,18(4):291—299.
- 莫济海,梁华英,喻亨祥,等,2008.西藏冲木达铜—金(钼)矿床黑云角闪二长花岗岩锆石U-Pb年龄及其意义.地球化学,37(3):206—212.
- 孙祥,郑有业,吴松,等,2013.冈底斯明则—程巴斑岩—矽卡岩型Mo-Cu矿床成矿时代与含矿岩石成因.岩石学报,

- 29(4):1392—1406.
- 童英,王涛,洪大卫,等,2006.中国阿尔泰造山带花岗岩 Pb 同位素组成特征:幔源成因佐证及陆壳生长意义.地质学报,80(4):517—528.
- 王立强,唐菊兴,陈伟,等,2014.西藏努日、程巴铜—钼—钨矿床硫铅同位素地球化学.地球学报,35(1):39—48.
- 王勤,黄勇,董随亮,等,2018.冈底斯成矿带东段努日矿床成矿斑岩年代学,地球化学及其意义.矿床地质,37(3):571—586.
- 王欣欣,丁俊,闫国强,等,2015.西藏山南努日矽卡岩型铜钼矿床黑云母花岗岩锆石 U-Pb 定年及其成矿意义.地质学报,89(3):549—559.
- 王欣欣,郑荣才,闫国强,等,2014.努日铜钼钨矿床黄铜矿 Re-Os 定年及意义.金属矿山,32(10):126—129.
- 闫国强,丁俊,黄勇,等,2014.西藏山南比马组安山岩形成时代及意义.金属矿山,32(8):91—94.
- 闫国强,丁俊,黄勇,等,2015a.西藏努日白钨矿床微量元素和稀土元素地球化学特征——对成矿流体与矿床成因的指示.矿物学报,35(1):87—94.
- 闫国强,丁俊,黄勇,等,2015b.西藏努日铜钼钨矿床辉钼矿微量元素、稀土元素地球化学特征——对矿床成矿流体性质的约束.矿物岩石地球化学通报,34(3):564—570.
- 闫国强,王欣欣,黄勇,等,2018.西藏山南努日超大型钨多金属矿床岩浆演化对区域成矿作用指示.地质学报,92(10):2138—2154.
- 闫学义,黄树峰,杜安道,2010.冈底斯泽当大型钨铜钼矿 Re-Os 年龄及陆缘走滑转换成矿作用.地质学报,84(3):398—406.
- 应立娟,王登红,唐菊兴,等,2010.西藏甲玛铜多金属矿辉钼矿 Re-Os 定年及其成矿意义.地质学报,84(8):1165—1174.
- 张理刚,1992.铅同位素地质研究现状及展望.地质与勘探,28(4):21—29.
- 张松,王永彬,褚少雄,2012a.华北克拉通北缘东段海沟岩体的锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素组成及其动力学背景.岩石学报,28(2):544—556.
- 张松,郑远川,黄克贤,等,2012b.西藏努日矽卡岩型铜钼钨矿辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义.矿床地质,31(2):337—346.
- 赵珍,胡道功,陆露,等,2013.西藏泽当地区晚白垩世埃达克岩的发现及其成矿意义.地质力学学报,19(1):45—52,112.
- 赵珍,胡道功,吴珍汉,等,2012.西藏冈底斯东段南缘桑布加拉辉钼矿 Re-Os 定年及地质意义.地质力学学报,18(2):178—186.
- 周清,姜耀辉,廖世勇,等,2013.德兴斑岩铜矿床研究新进展.地质论评,59(5):933—940.