

金属矿床成矿物质来源的几种常用同位素地球化学研究

毛光周¹, 王向军¹, 邓冰红², 曹明平¹, 刘晓通¹, 安鹏瑞¹

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 浙江大昌建设集团 大昌爆破工程有限公司, 浙江 舟山 316000)

摘要:金属矿床成矿物质来源是矿床地球化学工作者最为关心的问题之一。不同矿床成矿物质来源不同, 同种矿床甚至同一矿床成矿物质来源也会有不同。成矿物质来源包括成矿元素和成矿流体两方面, 目前常用的研究方法主要是同位素地球化学分析。通过研究六种常用同位素(氢、氧、硫、钕、锶、铅)的组成和演化特征, 简述同位素在金属矿床成矿物质来源中的应用及注意事项, 为矿床成因、成矿模式等研究工作以及同位素方法的合理运用提供参考。

关键词:金属矿床; 成矿流体; 成矿元素; 同位素; 物质源区

中图分类号: P597

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)01-0019-11

Geochemical Analysis of Several Common Isotopes in Ore-forming Material Sources of Metal Deposits

MAO Guangzhou¹, WANG Xiangjun¹, DENG Binghong², CAO Mingping¹, LIU Xiaotong¹, AN Pengrui¹

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Blasting Branch, Darch Construction Group Coporation, Zhoushan, Zhejiang 316000, China)

Abstract: The source of ore-forming materials in metal deposits is one of the biggest concerns for geochemists. Different deposits have different sources of ore-forming materials, and the same type of deposits or even the same deposits might also have various sources. The ore-forming material sources include ore-forming elements and ore-forming fluids and they are usually studied by isotope geochemical analysis. This paper studied the application and precautions of isotopes in ore-forming material sources of metal deposits by analyzing the compositions and evolution characteristics of six common isotopes (hydrogen, oxygen, sulphur, neodymium, strontium and lead) and proposed solutions to existing problems. It can provide reference for the rational application of isotope methods in the research of ore genesis and metallogenic model of deposits.

Key words: metal deposits; ore-forming fluids; ore-forming elements; isotope; material sources areas

成矿物质来源是研究矿床成因, 建立成矿模式等工作的基础^[1-4]。广义的物质来源指成矿元素及其搬运介质——成矿流体, 因而成矿物质来源可分为成矿元素和成矿流体两方面^[2,5-6]。二者有时同源, 有时异源。矿床通常具有成矿物质多源性、成矿作用多期性的特点。成矿物质来源是矿床地球化学、成矿规律学的基本问题之一, 也是成矿作用研究的重点^[2,7]。

金属矿床物质来源研究主要采用构造地质学、矿床学、流体动力学以及地球化学等理论, 探讨成矿物质

收稿日期: 2015-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572063, 41202083); 山东省金属矿产成矿地质过程与综合利用重点实验室项目(2013003); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2013HZ024); 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室开放课题(DMSM201403); 西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项(BJ081334)

作者简介: 毛光周(1978—), 男, 甘肃甘谷人, 副教授, 主要从事岩矿地球化学、能源地质方面的教学与研究工作。

E-mail: gzmaonjunwu@163.com

的宏观及微观信息^[8-10]。同位素地球化学在金属矿床成矿物质来源研究中具有重要作用,通过同位素在地质体中的分布及其运动规律研究,解释岩石和矿石的物质来源及其成因等地质问题^[11-17]。

同位素地球化学对成矿元素以及成矿流体来源的研究具有重要作用^[4-19]。虽然同位素方法经过几十年发展已经较为成熟,并取得许多重要成果,但是,对于基本地质事实重视程度仍有不足。通过研究六种常用同位素(氢、氧、硫、钨、锶、铅)的组成和演化特征,简述其在金属矿床物质来源中的应用及注意事项,并对存在的问题提出解决办法,为同位素方法在矿床成因、成矿模式等研究工作的合理运用提供参考。

1 氢氧同位素法

利用氢、氧同位素法研究成矿物质来源,是同位素示踪技术在地质研究中取得的重要成果之一^[12]。不同来源的物质具有不同的氢氧同位素组成,因此氢氧同位素组成特征是判断成矿物质来源的重要依据^[13,20]。在野外勘探与室内研究的基础上,初步确定方解石、石英等矿物与成矿的关系,并划分成矿期次。然后将所测得的成矿期的方解石或石英等矿物的氢、氧同位素数据投入成矿流体 $\delta D_{SMOW} - \delta^{18}O_{H_2O}$ 示意图(图 1)中,根据图中数据点的投点位置分析成矿物质来源^[13,21-23]。

氢氧同位素在各地质体中含量具有可变性,不同学者对各地质体中的氢、氧同位素边界的界定不同,如卢武长等^[19]与魏菊英等^[11]总结的各种类型天然水中的氢氧同位素组成(表 1)。

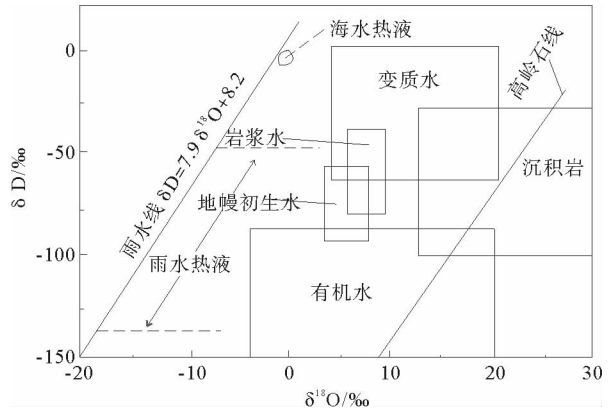


图 1 成矿流体 $\delta D_{SMOW} - \delta^{18}O_{H_2O}$ 示意图^[13,21-23]

Fig. 1 $\delta D_{SMOW} - \delta^{18}O_{H_2O}$ of ore-forming fluid

表 1 天然水中的氢、氧同位素组成^[20]

Tab. 1 Hydrogen and oxygen isotope composition in natural water

	魏菊英等 ^[11]		卢武长等 ^[19]	
	δD_{SMOW}	$\delta^{18}O_{SMOW}$	δD_{SMOW}	$\delta^{18}O_{SMOW}$
大气降水	+50~-500	+10~-55	+50~-350	-10~-50
海水	0±	0±	0±	0±
地热水、热卤水	不同地区、不同的地质地球化学条件差别较大			
岩浆水	-40~-85	5.5~9.5	-50~-85	6~8.5
变质水	-20~-65	5~25	-20~-65	5~25

氢氧同位素示踪研究受石英等矿物与流体的平衡状态难以确定以及作为流体包裹体的寄主矿物封闭不佳等因素的制约^[24],因此,分析金属矿床物质来源时,应在野外地质勘察和镜下观测基础上,采用硫化物(以黄铁矿最好)中流体包裹体的 $\delta D_{SMOW} - \delta^{18}O_{H_2O}$ 系统测试,再辅以氦、氩等惰性气体同位素方法,才能更明确指示热液矿体成矿流体来源。如张连昌等^[22]对胶东金矿研究中,认为黄铁矿流体包裹体的氢、氧同位素指示的成矿流体来源与氦、氩同位素指示的成矿流体来源一致,证实了该矿区成矿流体是以大气水为主要来源,仅有少量的地幔流体加入。

2 硫同位素法

硫有四种同位素(³²S, ³³S, ³⁴S, ³⁶S),其中³²S和³⁴S所占比例大于99%,因此,常用³²S/³⁴S或 $\delta^{34}S$ 值描述地质体的硫同位素特征。硫同位素是矿床成因和成矿物理化学条件的指示剂^[12-13,25]。对硫同位素特征研究,可以通过确定矿床中矿石硫或围岩硫的来源,推断金属矿床物质来源。在利用硫同位素研究成矿物质来

源时,通常计算矿石或者围岩的 $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$,并投点于不同地质体 $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ 分布图(图 2)中,据此可推断矿物的物质来源;也可以与研究区背景值或者邻区背景值进行对比,判断矿床成矿物质来源。

此外,硫同位素示踪也常利用 $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ -频数(频率)分布图(图 3),其优点在于可直观地了解矿石、围岩的 $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ 及其分布关系。如张云新等^[26]研究云南乐红铅锌矿床时,对 23 件黄铁矿、方铅矿等金属硫化物的硫同位素特征进行分析,发现硫同位素主要来自海水硫酸盐的热化学还原作用(图 3)。

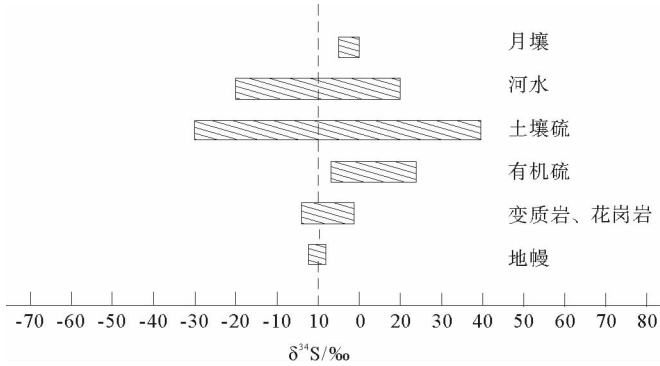


图 2 不同地质体中 $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ 含量分布图^[12,25]

Fig. 2 $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ content distribution in different geological bodies^[12,25]

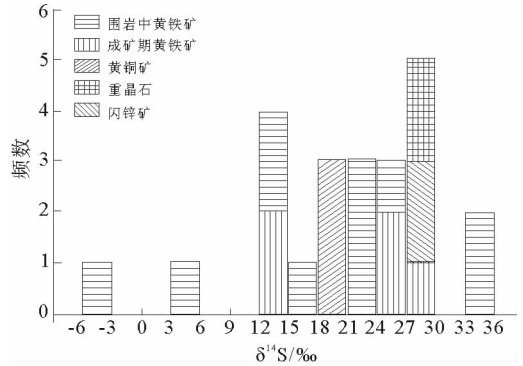


图 3 云南乐红铅锌矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ -频数分布图^[25-26]

Fig. 3 $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ -frequency distribution in Yunnan Leihong lead and zinc deposit metal sulfide^[25-26]

热液矿床硫同位素来源主要有 4 种:①来自地幔和深部地壳,其硫同位素平均组成与陨石硫同位素组成接近, $\delta^{34}\text{S}$ 含量约为 $0\sim 5\text{‰}$;②来自海水硫酸盐, $\delta^{34}\text{S}$ 一般高于 15‰ ;③生物成因硫,由于生物作用和 SO_4^{2-} 作用, H_2S 开放和封闭体系的不同, $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围较大,并显示硫同位素组成未达到平衡;④混合硫, $\delta^{34}\text{S}$ 常介于地幔硫和海水硫酸盐硫同位素组成之间^[11,19](表 2)。

表 2 不同地质体中硫同位素($\delta^{34}\text{S}$)组成特征

Tab. 2 Characteristics of sulfur isotopic composition in different geological bodies ‰

	郑永飞等 ^[12]	韩吟文等 ^[13]	张云新等 ^[26]	魏菊英 ^[11] , 卢武长 ^[19]
地幔、深部地壳	0 ± 2	$-1\sim +2$	$0\pm$	$0\sim 5$
海水硫	约 20	$10\sim 30$	富 ^{34}S	>15
生物成因硫	$14\sim 20$ (海水);多为负值(淡水)	$-50\sim$ 正值	贫 ^{34}S ,富 ^{32}S	变化大
混合硫	$-2\sim 20$		变化大	地幔硫~海水硫

硫同位素示踪研究中,不同成因矿床的硫同位素组成的变化区间有部分重合,且部分学者应用图解法阐述矿石硫来源时,容易忽略氧逸度、酸碱度及化学电位等物理化学参数的影响。硫化物样品数量和质量以及对矿床的野外地质观察和室内地质工作的研究深度也影响着硫同位素的示踪效果。

3 锶同位素法

锶有 ^{84}Sr 、 ^{86}Sr 、 ^{87}Sr 和 ^{88}Sr 四种同位素,其中部分 ^{87}Sr 可由 ^{87}Rb 衰变而成,而其余三种皆为宇宙成因,且原子总数基本不变。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 是判断成岩成矿物质壳、幔来源的重要指标^[27]。一般通过测定并对比基底、围岩或矿石三者的锶同位素组成特征,研究金属矿床物质来源。目前,人们已经积累了部分地质体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值,故可将样品值与之对比来判断物质来源。

Faure 等^[28]发现锶同位素组成随时间演化及其在不同地质体中的含量变化特征,绘制了不同地质体锶同位素-时间演化示意图(图 4),为成矿物质来源的锶同位素研究提供了对比依据和理论基础。

一般 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.710$ 时被认为是壳源, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.705$ 时为幔源。矿床成因研究中,常利用地质体的初始锶同位素特征判断成矿元素来源和成矿流体来源,有时也用于研究深源流体、岩浆流体的壳幔混染作用^[13]。

Hedge 等^[29] 和 Bohlke 等^[30] 指出, 锶同位素与流体及成矿物质的来源可以完全不同, 它只是流经某地时带走了与流体源相同的锶同位素, 改变了流体的锶同位素组成。解决方法是对硫化物矿物(闪锌矿等)的流体包裹体中锶同位素分析, 这样既可以排除富锶矿物的干扰, 也由于硫化物矿物良好的封闭性可减少其在运移过程中与外界的锶同位素交换^[26,31]。另外, 流体包裹体中锶同位素数据可以与从流体包裹体得到的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 及其他化学成分数据进行比较, 综合多种数据共同解释流体来源及演化。

4 钕同位素法

钕同位素在探讨地幔演化、地壳演化、壳幔交换、岩石成因和物质来源等方面具有十分重要的意义^[33-37]。在壳幔体系钕同位素演化中, 将测得的矿石或围岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和年龄投图于 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-t$ 演化图(图 5)中, 分析其物质来源。图中 CHUR 线表示相当于球粒陨石的原始地幔的演化线, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值恒等于 0; DM 线表示亏损地幔的演化线, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 随着时间向正值增高的方向演化, 现今亏损地幔的平均 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +10$; C 线为地壳物质演化线, 其稀土元素组成模式右倾, 表示从地幔中分异形成的地壳物质向 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值降低的方向演化, 该演化线的陡缓程度取决于地幔分异产物中 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值的大小, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值大, C 线越陡, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值小, C 线越缓; C 线与亏损地幔演化线的交点为 T_{DM} , 与 CHUR 线的交点为 T_{CHUR} ^[13]。

此外, 研究金属矿床物质来源时, 经常结合钕、锶两种同位素组成特征, 投图于 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 示意图(图 6)和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 示意图(图 7)两种模式。

在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 方法中, 需分别计算 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值, 再投于 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 示意图(图 6), 根据积累的地质经验与数据所划分出的常用地质体 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 组成^[32,34,37], 可以直观地判断围岩或矿石的物质来源。田世洪等^[38] 对成矿期方解石及萤石, 采用 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解法, 发现其锶同位素高度一致, 判定矿床流体来源为上地壳, 与硫化物矿石的其他同位素判定结果一致。

在采用钕、锶同位素结合的方式进行壳幔体系同位素示踪时, 以 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 示意图(图 7)最为常用。该图被 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 0$ 和 $\epsilon_{\text{Sr}}(t) = 0$ 的两个直线划分为四个象限, I 象限多为受海水蚀变蛇绿岩; II 象限源自亏损地幔玄武岩等; III 象限多为地壳麻粒岩相岩石; IV 象限多为地壳物质^[13]。

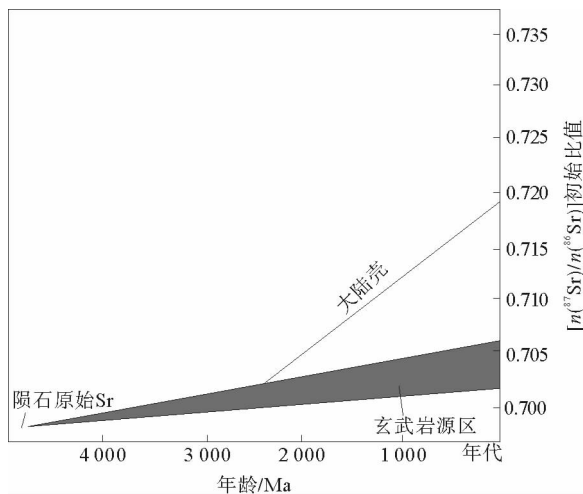


图 4 不同地质体锶同位素-时间演化示意图^[28]

Fig. 4 Evolution of Sr isotope-time in different geological bodies^[28]

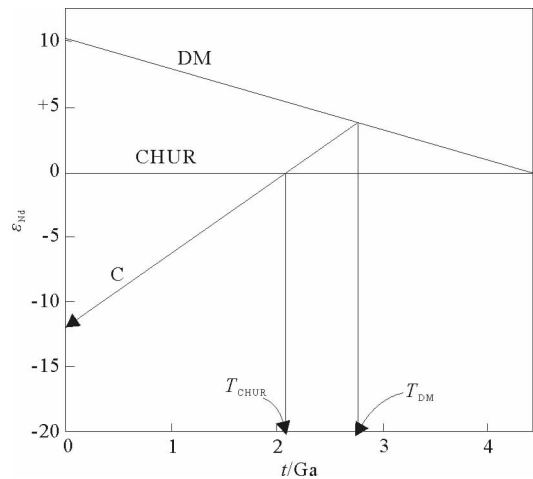
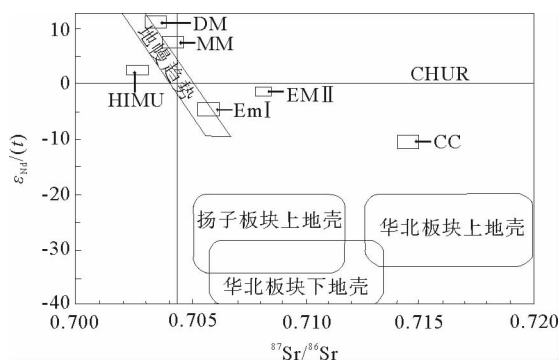


图 5 壳幔体系 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-t$ 演化图^[13,32]

Fig. 5 Evolution of Nd isotopic in crust-mantle system^[13,32]



DM—亏损地幔;MM—交代地幔;EM I—I型富集地幔;EM II—II型富集地幔;

HIMU—高U/Pb比值地幔;CC—大陆地壳;CHUR—球粒陨石均一库

图6 常见地质体 $\epsilon_{Nd}(t)$ - $^{87}Sr/^{86}Sr$ 示意图^[32,34,37]

Fig. 6 Schematic of $\epsilon_{Nd}(t)$ - $^{87}Sr/^{86}Sr$ in common geologic bodies^[32,34,37]

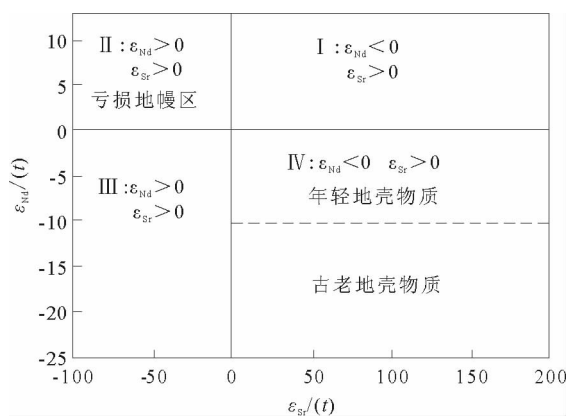


图7 不同地质体 $\epsilon_{Nd}(t)$ - $\epsilon_{Sr}(t)$ 示意图^[13,33]

Fig. 7 Schematic of $\epsilon_{Nd}(t)$ - $\epsilon_{Sr}(t)$ in different geologic bodies^[13,33]

钕同位素示踪时,相似年龄地壳样品的钕、锶同位素变化并不完全同步,通常 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值变化较小,而 $\epsilon_{Sr}(t)$ 值则变化相对较大^[13]。因此在解决成矿物质来源、壳幔演化等实际地质问题时,应在分析矿石钕同位素演化特征基础上,结合锶同位素特征进行综合判定。在选择矿石样品时,应对矿石的成矿期、成矿年龄等基础地质事实有较为清楚的了解;同时,样品的数量及种类也制约着钕同位素的示踪效果。

5 铅同位素法

铅同位素是人们较早应用于成矿物质来源研究的同位素之一^[39-42]。铅有四种同位素 ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb ,其中 ^{204}Pb 为非放射性成因同位素,而 ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb 是放射型成因同位素。随着时间演化, ^{206}Pb , ^{207}Pb 和 ^{208}Pb 可由 ^{238}U , ^{235}U 和 ^{232}Th 衰变而成。

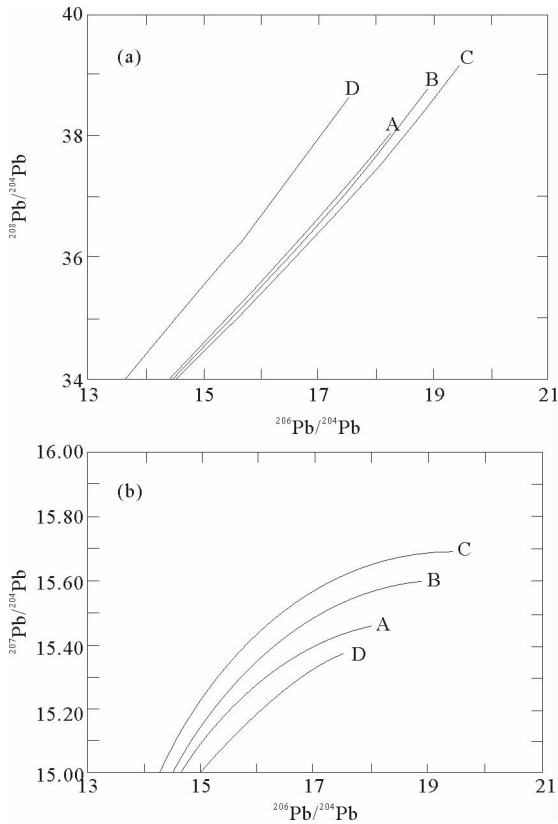
铅同位素示踪时,通常将矿石或富矿围岩与可能和成矿有成因联系的地质体铅同位素特征进行对比,如果矿石铅与围岩铅的同位素组成相似或年龄一致,则矿石与围岩的来源一致或相近。若矿石铅与围岩铅组成不同,成矿物质来源可能与围岩无关^[13]。Zartman等^[42]通过对不同地质体的研究,绘制 $^{208}Pb/^{204}Pb$ - $^{206}Pb/^{204}Pb$ 示意图和 $^{207}Pb/^{204}Pb$ - $^{206}Pb/^{204}Pb$ 示意图(图8(a),8(b);图9(a),9(b))。该方法利用板块构造理论把铅同位素的演化与板块构造体系和构造动力学相结合,使铅同位素可以应用于不同地质体中。程文斌等^[43]应用Zartman铅模式图研究西藏冈底斯成矿带时,证实了矿石铅大多来源于地幔,少部分为造山带型铅。

但是,Zartman铅同位素模式还存在一些不足,如其演化曲线难以代表各源区的平均值,并未确定各种来源铅同位素的变化范围,对于下地壳铅组成范围不当以及造山带铅的意义不明确等^[40]。

朱炳泉等^[40]为克服Zartman铅模式的上述不足,绘制了矿石铅的 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 示意图(图10),这也是金属矿床成矿物质来源中常用的方法。 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 示意图划分为地幔源铅、上地壳源铅、上地壳与地幔混合的俯冲带铅、化学沉积型铅、海底热水作用铅、中深变质作用铅、深变质下地壳铅、造山带铅、古老页岩上地壳铅和退变质铅十种铅源区。刘忠法等^[44]在冬瓜山铜金矿床研究中,应用 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 示意图法,发现几乎所有的矿石铅全部投点于与岩浆作用相关的俯冲带铅内,证实了矿石铅为幔源铅,该结果与采用Zartman图解判断的铅源一致。

朱炳泉等^[40]的 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 图解法也存在某些问题,如铅源区范围的确定是根据世界各地不同矿床分别得出的,经验性较大;其数据处理是依据单阶段、两阶段或者三阶段铅演化模式,但这些模式的使用是在多种假设的前提之下,而实际地质体的铅演化模式要更为复杂。

Zartman铅模式与朱炳泉的 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 示意图法并不完全准确,但是由于方法简单、实用,仍在示踪岩浆物质来源、示踪地幔不均一性以及示踪成矿物质来源中得到广泛应用。



A—地幔; B—造山带; C—上地壳; D—下地壳

图 8 铅构造模式图^[42]

Fig. 8 Lead isotopic pattern

铅演化模式的复杂性制约着其在解决实际地质问题中的应用和发展,所以在前人研究成果基础上,寻找更加实用、更加准确的铅同位素演化模式是未来铅同位素研究工作的方向之一。

6 其他同位素方法

除上述几种同位素外,对判断成矿物质来源还包括碳、铷、钷、氩、氙、钨、钪等同位素方法^[36,45-48]。这些同位素特征的研究结果对目前成矿源研究工作的开展提供了事实依据和理论基础。

碳同位素示踪资料较硫同位素少,主要是碳酸盐矿物在硫化物之后形成,并不能完全解释导致硫化物矿化的成矿溶液的性质及其演化特征^[36]。沈渭洲等^[36]整理了成矿溶液中碳的特征:①岩浆源或深部源, $\delta^{13}C \approx -7\%$; ②沉积碳酸盐来源, $\delta^{13}C \approx 0\%$; ③沉积岩、变质岩与火成岩中有机碳, $\delta^{13}C \approx -25\%$ 。当碳同位素与岩石中氢、氧、硫同位素数据相结合时,对于阐明成矿溶液的演化及判断矿脉中成矿物质的来源具有重要的意义。

氦、氩等惰性气体同位素在成矿源示踪时,硫化物尤其是黄铁矿是最理想的样品。因惰性气体同位素在水-岩反应中基本保持不变,可以反映成矿流体来源的原始信息;另外,不同来源成矿流体的氦、氩同位素

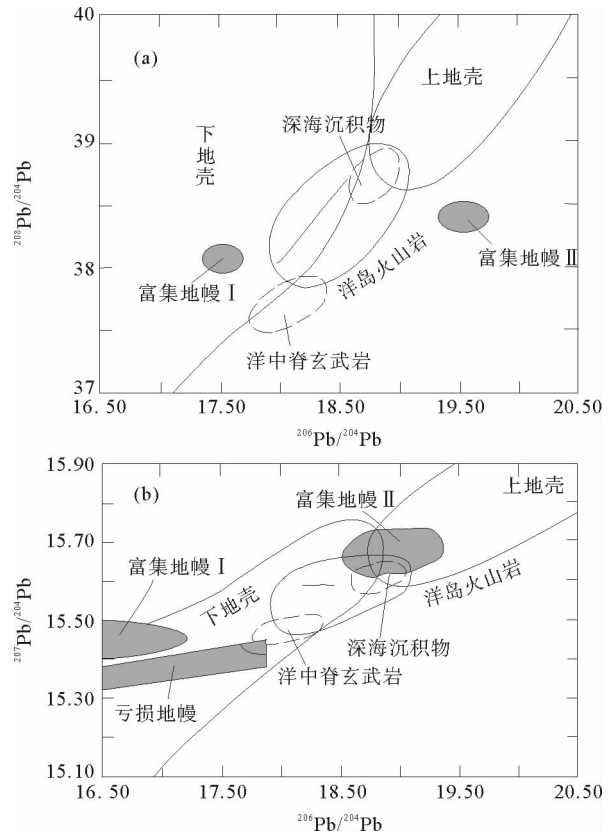
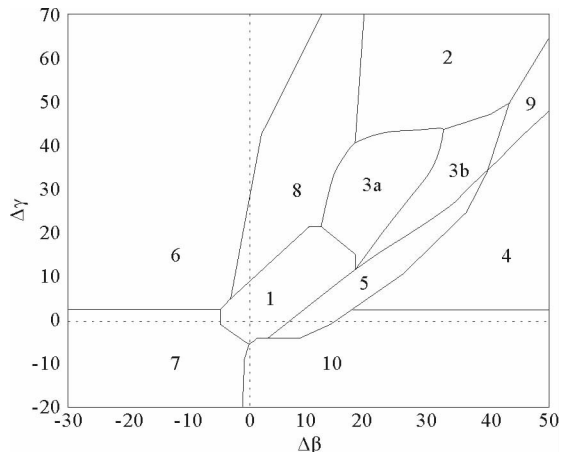


图 9 常用地质体铅同位素特征^[41-42]

Fig. 9 Characteristics of lead isotopic in common geologic bodies



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

图 10 矿石铅同位素的 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 成因分类^[40]

Fig. 10 Genetic classification of ore lead isotopic^[40]

体系差异甚大,较易区别^[45]。梁婷等^[49]基于现有资料,整理了成矿流体中稀有气体的氦、氩同位素特征,分别是:①大气饱和水(包括大气降水和海水): $^3\text{He}/^4\text{He}=1\text{ Ra}$ (Ra:大气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值,值为 1.4×10^{-6} ;下同), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=295.5$;②地幔流体: $^3\text{He}/^4\text{He}=6\sim 9\text{ Ra}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 变化较大,通常高于40 000;③地壳放射成因: $^3\text{He}/^4\text{He}=0.01\sim 0.05\text{ Ra}$,其 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 也比较高。

Re是不相容元素,Os是高度相容元素,因此在地幔部分熔融过程中,Re在熔融液相中富集,而Os保存在残余固相中^[50],这是Re和Os体系应用于示踪研究的基础。Re和Os体系在地幔、陨石和陆壳之间地球化学行为具有显著差异,使得该体系更适用于深部地质作用、壳幔演化等示踪研究。地壳岩石相对地幔岩石富集Re, ^{187}Re 的就地衰变使岩石中 ^{187}Os 的含量增加。因此,地壳岩石的 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 比值比地幔岩石高。在地壳中的 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 比值约10~11,地幔物质中 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 比值约1.05~1.06^[51]。

Lu-Hf均为难熔的中等-强不相容性亲石元素,其示踪原理与Sm-Nd体系相似。Lu-Hf体系和Sm-Nd体系在分馏过程中,铪、钇较易于富集在熔融体中,故在地幔、地壳部分熔融和岩浆结晶分异过程中, $n(\text{Sm})/n(\text{Nd})$ 值和 $n(\text{Lu})/n(\text{Hf})$ 值在地壳和地幔的岩石中大小不同^[48]。但由于技术限制,Lu-Hf示踪发展较慢。吴福元等^[48]基于已有资料统计了部分地质体的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值:①亏损地幔, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}\approx 0.0384$;②下地壳, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}\approx 0.022$;③上地壳, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}\approx 0.0093$;④球粒陨石, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}\approx 0.0332\pm 2$ 。

综上所述,研究成矿来源的同位素方法包括氢、氧、碳、硫、锶、钆、铅、铯、钷、氦、氩、镭、钍等十余种元素。实际运用中应结合两种或两种以上的同位素特征,综合判断成矿物质来源与成矿流体来源。如两端元C-O法、He-Ar法、Re-Os法、Sr-O法等;还有三端元法,如H-C-O法,Sm-Nd-Sr法等。对不同矿床的成矿源区判定,其同位素方法也各有优劣,如表3统计了成矿物质来源研究中不同同位素特征。

表3 成矿物质来源的不同同位素特征

Tab. 3 Different isotopes characteristics of the sources of ore-forming materials

方法	用途	适用对象	常用图件	优点	存在问题
氢氧同位素	成矿流体	石英、方解石、金属硫化物矿物等的气液包裹体	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 最为常用 ^[13,21-23] , δD 分布图、 $\delta^{18}\text{O}$ 分布图	样品易获取、数量大等	平衡状态难以确定、寄主矿物封闭不佳等
硫同位素	成矿元素 成矿流体	金属硫化物(黄铁矿最好)为主,围岩	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ 分布图 ^[12,25] , $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ -频率(率)图解 ^[25-26]	样品易获取、数量大等	变化区间有重合,氧逸度、化学电位等条件影响
锶同位素	成矿元素 成矿流体	矿石内的包裹体	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})-t$ 图解 ^[28] , $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 图解 ^[13,33] , $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解 ^[32,34,37]	可排除富Sr矿物的干扰,寄主矿物封闭性好等;	变化范围大、有叠加现象、寄主矿物封闭不佳等
钆同位素	成矿元素 成矿流体	方解石、萤石、金属硫化物等矿物	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)-t$ 图解 ^[13,32] , $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 图解 ^[13,33] , $\epsilon_{\text{Nd}}(t)-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解 ^[32,34,37]	可解决壳幔演化和相互作用以及地幔不均一性等地质问题	Nd、Sr同位素变化并不完全同步
铅同位素	成矿元素 成矿流体	方铅矿、闪锌矿最好,其他火山岩类、硫化物类如黄铁矿等皆可	Zartman铅构造图解 ^[41-42] , 朱炳炘 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 图解 ^[40]	稳定性高,变化明显、样品易获取、数量大等	Zartman演化曲线不能代表平均值等; $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 演化线未采用同一标准;
碳同位素	成矿元素 成矿流体	自然碳矿物、方解石等碳酸盐矿物及其包裹体等	$\delta^{14}\text{C}$ 分布图 ^[36] 、 $\delta^{14}\text{C}-\delta\text{D}$ 图解、 $\delta^{14}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ 图解等	样品易获得,数量大等,可与其他方法对比	氧逸度、酸碱度等影响,碳同位素范围有重叠
氦氩同位素	成矿流体	硫化物矿物(以黄铁矿最好)的流体包裹体	$^3\text{He}/^4\text{He}-^4\text{He}$ 图解 ^[45,49] $^3\text{He}/^4\text{He}-^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 图解等 ^[45,49]	封闭性好,变化范围大,特征明显,可与其他方法对比	需要样品质量较高,技术较为复杂
铯钷同位素	成矿元素 成矿流体	辉钼矿最好,金属硫化物(黄铁矿)矿物次之	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}-1/\text{Os}$ 图解 ^[50-51] , $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}-t$ 、 $\epsilon_{\text{Nd}}-\gamma_{\text{Os}}$ 等图解	封闭性好,后期改造弱	地幔分析中存在不准确,资料积累有限
铪钍同位素	成矿元素 成矿流体	锆石、磷灰石等副矿物	$\epsilon_{\text{Hf}}-t$ 图解, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}-t$ 图解 ^[176] $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}-^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 图解等 ^[48]	基本无放射性Hf积累,可代表形成体系铪同位素组成	样品难以获得,技术复杂,要求精度高,资料积累有限

不同矿床成矿期形成的适于定年的矿物不同,矿物中相关元素、同位素含量不同,对于不同成矿期矿石物质来源的研究方法也不同。由于金属矿床中矿物种类繁多、矿石成分复杂、元素、同位素等研究方法种类多样,不利于相关工作的开展。通过对前人相关工作的总结,介绍不同矿物所适宜的同位素方法,对研究中所注意的问题提出合理解决方案,为金属矿床物质来源的相关研究提供参考。

7 结束语

以六种常用同位素(氢、氧、硫、锶、钆、铅)的组成和演化特征为基础,简述了同位素在金属矿床物质来源中的应用及存在问题,并对存在问题提出合理解决办法,为矿床成因、成矿模式等相关研究工作的开展提供参考。氢、氧、硫、碳等同位素质量差别相对较大,同位素分馏效应明显,并且对地质体不同埋藏深度反应灵敏^[13-19],用来研究地壳和地表的成矿流体或成矿元素的来源非常有效;锶、钆、铅等同位素质量差别相对较小,其同位素组成变化与各种物理、化学作用无关,不受温度、压力和埋藏深度控制,丰度值直接受⁸⁷Rb, ¹⁴⁷Sm, ²³⁸U, ²³⁵U, ²³²Th 等衰变的控制,对研究地壳深部和上地幔成矿作用较为有效^[13,19]。

在金属矿床物质来源研究中,虽然同位素方法经过几十年发展已经较为成熟,并取得许多重要成果,但对于基本地质特征等的重视程度依然不够。金属矿床成矿物质来源研究应在采用多种化学元素或同位素分析基础上,结合构造地质学、地球物理、成矿年代学等多学科综合完成,避免采用单一示踪体系或单一方法,影响对成矿物质来源的客观认识。

参考文献:

- [1] SMIRNOV V I. The sources of ore-forming material[J]. *Economic Geology*, 1968, 63(4): 380-389.
- [2] 张秋生, 刘连登. 矿源与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1982: 11-33.
- [3] 范永香, 阳正熙. 成矿规律与成矿预测[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 125-143.
- [4] 肖荣阁, 刘敬党, 费红彩, 等. 岩石矿床地球化学[M]. 北京: 地震出版社, 2008: 249-375.
- [5] 韩建民. 阿希金矿床成矿物质来源及深部找矿前景分析[J]. *新疆有色金属*, 2014, 12(1): 12-13.
HAN Jianmin. Ore-forming matter source of Axi gold deposit and analysis of deep Prospecting[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 2014, 12(1): 12-13.
- [6] 肖金根. 安徽省东至县兆吉口铅锌矿床成矿物质来源分析[J]. *科技视界*, 2014(17): 283-285.
XIAO Jingen. The source of Ore-forming material at Zhaojikou Pb-Zn deposit, in Dongzhi, Anhui Province[J]. *Science and Technology Vision*, 2014(17): 283-285.
- [7] 张振杰, 左仁广. 马坑铁矿的成矿物质来源研究方法[J]. *矿物学报*, 2013(s): 635-636.
ZHANG Zhenjie, ZUO Renguang. The research methods of source materials of Makeng iron ore deposit[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2013(s): 635-636.
- [8] 王团华, 谢桂青, 叶安旺, 等. 豫西小秦岭-熊耳山地区金矿成矿物质来源研究: 兼论中基性岩墙与金成矿作用关系[J]. *地球学报*, 2009, 30(1): 27-38.
WANG Tuanhua, XIE Guiqing, YE Anwang, et al. Material sources of gold deposits in Xiaoqinling-Xiong'er shan area of western Henan province as well as the relationship between gold deposits and intermediate-basic dykes[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(1): 27-38.
- [9] 黄勇, 丁俊, 唐菊兴, 等. 西藏雄村铜金矿床 I 号矿体成矿构造背景与成矿物质来源探讨[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(3): 306-312.
HUANG Yong, DING Jun, TANG Juxing, et al. Tectonic setting and No. I orebody in the source of ore-forming materials of Xiongcu copper-gold deposit in Tibet[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2011, 38(3): 306-312.
- [10] 石文杰. 山东沂沭断裂带及邻区晚中生代构造-岩浆活动与金成矿作用[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014: 35-46.
- [11] 魏菊英, 王关玉. 同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 113-138.
- [12] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 7-9.
- [13] 韩吟文, 马振东. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 213-259.
- [14] 张良, 刘跃, 李瑞红, 等. 胶东大尹格庄金矿床铅同位素地球化学[J]. *岩石学报*, 2014, 30(9): 2468-2480.

- ZHANG Liang, LIU Yue, LI Ruihong, et al. Lead isotope geochemistry of Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(9): 2468-2480.
- [15] 沈能平, 彭建堂, 袁顺达, 等. 湖北徐家山锑矿床铅同位素组成与成矿物质来源探讨[J]. *矿物学报*, 2008, 28(2): 169-176.
SHEN Nengping, PENG Jiantang, YUAN Shunda, et al. Lead isotope compositions and its significance for ore-forming material of the Xujiashan timony deposit, Hubei Province [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2008, 28(2): 169-176.
- [16] 张潮, 刘育, 刘向东, 等. 胶西北新城金矿床硫同位素地球化学[J]. *岩石学报*, 2014(9): 2495-2506.
ZHANG Chao, LIU Yu, LIU Xiangdong, et al. Characteristics of sulfur isotope geochemistry of the Xincheng gold deposit, Northwest Jiaodong, China [J]. *Acta Petrologica Sinica* [J]. 2014(9): 2495-2506
- [17] 王辉, 丰成友, 李大新, 等. 赣北大湖塘钨矿成岩成矿物质来源的矿物学和同位素示踪研究[J]. *岩石学报*, 2015, 31(3): 725-739.
WANG Hui, FENG Chengyou, LI Daxin, et al. Sources of granitoids and ore-forming materials of Dahutang tungsten deposit in northern Jiangxi Province; Constraints from mineralogy and isotopic tracing [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(3): 725-739.
- [18] 姚凤良, 孙半月. 矿床学教程[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 40-90.
- [19] 卢武长, 杨绍全. 稳定同位素地球化学[M]. 成都: 成都地质学院出版社, 1986: 9-52.
- [20] 倪师军, 滕彦国, 张成江, 等. 成矿流体活动的地球化学示踪研究综述[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(4): 33-39.
NI Shijun, TENG Yangguo, ZHANG Chengjiang, et al. Review on the geochemical tracing of mineralizing fluid [J]. *Advance in Earth Science*, 1999, 14(4): 33-39.
- [21] TAYLOR H P. Oxygen and hydrogen isotope studies of plutonic granitic rocks [J]. *Earth and Planet Science*, 1978, 38: 77-210
- [22] 张连昌, 沈远超, 李厚民, 等. 胶东地区金矿床流体包裹体的 He-Ar 同位素组成及成矿流体来源示踪[J]. *岩石学报*, 2002, 18(4): 559-565.
ZHANG Lianchang, SHEN Yuanchao, LI Houmin, et al. Helium and argon isotopic compositions of fluid inclusions and tracing to the source of ore-forming fluids for Jiaodong gold deposits [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(4): 559-565.
- [23] 刘淑文, 刘玲芳, 高永宝, 等. 扬子陆块北缘马元铅锌矿床成矿物质来源探讨: 来自 C, O, H, S, Pb, Sr 同位素地球化学的证据[J]. *矿床地质*, 2012, 31(3): 545-554.
LIU Shuwen, LIU Lingfang, GAO Yongbao, et al. Sources of metallogenic materials for Mayuan Pb-Zn deposit on northern margin of Yangtze Plate: Evidence from C, O, H, S, Pb, Sr isotope geochemistry [J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(3): 545-554.
- [24] 郭春影, 张文钊, 葛良胜, 等. 氢氧同位素体系成矿流体示踪若干问题[J]. *矿物岩石*, 2011, 31(3): 41-47.
GUO Chunying, ZHANG Wenzhao, GE Liangsheng, et al. Several questions on tracing ore forming fluid by using hydrogen and oxygen isotope system [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2011, 31(3): 41-47.
- [25] HOEFS J. Stable isotope geochemistry [M]. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1980: 35-39.
- [26] 张云新, 吴越, 田广, 等. 云南乐红铅锌矿床成矿时代与成矿物质来源: Rb-Sr 和 S 同位素制约[J]. *矿物学报*, 2014, 34(3): 305-311.
ZHANG Yunxin, WU Yue, TIAN Guang, et al. Mineralization age and the source of ore-forming material at Lehong Pb-Zn deposit, Yunnan Province; Constraints from Rb-Sr and S isotopes system [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 34(3): 305-311.
- [27] FRANCESCA C, GIORGIO P, MARCELLA P. Constraints from geochemistry and Sr-Nd isotopes for the origin of albitite deposits from Central Sardinia (Italy) [J]. *Miner Deposita*, 2006, 41: 323-338.
- [28] FAURE G. Principles of isotope geology [M]. 2nd edition. New York: John Wiley and Sons, 1986: 52-57.
- [29] HEDGE E C. Strontium isotopes in economic geology [J]. *Economic Geology*, 1974(69): 823-825.
- [30] BOHLKE J K, KISTLER R W. Rb-Sr, K-Ar, and stable isotope evidence for the ages and sources of fluid components of gold-bearing quartz veins in the northern Sierra Nevada foothills metamorphic belt, California [J]. *Economic Geology*, 1986(81): 296-322.
- [31] 范建国, 倪培, 田京辉. 成矿流体的流体包裹体同位素示踪探讨[J]. *地质找矿论丛*, 2000, 15(3): 275-281.
FAN Jianguo, NI Pei, TIAN Jinghui. Fluid inclusion isotopes as tracers of ore fluid [J]. *Contributions to Geology and Min-*

- eral Resources Research, 2000, 15(3): 275-281.
- [32] DEPAOLO D J, WASSERBURG G J. Nd isotope variations and petrogenetic models[J]. Geophysical Research Letters, 1976(3): 249-252.
- [33] DEPAOLO D J, WASSERBURG G J. Petrogenetic mixing models and Nd-Sr isotope patterns[J]. Geochimica Cosmochim. Acta, 1979(43): 615-627.
- [34] BERZINA A P. Geochemical and Sr-Pb-Nd isotopic characteristics of the Shakhtama porphyry Mo-Cu system (Eastern Transbaikalia, Russia)[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 3(79): 655-665.
- [35] 朱炳泉. 同位素地质年代学与同位素演化研究进展与展望[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1982(3): 9-13.
ZHU Bingquan. Research progress and prospect of isotopic geochronology and isotope evolution[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1982(3): 9-13.
- [36] 沈渭洲. 稳定同位素地质[M]. 北京: 原子能出版社, 1987: 69-390
- [37] 王中亮, 赵荣新, 张庆, 等. 胶西北高 Ba-Sr 郭家岭型花岗岩岩浆混合成因: 岩石地球化学与 Sr-Nd 同位素约束[J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 2595-2608.
WANG Zhongliang, ZHAO Rongxin, ZHANG Qing, et al. Magma mixing for the high Ba-Sr Guojialing-type granitoids in the northwest of Jiaodong peninsula: Constraints from petrogeochemistry and Sr-Nd isotope[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(9): 2595-2608.
- [38] 田世洪, 侯增谦, 杨竹森, 等. 青海玉树莫海拉亨铅锌矿床 S, Pb, Sr-Nd 同位素组成: 对成矿物质来源的指示——兼与东莫扎拉铅锌矿床的对比[J]. 岩石学报, 2011, 27(9): 2709-2720.
TIAN Shihong, HOU Zengqian, YANG Zhusen, et al. Sulfur, lead, strontium and neodymium isotope compositions of the Mohailaheng lead-zinc ore deposit in the Yushu area, Southern Qinghai: Implications for the sources of ore-forming material in the deposit and comparison with those of Dongmohazhua lead-zinc ore deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(9): 2709-2720.
- [39] 常向阳, 朱炳泉. 铅同位素方法应用于化探找矿评价[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1997, 16(4): 37-41.
CHANG Xiangyang, ZHU Bingquan. Application of lead isotopes to geochemical exploration and evaluation [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1997, 16(4): 37-41.
- [40] 朱炳泉. 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, 1998: 216-230.
- [41] 杨利亚. 阳山金矿带成矿作用: 多元同位素示踪[D]. 北京: 中国地质大学, 2014: 45-48.
- [42] ZARTMAN R L, DOE B R. Plumbotectonics—the model[J]. Tectonophysics, 1981(75): 135-162.
- [43] 程文斌, 顾雪祥, 唐菊兴, 等. 西藏冈底斯-念青唐古拉成矿带典型矿床硫化物 Pb 同位素特征: 对成矿元素组合分带性的指示[J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3350-3362.
CHENG Wenbin, GU Xuexiang, TANG Juxing, et al. Lead isotope characteristics of ore sulfides from typical deposits in the Gangdese-Nyainqentanglha metallogenic belt implications for the zonation of ore-forming elements[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(11): 3350-3362.
- [44] 刘忠法, 邵拥军, 周鑫, 等. 安徽铜陵冬瓜山铜(金)矿床 H-O-S-Pb 同位素组成及其示踪成矿物质来源[J]. 岩石学报, 2014, 30(1): 199-208.
LIU Zhongfa, SHAO Yongjun, ZHOU Xin, et al. Hydrogen, oxygen, sulfur and lead isotope composition tracing for the ore-forming material source of Dongguashan copper (gold) deposit in Tongling, Anhui Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(1): 199-208.
- [45] SIMMONS S F, SAWKINS F J, SCHLUTTER D J. Mantle derived helium in two Peruvian hydrothermal ore deposits [J]. Nature, 1987(329): 429-432.
- [46] NORMAN D I, MUSGRAVE J. N₂-Ar-He compositions in fluid inclusions: Indicators of fluid source[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1994(58): 1119-1131.
- [47] 蒋少涌, 杨竞红, 赵葵东, 等. 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.
JIANG Shaoyong, YANG Jinghong, ZHAO Kuidong, et al. Re-Os isotope tracer and dating methods in ore deposits research[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2011, 36(6): 306-312.
- [48] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 185-220.

WU Fuyuan, LI Xianhua, ZHENG Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in Acta Petrologica Sinica, 23(2):185-220.

[49] 梁婷, 高景刚, 朱文戈. 成矿流体类型及研究方法综述[J]. 西安文理学院学报(自然科学版), 2005, 8(4):36-42.

LIANG Ting, GAO Jinggang, ZHU Wenge. A summary on the type of ore-forming fluids and research methods[J]. Journal of Xi'an University of Arts and Science(Natural Science Edition), 2005, 8(4):36-42.

[50] KOEBERL C, SHIREY S B. Re-Os isotope study of rocks from the Manson impact structure[J]. Geological Society of America Special Paper, 1996, 302:331-339.

[51] 谢智, 陈江峰. Re-Os 同位素体系在金属矿床研究中的应用[J]. 地质地球化学, 1998(4):79-85.

XIE Zhi, CHEN Jiangfeng. Application of Re-Os isotopic systematics in the study of ore deposit[J]. Geology Geochemistry, 1998(4):79-85.

(责任编辑:高丽华)

“沉积·资源·环境”研究专栏征稿

征稿范围:

- | | |
|-----------------|-------------|
| ◇地质基本科学问题、应用及发展 | ◇层控矿床 |
| ◇全球环境变化与沉积作用 | ◇岩相古地理 |
| ◇盆地分析与板块运动 | ◇生物成矿作用 |
| ◇盆地运动学的新理论 | ◇流域开发与环境保护 |
| ◇能源的勘探与开发 | ◇层序地层与事件地质 |
| ◇大地构造沉积学 | ◇油气储集层的成岩作用 |

欢迎相关领域专家、学者和工程技术人员踊跃投稿, 来稿请注明“沉积·资源·环境”专栏。稿件经专家评审通过后优先发表, 优稿优酬。

投稿平台: http://xuebao.sdust.edu.cn/index_z.asp

电子邮箱: zkglhxx@163.com; zkzxcg@sdust.edu.cn

联系电话: 0532-86057859

《山东科技大学学报(自然科学版)》编辑部