

doi: 10.12029/gc20190103

马振东, 方俊杰, 刘小权. 2019. 中国新生代上地幔铅同位素地球化学场对成岩、成矿物质来源的制约——以斑岩铜矿床及铜镍硫化物矿床为例[J]. 中国地质, 46(1): 32–42.

Ma Zhendong, Fang Junjie, Liu Xiaoquan. 2019. Constraints of the lead isotope geochemical field of the Upper Mantle in China on diagenetic and ore-forming materials exemplified by porphyry copper deposit and copper-nickel sulfide deposit[J]. *Geology in China*, 46(1): 32–42(in Chinese with English abstract).

中国新生代上地幔铅同位素地球化学场对成岩、成矿物质来源的制约——以斑岩铜矿床及铜镍硫化物矿床为例

马振东, 方俊杰, 刘小权

(中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要: 区域成矿带铅稳定同位素地球化学研究是区域地球化学分区、示踪成岩成矿物质来源、阐明矿床成因的有效途径。本文以中国特有的大地构造背景为基础, 以新生代上地幔铅同位素组成的地球化学场为依据, 示踪了中国大型、超大型斑岩型铜矿床及铜镍硫化物型矿床的成岩成矿物质来源。结果显示: ①斑岩型铜矿床及铜镍硫化物型矿床成矿母岩继承了所属陆块的上地幔铅同位素组成特征; ②两类矿床的含矿岩体和矿石矿物铅同位素组成十分一致, 示踪两者同源; 壳熔花岗岩和围岩地层的铅同位素组成与矿石铅同位素组成迥异; ③位于各陆块的斑岩型铜矿床及铜镍硫化物型矿床的成矿母岩和矿石铅同位素组成除继承了各陆块上地幔不同的铅同位素组成特征外, 还示踪了壳幔层圈间耦合性的“块体效应”, 同时, 上地幔铅同位素组成可能还具“延迟效应”。

关键词: 新生代上地幔铅同位素场; 斑岩型铜矿; 铜镍硫化物; 物质来源

中图分类号: P594.1; P618.41 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)01-0032-11

Constraints of the lead isotope geochemical field of the Upper Mantle in China on diagenetic and ore-forming materials exemplified by porphyry copper deposit and copper-nickel sulfide deposit

MA Zhendong, FANG Junjie, LIU Xiaoquan

(*China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China*)

Abstract: The lead stable isotope geochemistry of regional metallogenic belts is an effective means for making regional geochemical zoning, tracing diagenetic ore-forming sources, and elucidating the genesis of deposits. Based on the unique tectonic setting of China, the authors have traced the diagenesis of large-sized and superlarge porphyry copper deposits and copper-nickel sulfide deposits in China based on the geochemical field of the lead isotope composition of the upper mantle in China for sources of ore-forming materials. Some conclusions have been reached: 1. The porphyry copper deposit and the copper-nickel sulfide type

收稿日期: 2018-11-16; 改回日期: 2018-12-12

基金项目: 中国地质调查局项目“中国地球化学场与成矿关系研究”课题(DD20160346)资助。

作者简介: 马振东, 男, 1943年生, 教授, 从事地球化学方向的教学和科研; E-mail: zhdongma@163.com。

ore-forming parent rock inherit the lead isotope composition of the upper mantle of the adjacent land mass; 2. The lead isotope composition of the ore-bearing rock mass and ore minerals of the two types of deposits is obviously consistent with each other, and the two traces are homologous; the lead isotope composition of the shell fused granite and surrounding strata is different from that of the ore; 3. In addition to inheriting different lead isotope composition characteristics of the mantle on each land mass, the lead isotope composition of rock and ore in the porphyry copper deposits and the copper-nickel sulfide deposits of each land mass also trace the "block effect" of the coupling between the crust and the mantle layers. At the same time, the lead isotope composition of the upper mantle may exhibits "delay effect".

Key words: Cenozoic upper mantle lead isotope field; porphyry copper deposit; copper-nickel sulfide; material source

About the first author: MA Zhendong, male, born in 1943, professor, majors in the teaching and study of geochemistry; E-mail: zhdongma@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Project (No. DD20160346).

1 引言

近年来,国内外铅同位素地球化学研究方兴未艾,大量研究表明:全球、区域岩石圈铅同位素组成特征及演化受原始地幔的铀、钍、铅元素丰度的不均一性、壳幔交换的动力学过程、层圈铀、钍、铅丰度及作用发生的时间等诸多因素的控制。为此,开展区域各类矿床铅同位素组成特征的研究,可为地球化学分区(铅同位素填图)、示踪物质来源及区域地球化学找矿预测提供有意义的信息。本文运用了当今国内外研究铅同位素的新思路和方法,以我国特有的大地构造背景为基础,以我国新生代上地幔铅同位素组成的地球化学场为依据,示踪我国大型、超大型斑岩型铜矿床及铜镍硫化物型矿床的成岩成矿物质来源,试图从更广阔的时、空领域及难观察的微观变化来探讨铅同位素的示踪意义。

多年来的地质、地球物理和地球化学研究已初步揭示:主要组成中国大陆的华北、扬子、华南、塔里木等陆块长期位于冈瓦纳大陆和劳亚大陆交接的过渡带,而且各陆块的壳和幔具有不同的铅同位素组成特征(壳幔间具耦合性)与演化历史(朱炳泉等,1998;张理刚,1995)。深入研究地幔铅同位素组成特征对于来自深源(上地幔、下地壳)的斑岩型铜矿及铜镍硫化物型矿床具有重要的理论和实践意义。

2 中国新生代上地幔铅同位素地球化学场的特征

路凤香等(2009)收集了301件近年来(20世纪80年代末至2004年)在国内外杂志上发表的幔源

玄武岩的铅同位素资料,为了保证这些玄武岩为上地幔来源,它们要符合下面两个条件之一:①其中含有地幔捕虏体或高压巨晶;②通过微量元素及同位素示踪该玄武岩确属幔源岩浆结晶产物。这样所获得的成果能清楚地反映新生代上地幔的特征,而不受地壳和壳-幔过渡带组成的干扰。所收集的玄武岩的时代,除个别地区为中生代喷发(如新疆托云盆地、辽宁阜新等)外,均为新生代时期,因此基本上可以代表新生代上地幔铅同位素地球化学场。由图1可知(路凤香等,2009):中国大陆具有比较明显的南北向铅同位素的差异,依据目前已有资料点的控制,粗略划分的南北界限是:从合肥—郑州—银川—汗腾格里峰,分界线以北的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 18$,以南 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18$ 。

(1)结合我国华北、扬子、华夏、塔里木陆块及西藏冈底斯造山带、“三江”造山带的空间分布,由图1可见:华北陆块新生代地幔铅同位素: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \leq 17.5$ (渤海周边地区除外);扬子陆块: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $17.5 \sim 18.5$;华夏陆块: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18.5$;塔里木陆块: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $17.5 \sim 18.5$ 。

(2)西藏冈底斯造山带、“三江”造山带新生代地幔铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18.5$ 。

综观全图:华北新生代地幔铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \leq 17.5$,扬子、塔里木陆块新生代地幔铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $17.5 \sim 18.5$;华夏陆块、西藏冈底斯造山带、“三江”造山带新生代地幔铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18.5$ 。

(3)朱炳泉、张理刚等(1993,1998)对中国东部开展的大尺度铅(结合部分Nd、Sr数据)同位素填图,已证明华夏、扬子、华北等陆块的幔、壳具有不

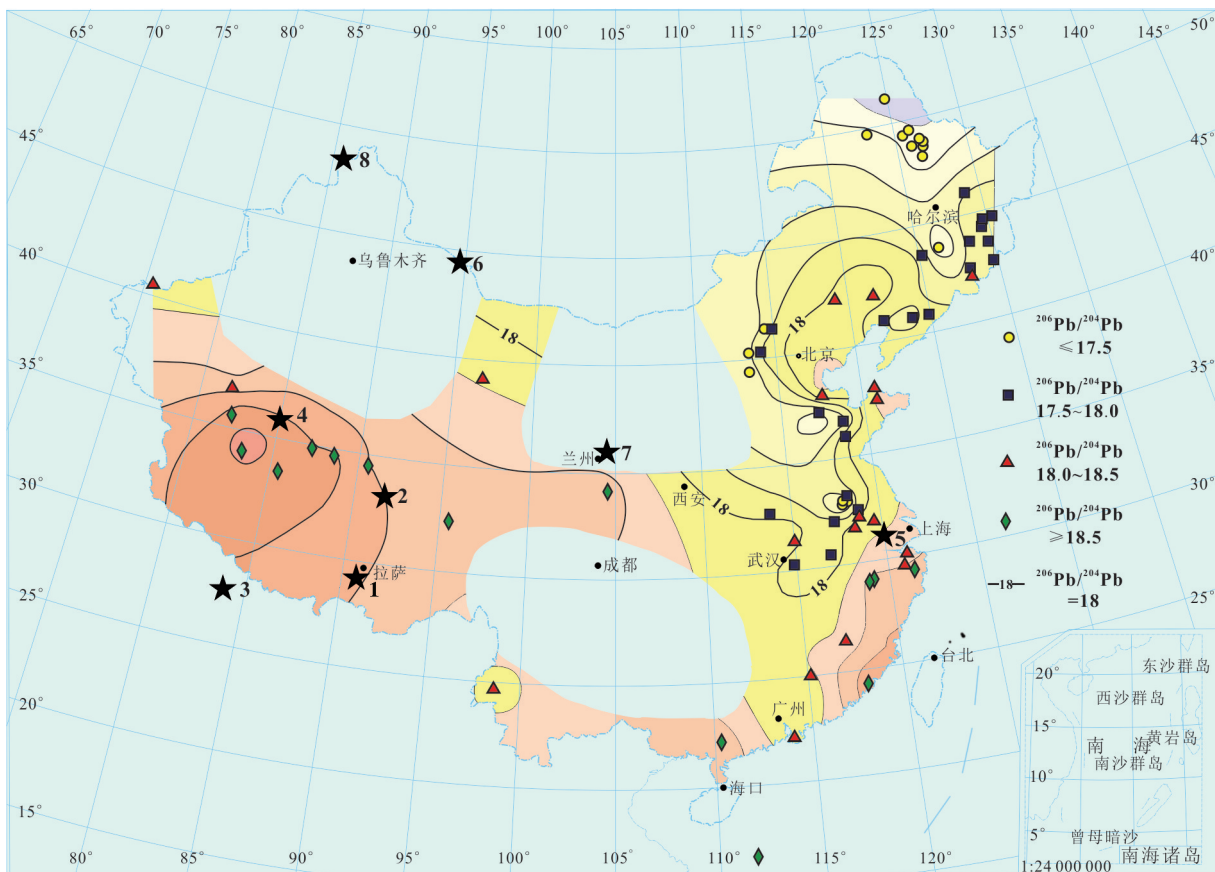


图1 中国新生代地幔及斑岩型铜矿和铜镍硫化物矿床 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 铅同位素组成分布(据路凤香2009,修改)

★1—驱龙;★2—玉龙;★3—雄村;★4—多龙;★5—德兴;★6—土屋-延东;★7—金川;★8—喀拉通克

Fig.1 Distribution of lead isotope composition of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ in the Cenozoic mantle, porphyry copper deposits and copper-nickel sulfide deposit in China (after Lu Fengxiang 2009, revised)

★1—Demonstration; ★2—Yulong; ★3—Xiongcu; ★4—Duolong; ★5—Dexing; ★6—Tuwu—Yandong; ★7—Jinchuan; ★8—Kalatongke

同的铅同位素组成,并据之划分了相应的铅同位素省和亚省。

3 中国斑岩型铜矿 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 铅同位素组成特征

众所周知,斑岩型(矽卡岩型)铜矿的成矿母岩主要是基性岩、中性岩及中酸性岩石。我国铜矿的主要类型:斑岩型(矽卡岩型)铜矿与深源中酸性浅成侵入体有关。

在地壳深部经强烈地幔交代作用,原始地幔岩浆分异出来的富Cu融体与下地壳英闪长质-英闪质-花岗闪长质的片麻岩发生局部熔融,形成了玄武-安山质母岩浆房,Cu含量 $90 \times 10^{-6} \sim 110 \times 10^{-6}$,其深度约20~30 km,这是第一级岩浆泵站;在深部地壳范围内玄武安山质母岩浆不断分离结晶,沿着壳

幔断裂分异出辉长质-闪长质-花岗闪长质岩浆,由于熔浆结构所产生的晶体场效应, Cu^{2+} 等过渡族元素离子,倾向于在岩浆熔体中富集,其Cu含量 $50 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ (暗色包体),形成深度为2~3 km至4~5 km,这是二级岩浆泵站;在近地表0.5~2 km所形成的闪长岩、花岗闪长岩小岩株、小岩墙,就是目前所研究的含矿小岩体,它是铜富集的第三级岩浆泵站(含铜几十至几百个 10^{-6}),它又是赋矿空间;中酸性花岗岩小岩株与围岩的接触带、顶缘冷缩裂隙带、隐蔽爆发角砾岩带、围岩层间破碎带,由于多级岩浆泵的多期多次的“泵吸”作用,源源不断地把Cu等成矿物质从深部带到地壳浅部,在深部岩浆气液流体多期多次叠加作用下,使之发生普遍蚀变、矿化,局部形成工业矿体、富矿体(马振东等,1996,1997)。

为此,斑岩型铜矿成矿母岩、铜矿质的深源特征,必然继承了上地幔、下地壳U、Th、Pb元素丰度和铅同位素组成特征(见图1、表1★1~★6矿床)。

4 中国新生代地幔铅同位素地球化学场对斑岩型铜矿铅同位素组成的制约

自然界铅同位素组成变化不外乎两个因素:时间和源区U、Th、Pb的丰度,在时间因素确定后,源区U、Th、Pb的丰度是铅同位素组成变化的主导因素!

从表1获知,中国大型、超大型斑岩铜矿床的成岩、成矿时代:特提斯—喜马拉雅成矿域、滨太平洋成矿域、古亚洲成矿域分别是新生代(中生代)、中生代和古生代。

(1)特提斯—喜马拉雅成矿域位于印度洋板块和亚洲大陆强烈碰撞、挤压、伸展地带。西藏冈底斯铜多金属成矿带属中新世后,冈底斯造山带由汇聚造山向伸展走滑转换的过渡,由于软流圈上涌,深部物质减压、分熔等因素,诱发深熔作用,形成富含挥发分、侵位能力极强的花岗岩浆,沿次级北东向控盆控岩(控矿)断裂侵位,形成一系列的斑岩体、成矿小岩体及火山岩,造就了驱龙、玉龙等矿床的巨型的斑岩铜多金属成矿带。

雄村斑岩型铜(金)矿集区位于冈底斯南缘晚燕山期—早喜马拉雅期陆缘岩浆弧东段南缘,岩浆弧与昂仁—日喀则中—新生代弧前盆地转换部位。它是冈底斯成矿带上目前发现的唯一一个与新特提斯洋壳早期俯冲作用有关的斑岩—浅成低温热液型铜金矿床。

而多龙矿集区地处班公湖—怒江成矿带,班公湖—怒江成矿带地跨青藏高原中部班公错—怒江缝合带两侧,晚白垩世期,伴随着南羌塘—“三江”复合板片与冈底斯—念青唐古拉板片之间弧—陆碰撞,在班怒缝合带西段措勤—申扎火山岩浆弧内形成与上地幔或初生下地壳重熔并受上地壳物质不同比例混染的斑岩—矽卡岩铜金矿成矿系列。

①结合图1、表1可知,驱龙铜、钼多金属矿床含矿岩体 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$:18.486~18.715(平均18.537),矿石矿物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$:18.443~18.591(平均18.521);与西藏冈底斯造山带新生代地幔铅同位

素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}>18.5$ 完全吻合。这充分佐证了驱龙含矿岩体和成矿物质源于上地幔、下地壳。

②“三江”造山带属特提斯—喜马拉雅构造造成矿域的东段,位于印度洋板块和亚洲大陆强烈碰撞、挤压、伸展地带。受到印度洋板块北东部犄角突兀构造作用的影响。藏东地区在“三江”陆内裂谷构造作用下,地质构造复杂多样,岩浆作用频繁发育,成矿条件十分有利,是我国重要的铜、金多金属等矿床的成矿远景区域。其中有著名的“三江”藏东玉龙铜多金属巨型成矿带及青海纳日贡玛斑岩铜钼矿床。

新生代玉龙铜多金属矿床含矿岩体 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$:18.712~18.824,(平均18.736),矿石矿物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$:18.355~18.892,(平均18.733);中生代多不杂铜矿燕山期花岗闪长斑岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$:18.514~18.631(平均18.585)(辛洪波,2009),尕尔穷矿床矿石矿物18.522~18.615(平均18.565),波龙铜矿床矿石矿物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$:18.552~18.701(平均18.590)。与“三江”造山带新生代地幔铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}>18.5$ 完全吻合。这也充分佐证了藏东玉龙、班公湖—怒江含矿岩体和成矿物质源于上地幔、下地壳。

③与新生代新特提斯洋壳早期俯冲作用有关的雄村斑岩—浅成低温热液型铜金矿床含矿岩体 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$:18.170~18.432(平均18.231),矿石矿物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$:18.162~18.260(平均18.189),明显比班公湖—怒江铜、金多金属矿床含矿岩体、矿石矿物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 偏低。其原因可能是地幔铅同位素组成还具“延迟效应”。

(2)江西德兴斑岩型铜矿田位于滨太平洋成矿域,是我国东部大陆环境最具代表性的特大型斑岩铜矿床,它处于扬子陆块与华南陆块碰撞拼合而成的钦杭成矿带的东段,位于扬子陆块东南缘赣东北深大断裂附近,地质构造和成矿因素复杂,成矿作用具有多期叠加、多源混杂等特点。

江西德兴斑岩型铜矿田成岩、成矿时代为中生代((171±3)Ma,(170.9±1.1)Ma),含矿岩体 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$:17.688~18.377(平均17.995),矿石矿物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$:17.954~18.320(平均18.097)。与扬子陆块东部新生代地幔铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (17.5~18.5)基本一致。

表1 中国大型—超大型斑岩铜矿地质、²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 铅同位素组成特征Table 1 Characteristics of large-superlarge porphyry copper deposits in China, ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb lead isotope composition

大地构造背景	斑岩铜矿床	成矿环境	含矿岩体 成岩时代/Ma	成矿时代/Ma	含矿岩体	矿石矿物	新生代上地幔
					²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb 铅同位素组成(样品数平均)		
西藏冈底斯造山带	★1 驱龙Cu、Mo多金属矿床	冈底斯造山带由汇聚造山向伸展走滑转换的过渡环境	黑云母二长花岗斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 加权平均年龄分别为(16.35±0.40)Ma, (16.38±0.46)Ma(王亮亮等, 2006)	6件辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (16.41 ± 0.48)Ma(孟祥金等, 2003)	18.486~18.715, (平均 18.537)(17)(孟祥金等, 2006)	18.443~18.591, (平均 18.521)(5)(孟祥金等, 2006)	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb: >18.5
	★2 玉龙斑岩铜(钼)矿床	金沙江缝合线和班公湖—怒江缝合线之间羌塘地体	锆石 SHRIMP 测年成矿前石英二长斑岩为(43.6±0.8)Ma, 成矿期黑云母二长花岗斑岩为(41.0±1.0)Ma(郭利果等, 2006)	Re-Os 等时线年龄为(41.6±1.4)Ma(唐菊兴等, 2009)	18.712~18.824, (平均 18.736)(10)(马鸿文, 1988)	18.355~18.892, (平均 18.733)(7)(马鸿文, 1988)	
西藏冈底斯造山带	★3 雄村斑岩型铜(金)矿床	冈底斯南缘晚燕山期—早喜马拉雅期陆缘岩浆弧	U-Pb 锆石成岩年龄为(173±3)Ma(唐菊兴等, 2010)	1 矿体辉钼矿 Re-Os 加权平均模式年龄为(161.5 ± 2.7)Ma(郎兴海等, 2010)	18.170~18.432, (平均 18.231)(6)(郎兴海等, 2012)	18.162~18.260, (平均 18.189)(5)(郎兴海等, 2012)	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb: 17.5~18.5
	★4 多龙斑岩型铜(金)矿床	多龙矿集区地处班公湖—怒江成矿带, 班公湖—怒江成矿带地跨青藏高原中部班公错—怒江缝合带两侧	多不杂含矿斑岩中锆石的 U-Pb (SHRIMP) 年龄为(120.9±2.4)Ma(余宏全等, 2009)	多不杂辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为(118.0±1.5)Ma(余宏全等, 2009)	多不杂铜矿燕山期花岗岩长斑岩 ²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb : 18.514~18.631 (平均 18.585)(辛洪波等, 2009)	尕尔穷矿床 18.522~18.615, (平均 18.565)(5)(姚晓峰, 2012) 波龙铜矿床 ²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb : 18.552~18.701 (平均 18.590)(周玉, 2013)	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb: >18.5
扬子板块	★5 德兴斑岩型铜矿田(富家坞、朱砂红、铜厂)	扬子陆块和华夏陆块在晋宁期发生碰撞拼贴形成的钦—杭结合带	SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(171±3)Ma(王强等, 2004)	富家坞矿床的辉钼矿 Re-Os 加权平均年龄为(170.9±1.1)Ma(周清, 2011)	17.688~18.377, (平均 17.995)(8)(周清, 2011)	17.954~18.320 (平均 18.097)(10)(周清, 2011)	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb: 17.5~18.5
塔里木板块	★6 土屋—延东铜矿床	塔里木板块和准噶尔板块碰撞带北侧的觉罗塔格晚古生代石炭纪火山岛弧	矿化斜长花岗斑岩体锆石 SHRIMP 微区原位 U-Pb 测年, 其中土屋矿区为(334±3)Ma, 延东矿区为(333±4)Ma(陈富文等, 2005)	辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为晚石炭世(323±2)Ma(芮宗瑶等, 2002)	17.913~18.059, (平均 17.986)(候广顺等, 2005)	17.806~17.820, (平均 17.814)(候广顺等, 2005)	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb: 17.5~18.5

(3) 新疆东天山土屋—延东铜矿田隶属于古亚洲成矿域,位于塔里木板块和准噶尔微板块碰撞带北侧的觉罗塔格晚古生代石炭纪火山岛弧北侧,北为大草滩断裂,南以康古尔塔格深大断裂为界。在晚石炭世早期汇聚阶段沉积了复理石建造夹基—中—酸性火山岩建造,中期大规模钙碱性系列花岗岩侵入,土屋—延东含矿岩体属该阶段的产物(含矿岩体斜长花岗斑岩体锆石 SHRIMP 微区原位 U—Pb 测年,其中土屋矿区为 (334 ± 3) Ma,延东矿区为 (333 ± 4) Ma)。土屋—延东铜矿床辉钼矿 Re—Os 等时线年龄为晚石炭世 (323 ± 2) Ma。

土屋—延东铜矿床含矿岩体 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 17.913 ~ 18.059 (平均 17.986), 矿石矿物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 17.806 ~ 17.820 (平均 17.814), 古亚洲成矿域塔里木板块新生代地幔铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 17.5 ~ 18.5。两者十分一致。

综上所述,从中国新生代地幔 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 铅同位素组成及斑岩型铜矿 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 铅同位素组成分布特征中获知:

(1) 斑岩型铜矿成矿母岩继承了上地幔 U、Th、Pb 元素丰度和铅同位素组成特征;

(2) 斑岩型铜矿含矿岩体与矿石矿物铅同位素组成十分一致,示踪两者同源(图2,图3)。如江西德兴斑岩铜矿矿石铅(黄铁矿)铅同位素相对较均一(虚线投点域), $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 17.954 ~ 18.320, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$:

15.407 ~ 15.517, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 37.933 ~ 38.153, 而与之有成因联系的含矿斑岩体具铅同位素组成(实线投点域)与矿石铅相似,相应的比值分别为 17.688 ~ 18.377, 15.478 ~ 15.614, 37.210 ~ 38.491, 两者投点域基本吻合(图2)。

而在德兴矿田东南侧的大茅山壳熔黑云母花岗岩基的铅同位素组成(点线投点域)(图2)与含矿斑岩体矿石铅迥然有别,其投点域明显具较高的放射成因铅同位素组成,三类地质体的铅同位素组成特征清晰地示踪了德兴斑岩铜矿的矿质来源—深源花岗闪长斑岩小岩株(铜厂、富家坞、朱砂红)。

又如藏东玉龙斑岩铜矿含矿斑岩体全岩铅同位素组成变化范围小(虚线投点域),在投点图中集中分布。 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18.714 ~ 18.824, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15.646 ~ 15.673, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 38.867 ~ 38.999。此外,II号矿体的矿石铅同位素组成(实线投点域)与含矿斑岩体铅同位素组成十分相似,二者落在同一投点域内,示踪其物源的一致性(图3)。

而围岩及赋存其中的黄铁矿具有较高的放射性成因铅,明显落在与II号矿体及玉龙含矿斑岩体投点域范围外,这一特征示踪两者不同的物源,地层中物源明显受U、Th放射性元素的影响。

(3) 除了各陆块的壳和幔具有不同的铅同位素组成特征及壳幔间耦合性的“块体效应”外;地幔铅同位素组成还具“延迟效应”,所谓“延迟效应”就是

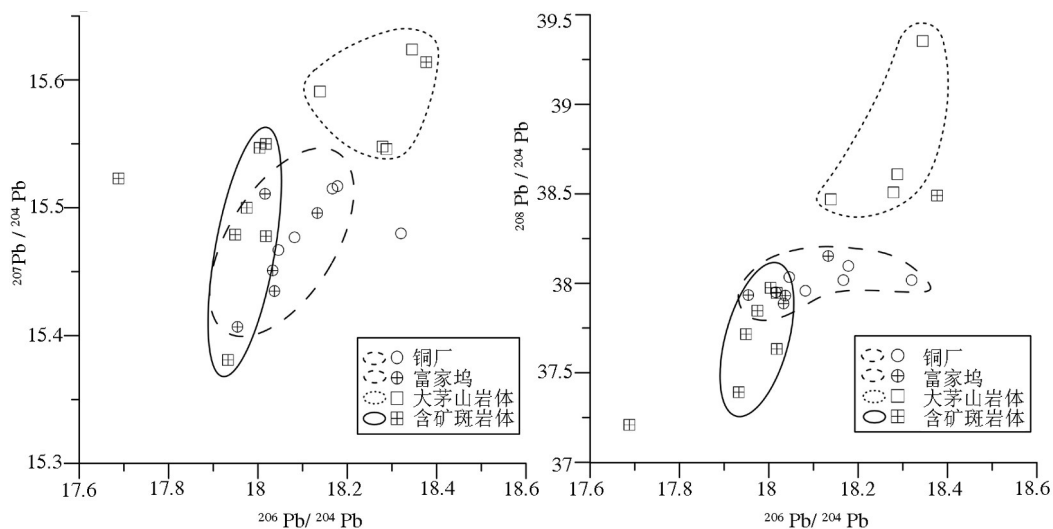


图2 德兴斑岩铜矿床矿石铅、含铜斑岩体、大茅山岩体铅同位素组成

Fig.2 Lead isotope composition of ore lead, copper-bearing porphyry body and Damaoshan rock mass in Dexing porphyry copper deposit

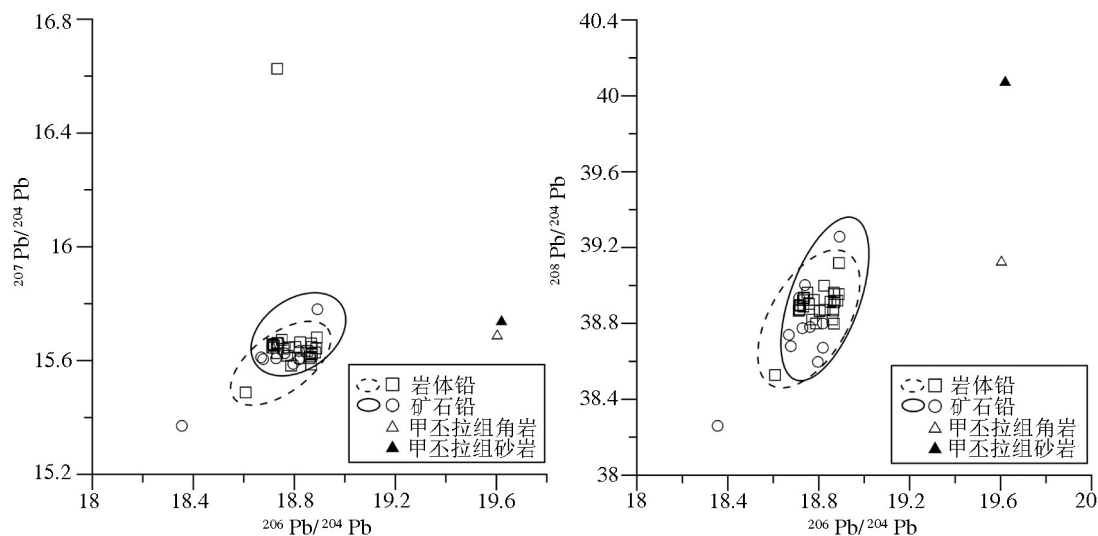


图3 玉龙斑岩铜矿带含矿岩体全岩铅及矿石铅同位素组成投点图

Fig.3 Plotting diagram of lead isotope composition and lead isotope composition of ore-bearing rock mass in the Yulong porphyry copper deposit

新生代地幔 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 铅同位素组成可以示踪不同时代(古生代、中生代)源于地幔物质(基性-超基性岩浆岩、Cu、Ni硫化物)的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 铅同位素组成,如与新生代新特提斯洋壳早期俯冲作用有关的雄村斑岩铜矿铅同位素组成却呈现了 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$:17.5~18.5的地幔铅同位素组成。地幔物质铅同位素组成的“延迟效应”的原因还有待进一步探讨,因为自然界铅同位素组成变化的另一个因素—时间不起作用了。

5 中国新生代地幔铅同位素地球化学场对铜镍硫化物矿床铅同位素组成的制约

铜镍硫化物矿床的赋矿岩体是基性-超基性岩,起源于软流圈地幔的基性-超基性岩浆携带大量Cu、Ni等亲铜元素,当岩浆中S元素达到饱和与亲铜元素结合形成硫化物,进而硫化物熔体从硅酸盐岩浆中熔离出来,在一定的空间内与足够的硅酸盐岩浆混合,并保存在合适的空间,形成具工业价值的岩浆熔离型铜镍硫化物矿床。该类矿床以岩体底部矿体最为重要,规模最大,常呈似层状。其次,还有产于岩体上部或附近(特别是接触带)围岩中的脉状贯入矿体和靠近底部岩体内的上悬矿体。

铜镍硫化物矿床主要分布于陆缘拉张带、大陆裂谷带及裂隙槽中。我国甘肃金川铜镍硫化物矿床处于新元古代华北古大陆边缘裂谷带内,其成矿

母岩是二辉橄榄岩-橄榄岩。而新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床处于中生代造山带内碰撞后弛张时期的裂谷带中,其成矿母岩是闪长岩-辉长苏长岩-橄榄岩。

(1) 金川铜镍硫化物矿床产于华北古陆阿拉善陆块西缘龙首山裂谷带中,沿龙首山裂谷带南缘断裂分布有大小20余个镁铁-超镁铁岩体(群)和若干个中酸性岩体,组成北西西向转折为近东西向的龙首山构造岩浆带,东西向延伸200 km左右,金川矿床正处在其构造转折处。

表2中显示I-6矿体的含矿镁铁岩(矿石全岩)和矿石铅同位素组成极为相似,两者均为上地幔同源分异的产物(实线投点域),与华北陆块地幔铅同位素: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}\leq 17.5$ 一致。而后期花岗岩全岩及附近的矿体受后期壳源物质的混染,具相对较高的放射性成因铅(相对富Th),与早期形成的超基性岩体及矿体在铅同位素投影图上呈明显不同的投点域(虚线投点域)(图4)。

(2) 喀拉通克铜镍硫化物矿床

喀拉通克铜镍矿床位于西伯利亚板块与哈萨克斯坦-准噶尔板块之间的陆缘裂谷带中,位于额尔齐斯断裂带与二台断裂带交汇处的西南侧。

矿区分布有11个铁镁质岩体。含矿超基性岩体具有富铁镁、贫钙,略富碱、贫硅铝的特征,属正常类型的镁铁质侵入岩。岩体侵位于下石炭统南

表2 I-⑥隐伏矿体与花岗岩全岩及其附近矿体铅同位素组成
Table 2 Lead isotope composition of I-6 concealed ore body and granite whole rock and its adjacent ore body

样号	采样地点	测试对象	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb
6B-5	1220水平6行 隐伏矿体	矿石全岩	16.852	15.360	37.071
		磁黄铁矿	16.924	15.385	37.175
6B-11		矿石全岩	17.050	15.372	37.116
		磁黄铁矿	17.031	15.401	37.168
6B-13	1280水平6行	矿石全岩	16.852	15.414	37.143
6B-14	隐伏矿体	矿石全岩	16.747	15.350	36.790
6B-16		矿石全岩	16.813	15.358	37.076
6B-22		矿石全岩	16.919	15.349	37.032
6B-18	1280水平6行 花岗岩	花岗岩全岩	17.420	15.423	38.074
		矿石全岩	17.476	15.482	37.673
7H-20	1270水平7行 正常贫矿石	磁黄铁矿	17.509	15.512	37.705
		黄铁矿薄膜	17.349	15.378	37.343

注:数据引自高亚林等,2009。

明水组中上段,围岩主要为含炭质细-粗碎屑沉凝灰岩、夹炭质板岩、含砾沉凝灰岩。产出有铜镍硫化物矿体的主要为I、II、III矿体,分别对应于Y₁、Y₂、Y₃铁镁质岩体,Y₁岩体几乎全岩矿化,为大型铜镍矿床。Y₂、Y₃岩体中的II、III矿体主要分布在岩体的中下部,为中型矿床。I矿体在平面上呈不规则脉状,剖面上呈巢状或囊状,矿体主要由浸染状矿石和致密块状原生硫化物矿石组成。

表3列出了超基性成矿母岩体(Y₁)岩石铅同位素组成变化范围窄,²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 17.9427~18.0782;

²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 15.4887~15.4999;²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 37.6581~37.7126。明显具深源地幔低U、Th丰度特征(实线投点域)。大部分浸染状矿石和致密块状矿石的铅同位素组成与超基性成矿母岩体(Y₁)十分相似:²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 17.893~18.007;²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 15.432~15.517;²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 37.474~37.686。示踪两者同源(图5)。与新生代塔里木陆块地幔铅同位素组成:(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb为17.5~18.5)相吻合。

由于受到岩浆期后热液阶段(贯入矿脉)及地壳混染,部分样品(特富块状矿石、晚期矿脉)放射性成因铅增加(虚线投点域)(图5)。

需要指出的是,20世纪70年代,B.R.Doe和R.E.Zartman的铅同位素构造模式示踪物源的图解风靡一时,然而,至今仍有国内不少研究者用我国大陆构造环境中铅同位素组成数据在此图解上投点,来探讨成岩、成矿物质来源。笔者认为这是不合适的,因为B.R.Doe和R.E.Zartman的铅同位素构造模式的数据主要来源于北美大陆构造环境,不宜盲目套用。而应以我国特有的大地构造背景为基础,以我国各层圈内地质体的铅同位素组成的地球化学场(域)为依据来示踪成岩、成矿物质来源,这样才能获得相对接近实际的认识。

6 结 论

本文探索性地应用了中国新生代上地幔铅同位素组成的特征,来示踪各构造单元中大型、超大

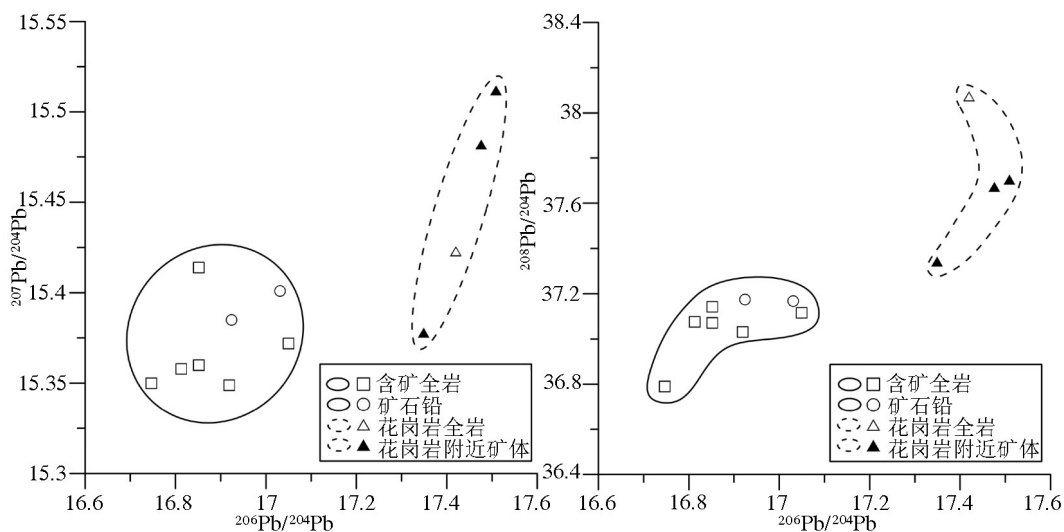


图4 金川铜镍矿床铅同位素组成投点图

Fig.4 Plotting point diagram of lead isotope composition of Jinchuan copper-nickel deposit

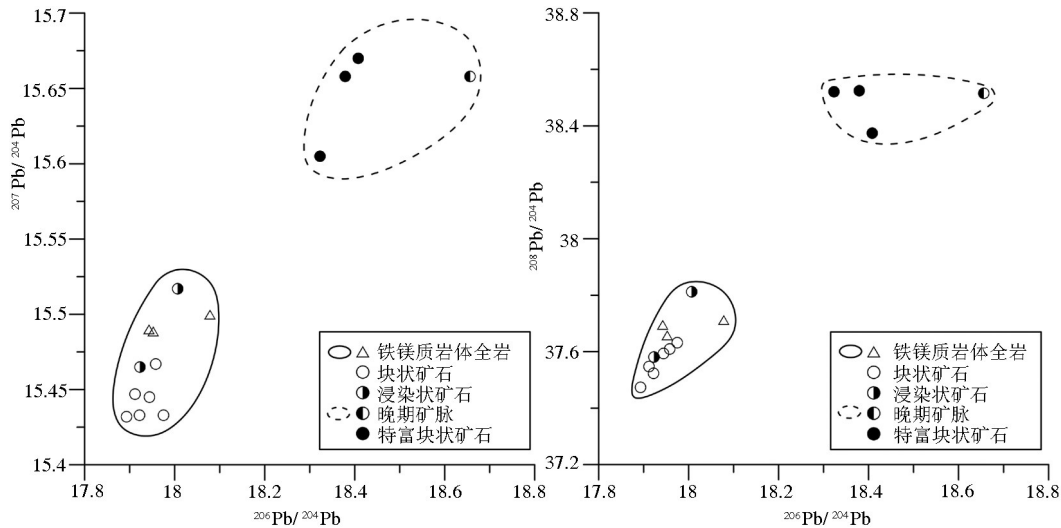


图5 喀拉通克铜镍矿床铅同位素组成投点图

Fig.5 Plotting point diagram of lead isotope composition of the Kalatongke copper-nickel deposit

表3 喀拉通克一号铜镍矿床铅同位素组成

Table 3 Lead isotope composition of the Kalatongke No. 1 copper-nickel deposit

样品编号	矿石类型	矿物名称	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
157/28-221	块状矿石	黄铜矿	17.922	15.433	37.524
157/28-272	块状矿石	黄铜矿	17.912	15.447	37.548
157/28-330	块状矿石	磁黄铁矿	17.958	15.467	37.610
157/28-304	块状矿石	磁黄铁矿	17.975	15.433	37.632
160/26-330	块状矿石	磁黄铁矿	17.944	15.445	37.594
159/26-347	块状矿石	磁黄铁矿	17.893	15.432	37.474
155/28-235	浸染状矿石	磁黄铁矿	17.923	15.465	37.582
151/30-336	浸染状矿石	磁黄铁矿	18.007	15.517	37.813
162/24-293	特富块状矿石	磁黄铁矿	18.323	15.605	38.521
13/28-342	特富块状矿石	磁黄铁矿	18.379	15.658	38.525
159/26-344	特富块状矿石	黄铁矿	18.408	15.670	38.375
160/26-343	晚期矿脉	黄铁矿	18.656	15.658	38.516
Y ₁ 104-3	镁铁质岩体	全岩	17.9427	15.4901	37.6951
Y ₁ Z ₂ -12	镁铁质岩体	全岩	18.0782	15.4999	37.7126
Y ₁ Z ₂ -21	镁铁质岩体	全岩	17.9524	15.4887	37.6581

注:前12个数据引自王润民等,1991;后3个引自柴凤梅,2006。

型斑岩型铜矿和铜镍硫化物矿床的成岩、成矿物质来源。通过研究,可以得出如下认识:

(1)斑岩型铜矿床及铜镍硫化物型矿床成矿母岩继承了所属陆块的上地幔铅同位素组成特征。

(2)两类矿床的含矿岩体和矿石矿物铅同位素组成十分一致,示踪两者同源;壳熔花岗岩和围岩地层的铅同位素组成与矿石铅同位素组成迥异。

(3)位于不同陆块的斑岩型铜矿床及铜镍硫化物型矿床的成矿母岩和矿石铅同位素组成除了继承了各陆块壳幔不同的铅同位素组成特征外,还示踪了壳幔间耦合性的“块体效应”,同时,上地幔铅同位素组成可能还具“延迟效应”。

References

- Chai Fengmei.2006. Comparison on Petrologic Geochemistry of Three Mafic-ultramafic Intrusions Associated with Ni-Cu Sulfide Deposits in Northern Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing)(in Chinese with English abstract).
- Chen Fuwen, Li Huaqin, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Wang Jinliang.2005. Zircon SHRIMP U-Pb dating and its geological Significance of mineralization in Tuwu-Yandong porphyry copper mine, East Tianshan Mountain[J]. Acta Geologica Sinica, 79(2): 113-118(in Chinese with English abstract).
- Gao Yalin, Tang Zhongli, Song Xieyan, Tian Yulong, Meng Yuanzhi. 2009. Study on genesis of the concealed Cu-rich ore body in the Jinchuan Cu-Ni deposit and its prospecting in depth[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(12): 3370-3395(in Chinese with English abstract).
- Guo Liguo, Liu Yuping, Xu Wei, Zhang Xingchun, Qin Kezhang.2006. Constraints to the mineralization age of Yulong porphyry copper deposit form SHRIMP U-Pb zircon geochronology date in Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(4): 1009-1016(in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Wei, Chen Lihui, Li Zonghuai.2004. SHRIMP zircon U-Pb age and its geological significance of the ferrocene-super-magnesium complex in the Kelatongke and

- Huangshanshan, Xinjiang[J]. Chinese Science Bulletin, 49(22): 2324–2328(in Chinese).
- Han Chunming, Xiao Wenjiao, Zhao Guochun, Qu Wenjun, Mao Qigui, Du Andao.2006. Re–Os isotopic analysis of the Kalatongke Cu–Ni Sulfide Deposit, Northern Xinjiang, NW China, and its geological implication[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 163–170 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guangshun, Tang Hongfeng, Liu Congqiang, Wang Yanbin.2005. Geochronological and geochemical study on the wallrock of Tuwu–Yandong porphyry copper deposits, eastern Tianshan mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(6): 1729–1736(in Chinese with English abstract).
- Lang Xinghai, Chen Yuchuan, Li Zhijun, Huang Yong .2012. Neo–Tethys mineralization on the southern margin of the Gangdise Metallogenic Belt, Tibet, China: Evidence from Re–Os ages of Xiongcu Orebody No I[J]. Earth Science, 37(3): 515–525(in Chinese with English abstract).
- Lang Xinghai, Chen Yuchuan, Li Zhijun, Huang Yong, Ding Feng, Wang Chenghui, Zhangli, Zhou Yun. 2012. Sulfur and lead isotope characteristics of No I ore body in the Xiongcu porphyry copper–gold ore concentration area of Tibet: Implications for the source of metals in the ore deposit [J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(4): 459–470(in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang, Li Fanglin, Han Yuwen, Hou Yeqing.2009. Characteristics of Pb isotopic composition in upper mantle cenozoic for China continent[J]. Earth Science, 1: 11–16(in Chinese with English abstract).
- Lü Linsu, Mao Jingwen, Liu Wangjun, Chen Gang, Zhang Zuoheng, Xie Guiqing, Wang Ruiting.2007. Geological characteristics, geochronology and tectonic settings of Neoproterozoic magmatic Ni–Cu–(PGE)sulfide deposits in China[J]. Mineral Deposits, 26(4): 397–416(in Chinese with English abstract).
- Ma Hongwen.1988. On the source of rock and ore–forming materials in the Yulong porphyry copper belt, eastern Tibet[J]. Geoscience, (4): 31–41(in Chinese with English abstract).
- Ma Zhendong, Shan Guangxiang.1997. Geological–geochemical studies of the formation mechanism of “integrat whole of multiplaces” large and super–large copper deposits in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Mineral Deposits, (3), 225–234(in Chinese with English abstract).
- Ma Zhendong, Shan Guangxiang.1996. Background and application of lead isotope composition in the middle and lower reaches of the Yangtze River and its adjacent areas[J]. Acta Geologica Sinica, No 4, 267–275(in Chinese with English abstract).
- Meng Xiangjin, Hou Zengqian.2006. Sulfur and lead isotope compositions of the Qulong porphyry copper deposit, Tibet: Implications for the sources of plutons and metals in the deposit[J]. Acta Geologica Sinica, 80(4): 84–90.
- Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Gao Yongfeng, Huang Wei, Qu Xiaming, Qu Wenjun. 2003. Re–Os dating for molybdenite from Qulong porphyry coepr deposit in the Gangdese metallogenic belt, Tibet, China [J]. Geological Review, 49(6): 660–666 (in Chinese with English abstract).
- She Hongquan, Li Jinwen, Ma Dongfang, Li Guangming, Zhang Dequan, Feng Chengyou, Qu Wenjun, Pan Guizhen.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).
- Tang Juxing, Li Fengwei, Li Zhijun, Zhang Li, Tang Xiaoqian.2010. Time limit for formation of main geological bodies in Xiongcu copper–gold deposit, Xietongmen County, Tibet :Evidence from zircon U–Pb ages and Re–Os age of molybdenite[J]. Mineral Deposits, 29(3): 461–475(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Wang Chenghui, Qu Wenjun, Du Andao, Ying Lijuan, Gao Yizhen.2009. Re–Os isotope dating of the molybdenite from the Yulong porphyry copper–molybdenum deposit, Tibet, and its metallogenic significance[J]. Rock and Mineral Analysis, 28(3): 215–218(in Chinese with English abstract).
- Wang Liangliang, Mo Xuanxue. 2006. Chronology and geochemistry of ore–bearing porphyry in the Chonglong porphyry Qulong Cu (Mo) ore deposit, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 22(4):1001–1008(in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua.2004. Constraint of Pb Isotope on ore–forming source origin of the Dexing copper deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 315–324(in Chinese with English abstract).
- Wang Runmin, Zhao Changlong.1991. Xinjiang Kalatongke No1 Copper–Nickel Sulfide Deposit [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–198(in Chinese).
- Xin Hongbo, Qu Xiaoming, Wang Ruijiang, Liu Hongfei, Zhao Yuanyi, Huang Wei.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 Gang, Du Andao, Lu Jiren.2005. Re–Os (ICP–MS) dating of the massive sulphide deposit in Jinchuan nickel–copper–platinum deposit[J]. Science in China (D),35(3): 241–245(in Chinese).
- Yang Shenghong, Chen Jiangfeng, Qu Wenjun, Yang Gang, Du Andao.2007. Re–Os age of Jinchuan Copper–Nickel sulfide deposits and their significance[J].Geochimica, (1):27–36(in Chinese with English abstract).
- Yao Xiaofeng, Tang Juxing, Li Zhijun, Deng Shilin, Hu Zhenghua, Zhang Zhi. 2012. S, Pb isotope characteristics of the Ga’erqiong gold–copper deposit in Tibet: Tracing the source of ore–forming materials[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(4): 528–536(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ligang. 1995. East Asian Lithospheric Block Geology – upper Mantle, Basement and Granite Isotope Geochemistry and Its Dynamics [M]. Beijing: Science Press(in Chinese).

- Zhou Qing, Jiang Yaohui, Liao Shiyong, Zhao Peng, Ruan Guodong. 2013. Pb isotope constraints on the mineral source of Dexing Copper Mine[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(6):1124–1135 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yu, Duo Ji, Wen Chunqi, Fei Guangchun, Zhang Wei. 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).
- Zongyao, Wang Longsheng, Wang Yitian, Liu Yulin. 2002. Discussion on metallogenic epoch of Tuwu and Yandong porphyry copper deposits in eastern Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 21(1): 16–22(in Chinese with English abstract).
- Zhu Bingquan, Li Xianhua, Dai Chuangmo. 1998. Theory and Application of Isotope Systems in Earth Sciences—Also on the Evolution of Crust in China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 柴凤梅. 2006. 新疆北部三个与岩浆岩型Ni-Cu硫化物矿床有关的镁铁-超镁铁质岩的地球化学特征对比研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2006.
- 陈富文, 李华芹, 陈毓川, 王登红, 王金良. 2005. 东天山土屋一延东斑岩铜矿田成岩时代精确测定及其地质意义[J]. *地质学报*, 79(2):113–118.
- 高亚林, 汤中立, 宋谢炎, 田毓龙, 孟远志. 2009. 金川铜镍矿床隐伏富铜矿体成因及其深部找矿意义[J]. *岩石学报*, 29(12):3370–3395.
- 郭利果, 刘玉平, 徐伟, 张兴春, 秦克章. 2006. SHRIMP锆石年代学对西藏玉龙斑岩铜矿成矿年龄的制约[J]. *岩石学报*, 22(4): 1009–1016.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 李宗怀. 2004. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁杂岩体的SHRIMP锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. *科学通报*, 49(22):2324–2328.
- 韩春明, 肖文交, 赵国春, 屈文俊, 毛启贵, 杜安道. 2006. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床Re-Os同位素研究及其地质意义[J]. *岩石学报*, 22(1):163–170.
- 候广顺, 唐红峰, 刘丛强, 王彦斌. 2005. 东天山土屋一延东斑岩铜矿围岩的同位素年代和地球化学研究[J]. *岩石学报*, 21(6): 1729–1736.
- 郎兴海, 陈毓川, 李志军, 黄勇. 2012. 西藏冈底斯成矿带南缘新特提斯洋俯冲期成矿作用:来自雄村矿集区I号矿体的Re-Os同位素年龄证据[J]. *地球科学*, 37(3):515–525.
- 郎兴海, 陈毓川, 李志军, 黄勇, 丁枫, 王成辉, 张丽, 周云. 2012. 西藏雄村斑岩型铜金矿集区I号矿体的硫、铅同位素特征及其对成矿物质来源的指示[J]. *地球学报*, 33(4):459–470.
- 路风香, 李方林, 韩吟文, 候叶青. 2009. 中国大陆新生代上地幔铅同位素特征[J]. *地球科学*, 1: 11–16.
- 吕林素, 毛景文, 刘王君, 陈刚, 张作衡, 谢桂青, 王瑞廷. 2007. 新元古代岩浆Ni-Cu(PGE)硫化物矿床地质特征、形成时代及其地球动力学背景[J]. *矿床地质*, 26(4):397–416.
- 马鸿文. 1988. 论藏东玉龙斑岩铜矿带成岩成矿物质来源[J]. *现代地质*, 4: 31–41.
- 马振东, 单光祥. 1997. 长江中下游及邻区多位一体大型、超大型铜矿形成机制的地质、地球化学研究[J]. *矿床地质*, 3: 225–234.
- 马振东, 单光祥. 1996. 长江中下游及邻区区域铅同位素组成背景及其应用[J]. *地质学报*, 4: 267–275.
- 孟祥金, 候增谦. 2006. 西藏驱龙斑岩铜矿S、Pb同位素组成:对含矿斑岩与成矿物质来源的指示[J]. *地质学报*, 80(4):84–90.
- 孟祥金, 候增谦, 高永丰, 黄卫, 曲晓明, 屈文俊, 等. 2003. 西藏冈底斯成矿带驱龙铜矿Re-Os年龄及成矿学意义[J]. *地质论评*, 49(6):660–666.
- 芮宗瑶, 王龙生, 王义天, 刘玉琳. 2002. 东天山土屋和延东斑岩铜矿床时代讨论[J]. *矿床地质*, 21(1):16–22.
- 余宏全, 李进文, 马东方, 李光明, 张德全, 丰成友, 屈文俊, 潘桂棠. 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.
- 唐菊兴, 黎凤佳, 李志军, 张丽, 唐晓倩. 2010. 西藏谢通门县雄村铜金矿主要地质体形成的时限:锆石U-Pb、辉钼矿Re-Os年龄的证据[J]. *矿床地质*, 29(3):461–475.
- 唐菊兴, 王成辉, 屈文俊, 杜安道, 应立娟, 高一鸣. 2009. 西藏玉龙斑岩铜矿辉钼矿铷-锶同位素定年及其成矿学意义[J]. *岩矿测试*, 28(3):215–218.
- 王亮亮, 莫宜学. 2006. 西藏驱龙斑岩铜矿含矿斑岩的年代学与地球化学[J]. *地质学报*, 22(4):1001–1008.
- 王强, 赵振华. 2004. 德兴花岗闪长斑岩SHRIMP锆石U-Pb年代学和Nd-Sr同位素地球化学[J]. *岩石学报*, 20(2):315–324.
- 王润民, 赵昌龙. 1991. 新疆喀拉通克一号铜镍硫化物矿床[M]. 北京:地质出版社, 1–298.
- 辛洪波, 曲晓明, 王瑞江, 刘鸿飞, 赵元艺, 黄玮. 2009. 西藏班公湖斑岩铜矿带成矿斑岩地球化学及Pb、Sr、Nb同位素特征[J]. *矿床地质*, 28(6):785–792.
- 杨刚, 杜安道, 卢记仁. 2005. 金川镍-铜-铂矿床块状硫化物矿床的Re-Os(ICP-MS)定年[J]. *中国科学(D辑)*, 35(3):241–245.
- 杨胜洪, 陈江峰, 屈文俊, 杨刚, 杜安道. 2007. 金川铜镍硫化物矿床的Re-Os年龄及其意义[J]. *地球化学*, (1):27–36.
- 姚晓峰, 唐菊兴, 李志军, 邓世林, 胡正华, 张志. 2012. 西藏尕尔穷铜金矿床S、Pb同位素地球化学特征——成矿物质来源示踪[J]. *地球学报*, 33(4):528–536.
- 张理刚. 1995. 东亚岩石圈块体地质——上地幔、基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学[M]. 北京:科学出版社.
- 周清, 蒋耀辉, 廖世勇, 赵鹏, 靳国栋. 2013. Pb同位素对德兴铜矿成矿物质来源的制约[J]. *地质学报*, 87(6):1124–1135.
- 周玉, 多吉, 温春齐, 费光春, 张贻. 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, 李献华, 戴德谟. 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.