

**【编者按】**中国矿物岩石地球化学学会自1978年成立的三十多年来,有一个很好的对学科发展“十年一回顾”的传统。进入21世纪的十年来,我国在矿物学、岩石学、地球化学、沉积学及其相关学科的研究中都有了长足的进展,在一些领域还有某些重大的突破;及时系统地进行综合总结和展望,对促进学科发展无疑有着十分重要的意义。学会第七届理事会议拟继续这一工作,组织编纂《21世纪前十年学科进展的回顾与展望》的文集;所有文章将先在《矿物岩石地球化学通报》上刊出,待后再辑册出版。本刊从2012年第3期开始陆续刊登该文集的系列文章,以飨读者。

## 矿床地球化学近十年若干研究进展

胡瑞忠,温汉捷,苏文超,彭建堂,毕献武,陈佑纬

中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室,贵阳 550002

**摘要:**矿床地球化学的主要任务是研究各种地质作用过程中矿床形成的地球化学问题,重点包括成矿元素的地球化学行为、成矿元素的源—运—储过程和矿床形成的驱动机制等。矿产资源勘查已越来越依赖于成矿新理论的指导和找矿新技术新方法的应用。因此,近10多年来,探索成矿新理论一直是地质学家们的不懈追求,矿床地球化学研究取得明显进展。本文扼要论述了其中的几个方面,包括大陆动力学与成矿关系、成矿流体地球化学、矿床同位素地球化学、成矿年代学和分散元素成矿作用等方面的某些研究进展。

**关键词:**成矿年代学;成矿流体地球化学;矿床同位素地球化学;分散元素成矿作用

**中图分类号:**P591;P632 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-2802(2014)02-0127-18 **doi:**10.3969/j.issn.1007-2802.2014.02.016

### Some Advances in Ore Deposit Geochemistry in Last Decade

HU Rui-zhong, WEN Han-jie, SU Wen-chao, PENG Jian-tang, BI Xian-wu, CHEN You-wei  
State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences,  
Guiyang 550002, China

**Abstract:** Ore deposit geochemistry mainly deals with the geochemical issues related to the formation of ore deposits in various geological environments. Understanding geochemical behaviors of ore-forming elements, metallogenic processes and the driving mechanism for ore formation has been the focus of intensive research effort over the last decade. This paper presents a status update of research on the relationship between continental dynamics and metallogenesis, ore-forming fluid geochemistry, isotope geochemistry of ore deposit, metallogenic geochronology and mineralization of dispersed elements.

**Key words:** metallogenic geochronology; ore-forming fluid geochemistry; isotope geochemistry of ore deposit; mineralization of dispersed elements

矿床地球化学是矿床学与地球化学交叉形成的分支学科。地球化学以研究地球和部分天体化学组成、化学作用和化学演化为己任。但如果说矿床地球化学是研究矿床的化学组成、化学作用和化学演化的分支学科,那就显得目标有些狭窄了。虽然矿

床本身的研究是重要的,但同样重要的是矿床形成以前的成矿过程及矿床形成后的保留、演化问题。因此,将矿床地球化学定义为成矿作用的地球化学可能更合理一些<sup>[1]</sup>。

成矿作用是指地球演化过程中,使分散存在的

收稿日期:2013-12-19收到,2014-01-23改回

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(41230316);国家973项目(2014CB440900);中国科学院至2050年矿产资源领域科技发展路线图战略研究项目资助

第一作者简介:胡瑞忠(1958—),男,研究员,博士生导师,研究方向:矿床地球化学。E-mail: huruizhong@vip.gyig.ac.cn.

有用物质富集而形成矿床的各种地质作用。因此,矿床地球化学的任务就应该是研究各种地质作用过程中矿床形成的地球化学问题,主要包括成矿元素的地球化学行为、成矿元素的源-运-储过程和矿床形成的驱动机制等方面。

矿产资源的勘查已越来越依赖于成矿新理论的指导和找矿新技术新方法的应用。因此,近10多年来,探索成矿新理论和发展找矿新技术新方法,一直是地质学家们的不懈追求。综观近十年的研究,矿床地球化学取得了明显进展。本文扼要地论述其中的几个方面。

## 1 大陆动力学与成矿关系

上世纪70年代以来,板块构造理论的诞生导致了成矿理论研究的重大飞跃,促进了对板块边缘成矿体系和成矿机制认识的深刻变革<sup>[2,3]</sup>。然而,板块构造理论虽然提供了解释大陆古板块边缘演化过程中成矿问题的理论框架,但对解释板块碰撞后陆内演化阶段的成矿作用,尤其是成矿作用的动力来源、不同类型矿床成因机制上的关联性问题则尚无现成答案。在这种背景下,90年代以来大陆动力学与成矿关系的研究也就成了当今成矿学研究的前沿,引起了国内外的极大关注。主要有以下研究特点。

### 1.1 成矿作用与地球各圈层相互作用

地球各圈层相互作用,尤其是壳幔相互作用,是大陆动力学研究的核心之一。近年来,国内外学者对壳幔相互作用与成矿的关系进行了有益的探讨,发现壳幔相互作用在许多大型-超大型矿床的形成中具有重要意义,认为壳幔相互作用是诱发成矿系统中各种地质作用的主要原因之一,是决定成矿系统物质组成、时空结构和各类矿床有序组合的重要因素<sup>[4~9]</sup>。因此,从地球多层圈相互作用过程中的物质和能量迁移交换角度来探讨成矿机制,用受地球系统演化过程控制的成矿地质环境的时空演化规律,来阐明成矿作用的时空演化规律,在此基础上建立成矿和找矿模型,指导大型-超大型矿床的寻找,已成为当今成矿理论和成矿规律研究的一种重要发展趋势。

### 1.2 成矿作用与重大地质事件的内在关联

重大地质事件包括板块的俯冲碰撞或裂解、地幔柱活动、岩石圈拆沉和幔源岩浆底侵、岩石圈伸展等等。与板块俯冲和洋中脊扩张有关的成矿研究,已成为长达近半个世纪的研究热点;中国青藏高原、秦岭造山带和中亚造山带相关成矿作用的研究,正

推动着造山带成矿理论研究的进步<sup>[10~15]</sup>;通过对地幔柱大规模玄武岩岩浆起源-演化和岩浆硫化物矿床-岩浆氧化物矿床形成机制的研究,推动了地幔柱动力学和成矿作用研究的发展<sup>[16~23]</sup>;岩石圈减薄和幔源岩浆底侵及其与大规模花岗岩浆活动和成矿作用关系的研究,掀起了中国东部中生代地质矿产研究的新篇章<sup>[24~30]</sup>。高精度的定年研究结果表明,特定成矿域的大规模成矿作用往往发生在相对较短的时间而具有“爆发性”,并与区域重大地质事件具有密切的时空耦合关系<sup>[31,32]</sup>。深入剖析这种内在联系,精细刻画重大地质事件如何促使成矿物质大规模活化-迁移-聚集-成矿,准确认知区域成矿规律,已成为矿床地球化学研究的重要发展方向。

### 1.3 板缘和板内成矿作用

大量研究证明,板块边界是成矿作用异常活跃的区域;板块的扩张-离散边界和汇聚-消减边界具有完全不同的构造环境和动力学特征,所导致的成岩和成矿作用也各具鲜明的“专属性”。毫无疑问,板块构造理论极大地推动了成矿理论和找矿模式的深刻变革。近十多年来,随着板块构造“登陆”,碰撞造山后的大规模伸展、岩石圈折沉和幔源岩浆底侵作用、地幔柱活动等大陆板块内部演化阶段的地质过程对成矿的重要意义逐渐被认识。但是,相对于包括碰撞造山带在内的大陆板块边缘的成矿作用,对大陆板块内部成矿作用驱动机制的认识相对模糊。对这一薄弱领域的积极探索,必将极大地丰富大陆动力学与成矿关系的理论体系。

此外,成矿理论和成矿规律的研究,目前已不仅仅局限于对单个矿床的研究,而是在向矿床-区域-大陆-全球方向发展,全球成矿学研究已初露端倪,以期不断从更高层次成矿因素的相互联系中来探索成矿规律。总的讲,这方面的研究尚处在描述和数据积累阶段。但是,地球系统科学的研究必将为成矿作用研究注入新的生机和活力,而对全球成矿学的深入探索,必能为揭示地球系统与各类成矿系统的实质关系做出积极而关键的贡献。

## 2 成矿流体地球化学研究

成矿流体是元素迁移、富集形成矿床最重要的介质。热液成因矿物形成过程中捕获的流体包裹体,是研究成矿流体组成、性质及其成矿过程最直接的天然样品。成矿流体的研究方法,已从对流体包裹体群的研究发展到对单个流体包裹体的研究,从对透明脉石矿物中流体包裹体的研究发展到对不透明矿石矿物中流体包裹体的研究<sup>[33~39]</sup>。

## 2.1 单个流体包裹体组成和性质

近年来,随着单个流体包裹体中元素和同位素组成 LA-(MC)-ICP-MS 分析技术的建立与完善,为深入研究成矿流体的组成、性质和演化特征,精细刻画成矿过程提供了重要技术支持。

2.1.1 元素和同位素组成 流体包裹体的元素和同位素组成,是了解热液矿床成因最重要的信息之一。以往通常采用分析流体包裹体群的方法来确定成矿流体的组成。由于热液矿物中通常捕获不同世代的流体包裹体,流体包裹体群的组成一般不能真实反映特定阶段成矿流体的组成。因此,精确测定不同世代单个流体包裹体的组成,成为矿床地球化学研究的热点和难点问题。近年来,采用 LA-(MC)-ICP-MS 分析技术研究单个流体包裹体的组成取得重要进展<sup>[35,39]</sup>。

研究发现,一些岩浆热液矿床(如澳大利亚 Yankee Lode 锡多金属矿床、印度尼西亚 Grasberg 和阿根廷 Alumbraera 斑岩 Cu-Au 矿床等)不同世代石英中单个流体包裹体的 Sn、Cu、B、As、Sb、Ag 等成矿元素含量,可从几个 ppm 一直到百分级(wt%)<sup>[34]</sup>,如斑岩铜矿,Au 在富气相流体包裹体中的含量为  $(10.17 \pm 6.2) \times 10^{-6}$ ,Cu 高达 1.2 wt%<sup>[40,41]</sup>。Su 等<sup>[37]</sup>利用单个流体包裹体的 LA-ICP-MS 分析技术,在国际上率先获得一些卡林型金矿床成矿流体中成矿元素(如 Au、As、Sb 等)含量及其演化过程的重要数据,结果显示成矿前石英流体包裹体中的 Au 含量高达  $(3.8 \sim 5.7) \times 10^{-6}$ ,而流体中的 Fe、Cu、Pb、Zn 等元素则低于检测限。Guillong 等<sup>[36]</sup>建立了单个流体包裹体矿化剂元素(如 S 等)含量的 LA-ICP-MS 分析技术。Seo 等<sup>[42]</sup>运用该技术测定了一些斑岩 Cu-Au 矿床(如美国的 Bingham Canyon 等)、花岗岩型 W-Sn 矿床(如德国的 Zinnwald 等)富气相和富液相单个流体包裹体中的 S 含量,发现两类流体包裹体中 S 的含有高达几千 ppm 到百分级(wt%)。Loucks 等将人工合成流体包裹体与 LA-ICP-MS 分析技术相结合,发现 Au 在超临界流体中具有很高的溶解度,并据此提出自然界可能存在一种新的硫-金络合物  $(AuHS(H_2S)_3)$ <sup>[43]</sup>。Pettke 等<sup>[38]</sup>利用单个流体包裹体 Pb 同位素的 LA-MC-ICP-MS 分析技术,研究了成矿流体的 Pb 同位素组成,据此确定美国 Bingham Canyon 斑岩 Cu-Au 矿床的成矿元素来源于俯冲流体交代的古老(1.8 Ga)岩石圈地幔。

2.1.2 元素在不同流体相中的分配 成矿元素在不同流体相中的分配,是了解热液矿床成矿过程和

元素共生分异机制的关键问题之一。在矿田尺度和单个矿床尺度,元素发生共生分异是许多热液矿床较常见的地质现象。如澳大利亚 Mole 花岗岩体从岩体向外分别发育 W-Sn、Cu-Sn-As、Pb-Zn-Ag 等矿床;中国南岭地区,W-Sn 矿床发育在花岗岩中或附近,外侧则发育 Pb-Zn-Ag 矿床的现象亦十分普遍。单个流体包裹体成分的 LA-ICP-MS 分析技术,为深入研究元素在不同流体相中的分配,进而研究成矿过程和元素共生分异机制提供了重要手段。Audetat 等研究澳大利亚 Yankee Lode 锡多金属矿床发现,Cu 和 B 主要分配在富气相的流体包裹体中,而 Sn 等成矿元素则在富液相的流体包裹体中富集<sup>[34]</sup>;Ulrich 等<sup>[40,41]</sup>通过研究印度尼西亚 Grasberg 和阿根廷 Alumbraera 斑岩型 Cu-Au 矿床发现,Au、Cu、As 等成矿元素在气相中富集;Heinrich 等<sup>[43~45]</sup>根据热力学和单个流体包裹体成分分析结果,系统总结了与岩浆热液有关的矿床中成矿元素在液相和气相中的分配,认为 Pb、Zn、Ag、Sn、Tl 等成矿元素富集在以 Cl 为矿化剂的液相之中,而 Au、Cu、As、Sb 等成矿元素则在以 S 为矿化剂的气相中富集,流体的不混溶(如沸腾作用)过程导致矿化剂元素(如 S 和 Cl 等)发生分异,最终导致成矿元素的分异。成矿实验研究进一步发现,成矿流体密度是控制成矿元素分异的重要因素之一<sup>[46]</sup>。这些成矿元素气相迁移的研究成果,突破了金属元素液相迁移的传统认识,掀起了成矿元素气相迁移研究的热潮<sup>[47,48]</sup>。根据成矿元素气相迁移理论,Muntean 等推测美国卡林型金矿的成矿元素,可能是深部岩浆去气迁移而来的 Au、As、Sb 等<sup>[49]</sup>。

2.1.3 成矿过程和成矿元素沉淀机制 热液矿床的形成是多种地质地球化学过程综合作用的结果,包括成矿流体温度、压力、盐度、氧逸度、pH 值、化学成份以及流体相分离和混合等条件的变化等。通过流体包裹体岩相学和显微测温学的系统研究,结合阴极射线激发荧光(CL)图像,建立流体包裹体形成的相对时序与矿物生成顺序的关系。在此基础上,运用 LA-ICP-MS 分析技术,精确测定各世代单个流体包裹体中主量元素(如 K、Na、Ca、Mg 等)、成矿元素(如 Cu、Pb、Zn、Au、As 等)等的组成,可以提取由成矿流体成分变化所反映的成矿过程等方面的重要信息。

Audetat 等对澳大利亚 Yankee Lode 锡多金属矿床锡石的成矿过程进行了详细研究<sup>[34]</sup>。他们在石英-锡石-电气石主成矿阶段的石英晶体中,鉴别出 29 次流体包裹体捕获事件。流体包裹体均一温

度变化范围为 220~453℃,盐度变化范围为(0.1~35.1)%(NaCl,wt)。研究表明,成矿流体至少经历了 3 次沸腾降温事件,而锡石的沉淀发生在第 3 次沸腾降温事件之后。单个流体包裹体成分的 LA-ICP-MS 研究显示,与前两次流体沸腾降温事件不同,第 3 次沸腾降温事件后的流体中 Sn 与 Na、K、Mn、Cs、Rb 等元素的含量协同变化,成矿元素含量降低了近 5000 倍,认为高温、高盐度岩浆卤水与低温、低盐度大气降水的混合是诱发锡石沉淀的主要因素。Landtwing 等利用 LA-ICP-MS 分析技术对美国 Bingham 斑岩铜矿床 Cu 的沉淀机制进行了系统研究,发现在比较小的温度区间(425~350℃),石英流体包裹体中 Cu 的含量与流体包裹体均一温度呈正相关关系,从高温端到低温端 Cu 含量降低了 2 个数量级,与黄铜矿溶解度实验相一致,从而认为流体温度的降低是导致斑岩型铜矿床 Cu 沉淀的主要控制因素<sup>[50]</sup>。Su 等通过对中国西南地区部分卡林型金矿床流体包裹体岩相学和显微测温学的系统研究,利用 LA-ICP-MS 分析技术,获得了该类矿床成矿前、成矿时和成矿后流体中成矿元素的含量。结果表明,卡林型金矿的成矿流体以富含 Au、As、Sb 等元素而贫 Fe、Cu、Pb、Zn 等元素为主要特征。对含金硫化物矿物学和地球化学的进一步研究表明,Au 主要赋存在黄铁矿的含砷环带中<sup>[37,51,52]</sup>。形成含砷黄铁矿需要 Fe 的参与,但含 Au 流体中不能为含砷黄铁矿的形成提供足够的 Fe。通过岩石显微岩相学特征研究发现,成矿所需要的 Fe 主要来源于赋矿地层中含 Fe 碳酸盐矿物的溶解(去碳酸盐化)。据此,确定了卡林型金矿的三阶段成矿模式:①赋矿地层中含 Fe 碳酸盐矿物去碳酸盐化释放 Fe;②去碳酸盐化释放的 Fe 形成含砷黄铁矿与流体中的金共沉淀;③去碳酸盐化过程产生的 CO<sub>2</sub>在相对浅部断裂构造中与流体中的 Ca 形成方解石脉<sup>[53]</sup>。他们据此建立了卡林型金矿成矿模式与找矿模式的关系,认为含 Fe 碳酸盐岩是形成高品位、大型金矿床最重要的赋矿围岩,由含 Fe 碳酸盐岩去碳酸盐化在近地表断裂中形成的方解石脉,是寻找深部隐伏卡林型金矿最重要的找矿标志之一。这一认识为近年来黔西南水银洞卡林型金矿深部找矿的重大突破提供了重要依据。

## 2.2 显微红外测温技术在矿床研究中的应用

热液矿床中大多数金属矿物在光学显微镜下不透明,以往流体包裹体研究仅局限于与金属矿物共生的石英等透明脉石矿物<sup>[54,55]</sup>。在岩相学上,这些透明矿物通常早于或晚于金属矿物的形成,因此,透

明矿物中捕获的流体包裹体不能直接完全真实反映金属矿物形成的流体性质。

2.2.1 红外光强度对测定金属矿物中流体包裹体盐度和均一温度的影响 显微红外技术以红外光作为光源,使可见光下不透明的矿物在一定波长红外光的照射下变得“透明”,从而实现对不透明矿物结构和其中流体包裹体的观测研究。然而,由于红外光本身具有一定能量,在红外显微镜下测定不透明金属矿物中流体包裹体的盐度和均一温度时,流体包裹体将受到红外光源加热和外部加热(冷热台)的双重影响。因此,要精确确定不透明矿物中流体包裹体的盐度和均一温度,需要正确评估红外光强度对测定结果的影响。Moritz<sup>[56]</sup>通过改变红外光的相对强度来测定硫砷铜矿中同一流体包裹体的盐度(冰点)和均一温度,首先观察到红外光强度对所测定的硫砷铜矿中流体包裹体的盐度和均一温度有显著影响,不同红外光强度测定出的盐度误差可高达 600%,其结果可能会导致过高估计硫砷铜矿流体包裹体的盐度和过低估计其均一温度。格西等系统评价了红外光强度对测定辉锑矿中流体包裹体冰点的影响<sup>[57]</sup>。结果表明,红外光强度对辉锑矿中流体包裹体的冰点测定有显著影响,因此正确调控红外光强度对保证测定结果的可靠性至关重要。

## 2.2.2 显微红外测温技术在矿床研究中的应用

红外显微镜技术在矿床研究中的应用,实现了一些不透明金属矿物中流体包裹体的直接观察和性质(如温度和盐度)的测定,以及单个流体包裹体成分的 LA-ICP-MS 分析<sup>[58,59]</sup>。研究的金属矿物包括黑钨矿<sup>[60,61]</sup>、硫砷铜矿<sup>[56,62]</sup>、闪锌矿<sup>[58]</sup>、黄铁矿<sup>[63,64]</sup>、辉锑矿<sup>[57,65]</sup>、赤铁矿<sup>[66~68]</sup>、深红银矿<sup>[68]</sup>、锡石<sup>[69]</sup>以及金红石<sup>[70,71]</sup>等,为确定热液矿床形成的物理化学条件和成矿过程等提供了直接证据。研究发现,一些金属矿物(如黑钨矿等)中的流体包裹体类型、均一温度和盐度与共生的脉石矿物(如石英等)有显著差异<sup>[60,61]</sup>,通常金属矿物流体包裹体比共生的脉石矿物具有较高的温度和盐度,如江西西华山钨矿床的黑钨矿中仅发育盐水流体包裹体,均一温度为 239~380℃,盐度为(3.8~13.7)%(NaCl,wt),而共生石英中的流体包裹体则发育含 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 流体包裹体,均一温度为 177~329℃,盐度为 0.9%~8.1%(NaCl,wt)<sup>[61]</sup>。再如,一些产于绿岩带中的石英脉型 Au-As-Sb 矿、石英脉型 Sb 矿和卡林型 Au 矿等矿床<sup>[65,72~74]</sup>,辉锑矿中的流体包裹体多种多样,包括 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O、H<sub>2</sub>O-CaCl<sub>2</sub>±MgCl<sub>2</sub>±NaCl、H<sub>2</sub>O-NaCl 等流体包裹体,而与辉锑矿密切共

生的石英中的流体包裹体类型则主要为  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ , 其盐度和均一温度相差均较大: 澳大利亚 Wiluna 石英脉型 Au-Sb 矿床, 辉锑矿中流体包裹体均一温度为  $239\sim 247^\circ\text{C}$ , 盐度为  $(5.1\sim 23.8)\%$  (NaCl, wt), 与之共生的石英中流体包裹体的均一温度为  $210\sim 340^\circ\text{C}$ , 盐度仅为  $4.3\%\sim 4.5\%$  (NaCl, wt)<sup>[72]</sup>; 贵州晴隆大厂锑矿辉锑矿中的流体包裹体类型以含子晶-气-液三相包裹体和气-液两相包裹体为主, 具有较高的盐度  $(0.2\%\sim 19.5\%$  NaCl, wt) 和均一温度  $(153\sim 285^\circ\text{C})$ , 而共生的萤石则主要发育气-液两相流体包裹体, 具有较低的盐度  $(0.2\%\sim 1.9\%$  NaCl, wt) 和均一温度  $(144\sim 176^\circ\text{C})$ , 认为形成辉锑矿和萤石的流体可能有所不同, 流体混合导致的温度和盐度降低可能是锑成矿的重要控制因素之一<sup>[57]</sup>。

近年来, 利用显微红外测温技术, 结合同步辐射 X 射线荧光 ( $\mu\text{-SXRF}$ ) 和 LA-ICP-MS 分析技术, 直接测定了金属矿物 (深红银矿、闪锌矿、黄铁矿、硫砷铜矿等) 中单个流体包裹体的成矿元素含量 (如 Cu、Pb、Zn、Au 等)<sup>[58,59,68]</sup>。Stoffell 等和 Wilkinson 等运用 LA-ICP-MS 技术, 发现北美和爱尔兰地区一些典型 MVT 铅锌矿床闪锌矿中的流体包裹体富含 Pb ( $10\times 10^{-6}\sim 890\times 10^{-6}$ ), 热力学计算预测 Zn 的含量高达  $(3000\sim 5000)\times 10^{-6}$ , 高于与闪锌矿密切共生的脉石矿物 (如石英等) 流体包裹体中的 Pb ( $0.2\times 10^{-6}\sim 3.5\times 10^{-6}$ ) 和 Zn ( $0.1\times 10^{-6}\sim 12\times 10^{-6}$ ) 含量 2 个数量级, 认为富含 Pb、Zn 等成矿元素的流体与贫 Pb、Zn 流体的混合可能是该类型铅锌矿床的重要成矿机制<sup>[75,58]</sup>。Samson 等也采用该技术研究了洪都拉斯 El Mochito 地区远离岩体的夕卡岩型铅锌矿床的成矿流体, 发现从夕卡岩矿物 (如石榴子石、辉石) 到金属硫化物 (如闪锌矿), 其中流体包裹体的成矿元素含量及其比值 (K/Na、Mn/Na、Rb/Na、Zn/Na) 均与花岗岩类有关矿床非常相近, 而与盆地流体差别较大, 因而认为该矿床尽管远离岩体, 但其成矿流体仍以岩浆流体为主<sup>[76]</sup>。Kouzmanov 等结合红外显微镜与单个流体包裹体成分的 LA-ICP-MS 分析技术, 测定了罗马尼亚 Rosia Poieni 浅成低温热液矿床黄铁矿、硫砷铜矿及其共生石英中单个流体包裹体的成矿元素含量及其比值, 发现金属硫流体包裹体的 Cu/(Na+K) 比值是其共生石英中流体包裹体的 10~100 倍, 认为富含金属元素的成矿流体可能来源于深部岩浆的结晶分异作用<sup>[59]</sup>。

### 3 矿床同位素地球化学研究

成矿作用示踪理论、技术和方法, 是矿床地球化学研究的重要基础, 是了解矿床成矿物质源区及其活化、迁移、富集和成矿流体演化过程的主要手段。矿床同位素地球化学在其中发挥不可替代的重要作用。

近年来, 由于各种新型同位素分析仪器的开发利用和分析测试技术方法上的快速发展, 大大拓宽了各种同位素新技术方法在矿床研究中的应用: ①新一代高精度、高灵敏度、多接收热电质谱仪 (TIMS) 和多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS) 的开发和利用, 使得像 Li、B、Cl、Fe、Cu、Zn、Mo、Se、Ge、Cd 等“非传统稳定同位素”的高精度分析成为可能, 成为当前成矿学研究中的一个重要前沿领域; ②激光剥蚀-等离子质谱联用系统 (LA-ICP-MS, LA-MC-ICP-MS) 和二次离子探针 (SHRIMP, SIMS, Nano-SIMS) 等原位分析技术的出现, 将同位素研究拓展到了更微观的尺度 (微米-纳米尺度), 为精细刻画成矿过程提供了重要保证; ③一些专门的设计, 如加装专门设计的法拉第杯接收器的稳定同位素质谱仪使“Clumped Isotope”的准确测定成为可能, 从而拓展了传统稳定同位素的应用领域。这些新的技术方法获得的数据, 为岩石成因、矿床成因、壳-幔相互作用、水-岩相互作用等方面的研究提供了重要信息, 取得了一系列令人瞩目的新认识。中国科学家在该领域的研究基本与国际同步, 亦取得重要成果。

#### 3.1 成矿作用的深部过程示踪

壳幔相互作用与成矿的关系, 是当今成矿学研究的一个重要方面, 典型成矿区带的成矿动力学研究是发展新的成矿理论和找矿方法的重要环节。如何揭示深部过程对成矿的贡献已受到大家的高度关注。在以往的研究中一系列较熟知的同位素地球化学研究手段 (如 Sr、Nd、Pb、H、O、C、S 等) 得到了有效运用, 同时一些新的同位素地球化学研究手段 (如 Cl、Li、Mg、Os、He 等) 也显示了极大潜力。

由于其同位素组成在地壳与地幔中极不相同, He、Ar 等稀有气体同位素可作为示踪壳-幔相互作用过程极灵敏的指示剂, 是研究地球内部流体来源、运移机制和演化历史的强有力工具。上世纪末这一示踪手段开始引入成矿古流体的研究<sup>[77~81]</sup>。近年来, 中国在矿床稀有气体同位素地球化学研究领域取得了积极进展。通过对红河-金沙江富碱侵入岩带中铜-金矿床<sup>[80,82]</sup>、华南铀矿床<sup>[28,29]</sup>、南岭地区中

生代钨锡多金属矿床<sup>[83~89]</sup>、哀牢山金矿带新生代金矿床<sup>[81,90,91]</sup>、华北克拉通中生代铜金多金属矿床<sup>[92~96]</sup>成矿流体稀有气体同位素地球化学的深入研究,发现这些矿床成矿流体中均有大量幔源组分加入,显示了壳幔深部过程对成矿的重要制约作用。

由于地壳相对富 Re,混入的地壳物质愈多产生的放射性<sup>187</sup>Os 含量就越高,因此,Re-Os 同位素体系是成矿过程中地壳物质混入程度很好的指示剂<sup>[97]</sup>。利用硫化物的 Re-Os 同位素组成,可以揭示岩浆成因 Cu-Ni 硫化物矿床、金矿床、斑岩型矿床、黑色岩系矿床以及洋底块状硫化物矿床的成矿物质来源<sup>[98,99]</sup>。此外,将 Re-Os 同位素体系与其他元素或同位素比值结合起来联合示踪已成为一种新的趋势。例如, Yang 测试了新疆普布拉克铜镍矿床中硫化物、橄榄辉长岩、异剥橄榄岩样品中的 Re-Os 含量及同位素组成,认为硫化物中高的 Os 含量、低的 Re/Os 值以及低的<sup>187</sup>Os/<sup>188</sup>Os 值暗示成矿物质源于地幔。同时,放射性成因的 Os 同位素及 Sr-Nd 同位素组成显示,幔源岩浆上升过程中可能混染了部分地壳成分,对硫化物矿床的形成起到了制约作用<sup>[100]</sup>。

近年发展起来的 Li、Cl、Mg 同位素也具有追踪深部地质过程的巨大潜力。锂有两种稳定同位素(<sup>6</sup>Li和<sup>7</sup>Li),质量上的较大差异(~15%)导致了较明显的同位素分馏,锂同位素在近地表的分馏程度可达-20%~40%<sup>[101]</sup>。这一特性使得 Li 同位素体系可以作为从地表到地幔的流体与矿物之间相互作用程度良好的地球化学指示剂,例如被用于示踪洋壳蚀变与热液活动的关系<sup>[102,103]</sup>和壳-幔物质循环<sup>[104,105]</sup>等重要地质过程。苏媛娜等<sup>[106]</sup>在对四川甲基卡伟晶岩型锂多金属矿床的研究中发现,锂辉石和二云母花岗岩(二云母花岗岩中黑云母的锂同位素特征可以代表其寄主花岗岩的特征)的锂同位素组成在误差范围内具有非常好的一致性,证明形成锂辉石的物质起源于二云母花岗岩。这一结论与前人基于流体包裹体、同位素地球化学和年代学等方面研究得出的认识相一致。

地幔来源样品具有低  $\delta^{37}\text{Cl}$  值的特点( $\delta^{37}\text{Cl} \leq -1.6\%$ ),而地表氯库  $\delta^{37}\text{Cl}$  值一般在  $0\% \pm 0.9\%$  范围内,显示了地幔氯和地壳氯有截然不同的氯同位素组成<sup>[107,108]</sup>。此外,由于 Cl 具有强挥发性和低粘滞性的特点,有潜力成为壳-幔物质相互作用的良好指示剂。Gleeson 和 Smith 对瑞典 Norrbotten 氧化铁-铜-金矿床矿物流体包裹体的氯同位素组成进行了详细研究<sup>[109]</sup>,其中最为显著的一个特点是这

些样品的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值偏负,并且其偏负的程度要超出 Eastoe 给出的地表氯库  $\delta^{37}\text{Cl}$  值  $0\% \pm 0.9\%$  的范围<sup>[107]</sup>。比较与该矿床空间上密切相关的 3 种成矿体系的氯同位素组成,支持该矿床的氯源自地幔而非蒸发岩。

地球不同储库具有明显不同的镁同位素组成,较大的镁同位素分馏主要发生在低温水-岩作用过程中,因此镁同位素可望成为示踪低温矿床成矿流体来源和性质的优势工具之一<sup>[110,111]</sup>。孙剑利用镁同位素成功示踪了白云鄂博矿床 H8 白云岩的成因,从而对白云鄂博矿床的成因提供了进一步的约束。镁同位素组成清晰地表明,H8 白云岩的镁主要来自地幔,在白云岩沉淀过程和后期白云岩化过程中可能发生了镁同位素分馏<sup>[112]</sup>。

### 3.2 成矿元素来源的直接示踪

成矿流体中,成矿元素(如 Cu、Zn、Cd、Fe、Hg、Se、Ge 等)与 H、O、C、S 的来源并非经常一致。从严格意义上讲,用 H、O、C、S 等同位素并不能示踪成矿元素的来源,这就为成矿元素本身的同位素示踪研究创造了发展空间。因此,利用成矿元素的同位素组成来示踪成矿物质的来源和演化,近年来引起了国内外学者的高度重视。研究表明,利用 Zn、Cd 等同位素组成的差异可初步区分 MVT、VMS、Sedex 铅锌矿床类型<sup>[113,114]</sup>,利用 Se/Ge 同位素可示踪 Se/Ge 矿床物质来源和成矿过程<sup>[115,116]</sup>,利用 Hg 同位素可示踪热泉型 Hg 矿的沸腾、氧化成矿过程<sup>[117]</sup>。

近年来,中国科学家在研究分散元素矿床时,利用分散元素同位素来示踪其来源和成矿过程等方面取得了积极进展。Qi 等<sup>[115]</sup>系统研究了云南临沧超大型锆矿床的锆同位素地球化学。研究发现富锆褐煤中锆同位素组成存在较大的变化( $^{74}\text{Ge}_{\text{NIST}} = -2.59\% \pm 4.72\%$ ),根据锆同位素与锆含量之间明显的负相关性,推断褐煤中锆同位素的分馏主要受有机质的吸附作用控制。与富锆褐煤互层的热液成因硅质岩和灰岩的锆同位素组成变化范围较小( $-0.14\% \sim +2.89\%$ ),暗示在开放体系中石英沉淀过程导致的锆同位素分馏,小于有机质吸附过程产生的锆同位素分馏。研究表明,临沧锆矿形成过程中锆同位素组成的变化,符合开放体系中的瑞利分馏模式,沿煤层剖面锆同位素的变化可以指示含锆流体的运移方向和锆的富集机制。Wen 等<sup>[116]</sup>对硒同位素用于成矿物质来源和成矿环境氧化还原状态的示踪潜力进行了评估。通过硒同位素研究,分别建立了黑色岩系中 Se 富集的“热液与海水混合模

式”、“表生淋滤氧化还原模式”、“有机质和热液控制的成矿模式”,突破了以往硒成矿单一模式的传统观念。Zhu 等<sup>[114]</sup>通过川滇黔接壤区多个铅锌矿床的 Cd 同位素研究发现,矿床中 Cd 同位素组成变化范围较大,可达 1.9‰,是目前发现的硫化物样品中最大的同位素分馏值,这一发现为 Cd 同位素作为一种重要示踪剂提供了重要基础。此外,研究还发现不同矿床存在明显的元素和同位素分组现象,反映川滇黔接壤区的铅锌矿床可能具有不同的成因(MVT 和 SEDEX 型)。

此外,中国科学家运用 Cu、Fe、Zn 等同位素,对相关矿床进行了成矿物质来源的示踪研究。例如,利用 Fe 同位素对条带状铁矿(BIF),四川攀枝花 V-Ti 磁铁矿矿床的研究,为相关矿床的成因提供了新的信息<sup>[118~120]</sup>。

### 3.3 对成矿流体演化过程的同位素示踪

研究成矿热液的起源、搬运成矿组分的方式和路径以及矿质沉淀的机制,是矿床地球化学研究的主要内容之一。很多元素(如 Mo、Se、Fe 等)都具有多价态特征,是氧化-还原敏感金属,其同位素分馏主要受控于地质演化过程中的氧化还原过程,在低温条件下尤为显著。因此,这些元素的同位素组成,是成矿过程中元素迁移、分配及其热液物理化学条件演化的灵敏示踪剂。

已有资料表明,热液体系中钼的氧化物和硫化物之间的相互转化,构成了钼在热液体系中的主要物理化学过程,这一过程会造成较大的钼同位素分馏<sup>[121]</sup>。这一机制的研究,可为揭示成矿流体中钼的活化、转化、迁移及沉淀提供重要依据。Song 等<sup>[122]</sup>通过粤西大降坪黄铁矿矿床的 Mo 同位素研究表明,矿床的形成经历了 2 种不同的过程,即海底喷流沉积和热液改造。同时,Mo 同位素组成的变化可以反映成矿发生在缺氧环境还是弱氧化-氧化的环境。

硼在自然界有 2 种稳定同位素<sup>11</sup>B 和<sup>10</sup>B。硼同位素在不同地质体中的分馏较大,且在岩浆-热液流体中具有高活动性和稳定的化学性质等特性,因此硼同位素在地学研究中的应用越来越广泛。硼同位素已逐步成为研究热液成矿过程、示踪成矿物质来源和成矿环境的强有力地球化学工具<sup>[123,124]</sup>。

对矿床中常见的脉石矿物(如方解石、白云石等),除通常的 C、O 同位素示踪外,直接研究组成矿物的主元素(如 Ca、Mg 等)的同位素也是目前的研究热点。例如,已有研究表明,5~10℃ 的温度变化可以产生大于 0.2‰ 的钙同位素分馏,因此热液方

解石的钙同位素组成可以反映热液流体较小的温度变化。实验研究也发现,高温体系中温度梯度的存在可以产生较大的钙同位素分馏<sup>[110]</sup>,这为矿床地球化学研究中利用钙同位素示踪成矿流体的温度和流体的运移途径提供了可靠的理论基础。

### 3.4 传统同位素新理论拓展了在矿床研究中的应用领域

一些传统同位素正在不断扩展其理论体系和应用范围,取得了瞩目的成果。非质量同位素分馏效应( $\delta^{33}\text{S}$ 、 $\delta^{17}\text{O}$ )可以揭示单个同位素比值测量无法揭示的特殊作用过程。Algoma 型硅铁建造往往具有负的  $\Delta^{33}\text{S}$  值,而 Superior 型硅铁建造具有正的  $\Delta^{33}\text{S}$  值,这是区分不同 BIF 矿床类型的重要标志<sup>[125]</sup>。利用氧同位素的非质量分馏效应( $\delta^{17}\text{O}$ ),为确定智利 Atacama、美国死谷和新疆吐哈地区硝酸盐矿床的大气成因提供了可靠证据<sup>[126~128]</sup>。“Clumped isotope”是另一类新兴起的同位素研究方法——即研究地质样品中“稀-稀”同位素体浓度的方法,如研究  $\text{CO}_2$  中的<sup>18</sup>O、<sup>13</sup>C、<sup>16</sup>O 浓度。唐茂等<sup>[129]</sup>发表了国内第一篇关于“Clumped isotope”同位素的文章。这些“稀-稀”同位素体具有提供各种地学过程信息的潜力,如单相物质测温,即仅依靠一种矿物或分子的“Clumped isotope”确定它的形成温度<sup>[130,131]</sup>,这极大地拓展了同位素地质温度计的应用范围,为更加精细地研究成矿流体的演化特征提供了强有力的工具。可以相信,随着“Clumped isotope”理论体系的进一步完善,它们将有望在矿床地球化学研究中得到更广泛的应用。

## 4 成矿年代学研究

成矿年代学是矿床地球化学研究最基本的内容之一。只有精确确定成矿时代,才能正确判断构造-岩浆-沉积-变质-热事件与成矿作用间的关系,从而深入认识矿床形成的地球动力学环境和矿床成因。

早在 18 世纪,人们就已意识到成矿年代学研究在矿床研究中的重要地位<sup>[132]</sup>。但长期以来,由于分析测试手段发展的相对滞后以及许多矿床中缺乏适于常规定年的矿物,成矿年代学研究一直是矿床地球化学研究中的薄弱环节。上世纪 80 年代以前,人们对热液矿床的年代学研究主要局限于含钾热液矿物的 K-Ar 法测年或对方铅矿、钾长石等进行普通 Pb 或 Pb-Pb 年龄的测定<sup>[133]</sup>。许多矿床的形成时间主要借助于间接手段来获取,难以准确反映其成矿的真实时间。近年来,随着分析测试技术的进步,成矿年代学研究得到了较大发展。

#### 4.1 定年对象和一些传统定年方法得到拓展

4.1.1 传统方法的拓展 Sm-Nd 同位素传统上主要用于前寒武纪地质年代学研究。但是,近年的研究发现,在某些热液矿床成矿过程中,稀土元素内部可发生强烈的分馏作用,导致一些热液矿物中的 Sm/Nd 变化很大,远高出地壳岩石的正常值<sup>[134~137]</sup>。因此,热液矿床中含钙矿物的 Sm-Nd 同位素定年得到广泛应用<sup>[137]</sup>,萤石<sup>[136]</sup>、白钨矿<sup>[138~140]</sup>和方解石<sup>[37,141~143]</sup>均被广泛应用于 Sm-Nd 同位素定年研究,并取得成功。黄铁矿 Rb-Sr 法对胶东玲珑金矿<sup>[144~146]</sup>和河南祁雨沟金矿<sup>[147]</sup>的研究亦取得令人满意的结果。

4.1.2 矿石矿物被广泛应用于定年研究 除辉钼矿外,其他硫化物如毒砂<sup>[148~151]</sup>、黄铁矿<sup>[152~156]</sup>、磁黄铁矿<sup>[157,158]</sup>、黄铜矿<sup>[159]</sup>等矿石矿物均被尝试用于 Re-Os 定年研究。此外,矿石矿物如白钨矿<sup>[138~140]</sup>和黑钨矿<sup>[160~162]</sup>的 Sm-Nd 定年和锡石的 U-Pb 定年也得到较广泛的应用<sup>[163,164]</sup>。在缺少可精确定年的合适矿物的前提下,这些矿物的定年为试图确定成矿时代提供了一些有用信息。

#### 4.2 新技术和新的同位素定年体系得到发展

4.2.1 新的同位素定年体系 近年来,磷灰石 Lu-Hf 同位素体系得到广泛研究,目前已被用于磷块岩和与铁镁质岩石有关 Fe-Ti 矿床的年龄测定<sup>[165,166]</sup>。

由于<sup>190</sup>Pt 半衰期时间长( $\lambda = 1.477 \times 10^{-12} \text{ yr}^{-1}$ ),自然界中<sup>186</sup>Os/<sup>188</sup>Os 变化小,因此在过去 20 年中<sup>190</sup>Pt-<sup>186</sup>Os 同位素体系主要用于示踪地球的深部地质作用过程<sup>[167,168]</sup>。最近,Pt-Os 同位素体系已被成功应用于铂族元素成矿作用的年龄测定,如对印尼 Borneo 州砂矿中铂族矿物<sup>[169]</sup>和南非 Bushveld 杂岩体中铂矿化<sup>[170]</sup>形成时间的准确确定。

4.2.2 同位素原位定年技术 近年来,同位素原位定年技术得到迅猛发展。主要体现在利用 SHRIMP、SIMS、LA-ICP-MS 或 LA-MC-ICP-MS 等手段,对与成矿作用有关的热液成因含铀矿物进行微区原位 U-Pb 同位素定年,包括热液锆石<sup>[171,172]</sup>、独居石<sup>[173,174]</sup>、金红石<sup>[175~177]</sup>、榍石<sup>[175,176]</sup>、锡石<sup>[163,178,179]</sup>等。

#### 4.3 基本查明中国各成矿域的成矿时代

全球三大主要成矿域,即环太平洋成矿域、特提斯成矿域和古亚洲成矿域,在中国均有分布,是中国矿产资源最重要的分布区。在多轮国家 973 项目等一系列项目的资助下,学者对上述三大成矿域进行了较系统的研究,目前已基本查明古亚洲成矿域、环

太平洋成矿域和特提斯成矿域的主成矿期分别对应于古生代、中生代和新生代。

古亚洲成矿域在中国的部分,通常指中国阿尔泰、准噶尔、天山-北山、兴蒙、吉黑以及华北陆块北缘早古生代褶皱造山带范围<sup>[180~182]</sup>。最近的研究表明,该区的成矿作用主要集中于古生代,特别是海西期和加里东期。如对东天山和北山裂谷中与镁铁质—超镁铁质有关的铜镍、钒钛磁铁矿矿床的研究发现,这些成矿作用均发生于海西期,成矿时间为 278.6~284.0 Ma<sup>[183~186]</sup>或 270~298<sup>[187~190]</sup>。此外,最新研究表明,兴蒙地区多宝山-铜山斑岩铜钼矿床和白乃庙斑岩铜金矿的成矿年龄分别为 482~486 Ma<sup>[191]</sup>和 445.0±3.4 Ma<sup>[192]</sup>,表现出加里东期成矿的特点。国外亦是如此,中亚地区包括穆龙套金矿在内的造山型金矿形成于 260~300 Ma<sup>[193~195]</sup>。Orlov 的统计结果表明,哈萨克斯坦中部 94% 的铜矿形成于海西中晚期,6% 的铜矿形成于加里东早期<sup>[196]</sup>。

特提斯成矿域分布于青藏高原和西南三江地区,该区经历了多次大陆裂解、增生造山、碰撞造山演化历史及相关成矿过程<sup>[197~201]</sup>。研究表明,该区主成矿期主要为新生代<sup>[201,202]</sup>。三江地区广泛发育与新生代富碱侵入岩有关的铜、金矿床<sup>[82,203,204]</sup>,这些矿床的年龄相当集中,基本上分布于 13~65 Ma 之间<sup>[198]</sup>;冈底斯斑岩铜矿带的形成时间集中在 15.2~16.0 Ma<sup>[201]</sup>;在三江地区沿沱沱河—玉树—昌都—兰坪—思茅一线,赋存于沉积岩中的 Pb-Zn-Cu-Ag 矿床也形成于新生代<sup>[205]</sup>。

中国东部是全球环太平洋成矿域的重要组成部分,该区壳幔相互作用复杂,花岗岩分布十分广泛,并存在大规模的钨、锡、金、铜等成矿作用。最近十多年的研究表明,尽管该区存在多期次的成矿作用,但其大规模的成矿作用主要发生于中生代<sup>[31,32]</sup>。如秦岭—大别一带钨矿均发生在早三叠世以后,集中发生于 233~221 Ma、148~138 Ma 和 131~112 Ma 三个时间段<sup>[206]</sup>;胶东地区的金矿主要形成于 120 Ma<sup>[207,208]</sup>;长江中下游的铜、金、铁成矿带集中于 140 Ma 左右和 120 Ma 左右<sup>[209,31]</sup>。南岭地区大规模成矿作用出现于中晚侏罗世(150~170 Ma)<sup>[210~212]</sup>,特别是集中爆发于 150~160 Ma<sup>[31,137,213,214]</sup>;华南地区的钨矿床形成于 140~50 Ma<sup>[28,215]</sup>。华南广泛分布的钨锡多金属矿床主要形成于 210~230 Ma、150~160 Ma、80~100 Ma 三个时期<sup>[31,32]</sup>,华南陆块西侧大面积低温成矿域的川滇黔 Pb-Zn 矿集区、湘中盆地 Sb-Au 矿集区、右江盆

地 Au-As-Sb-Hg 矿集区的成矿时代,可能分别与华南陆块东侧钨锡多金属矿床大规模成矿的 3 个时期相对应<sup>[31]</sup>。

#### 4.4 成矿作用与地质事件的关系

已有研究表明,华南南岭地区 150~160 Ma 钨锡大规模成矿作用被认为与华南地区中生代地幔上涌、岩石圈拉张减薄密切相关<sup>[31,32,211,213,216]</sup>。华南地区中-新生代的铀成矿受该区白垩纪-第三纪地壳拉张、幔源基性脉岩侵位所驱动<sup>[28,29,31,215]</sup>。三江地区与新生代富碱侵入岩有关的铜、金矿床年龄集中分布于 65~41 Ma、40~26 Ma 和 25~13 Ma 三个区间,与青藏高原印-亚大陆碰撞密切相关,分别对应于碰撞造山、晚碰撞转换和后碰撞伸展的构造环境<sup>[197,217]</sup>。中国西南地区峨眉大火成岩省与基性、超基性岩有关的钒钛磁铁矿矿床、铜镍硫化物矿床形成于 260 Ma 左右,是峨眉地幔柱活动的产物<sup>[18,20,22,218~225]</sup>。

Groves 等<sup>[226]</sup>对全球金矿的成矿年龄进行了统计分析,发现造山型金矿周期性的形成与保存时间,与地壳周期性生长事件基本能一一对应。包括造山型金矿、IOCG、VHMS 在内的含金矿床,在时间分布上具有显著的规律性。这种规律被认为与从早期热地球漂浮式的块体构造样式向显生宙现代板块样式的转变密切相关。

## 5 分散元素成矿作用

分散元素包括 Ga、Ge、Se、Cd、In、Te、Re、Tl 等 8 个元素,具有广泛用途,是很重要的战略资源。这类元素的地球化学性质以分散为特征,直至上世纪 80 年代末国内外的权威著作还断言它们不能形成独立矿床,只能作为副产品从其他矿床中回收。近年来,中国西南地区相继发现了一批主要在低温条件下形成的分散元素超常富集的地质体。在这些地质体中,分散元素的富集程度很高,经常有分散元素的独立矿物或富含分散元素的载体物(类质同象矿物或吸附体)出现。它们已不再是副产品,不再是开采其他矿产资源而回收的伴生元素,分散元素本身的经济价值高于或等于并存的其他元素。我们将这些分散元素超常富集的地质体确定为分散元素矿床。近年来,中国科学家在分散元素成矿作用方面进行了较系统的研究,取得的主要成果<sup>[227]</sup>包括以下几个方面。

### 5.1 确立了分散元素可以形成矿床的理论体系

打破了过去人们一直认为“分散元素不能形成独立矿床,以伴生元素方式存在于其他元素的矿床

内”的传统观念,初步揭示了这些分散元素独立成矿的地质地球化学条件,确定了它们可以形成矿床的理论体系。

### 5.2 确定了矿床中分散元素的赋存状态并发现若干分散元素新矿物

研究确定了分散元素的赋存状态为独立矿物(主要 Te、Tl、Se)、类质同象(主要 Cd、Ga、In、Re、Se)和有机质吸附(主要 Ge 和 Se)三大类。在国际上首次发现了 Zincospiroffite [碲铊(铁)石]和  $H_2Pb_2Fe_4[(Te, S)O_4]_9 \cdot (7-12)H_2O$  等新矿物。在中国首次找到的分散元素矿物包括:①碲铋碲矿(BiTe);②水硫碲铅石( $Pb[Te, S]O_4 \cdot H_2O$ );③斜硫碲铊汞矿( $TlHgAsS_3$ );④硫铁碲矿( $TlFeS_2$ );⑤辉铁碲矿( $TlFe_2S_3$ );⑥硫碲铊铅矿( $PbTlAs_5S_9$ );⑦硫碲铊矿( $Tl, Pb)_3AsS_3$ 。

### 5.3 确定了分散元素矿床的分类

按工业意义,分散元素矿床可分为独立矿床和伴生矿床两大类,① Ge、Se、Te、Tl 等元素在特定地质条件下可以形成独立矿床,但它们也可以伴生矿床的形式出现;② Ga、Cd、In、Re 等元素很难形成独立矿床,基本上都以伴生矿床形式产出。根据分散元素富集机制和赋存状态的不同,分散元素矿床可分为三类:①以分散元素独立矿物的大量形成而成矿,如四川大水沟独立 Te 矿床、贵州滥木厂独立 Tl 矿床和川西北拉尔玛 Se 矿体;②分散元素主要以被吸附方式成矿,如滇西临沧 Ge 矿床;③分散元素以类质同象代替主成矿元素,以此方式它不可能形成分散元素独立矿床,但可以造成超常富集,如贵州牛角塘 Pb-Zn 矿床中的 Cd,云南会泽 Pb-Zn 矿中的 Ge,黔中铝土矿中之 Ga,一些锡多金属矿床中的 In 等。

### 5.4 初步揭示了分散元素矿床的主要特征

研究表明,①它们是低温成矿作用的产物;②表现出明显的层控性;③成矿物质多来自赋矿围岩及邻近地层的岩石,说明物质来源的浅成性;④成矿流体具还原性、弱酸-弱碱性,并多来自大气降水和地层水,有时混入有少量变质水和岩浆流体;⑤尽管有些分散元素矿床赋存的岩系较老,但成矿时间均较晚,成矿时代多为燕山期。中国西南地区分散元素矿床集中出现的有利因素是:①多时代黑色岩系(含炭细碎屑岩系)的发育;②西南存在大面积低温热液成矿域,若干分散元素常在低温热液体系成矿;③富含分散元素的大型-超大型矿床集中分布。

### 5.5 明确了分散元素的成矿专属性和找矿方向

① Ga-铝土矿中镓可综合回收;② Ge-低成熟度的煤层和铅锌矿床是寻找 Ge 的方向(川滇黔接壤

区);③Se-湘西和贵州地区黑色岩系是具有找矿前景的地段;④Cd-中国南方特别是西南地区的一些大型-超大型铅锌矿是Cd的潜在资源地;⑤In-锡石硫化物矿床中闪锌矿富集部位或铅锌矿体是找铟的主要地段;⑥Te-碲成矿可以从两方面来探讨,一是Te的独立矿床(如大水沟Te与Bi结合成矿),二是一些大型和超大型金矿床(如东坪金矿床是含碲化物的金矿床);⑦Re-斑岩型铜钼矿床、与超基性岩有关的PGE矿床及黑色岩系,是寻找铼的潜在对象;⑧Tl-应在西南Au-As-Hg-Sb和铅锌矿化集中区加强Tl的查定,以便找到更多的铊资源。

综上所述,近年来矿床地球化学研究取得了重要进展。然而,学科的发展是一长期过程,要建立更加完善和系统的矿床地球化学理论,还任重而道远。展望未来,要做的工作很多。作为其中的重要方面,以下4点可能需要得到继续关注。(1)成矿精细过程。以往成矿学关注的焦点是成矿作用的始、终态,对成矿过程的研究较为薄弱。随着实验模拟技术和分析测试条件的不断完善,如何揭示成矿系统不同演化阶段的组成和环境、定量表达成矿系统中发生的各种化学反应的机制和速率,从而精细刻画成矿作用的源-运-储过程和制约机制,将是矿床地球化学研究的重要发展趋势之一;(2)矿石矿物年代学。对成矿时代的正确把握,是建立成矿理论体系的重要方面。但是,很多矿床都缺少适合用传统放射性同位素方法精确定年的矿物,这就给矿床成矿时代的确定带来了很大难度。如何进一步提高测试精度,降低测试下限,建立一些各类矿床中基本都有分布的所谓“遍在性”矿物的精确定年方法(例如,黄铁矿Re-Os等),对矿床地球化学的进一步发展将至关重要;(3)特定元素成矿作用。例如,稀有金属等。稀有金属主要包括稀有轻金属、稀有难熔金属、分散金属、稀土金属等,对新材料、新能源和信息技术等新兴产业十分关键,对其需求正呈爆发性增长趋势,其在未来工业中的意义或不亚于铁、铜、铝等大宗金属和石油在现代社会中的作用。但是,以往对稀有金属矿床地球化学的研究相对薄弱,急需加强探索以正确把握其成矿规律;(4)成矿模式与找矿模式的关系。研究成矿模式一方面是为了认识自然,但更重要的还是为了指导找矿。用成矿模式指导找矿有较多成功实例,但在很大程度上通常只能落实到到一个面积较大的区域。如何进一步缩小理论指导找矿的区域,提高找矿效率,需要把成矿信息转化为找矿信息,明确各种有效的找矿标志,架起成矿模式与找矿模式的桥梁。

## 参考文献 (References):

- [1] 涂光炽. 绪论[A]. 中国科学院矿床地球化学开放研究实验室. 矿床地球化学[C]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [2] Mitchell A H G, Garson M S. Mineral deposits and tectonic settings[M]. London: London Academic Press, 1981.
- [3] Sawkins F G. Metal deposits in relation to plate tectonic[M]. Berlin: Springer Verlag, 1984.
- [4] Oyarzun R, Márquez A, Lillo J, López I, Rivera S. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism[J]. Mineralium Deposita, 2001, 36(8): 794-798.
- [5] Sazonov V N, Van Herk A H, Boorde H D. Spatial and temporal distribution of gold deposits in the Urals[J]. Economic Geology, 2001, 96(4): 685-703.
- [6] Miao L C, Qiu Y M, McNaughton N, Luo Z K, Groves D, Zhai Y S, Fan W M, Zhai M G, Guan K. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of granitoids from Dongping area, Hebei Province, China: Constraints on tectonic evolution and geodynamic setting for gold metallogeny[J]. Ore Geology Reviews, 2002, 19(3-4): 187-204.
- [7] Ernst R E, Buchan K L. Recognizing mantle plume in the geological record[J]. Annual Review of Earth and Planetary Science Letters, 2003, 31: 469-523.
- [8] Sillitoe R H, Hedenquist J W. Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits[J]. Special Publication-Society of Economic Geologists, 2003, 10: 315-343.
- [9] Naldrett A J. Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry and exploration[M]. Springer, 2004: 725.
- [10] Chen Y J, Pirajno T, Sui Y H. Isotope geochemistry of the Tieluping silver-lead deposit, Henan, China: A case study of orogenic silver-dominated deposits and related tectonic setting [J]. Mineralium Deposita, 2004, 39(5-6): 560-575.
- [11] Hou Z Q, Zeng P S, Gao Y F, Du A D, Fu D M. Himalayan Cu-Mo-Au mineralization in the eastern Indo-Asian collision zone: Constraints from Re-Os dating of molybdenite [J]. Mineralium Deposita, 2006, 41(1): 33-45.
- [12] Hou Z Q, Tian S H, Yuan Z X, Xie Y L, Yin S P, Yi L S, Fei H C, Yang Z M. The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: Petrogenesis, mantle source and tectonic implication[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006b, 244 (1-2): 234-250.
- [13] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [14] 王京彬, 徐新. 新疆北部后碰撞构造演化与成块[J]. 地质学报, 2006, 80(1): 23-31.
- [15] Xiao W J, Kusky T. Geodynamic processes and metallogenesis of the Central Asian and related orogenic belts: Introduction[J]. Gondwana Research, 2009, 16: 167-169.
- [16] Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, Wu G Y. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China[J]. Lithos,

- 2001, 58(3-4): 145-168.
- [17] Song X Y, Keays R R, Xiao L, Qi H W, Ihlenfeld C. Platinum-group element geochemistry of the continental flood basalts in the central Emeishan Large Igneous Province, SW China[J]. *Chemical Geology*, 2009, 262(3-4): 246-261.
- [18] Zhong H, Zhou X H, Zhou M F, Sun M, Liu B G. Platinum-group element geochemistry of the Hongge Fe-V-Ti deposit in the Pan-Xi area, southwestern China[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37(2): 226-239.
- [19] Zhong H, Zhu W G. Geochronology of layered mafic intrusions from the Pan-Xi area in the Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41(6): 599-606.
- [20] Zhou M F, Robinson P T, Leshar C M, Keays R R, Zhang C J, Malpas J. Geochemistry, petrogenesis, and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V-oxide deposits, Sichuan Province, SW China[J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46(11): 2253-2280.
- [21] Zhou M F, Zhou J H, Qi L, Su W C, Hu R Z. Zircon U-Pb geochronology and elemental and Sr-Nd isotopic geochemistry of Permian mafic rocks in the Funing area, SW China[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 2006, 151(1): 1-19.
- [22] Tao Y, Ma Y S, Miao L C, Zhu F L. SHRIMP U-Pb zircon age of the Jinbaoshan ultramafic intrusion, Yunnan Province, SW China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(1): 168-172.
- [23] Wang C Y, Zhou M F. Genesis of the Permian Baimazhai magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Yunnan, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41(8): 771-783.
- [24] 华仁民, 毛景文. 试论中国东部中生代成矿大爆发[J]. *矿床地质*, 1999, 18(4): 300-308.
- [25] 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 华北中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄的精确测定得到启示[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(4): 289-300.
- [26] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张作衡, 王义天, 王志良, 赵财胜, 杨富全, 李厚民. 大陆动力学演化与成矿研究: 历史与现状—兼论华南地区在地质历史演化期间大陆增生与成矿作用[J]. *矿床地质*, 2005, 24(3): 193-205.
- [27] 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 刘桑, 钟宏, 赵军红, 蒋国豪. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题[J]. *矿床地质*, 2007, 26(2): 139-152.
- [28] Hu R Z, Bi X W, Zhou M F, Peng J T, Su W C, Liu S, Qi H W. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary[J]. *Economic Geology*, 2008, 103(3): 583-598.
- [29] Hu R Z, Burnard P G, Bi X W, Zhou M F, Peng J T, Su W C, Zhao J H. Mantle-derived gaseous components in ore-forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi province, China: Evidence from He, Ar and C isotopes[J]. *Chemical Geology*, 2009, 266(1): 86-95.
- [30] Hu R Z, Bi X W, Jiang G H, Chen H W, Peng J T, Qi Y Q, Wu L Y, Wei W F. Mantle-derived noble gases in ore-forming fluids of the granite-related Yaogangxian tungsten deposit, Southeastern China[J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47(6): 623-632.
- [31] Hu R Z, Zhou M F. Multiple Mesozoic mineralization events in South China—An introduction to the thematic issue[J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47(6): 579-588.
- [32] Mao J W, Chen Y B, Chen M H, Pirajno F. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings[J]. *Mineralium Deposita*, 2013, 48(3): 267-294.
- [33] Burke E A J. Raman microspectrometry of fluid inclusions[J]. *Lithos*, 2001, 55(1): 139-158.
- [34] Audetat A, Günther D, Heinrich C A. Formation of a magmatic-hydrothermal ore deposit: Insights with LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions[J]. *Science*, 1998, 279(5359): 2091-2094.
- [35] Heinrich C A, Pettke T, Halter W E, Aigner-Torres M, Audétat A, Günther D, Hattendorf B, Bleiner D, Guillong M, Horn I. Quantitative multi-element analysis of minerals, fluid and melt inclusions by laser-ablation inductively-coupled-plasma mass-spectrometry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(18): 3473-3497.
- [36] Guillong M, Ltkoczy C, Seo J H, Gunther D, Heinrich C A. Determination of sulfur in fluid inclusions by laser ablation ICP-MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2008, 23(12): 1581-1589.
- [37] Su W C, Heinrich C A, Pettke T, Zhang X C, Hu R Z, Xia B. Sediment-hosted gold deposits in Guizhou, China: Products of wall-rock sulfidation by deep crustal fluids[J]. *Economic Geology*, 2009, 104(1): 73-93.
- [38] Pettke T, Oberli F, Heinrich C A. The magma and metal source of giant porphyry-type ore deposits, based on lead isotope microanalysis of individual fluid inclusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 296(3): 267-277.
- [39] Pettke T, Oberli F, Audetat A, Guillong M, Simon A C, Hanley J J, Llemm L. Recent developments in element concentration and isotope ratio analysis of individual fluid inclusions by laser ablation single and multiple collector ICP-MS[J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 44: 10-38.
- [40] Ulrich T, Guenther D, Heinrich C A. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits[J]. *Nature*, 1999, 399(6737): 676-679.
- [41] Ulrich T, Günther D, Heinrich C A. The evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions, Bajo de la Alumbrera, Argentina[J]. *Economic Geology*, 2001, 96(8): 1743-1774.
- [42] Seo J H, Guillong M, Heinrich C A. The role of sulfur in the formation of magmatic-hydrothermal copper-gold deposits[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 282(1): 323-328.
- [43] Heinrich C A, Gunther D, Audetat A, Ulrich T, Frischknecht R. Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determined by microanalysis of fluid inclusions[J].

- Geology, 1999, 27(8): 755–758.
- [44] Heinrich C A, Driesner T, Stefansson A, Seward T. Magmatic vapor contraction and the transport of gold from the porphyry environment to epithermal ore deposits[J]. *Geology*, 2004, 32(9): 761–764.
- [45] Heinrich C A. The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: A thermodynamic study [J]. *Mineralium Deposita*, 2005, 39(8): 864–889.
- [46] Pokrovski G S, Roux J, Harrichoury J C. Fluid density control on vapor-liquid partitioning of metals in hydrothermal systems[J]. *Geology*, 2005, 33(8): 657–660.
- [47] Migdisov A A, Williams-Jones A E. An experimental study of cassiterite solubility in HCl-bearing water vapour at temperatures up to 350°C: Implications for tin ore formation[J]. *Chemical geology*, 2005, 217(1): 29–40.
- [48] Williams-Jones A E, Heinrich C A. 100th Anniversary special paper: Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 2005, 100(7): 1287–1312.
- [49] Muntean J L, Cline J S, Simon A C, Longgo A A. Magmatic-hydrothermal origin of Nevada's Carlin-type gold deposits [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(2): 122–127.
- [50] Landtwing M R, Pettke T, Halter W E, Heinrich C A, Redmond P B, Einaudi M T, Kunze K. Copper deposition during quartz dissolution by cooling magmatic-hydrothermal fluids: The Bingham porphyry[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 235(1): 229–243.
- [51] Su W C, Xia B, Zhang H T, Zhang X C, Hu R Z. Visible gold in arsenian pyrite at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: Implications for the environment and processes of ore formation[J]. *Ore Geology Reviews*, 2008, 33(3): 667–679.
- [52] Su W C, Zhang H T, Hu R Z, Ge X, Xia B, Chen Y Y, Zhu C. Mineralogy and geochemistry of gold-bearing arsenian pyrite from the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: Implications for gold depositional processes[J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47(6): 653–662.
- [53] 苏文超, 夏斌, 张弘毅, 田建吉, 胥磊落, 胡瑞忠, 夏勇. 隐伏卡林型金矿区碳酸盐脉地球化学及其对深部矿体的指示作用[J]. *矿物学报*, 2007, 27(z1): 525–526.
- [54] 范宏瑞, 谢奕汉, 翟明国. 冀西北东坪金矿成矿流体研究[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(7): 537–544.
- [55] 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 2007, 23(9): 2085–2108.
- [56] Moritz R. Fluid salinities obtained by infrared microthermometry of opaque minerals: Implications for ore deposit modeling—a note of caution[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 89(1): 284–287.
- [57] 格西, 苏文超, 朱路艳, 武丽艳. 红外显微镜红外光强度对测定不透明矿物中流体包裹体盐度的影响: 以辉锑矿为例[J]. *矿物学报*, 2011, 31(3): 366–371.
- [58] Wilkinson J J, Stoffell B, Wilkinson C C, Jeffries T E, Apold M S. Anomalously metal-rich fluids form hydrothermal ore deposits[J]. *Science*, 2009, 323(5915): 764–767.
- [59] Kouzmanov K, Pettke T, Heinrich C A. Direct analysis of ore-precipitating fluids: Combined IR microscopy and LA-ICP-MS study of fluid inclusions in opaque ore minerals[J]. *Economic Geology*, 2010, 105(2): 351–373.
- [60] Ni P, Huang J, Wang X, Jiang S, Ling H. Infrared fluid inclusion microthermometry on coexisting wolframite and quartz from Dajishan tungsten deposit, Jiangxi province, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement*, 2006, 70: 444.
- [61] Wei W F, Hu R Z, Bi X W, Peng J T, Su W C, Song S Q, Shi S H. Infrared microthermometric and stable isotopic study of fluid inclusions in wolframite at the Xihuashan tungsten deposit, Jiangxi province, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47(6): 589–605.
- [62] Kouzmanov K, Ramboz C, Bailly L, Bogdanov K. Genesis of high-sulfidation vinciennite-bearing Cu-As-Sn (<Au) assemblage from the Radka epithermal copper deposit, Bulgaria: Evidence from mineralogy and infrared microthermometry of enargite[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2004, 42(5): 1501–1521.
- [63] Kouzmanov K, Bailly L, Ramboz C, Rouer O, Bény J M. Morphology, origin and infrared microthermometry of fluid inclusions in pyrite from the Radka epithermal copper deposit, Srednogorie zone, Bulgaria [J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37(6-7): 599–613.
- [64] Lindaas S E, Kulis J, Campbell A R. Near-infrared observation and microthermometry of pyrite-hosted fluid inclusions [J]. *Economic Geology*, 2002, 97(3): 603–618.
- [65] Bailly L, Bouchot V, Beny C, Milesi J P. Fluid inclusion study of stibnite using infrared microscopy: An example from the Brouzils antimony deposit (Vendee, Armorican massif, France)[J]. *Economic Geology*, 2000, 95(1): 221–226.
- [66] Lüders V, Romer R, Cabral A, Schmidt C, Banks D, Schneider J. Genesis of itabirite-hosted Au-Pd-Pt-bearing hematite-(quartz) veins, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: constraints from fluid inclusion infrared microthermometry, bulk crush-leach analysis and U-Pb systematics[J]. *Mineralium Deposita*, 2005, 40(3): 289–306.
- [67] Rosière C A, Rios F J. The origin of hematite in high-grade iron ores based on infrared microscopy and fluid inclusion studies: The example of the Conceição mine, Quadrilátero Ferrífero, Brazil[J]. *Economic Geology*, 2004, 99(3): 611–624.
- [68] Rios F J, Alves J V, Perez C A, Costa É C, Rosière C A, Fuzikawa K, Correia Neves J M, Chaves A D O, Pratesa S P, de Barrio, R. E. Barriod Combined investigations of fluid inclusions in opaque ore minerals by NIR/SWIR microscopy and microthermometry and synchrotron radiation X-ray fluorescence[J]. *Applied Geochemistry*, 2006, 21(5): 813–819.

- [69] 王旭东, 倪培, 袁顺达, 吴胜利. 赣南漂塘钨矿锡石及共生石英中流体包裹体研究[J]. 地质学报, 2013, 87(6): 850—859.
- [70] Ni P, Zhu X, Wang R, Shen K, Zhang Z, Qiu J, Huang J. Constraining ultrahigh-pressure (UHP) metamorphism and titanium ore formation from an infrared microthermometric study of fluid inclusions in rutile from Donghai UHP eclogites, eastern China[J]. Geological Society of America Bulletin, 2008, 120(9-10): 1296—1304.
- [71] 朱霞, 倪培, 黄建宝, 王天刚. 显微红外测温技术及其在金红石矿床中的应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(9): 2052—2058.
- [72] Hagemann S G, Lüders V. PTX conditions of hydrothermal fluids and precipitation mechanism of stibnite-gold mineralization at the Wiluna lode-gold deposits, Western Australia: Conventional and infrared microthermometric constraints[J]. Mineralium Deposita, 2003, 38(8): 936—952.
- [73] Emsbo P, Hofstra A H, Lauha E A, Griffin G L, Hutchinson R W. Origin of high-grade gold ore, source of ore fluid components, and genesis of the Meikle and neighboring Carlin-type deposits, northern Carlin trend, Nevada[J]. Economic Geology, 2003, 98(6): 1069—1105.
- [74] Buchholz P, Oberthur T, Lüders V, Wilkinson J. Multistage Au-As-Sb mineralization and crustal-scale fluid evolution in the Kwekwe district, Midlands greenstone belt, Zimbabwe: A combined geochemical, mineralogical, stable isotope, and fluid inclusion study[J]. Economic Geology, 2007, 102(3): 347—378.
- [75] Stoffell B, Appold M S, Wilkinson J J, McClean N A, Jeffries T E. Geochemistry and evolution of Mississippi Valley-type mineralizing brines from the Tri-State and northern Arkansas districts determined by LA-ICP-MS microanalysis of fluid inclusions[J]. Economic Geology, 2008, 103: 1411—1435.
- [76] Samson I M, Williams-Jones A E, Ault K, Gagnon J E, Fryer B J. Fluids in distal Zn-Pb-Ag Skarns: Evidence from El Mochito, Honduras[J]. Geology, 2008, 36(12): 1411—1440.
- [77] Simmons S F, Sawkins F J, Schlutter D J. Mantle-derived helium in two Peruvian hydrothermal ore deposits[J]. Nature, 1987, 329(6138): 429—432.
- [78] Turner G, Stuart F. Helium/heat ratios and deposition temperatures of sulphides from the ocean floor[J]. Nature, 1992, 357(6379): 581—583.
- [79] Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P, Turner G. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He, Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W, Mo mineralisation, South Korea[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(22): 4663—4673.
- [80] Hu R Z, Burnard P G, Turner G, Bi X W. Helium and argon isotope systematics in fluid inclusions of Machangqing copper deposit in west Yunnan Province, China[J]. Chemical Geology, 1998, 146(1): 55—63.
- [81] Burnard P G, Hu R Z, Turner G, Bi X W. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(10): 1595—1604.
- [82] Hu R Z, Burnard P G, Bi X W, Zhou M F, Pen J T, Su W C, Wu K X. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River—Jinshajiang fault belt, SW China[J]. Chemical geology, 2004, 203(3): 305—317.
- [83] Li Z L, Hu R Z, Peng J T, Bi X W, Li X M. Helium isotope geochemistry of ore-forming fluids from Furong Tin Orefield in Hunan Province, China[J]. Resource Geology, 2006, 56(1): 9—15.
- [84] Li Z L, Hu R Z, Yang J S, Peng J T, Li X M, Bi X W. He, Pb and S isotopic constraints on the relationship between the A-type Qitianling granite and the Furong tin deposit, Hunan Province, China[J]. Lithos, 2007, 97(1): 161—173.
- [85] Cai M H, Mao J W, Ting L, Pirajno F, Huang H L. The origin of the Tongkeng-Changpo tin deposit, Dachang metal district, Guangxi, China: Clues from fluid inclusions and He isotope systematics[J]. Mineralium Deposita, 2007, 42(6): 613—626.
- [86] Zhao K D, Jiang S Y, Ni P, Ling H F, Jiang Y H. Sulfur, lead and helium isotopic compositions of sulfide minerals from the Dachang Sn-polymetallic ore district in South China: Implication for ore genesis[J]. Mineralogy and Petrology, 2007, 89(3-4): 251—273.
- [87] Wu L Y, Hu R Z, Peng J T, Bi X W, Jiang G H, Chen H W, Wang Q Y, Liu Y Y. He and Ar isotopic compositions and genetic implications for the giant Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo deposit, Hunan Province, South China[J]. International Geology Reviews, 2011, 53(5-6): 677—690.
- [88] Hu R Z, Wei W F, Bi X W, Peng J T, Qi Y Q, Wu L Y, Chen Y W. Molybdenite Re-Os and muscovite  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the Xihuashan tungsten deposit, central Nanling district, South China[J]. Lithos, 2012, 150: 111—118.
- [89] Zhai W, Sun X M, Wu Y S, Sun Y Y, Hua R M, Ye X R. He-Ar isotope geochemistry of the Yaoling-Meiziwo tungsten deposit, North Guangdong Province: Constraints on Yanshanian crust-mantle interaction and metallogenesis in SE China[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(10): 1150—1159.
- [90] 胡瑞忠, 毕献武, Turner G, Burnard P. 哀牢山金矿带金成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(4): 321—330.
- [91] Sun X M, Zhang Y, Xiong D X, Sun W D, Shi G Y, Zhai W, Wang S W. Crust and mantle contributions to gold-forming process at the Daping deposit, Ailaoshan gold belt, Yunnan, China[J]. Ore Geology Reviews, 2009, 36(1): 235—249.
- [92] Mao J W, Li Y Q, Goldfarb R, He Y, Zaw K. Fluid inclusion and noble gas studies of the Dongping gold deposit, Hebei Province, China: A mantle connection for mineralization?

- [J]. *Economic Geology*, 2003, 98(3): 517–534.
- [93] Zhang L, Zhou X, Ding S. Mantle-derived fluids involved in large-scale gold mineralization, Jiaodong District, China: Constraints provided by the He-Ar and H-O isotopic systems [J]. *International Geology Reviews*, 2008, 50(5): 472–482.
- [94] Zhu L M, Zhang G W, Guo B, Lee B. He-Ar isotopic system of fluid inclusions in pyrite from the molybdenum deposits in south margin of North China Block and its trace to metallogenic and geodynamic background[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(14): 2479–2492.
- [95] Zhu M T, Zhang L C, Wu G, He H Y, Cui M L. Fluid inclusions and He-Ar isotopes in pyrite from the Yinjiagou deposit in the southern margin of the North China Craton: A mantle connection for poly-metallic mineralization[J]. *Chemical Geology*, 2013.
- [96] Li S R, Santosh M, Zhang H F, Shen J F, Dong G C, Wang J Z, Zhang J Q. Inhomogeneous lithospheric thinning in the central North China Craton: Zircon U-Pb and S-He-Ar isotopic record from magmatism and metallogeny in the Taihang Mountains[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 141–160.
- [97] Zhi X C. Re-Os isotopic system and formation age of subcontinental lithosphere mantle [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(3): 193–200.
- [98] 蒋少涌, 杨竞红, 赵葵东, 于际民. 金属矿床 Re-Os 同位素示踪与定年研究[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2000, 36(6): 669–677.
- [99] Jiang S Y, Yang J H, Ling H F, Chen Y Q, Ceng H Z, Zhao K D, Ni P. Extreme enrichment of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au in Lower Cambrian black shales of South China: An Os isotope and PGE geochemical investigation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254(1): 217–228.
- [100] Yang S H, Zhou M F, Lightfoot P C, Malpas J, Qu W J, Zhou J B, Kong D Y. Selective crustal contamination and decoupling of lithophile and chalcophile element isotopes in sulfide-bearing mafic intrusions: An example from the Jingbulake Intrusion, Xinjiang, NW China[J]. *Chemical Geology*, 2012, 302: 106–118.
- [101] Rudnick R L, Nakamura E. Preface to “Lithium isotope geochemistry”[J]. *Chemical Geology*, 2004, 212(1): 1–4.
- [102] Chan L H, Leeman W P, You C F. Lithium isotopic composition of Central American volcanic arc lavas: Implications for modification of subarc mantle by slab-derived fluids; correction[J]. *Chemical Geology*, 2002, 182(2): 293–300.
- [103] Chan L H, Hein J R. Lithium contents and isotopic compositions of ferromanganese deposits from the global ocean[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54(11): 1147–1162.
- [104] Elliott T, Jeffcoate A, Bouman C. The terrestrial Li isotope cycle: Light-weight constraints on mantle convection [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, 220(3): 231–245.
- [105] Elliott T, Thomas A, Jeffcoate A, *et al.* Lithium isotope evidence for subduction-enriched mantle in the source of mid-ocean-ridge basalts[J]. *Nature*, 2006, 443(7111): 565–568.
- [106] 苏媛娜, 田世洪, 侯增谦, 李真真, 侯可军, 李延河, 胡文洁, 杨竹森. 锂同位素及其在四川甲基卡伟晶岩型锂多金属矿床研究中的应用[J]. *现代地质*, 2011, 25(2): 236–242.
- [107] Eastoe C J, Peryt T M, Petrychenko O Y, *et al.* Stable chlorine isotopes in Phanerozoic evaporites[J]. *Applied Geochemistry*, 2007, 22(3): 575–588.
- [108] Bonifacie M, Busigny V, Mével C, Philippot P, Agrinier P, Jendrzewski N, Scambelluri M, Javoy M. Chlorine isotopic composition in seafloor serpentinites and high-pressure metaperidotites. Insights into oceanic serpentinization and subduction processes [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2008, 72(1): 126–139.
- [109] Gleeson S A, Smith M P. The sources and evolution of mineralising fluids in iron oxide-copper-gold systems, Norrbotten, Sweden: Constraints from Br/Cl ratios and stable Cl isotopes of fluid inclusion leachates[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2009, 73(19): 5658–5672.
- [110] Huang F, Chakraborty P, Lundstrom C C, Holmden C, Glessner J J G, Kieffer S W, Leshner C E. Isotope fractionation in silicate melts by thermal diffusion[J]. *Nature*, 2010, 464(7287): 396–400.
- [111] Huang S, Farkaš J, Jacobsen S B. Calcium isotopic fractionation between clinopyroxene and orthopyroxene from mantle peridotites[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2010, 292(3): 337–344.
- [112] 孙剑, 房楠, 李世珍, 陈岳龙, 朱祥坤. 白云鄂博矿床成因的 Mg 同位素制约[J]. *岩石学报*, 2012, 28(9): 2890–2902.
- [113] Kelley K D, Wilkinson J J, Chapman J B, Crowther H L, Weiss D J. Zinc isotopes in sphalerite from base metal deposits in the red dog district, northern Alaska[J]. *Economic Geology*, 2009, 104(6): 767–773.
- [114] Zhu C W, Wen H J, Zhang Y X, Fan H F, Fu S H, Xu J, Qin T R. Characteristics of Cd isotopic compositions and their genetic significance in the lead-zinc deposits of SW China[J]. *Earth Sciences*, 2013, 56(12): 2056–2065.
- [115] Qi H W, Rouxel O, Hu R Z. Germanium isotopic systematics in Ge-rich coal from the Lincang Ge deposit, Yunnan, Southwestern China[J]. *Chemical Geology*, 2011, 286(3): 252–265.
- [116] Wen H, Carignan J. Selenium isotopes trace the source and redox processes in the black shale-hosted Se-rich deposits in China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(6): 1411–1427.
- [117] Smith C N, Kesler S E, Klaue B, Blum J D. Mercury isotope fractionation in fossil hydrothermal systems[J]. *Geology*, 2005, 33(10): 825–828.
- [118] 朱祥坤, 李志红, 唐索寒, 李延河. 早前寒武纪硫铁矿矿床 Fe 同位素特征及其地质意义: 以山东石河庄和河北大川为

- 例[J]. 岩石矿物学杂志, 2008, 27(5): 429-434.
- [119] 李志红, 朱祥坤, 唐素寒. 鞍山一本溪地区条带状铁建造的铁同位素与稀土元素特征及其对成矿物质来源的指示[J]. 岩石矿物学杂志, 2008, 27(4): 285-290.
- [120] 孙剑, 朱祥坤, 陈岳龙, 房楠. 白云鄂博地区相关地质单元的铁同位素特征及其对白云鄂博矿床成因的制约[J]. 地质学报, 2012, 86(5): 819-828.
- [121] Hannah J L, Stein H J, Wieser M E, de Laeter J R, Varner M D. Molybdenum isotope variations in molybdenite: Vapor transport and Rayleigh fractionation of Mo[J]. *Geology*, 2007, 35(8): 703-706.
- [122] Song S M, Hu K, Wen H J, Zhang Y X, Li K, Fan H F. Molybdenum isotopic composition as a tracer for low-medium temperature hydrothermal ore-forming systems: A case study on the Dajiangping pyrite deposit, western Guangdong Province, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(21): 2221-2228.
- [123] 蒋少涌, 于际民, 凌洪飞, 倪培. 壳-幔演化和板块俯冲作用过程中的硼同位素示踪[J]. 地学前缘, 2000, 7(2): 391-399.
- [124] Jiang S Y. Boron isotope geochemistry of hydrothermal ore deposits in China: A preliminary study[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(9): 851-858.
- [125] 侯可军, 李延河, 万德芳. 鞍山-本溪地区条带状硅铁建造的硫同位素非质量分馏对太古代大气氧水平和硫循环的制约[J]. 中国科学(D辑), 2007, 37(8): 997-1003.
- [126] Michalski G, Böhlke J K, Thiemens M. Long term atmospheric deposition as the source of nitrate and other salts in the Atacama Desert, Chile: New evidence from mass-independent oxygen isotopic compositions[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68(20): 4023-4038.
- [127] Kaufman A J, Corsetti F A, Varni M A. The effect of rising atmospheric oxygen on carbon and sulfur isotope anomalies in the Neoproterozoic Johnnie Formation, Death Valley, USA[J]. *Chemical Geology*, 2007, 237(1): 47-63.
- [128] 秦燕, 李延河, 刘锋, 侯可军, 万德芳. 新疆吐-哈地区硝酸盐矿床的氧同位素非质量效应[J]. 地球学报, 2008, 29: 729-734.
- [129] 唐茂, 赵辉, 刘耘. 天然气中甲烷和 CO<sub>2</sub> 的二元同位素特征[J]. 矿物学报, 2007, 27: 396-399.
- [130] Eiler J M, Schauble E. <sup>18</sup>O, <sup>13</sup>C, <sup>16</sup>O in Earth's atmosphere[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(23): 4767-4777.
- [131] Eiler J M. "Clumped-isotope" geochemistry: The study of naturally-occurring, multiply-substituted isotopologues[J]. *Earth Plane. Sci. Lett.*, 2007, 262(3): 309-327.
- [132] 裴荣富. 中国矿床模式[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [133] Faure G. Principles of isotope geochemistry[M]. New York: Wiley, 1986.
- [134] Brugger J, Maas R, Lahaye Y, Mcrae C, Ghaderi M, Costa S, Lambert D, Bateman R, Prince K. Origins of Nd-Sr-Pb isotopic variations in single scheelite grains from Archaean gold deposits, Western Australia[J]. *Chemical geology*, 2002, 182(2): 203-225.
- [135] 彭建堂, 胡瑞忠, 林源贤, 赵军红. 锡矿山锑矿床热液方解石的 Sm-Nd 同位素定年[J]. 科学通报, 2002, 47(10): 789-792.
- [136] 彭建堂, 胡瑞忠, 蒋国豪. 萤石 Sm-Nd 同位素体系对睛隆锑矿床成矿时代和物源的制约[J]. 岩石学报, 2003, (4): 785-791.
- [137] 彭建堂, 胡瑞忠, 毕献武, 戴植谟, 李兆丽, 李晓敏, 双燕, 袁顺达, 刘世荣. 湖南芙蓉锡矿田成矿作用的 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2007, 26(3): 237-248.
- [138] 彭建堂, 胡瑞忠, 赵军红, 符亚洲, 林源贤. 湘西沃溪 Au-Sb-W 矿床中白钨矿 Sm-Nd 和石英 Ar-Ar 定年[J]. 科学通报, 2003, 48(18): 1976-1981.
- [139] 刘琰, 邓军, 李潮峰, 施光海, 郑爱力. 四川雪宝顶白钨矿稀士地球化学与 Sm-Nd 同位素定年[J]. 科学通报, 2007, 52(16): 1923-1929.
- [140] 王晓地, 汪雄武, 孙传敏. 甘肃后长川钨矿白钨矿 Sm-Nd 定年及稀土元素地球化学[J]. 矿物岩石, 2010, 30(1): 64-68.
- [141] Peng J T, Hu R Z, Burnard P G. Samarium-neodymium isotope systematics of hydrothermal calcites from the Xikuangshan antimony deposit (Hunan, China): The potential of calcite as a geochronometer[J]. *Chemical Geology*, 2003, 200(1): 129-136.
- [142] Barker S L L, Bennett V C, Cox S F, Norman M D, Gagan M K. Sm-Nd, Sr, C and O isotope systematics in hydrothermal calcite-fluorite veins: Implications for fluid-rock reaction and geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2009, 268(1): 58-66.
- [143] 田世洪, 杨竹森, 侯增谦, 杨天南, 张洪瑞, 刘燕学, 宋玉财, 刘英超, 王银喜, 于玉帅, 王富春, 薛万文, 鲁海峰, 张玉宝, 朱田, 俞长捷. 青海玉树东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床与逆冲推覆构造关系的确定——来自粗晶方解石 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(3): 475-489.
- [144] 杨进辉, 周新华. 胶东地区玲珑金矿矿石和载金矿物 Rb-Sr 等时线年龄与成矿时代[J]. 科学通报, 2000, 45(14): 1547-1553.
- [145] Yang J H, Zhou X H. Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: Implications for the age and genesis of lode gold deposits[J]. *Geology*, 2001, 29(8): 711-714.
- [146] Li Q L, Chen F K, Yang J H, Fan H R. Single grain pyrite Rb-Sr dating of the Linglong gold deposit, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2008, 34(3): 263-270.
- [147] 韩以贵, 李向辉, 张世红, 张元厚, 陈福坤. 豫西祁雨沟金矿单颗粒和碎裂状黄铁矿 Rb-Sr 等时线定年[J]. 科学通报, 2007, 52(11): 1307-1311.
- [148] Arne D C, Bierlin F P, Morgan J W, Stein H J. Re-Os dating of sulfides associated with gold mineralization in central Victoria, Australia[J]. *Economic Geology*, 2001, 96(6): 1455-1459.

- [149] Morelli R M, Creaser R A, Selby D, Kontak D J, Horne R J. Rhenium-Osmium geochronology of arsenopyrite in Meguma Group gold deposits, Meguma Terrane, Nova Scotia, Canada; Evidence for multiple gold-mineralizing events[J]. *Economic Geology*, 2005, 100(6): 1229-1242.
- [150] 喻钢, 杨刚, 陈江峰, 屈文俊, 杜安道, 何畏. 辽东猫岭金矿中含金毒砂的 Re-Os 年龄及地质意义[J]. *科学通报*, 2005, 50(12): 1248-1252.
- [151] 王加昇, 温汉捷, 李超, 丁伟, 张锦让. 黔东南石英脉型金矿毒砂 Re-Os 同位素定年及其地质意义[J]. *地质学报*, 2011, 85(6): 955-964.
- [152] Stein H J, Morgan J W, Scherstén A. Re-Os dating of low-level highly radiogenic (LLHR) sulfides; The Harnäs gold deposit, southwest Sweden, records continental-scale tectonic events[J]. *Economic Geology*, 2000, 95(8): 1657-1671.
- [153] Kirk J, Ruiz J, Chesley J, Tittle S, Walshe J. A detrital model for the origin of gold and sulfides in the Witwatersrand basin based on Re-Os isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(13): 2149-2159.
- [154] 石贵勇, 孙晓明, 潘伟坚, 胡北铭, 屈文俊, 杜安道, 李超. 云南哀牢山金矿带镇沅超大型金矿载金黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. *科学通报*, 2012, 57(26): 2492-2500.
- [155] Lawley C, Selby D, Imber J. Re-Os molybdenite, pyrite, and chalcopyrite geochronology, Lupa Goldfield, Southwestern Tanzania; tracing metallogenic time scales at mid-crustal shear zones hosting orogenic Au deposits[J]. *Economic Geology*, 2013, 108(7): 1591-1613.
- [156] 唐永水, 毕献武, 武丽艳, 和利平, 冯彩霞, 邹志超. 金顶铅锌矿黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. *矿物学报*, 2013, 33(3): 287-294.
- [157] Wang J Z, Li J W, Zhao X F, Ma C Q, Qu W J, Du A D. Re-Os dating of pyrrhotite from the Chaoshan gold skarn, eastern Yangtze Craton, eastern China[J]. *International Geology Review*, 2008, 50(4): 392-406.
- [158] Lü L S, Mao J W, Li H O, Pirajno F, Zhang Z H, Zhou Z H. Pyrrhotite Re-Os and SHRIMP zircon U-Pb dating of the Hongqiling Ni-Cu sulfide deposits in Northeast China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 43(1): 106-119.
- [159] Zhu Z M, Sun Y L. Direct Re-Os dating of chalcopyrite from the Lala IOCG deposit in the Kangdian copper belt, China[J]. *Economic Geology*, 2013, 108(4): 871-882.
- [160] 李华芹, 谢才富, 常海亮. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [161] Kempe U, Belyatsky B, Krymsky R, Kremenetsky A, Ivanov P. Sm-Nd and Sr isotope systematics of scheelite from the giant Au (-W) deposit Muruntau (Uzbekistan): Implications for the age and sources of Au mineralization[J]. *Mineralium Deposita*, 2001, 36(5): 379-392.
- [162] 聂凤军, 江思宏, 白大明. 北京密云沙厂环斑花岗岩杂岩体黑钨矿钨-铍同位素研究[J]. *地质论评*, 2002, 48(1): 29-30.
- [163] Yuan S D, Peng J T, Hao S, Li H, Geng J, Zhang D. In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin-poly-metallic mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 43(1): 235-242.
- [164] 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 等. 都龙锡锌矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件[J]. *岩石学报*, 2007, 23(5): 967-976.
- [165] Barfod G H, Otero O, Albarède F. Phosphate Lu-Hf geochronology[J]. *Chemical geology*, 2003, 200(3): 241-253.
- [166] Larsson D, Söderlund U. Lu-Hf apatite geochronology of mafic cumulates: An example from a Fe-Ti mineralization at Småländs Taberg, southern Sweden[J]. *Chemical Geology*, 2005, 224(4): 201-211.
- [167] Walker R J, Morgan J W, Beary E S, Smoliar M I, Czamanske G K, Horan M F. Applications of the  $^{190}\text{Pt}$ - $^{186}\text{Os}$  isotope system to geochemistry and cosmochemistry [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997, 61(22): 4799-4807.
- [168] Lugué A, Pearson D G, Nowell G M, Dreher S T, Coggon J A, Spetsius Z V, Parman S W. Enriched Pt-Re-Os isotope systematics in plume lavas explained by metasomatic sulfides [J]. *Science*, 2008, 319(5862): 453-456.
- [169] Coggon J A, Nowell G M, Pearson D G, *et al.* Application of the  $^{190}\text{Pt}$ - $^{186}\text{Os}$  isotope system to dating platinum mineralization and ophiolite Formation; An example from the Meratus Mountains, Borneo [J]. *Economic Geology*, 2011, 106(1): 93-117.
- [170] Coggon J A, Nowell G M, Pearson D G, Parman S W. The  $^{190}\text{Pt}$ - $^{186}\text{Os}$  decay system applied to dating platinum-group element mineralization of the Bushveld Complex, South Africa[J]. *Chemical Geology*, 302-303:48-60.
- [171] Hu F F, Fan H R, Yang J H, Wan Y S, Liu D Y, Zhai M G, Jin C W. Mineralizing age of the Rushan lode gold deposit in the Jiaodong Peninsula; SHRIMP U-Pb dating on hydrothermal zircon[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1629-1636.
- [172] Pellerer E, Cheilletz A, Gasquet D, Mouttaqi A, Annich M, Hakour A E, Deloule E, Féraude G. Hydrothermal zircons: A tool for ion microprobe U-Pb dating of gold mineralization (Tamlalt - Menhouhou gold deposit-Morocco) [J]. *Chemical Geology*, 2007, 245(3): 135-161.
- [173] Rasmussen B, Sheppard S, Fletcher I R. Testing ore deposit models using in situ U-Pb geochronology of hydrothermal monazite: Paleoproterozoic gold mineralization in northern Australia[J]. *Geology*, 2006, 34(2): 77-80.
- [174] Kempe U, Lehmann B, Wolf D, Rodionov N, Bombach K, Schwengfelder U, Dietrich A. U-Pb SHRIMP geochronology of Th-poor, hydrothermal monazite: An example from the Llallagua tin-porphyry deposit, Bolivia[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2008, 72(17): 4352-4366.
- [175] Jemielita R A, Davis D W, Krogh T E. U-Pb evidence for Abitibi gold mineralization postdating greenstone magmatism and metamorphism[J]. *Nature*, 1990, 346: 831-

- 834.
- [176] Zweng P L, Mortensen J K, Dalrymple G B. Thermochronology of the Camflo gold deposit, Malartic, Quebec: Implications for magmatic underplating and the formation of gold-bearing quartz veins[J]. *Economic Geology*, 1993, 88(6): 1700—1721.
- [177] Li J W, Deng X D, Zhou M F, Liu Y S, Zhao X F, Guo J L. Laser ablation ICP-MS titanite U-Th-Pb dating of hydrothermal ore deposits: A case study of the Tonglushan Cu-Fe-Au skarn deposit, SE Hubei Province, China[J]. *Chemical geology*, 2010, 270(1): 56—67.
- [178] Bi X W, Hu R Z, Li H M, 2011. U-Pb cassiterite dating by LA-ICPMS and a precise mineralization age for the super-large Furong tin deposit, Hunan Province, southern China [J]. *Mineralogical Magazine*, 2011, 75:526.
- [179] 马楠, 邓军, 王庆飞, 王长明, 张静, 李龚健. 云南腾冲大松坡锡矿成矿年代学研究: 锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年龄和锡石 LA-MC-ICP-MSU-Pb 年龄证据[J]. *岩石学报*, 2013, 29(4): 1123—1135.
- [180] 郭文魁, 刘梦庚, 王永勤, 刘兰笙. 中国内生金属成矿图说说明书[M]. 北京: 地图出版社, 1987.
- [181] 陈毓川. 中国矿床成矿系列图[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [182] 任秉琛, 邬介人. 古亚洲成矿域古生代矿床成矿系列组合与矿床成矿系列类型的初步划分[J]. *矿床地质*, 2002, 21(S1): 219—222.
- [183] Qin K Z, Zhang L C, Xiao W J, Xu X W, Yan Z, Mao J W. Overview of major Au, Cu, Ni and Fe deposits and metallogenic evolution of the eastern Tianshan Mountains, Northwestern China[J]. *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan (London)*, 2003: 227—249.
- [184] Qin K Z, Su B X, Sakyi P A, Tang D M, Li X H, Sun H, Xiao Q H, Liu P P. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu-Bearing Mafic-Ultramafic Intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China): Constraints on a ca. 280 Ma mantle plume[J]. *American Journal of Science*, 2011, 311(3): 237—260.
- [185] Zhang L, Xiao W, Qin K Z, Qu W, Du A D. Re-Os isotopic dating of molybdenite and pyrite in the Baishan Mo-Re deposit, eastern Tianshan, NW China, and its geological significance[J]. *Mineralium Deposita*, 2005, 39(8): 960—969.
- [186] Zhang L C, Qin K Z, Xiao W J. Multiple mineralization events in the eastern Tianshan district, NW China: Isotopic geochronology and geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 236—246.
- [187] 毛景文, 杨建民, 屈文俊, 杜安道, 王志良, 韩春明. 新疆黄山东铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定及其地球动力学意义[J]. *矿床地质*, 2002, 21(4): 323—330.
- [188] 毛景文, Pirajno F, 张作衡, 柴凤梅, 杨建民, 吴华, 陈世平, 程松林, 张长青. 天山—阿尔泰东部地区海西晚期后碰撞铜镍硫化物矿床, 主要特点及可能与地幔柱的关系 [J]. *地质学报*, 2006, 80(7): 925—942.
- [189] Zhou M F, Michael Lesher C, Yang Z G, Li J W, Sun M. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt[J]. *Chemical Geology*, 2004, 209(3): 233—257.
- [190] Mao J W, Pirajno F, Zhang Z H, Chai F M, Wu Hua, Chen S P, Cheng L S, Yang J M, Zhang C Q. A review of the Cu-Ni sulphide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal characteristics and ore-forming processes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32(2): 184—203.
- [191] Liu J, Wu G, Li Y, Zhu M T, Zhong W. Re-Os sulfide (chalcopyrite, pyrite and molybdenite) systematics and fluid inclusion study of the Duobaoshan porphyry Cu (Mo) deposit, Heilongjiang Province, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 49: 300—312.
- [192] Li W B, Zhong R C, Xu C, Song B, Qu W J. U-Pb and Re-Os geochronology of the Bainaimiao Cu-Mo-Au deposit, on the northern margin of the North China Craton, Central Asia Orogenic Belt: Implications for ore genesis and geodynamic setting[J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 48: 139—150.
- [193] Yakubchuk A, Seltmann R, Shatov V, Cole A. The Altaids; Tectonic evolution and metallogeny[J]. *Soc. Econ. Geol. Newsl.*, 2001, 46: 6—14.
- [194] Morelli R, Creaser R A, Seltmann R, Stuart F M, Selby D, Graupner T. Age and source constraints for the giant Murrumbidgee gold deposit, Uzbekistan, from coupled Re-Os-He isotopes in arsenopyrite[J]. *Geology*, 2007, 35(9): 795—798.
- [195] Goldfarb R J, Taylor R D, Collins G S, Goryachev N A, Orlandini O F. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 48—102.
- [196] 陈衍景. 中国西北地区中亚型造山—成矿作用的研究意义和进展[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(1): 17—22.
- [197] 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 王安建, 潘桂棠, 曲晓明, 聂凤军. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型[J]. *中国地质*, 2006, 33(2): 340—351.
- [198] Hou Z Q, Zeng P S, Gao Y F, Du A D, Fu D M. Himalayan Cu-Mo-Au mineralization in the eastern Indo-Asian collision zone: Constraints from Re-Os dating of molybdenite [J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41:33—45.
- [199] Hou Z Q, Zaw K, Pan G T, Mo X X, Xu Q, Hu Y Z, Li X Z. Sanjiang Tethyan metallogenesis in SW China: Tectonic setting, metallogenic epochs and deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31: 48—87.
- [200] 邓军, 杨立强, 王长明. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究进展[J]. *岩石学报*, 2011, 27(9): 2501—2509.
- [201] Deng J, Wang Q F, Li G J, Li C, Wang C. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China [J].

- Gondwana Research, 2013, 08, 002.
- [202] Hou Z Q, Yang Z M, Qu X M, Meng X J, Li Z Q, Beau-doin G, Rui Z Y, Gao Y F, Zaw K. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan Orogen [J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 36: 25-51.
- [203] Bi X W, Cornell D H, Hu R Z. REE composition of primary and altered feldspar from the mineralized alteration zone of alkali-rich intrusive rocks, western Yunnan province, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2002, 19: 69-78.
- [204] Bi X W, Hu R Z, Cornell D H. The alkaline porphyry associated Yao'an gold deposit, Yunnan, China: Rare earth element and stable isotope evidence for magmatic-hydrothermal ore formation [J]. *Mineralium Deposita*, 2004, 39: 21-30.
- [205] 侯增谦, 宋玉财, 李政, 王召林, 杨志明, 杨竹森, 刘英超, 田世洪, 何龙清, 陈开旭, 王富春, 赵呈祥, 薛万文, 鲁海峰. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型 [J]. *矿床地质*, 2008, 27(2): 123-144.
- [206] Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, Qü W J, Du A D, Ye H S, Pirajno F, Li F M, Guo B J, Li Y F, Yang Z Q. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling - Dabie orogenic belt [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2008, 72: 4607-4626.
- [207] Mao J W, Wang Y T, Zhang Z H, Yu J J, Niu B G. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(8): 838-851.
- [208] Li J W, Vasconcelos P M, Zhang J, Zhou M F, Zhang X J, Yang F H.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  constraints on a temporal link between gold mineralization, magmatism, and continental margin transtension in the Jiaodong gold province, eastern China [J]. *Journal of Geology*, 2003, 111: 741-751.
- [209] Mao J W, Wang Y T, Lehmann B, Yu J J, Du A D, Mei Y X, Li Y F, Zhang W S, Stein H J, Zhou T F. Molybdenite Re-Os and albite  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications [J]. *Ore Geology Reviews*, 2006, 29: 307-324.
- [210] 毛景文, 华仁民, 李晓波. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区 [J]. *矿床地质*, 1999, 18(4): 291-299.
- [211] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境 [J]. *高校地质学报*, 2008, 14(4): 510-526.
- [212] 华仁民. 南岭中生代陆壳重熔型花岗岩类成岩-成矿的时间差及其地质意义 [J]. *地质论评*, 2005, 51(6): 633-639.
- [213] 彭建堂, 胡瑞忠, 袁顺达, 毕献武, 沈能平. 南岭中段(湘南)中生代花岗岩类成岩成矿的时限 [J]. *地质论评*, 2008, 54(5): 617-625.
- [214] Peng J T, Zhou M F, Hu R Z, Shen N P, Yuan S D, Bi X W, Du A D, Qu W J. Precise molybdenite Re-Os and mica Ar-Ar dating of the Mesozoic Yaogangxian tungsten deposit, central Nanling district, South China [J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41: 661-669.
- [215] 胡瑞忠, 毕献武, 苏文超, 彭建堂, 李朝. 华南白垩-第三纪地壳拉张与轴成矿的关系 [J]. *地质前缘*, 2004, 11(1): 153-160.
- [216] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(10): 2329-2338.
- [217] 侯增谦, 郑远川, 杨志明, 杨竹森. 大陆碰撞成矿作用: I. 冈底斯新生代斑岩成矿系统 [J]. *矿床地质*, 2012, 31(4): 647-670.
- [218] 胡瑞忠. 国家 973 项目“大规模成矿作用与大型矿集区预测”课题结题报告 [R]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2004.
- [219] Zhou M F, Malpas J, Song X Y, Robinson P T, Sun M, Kennedy A K, Leshner C M, Keays R R. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, 196: 113-122.
- [220] Zhou M F, Arndt N T, Malpas J, Wang C Y, Kennedy A K. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Lithos*, 2008, 103: 352-268.
- [221] Zhong H, Zhu W G. Geochronology of layered mafic intrusions from the Pan-Xi area in the Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41: 599-606.
- [222] He B, Xu Y G, Huang X L, Luo Z Y, Shi Y R, Yang Q J, Yu S Y. Age and duration of the Emeishan flood volcanism, SW China: Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb dating of silicic ignimbrites, post-volcanic Xuanwei Formation and clay tuff at the Chaotian section [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, 255(3): 306-323.
- [223] Shellnutt J G, Zhou M F. Permian peralkaline, peraluminous and metaluminous A-type granites in the Panxi district, SW China: Their relationship to the Emeishan mantle plume [J]. *Chemical Geology*, 2007, 243: 286-316.
- [224] Shellnutt J G, Wang K L, Zellmer G F, Iizuka Y, Jahn B M, Pang K N, Qi L, Zhou M F. Three Fe-Ti oxide ore-bearing gabbro-granitoid complexes in the Panxi region of the Permian Emeishan large igneous province, SW China [J]. *American Journal of Science*, 2011, 311(9): 773-812.
- [225] Song X Y, Keays R R, Xiao L, Qi H W, Ihlenfeld C. Platinum-group element geochemistry of the continental flood basalts in the central Emeishan Large Igneous Province, SW China [J]. *Chemical Geology*, 2009, 262: 246-261.
- [226] Groves D I, Condie K C, Goldfarb R G, Hronsky J M A, Vielreicher R M. Secular changes in global tectonic processes and their influence on the temporal distribution of gold-bearing mineral deposits [J]. *Economic Geology*, 2005, 100: 203-224.
- [227] 涂光焱, 高振敏, 胡瑞忠, 张乾, 李朝阳, 赵振华, 张宝贵. 分散元素地球化学及成矿机制 [M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1-422.