

成矿流体活动的地球化学示踪研究综述^{*}

倪师军, 滕彦国, 张成江, 吴香尧
(成都理工学院, 四川 成都 610059)

摘 要: 成矿流体活动的地球化学示踪是近年来流体地球化学研究的一个新趋势。通过流体来源示踪、运移示踪和定位示踪可以追溯流体活动的全过程, 对恢复流体活动历史、演化历程具有积极意义。对成矿流体活动的地球化学示踪方法进行了一定的总结, 对人们常用的地球化学示踪方法——同位素地球化学示踪、元素地球化学示踪、包裹体地球化学示踪及气体地球化学示踪的研究现状进行了综述。

关 键 词: 成矿流体; 流体地球化学; 地球化学示踪

中图分类号: P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8166(1999)04-0346-07

地球化学示踪研究是查明元素、矿物等在地质地球化学作用过程中的来源、演化及其最终发展状态, 是揭示地球化学作用机理和过程的重要途径和有效手段。成矿流体地球化学是当前国际地学界研究的前沿和热点之一, 成矿流体活动的地球化学示踪研究已成为一个新的趋势, 通过流体来源示踪、运移示踪和定位可以追溯流体活动的全过程, 对恢复流体活动的历史、演化历程具有积极意义。

1 同位素地球化学示踪

由于同一元素不同同位素的原子质量不同, 其热力学性质有微小的差异。正是这种差异导致同位素组成在物理、化学作用过程中发生变化, 引起同位素分馏, 包括热力学平衡分馏和动力学分馏 2 种类型^[1]。

经过长期的分异、分馏、衰变演化, 地球不同层圈、不同地质单元具有明显不同的同位素组成特征。因此可以根据同位素具有基本相同的化学性质示踪成岩、成矿物质的来源、推断源区的地球化学特征。另外还可以根据同位素分馏规律和矿物的同位素组

成、示踪矿物形成时的物化条件和演化过程^[1]。用稳定同位素数据来定量地说明成矿介质水和其他物质的来源, 开始于 60 年代初期^[2], 作为独特的示踪剂和形成条件的指标, 稳定同位素组成已广泛地应用于陨石、月岩、地球火成岩、沉积岩、变质岩、大气、生物、海洋、河流、湖泊、地下水、地热水及各种矿床的研究, 成为解决许多重大地质地球化学问题的强大武器^[3]。在应用稳定同位素研究成矿流体的演化过程(源、运、储)的同时, 人们也不断地应用放射性同位素来定量、半定量地研究地质地球化学作用过程, 即应用放射性同位素研究地球化学示踪和地球化学作用发生的年代问题。同位素分析新方法新技术的不断发展, 如 Re-Os, Lu-Hf, La-Ba-Ce 等方法的建立^[4], 使同位素示踪技术也得到了丰富和发展。

1.1 氢、氧同位素示踪

利用氢、氧同位素示踪成矿溶液的来源, 是同位素示踪技术在地质研究中取得的最重要成果之一^[1]。由于不同来源的流体具有不同特征的氢氧同位素组成, 因此成矿流体的氢氧同位素组成成为判断成矿流体来源的重要依据, 如卢武长、魏菊英^[5]

^{*} 国家自然科学基金项目“成矿流体定位的地球化学界面及地学核技术追踪方法研究”(编号: 49873020)、国家科技攻关项目“矿床(体)快速追踪的地球化学新方法、新技术”(编号: 96-914-03-02)和国土资源部百名跨世纪优秀人才培养计划基金资助。

第一作者简介: 倪师军, 男, 1957 年 4 月出生, 教授, 主要从事地球化学的教学与研究。

收稿日期: 1998-08-10; 修改稿: 1999-04-13。

卢武长. 稳定同位素地球化学. 成都地质学院内部出版, 1986. 116~145.

等总结的各种类型天然水中的氢氧同位素组成(表 1)。张理刚^[6]按氢、氧同位素组成把成矿介质水分为 5 种类型: 大气降水、海水、再平衡混合岩浆水、变质分泌水和复合水—混合水。近年来人们认为水—岩反应是热液矿床形成的重要机制之一, 利用氧同位素可以研究水—岩交换过程。李延河将整个水—岩同位素交换演化过程分为 3 个阶段: 大气降水沿构造裂隙下渗阶段; 面型蚀变阶段; 成矿溶液沿裂隙上升成矿阶段^[1]。

表 1 天然水中的氢、氧同位素组成

Table 1 Compositions of H and O isotopes in natural water

	$\delta D_{SMOW} (‰)$	$\delta^{18}O_{SMOW} (‰)$	$\delta D_{SMOW} (‰)$	$\delta^{18}O_{SMOW} (‰)$
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
	魏菊英(1988)		卢武长(1986)	

1.2 碳同位素示踪

尽管碳同位素用于物源示踪的准确性开始被人怀疑^[7], 但至今仍被广泛用于指示油气来源、运移演化、热液矿床的成矿物质来源、全球变化等问题。在研究热液矿床成矿流体来源时, 碳同位素常与氧同位素体系综合作用。不同来源的碳同位素组成范围具重叠特征。在金矿床研究中发现^[8], 碳同位素组成不仅位于典型的深源碳的同位素组成范围内, 而且与沉积岩和变质岩碳的组成很难区分。碳同位素的物源示踪应建立在同位素体系的演化以及具体成矿环境分析的基础上, 而不应是简单的对比, 成矿体系中碳(氧)同位素的演化不仅可以提供成矿物源的信息, 而且对成矿过程、成矿方式的研究具有重要意义^[8]。天然气运移时气体同位素组成的变化及其对天然气运移的示踪具有一定的意义。可以利用天然气乙烷碳同位素与烃原岩酸解气乙烷碳同位素的可比性进行气源对比, 追踪天然气的来源^[9], 碳、氧同位素结合追踪油气物源将更为有效^[10]。

1.3 硅同位素示踪

硅是地壳中分布最广的元素之一, 石英是最主要的造岩矿物, 很多热液矿床中均发生硅化, 而且已经发现大量石英脉型热液矿床, 因此, 研究硅的来源及其与流体成矿活动的关系具有重要意义。硅同位素动力学分馏是引起硅同位素变化的最主要原

因^[1,11]。热液活动带来大量的硅质和成矿物质, 由于温度下降, 物理化学条件的变化, 部分硅质和成矿物质首先在喷口附近沉淀下来, 形成海底黑烟囱、硅华和热水沉积成因硅质岩。不同成因的硅质岩、粘土矿物等具有明显不同的硅同位素特征, 而且这些特征不会在后来的变质、改造过程中发生明显变化。因此, 硅同位素已成为恢复变质原岩、示踪脉石英硅质来源、判别硅质岩、粘土矿物等成因的重要手段之一^[1]。丁悌平在《硅同位素地球化学》^[12]中讨论了一些层状矿床和石英脉型矿床中硅同位素的组成及特征, 硅华 $\delta^{30}Si$ - 3.4‰~ 0.2‰, 脉石英 $\delta^{30}Si$ 0.7‰~ - 1.5‰, 硅化岩石 $\delta^{30}Si$ 1.1‰~ - 0.5‰, 并指出硅同位素在指示成矿流体来源、成矿物质来源及硅质的来源具有一定的实用价值。

1.4 氯同位素示踪

由于氯的地球化学稳定性, 故在地下水、热液矿床的成因和元素迁移理论方面, 对氯同位素的研究具有特殊意义^[13], 早在 1984 年 Kaufmann 就已经指出由于氯是自然界各种水体及卤水沉积物的大含量组分, 又是一个十分活跃的水迁移元素及重要的金属沉淀剂, 因此国内外学者对氯同位素的分析方法及地球化学行为非常关注, 希望用氯同位素直接探讨卤水的成因、成矿流体及油气运移路径、金属与盐类矿床及油气藏成藏机制^[14]。以氯同位素(³⁶Cl 和³⁷Cl)作为示踪剂可以成功地判断咸水成因, 其结果比 $\delta^{18}O$ 、 δD 资料更可靠^[15]。Eastoe 等^[16]研究发现 Elmwood-Gordonville 矿床热液作用过程中氯同位素的变化特征对流体运动具有指示作用。

1.5 硼同位素示踪

由于硼在自然界中分布较集中, 平均丰度低, 而且¹¹B 和¹⁰B 之间质量差大, 分馏效应显著, 故硼同位素组成可以作为判定硼来源的有效示踪剂和指相标志^[17], 在自然界中 B 的同位素组成变化很大($\delta^{11}B$ = - 32‰~ + 58‰), 但在不同类型地质体中却有较特定的分布范围。造成自然界 B 的同位素分馏的主要原因在于流体—固体反应体系的 pH 值和水/岩比值变化。B 的这些特殊地球化学性质在不同地质地球化学作用示踪, 特别是与流体有关的地球化学过程的研究中得到了广泛应用^[18]。据 Takao^[19]等研究日本指宿(Ibusuki)及其附近地区的热泉水的地球化学特征时指出: 测试的热泉水的地球化学组分与以前的争论是一致的, 即该地区热泉水溶解的主要组分是海水与地下热的岩石反应的结果; 热泉水的 $\delta^{11}B$ 值范围是+ 2.1‰~ + 39.4‰, 可以判断硼同位

素有 2 种来源,一是海水, $\delta^1\text{B}$ 为 + 39‰, 另一种是火山气体, $\delta^1\text{B}$ 为 + 6‰。

1.6 锂同位素示踪

锂同位素组成特征是盆地卤水、海水等流体活动的良好示踪剂。大量的实验研究表明锂在地质系统中具有较高的活动性,在地质作用过程中反映流体活动的特征^[20~22],许多学者的研究也证明水—岩反应期间 Li^+ 的浓度会增大并可能追踪地热流体的加入及确定地下水的来源及驻留时间^[23,24]。锂同位素组分在热液蚀变程度不同的岩石中变化较大,是热液流体作用的有效指示。Chan^[25]等认为在新鲜的洋中脊玄武岩中 δLi 为 - 3.4‰~ 4.7‰(L-SVE 标准),低温蚀变洋底岩石锂同位素组成增加,蚀变最严重、年龄最老的岩石 δLi 达 - 14‰。

1.7 铅同位素示踪

人们较早采用铅同位素进行成矿物质来源的研究,也是研究成矿物质来源比较有效的方法之一。现已建立了地球不同深度的铅同位素演化模式用以判断成矿物质的来源。根据矿石矿物及围岩的铅同位素组成特征($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)及 Zartman 铅构造模式示踪成矿物质来源、研究矿床的成因机制、矿床的垂直分带等方面均具有积极意义。

1.8 锶同位素示踪

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 是判断成岩成矿物质壳、幔来源的重要指标,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,在矿床地质研究中常利用其进行成矿元素来源的示踪。对成矿流体来源的示踪人们也作了许多研究工作,并已经很好地描述了使用锶同位素示踪深源流体、岩浆流体的壳幔混染作用。通过测定围岩、热液蚀变矿物、流体包裹体中的锶同位素组成,可以确定成矿流体的来源,人们早已在应用初始锶同位素特征示踪古流体成矿作用和利用锶流体—岩石反应^[26~30],例如 Pettke 等^[30]研究了阿尔卑斯山西北部 Brusson 石英脉型金矿床的 Sr 同位素组成特征,并依此追踪含矿流体的来源,认为流体来源深度超过 10 km。

1.9 铼钼同位素示踪

由于地壳和地幔在 Re/Os 比值方面差异很大,其中地壳岩石 Re/Os 比值较之地幔岩石的高 2~ 4 个数量级,因而这一同位素体系在探讨地幔作用,尤其是地壳—地幔相互作用方面,显示出极大价值^[31]。基于 β 衰变的 Re-Os 同位素体系,由于二者的 $D \gg 100$ ^[32]及在不混溶含硫化物岩浆中的高度富集,因此是岩浆硫化物矿床形成过程的强有力的示

踪剂^[33]。Re-Os 同位素体系示踪流体作用的地球化学过程有广阔的前景,但对 Re-Os 的测试技术、试验研究及地质应用仍待提高。

2 元素地球化学示踪

在近代元素地球化学中发展最快、成果最丰富、最具活力的当属微量元素地球化学。微量元素被广泛用作成岩成矿等地球化学作用的示踪剂^[34]。

2.1 稀土元素地球化学示踪

由于稀土元素化学性质的相似性,它们在自然界中通常以隐蔽形式共同赋存在某些矿物的晶格中,同时由于电子排布和“镧系收缩”的原因,各个元素之间在晶体化学性质方面又存在微小差别,这种差别可以记录自然系统中的地球化学过程^[35]。稀土元素的这些性质被广泛用于岩石学研究,较多的是应用稀土元素分配系数计算研究地幔熔融、玄武岩熔融、陆壳岩石熔融、分异作用、同化作用及碳酸盐岩熔体与 H_2O 、 CO_2 的反应,也用来研究不混溶流体的特征等^[36]和成岩成矿作用等地球化学过程。同时稀土元素对于研究海水中矿物吸附溶解络合过程^[37]以及沉积成岩物质来源示踪、沉积环境和相的恢复、变质岩原岩的恢复、大地构造环境的判别均具有积极意义。

利用 REE 组成和分布示踪成矿流体的性质和行为始于 70 年代^[38],以后人们相继采用稀土元素示踪成矿过程。利用 REE 示踪成矿过程的一个重要途径是分析对比原岩和不同成矿蚀变阶段产物中 REE 的组成与分布,从中恢复成矿流体的性质和演化^[39]。

稀土元素也是地下水流动反应、盆地流体演化的良好示踪剂。一般认为地下水系统中的 REE 主要来源于地下水流经的岩石^[40],REE 对于研究地下水—岩石反应、地下水的来源及地下水的混合具有特殊作用^[41]。Johannesson 等^[42]应用稀土元素作为示踪剂研究内华达中南部区域地下混合特征时指出,根据地下水中溶解的稀土元素的浓度,以页岩和 La 标准可以确定区域地下水的演化,与使用氢同位素、U 同位素等作为示踪剂得到的结果相一致,并且使用稀土元素可以确定不同来源地下水的混合比例。

2.2 微量元素地球化学示踪

对沉积岩源区的判别主要依据最稳定副矿物的微量元素组合,如锆石中 Zr/Hf 、钛铁矿中 Cr/Ni 、V、Cu、Mn 等均是源区的灵敏示踪剂;B、V、Ga、Rb 则是区分海相和淡水相的判别标志; Si/Ni 、 Co/Mn 、

Ba 等是礁相和非礁相火成岩的指标元素^[34], Ti/Nb 比值可以作为陆源碎屑沉积物的指示剂。

70 年代以前, 主要通过矿石矿物中的微量元素来研究成矿物质来源。80 年代以来, 则主要研究矿床中脉石矿物的微量元素组成, 如石英、方解石、长石、萤石等矿物的 K、Rb、Re 元素含量和比值(石英的 K/Rb、REE 组成, 方解石、萤石的 Tb/La-Tb/Ca、Yb/Ca-Yb/La 等)^[34]。

陈光远等^[43]研究了以铬为示踪元素探讨胶东金矿成矿物质来源时指出: 以铬为示踪元素, 以自然历史为线索, 追溯成岩成矿全过程中矿物组成中 Cr 含量的演化, 不仅有利于查明胶东金矿的矿质来源, 还有助于查明胶东金矿的成矿机理与成矿过程。马东升^[44]指出应用水岩作用过程中活动性较强的微量元素有可能作为地球化学示踪剂, 用于确定古流体的聚流方向和汇聚部位。在天然水和热液作用下, Sr 和 Hg 应具有较强的再分布示踪能力, 它们往往在低温环境中就具有显著的活动性, 在一定条件下, 低温成矿元素 Au、Sb、As 等对地壳古流体的地球化学示踪也应具有重要意义。

3 包裹体地球化学示踪

通过测试流体包裹体的各个参数, 可以获得成矿流体的来源、流体的物理化学参数、流体的成分及流体成矿的热力学及动力学过程, 因此流体包裹体研究早已成为人们获取流体活动过程及流体性质演化信息的重要手段。应用流体包裹体示踪成矿流体主要集中在如下方面: 根据流体包裹体氢、氧同位素组成特征判断流体来源及水岩交换作用过程; 根据流体包裹体压力测定结果判定流体来源的深度; 根据流体包裹体温度测量结果恢复古地温场进而确定流体运移的方向; 根据包裹体中 CO₂-CH₄ 体系、SO₄²⁻-H₂S 体系计算古流体的氧逸度和 Eh 值; 根据 CO₂(H₂O)-HCO₃⁻-CO₃²⁻ 计算古流体的 pH 值等, 依据上述结果恢复流体活动轨迹及演化历程; 根据 Na-Cl-Br 体系确定含矿卤水的来源和运移; 随着流体包裹体中金属元素分析方法和技术的发展, 直接测定包裹体中金属元素的含量已取得长足进展, 如 Nomman (1987) 采用中子活化分析分析了流体包裹体中 38 种主元素和痕量元素, 吴家弘 (1995) 用中子活化分析法测定了流体包裹体中 Au、As、Ba 等 30 种元素, 这为追踪成矿元素的来源、迁移形式及沉淀等成矿全过程提供了证据^[45]。另外, 根据流体包裹体研究获得的流体活动的地球

化学性状和物理化学参数是进行流体活动过程地球化学模拟的重要信息, 并依此进行成矿流体活动的热力学和动力学模拟。

4 稀有气体地球化学示踪

应用惰性气体同位素研究太阳系的形成和演化、地球的层圈构造、地幔的性质、流体与岩石的交换作用均有发展, 尤其在研究壳—幔作用过程中, 惰性气体同位素是壳—幔物质混染作用的灵敏示踪剂^[46]。He 的同位素丰度比 ³He/⁴He 是判别幔源物质的主要标志, 其他稀有气体如氩、氙等也是壳—幔演化、地球脱气及其运移等的示踪剂(表 2)^[47]。

当前应用惰性气体及其同位素进行流体活动信息的地球化学示踪主要集中在这样两个方面: 油气来源的示踪; 热液矿床成矿流体活动信息的示踪。

4.1 油气来源的示踪

近年来世界各国又把注意力移向地球更深处, 探索深埋地层的含油气性问题^[48], 同时由于石油、天然气中含有的稀有气体及其同位素组成特征往往可以判断油气的来源, 尤其对深层石油、天然气的判识, 因此稀有气体及其同位素的地球化学示踪研究就显得十分重要。天然气为地球内部流体的重要组成部分, 天然气中幔源稀有气体是源于地球深部的地幔挥发份。氦的同位素是 ³He/⁴He 幔源物质的重要判识指标, 天然气中 ³He/⁴He 大于 1.4×10^{-6} 时, 表明有相当数量的幔源挥发份加入到天然气中, 它是地球构造活动性强, 地幔挥发份可以沿一定断裂体系进入沉积壳层的指示^[49]。

4.2 成矿流体活动信息的示踪

由于稀有气体化学性质的惰性, 它们成为流体运动和反应的理想示踪剂^[50]。地壳流体的稀有气体同位素组成对示踪其中稀有气体的成因具有明显的优势, 尤其是氦, 由于地壳氦和地幔氦的 ³He/⁴He 值存在高达 1 000 倍的差异, 即使地壳流体中有少量幔源氦的加入, 用氦同位素也容易判别^[51]。80 年代末 90 年代初以来, 人们才先后运用 He 同位素研究成矿古流体的活动。如 Turner^[52]研究了热液作用与石英脉和燧石中的氩同位素的组成; Stuart 等^[53, 54]先后以惰性气体同位素作为示踪剂研究了古流体的活动及洋底硫化物热液矿床的热液流体的来源及其成矿作用。采用惰性气体同位素进行成矿流体活动信息的示踪研究可以说是方兴未艾, 还有待于进一步发展和完善。

表 2 地球各圈层的稀有气体同位素组成特征(据王先彬, 1996)

Table 2 The isotopic compositions of the rare gas in each shpere of the Earth(Wang X B, 1996)

圈 层	³ He/ ⁴ He	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	⁴ He/ ²⁰ Ne	⁴ He/ ⁴⁰ Ar	¹²⁹ Xe
大 气	1.4 × 10 ⁻⁶	295.6	0.318	5.8 × 10 ⁻³	过剩 6.8% (相对陨石)
地 壳	10 ⁻⁷ ~ 10 ⁻⁸	> 295.6	n × 10 ⁸	> 20	—
上地幔	1.2 × 10 ⁻⁸	~ 10 ⁴	> 10 ⁴	~ 2	—
下地幔	(3~ 5) × 10 ⁻⁵	~ 400	> 10 ⁴	—	过剩 8% (相对空气)
太阳系原始值	3 × 10 ⁴	1.4 × 10 ⁻³	—	—	原始 ¹²⁹ Xe

主要参考文献

[1] 李延河. 同位素示踪技术在地质研究中的某些应用[J]. 地学前缘, 1998, 5(2): 275~ 281.

[2] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安: 陕西科技出版社, 1985. 1~ 267.

[3] 丁梯平. 稳定同位素地球化学研究新况[J]. 地学前缘, 1994, 1(4): 191~ 203.

[4] 储雪蕾, 朱炳泉. 同位素地球化学[A]. 见: 欧阳自远, 主编. 地球化学: 历史、现状和发展趋势[C]. 北京: 原子能出版社, 1996. 56~ 66.

[5] 魏菊英, 王关玉, 编. 同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1988. 118~ 124.

[6] 张理刚, 陈振胜, 刘敬秀, 等. 两阶段水—岩同位素交换理论及其勘查应用[M]. 北京: 地质出版社, 1995. 1~ 231.

[7] Kerrich R. Archean gold: Relation of granulite fomation or felsic intrusions[J]. Geology, 1987, 17: 1 011~ 1 015.

[8] 柳少波, 王联魁, 张生. 热液(金)矿床中碳同位素矿源示踪综述和讨论[J]. 地质地球化学, 1996, 4: 21~ 24.

[9] 张同伟, 陈践发, 王先彬, 等. 天然气运移的气体同位素地球化学示踪[J]. 沉积学报, 1995, 13(2): 70~ 76.

[10] 张景廉, 刘小琦, 张平中, 等. 碳同位素与油气物源示踪[J]. 地质地球化学, 1998, 26(2): 63~ 71.

[11] 李延河, 丁梯平, 万德芳. 硅同位素动力学分馏的实验研究及其地质应用[J]. 矿床地质, 1994, 13(3): 282~ 288.

[12] 丁梯平, 李延河, 万德芳, 等. 硅同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 1~ 102.

[13] 王佩仪. 稳定氯同位素分馏机理及其应用的研究[J]. 地质科技情报, 1993, 12(3): 83~ 88.

[14] Kaufmann R, Long L, Bentley H, *et al* Natural chlorine isotope variations[J]. Nature, 1984, 309(5966): 338~ 340.

[15] 周栋, 刘存富. 河北沧州地区天然水的氯同位素组成[J]. 地球科学, 1996, 21(5): 561~ 566.

[16] Eastoe C J, Guilbert J M. Stable chlorine isotope in hydrothermal processes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56(12): 4 247~ 4 255.

[17] 彭齐鸣, 许虹. 硼同位素地球化学及其示踪意义[J]. 地质地球化学, 1994, 5: 55~ 59.

[18] 刘丛强. 流体—岩石反应体系中的硼同位素地球化学[J]. 地球化学, 1996, 25(1): 93~ 100.

[19] Takao O i, Kyutaro Ikeda, Makikao Nakano, *et al* Boron isotope geochemistry of hot spring waters in Ibusuki and adjacent areas, Kagoshima, Japan[J]. Geochemical Journal, 1996, 30: 273~ 287.

[20] Ellis A J, Mahon W A J. Natural hydrothermal systems and experimental hot-water interactions, Part 2[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1967, 28: 519~ 538.

[21] Syfried W E Jr, Janecky D R, *et al* Alteration of the oceanic crust: Implication for geochemical cycles of lithium and boron[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, 48: 557~ 569.

[22] Lyons W B, Welch K A. Lithium in waters of a polar desert[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 6(20): 4 309~ 4 319.

[23] Foulillac C, Michard G. Sodium/Lithium ration in water applied to geothermometry of geothermal riservoirs[J]. Geothermics, 1981, 10: 55~ 70.

[24] Martin J B, Kastner M, Elderfield H. Lithium sources in pore fluids of Peric slope sediments and implications for oceanic fluxes[J]. Mar Geol, 102: 281~ 292.

[25] L H Chan, J M Edmond, G Thompson, *et al* Lithium isotope composition of submarine basalts: implications for the lithium cycle in the oceans[J]. Earth and Planet Science Letter, 1992, 108: 151~ 160.

[26] Reesman R H. Strontium isotopic composition of gangue minerals from hydrothermal vein deposits[J]. Economic Geology, 1968, 63: 731~ 736.

[27] Kessen K M, Woodruff M S, Grant N K. Gangue mineral ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios and the origin of Mississippi Valley-type mineralization[J]. Economic Geology, 1981, 76: 913~ 920.

[28] Norman D L, Landis G P. Source of mineralizing components in hydrothermal ore fluids as evidenced by ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr stable isotope data from the Pasto Bueno deposit, Peru[J]. Economic Geology, 1983, 78: 451~ 465.

[29] Banks D A, Davis G R, Yardley B W D, *et al* The chemistry of brines from Alpine thrust system in the Central Pyrenees: An application of fluid inclusion analysis to the study of fluid behavior in orogenesis[J]. Geochemical et Cosmochimica Acta, 1991, 55: 1 021~ 1 030.

[30] Petrke T, Diamond L W. Oligocene gold quartz veins at Brusson, NW Alps: Sr isotopes trace the source of ore bearing fluid to over 10 km depth[J]. Economic Geology, 1997,



- 92: 389~ 406
- [31] 熊永良, 翟裕生. 铼—钼同位素体系在基性—超基性岩中应用现状的综述[J]. 地质科技情报, 1994, 13(3): 99~ 104.
- [32] Leshner C M, Campbell I H. Geochemical and fluid dynamic modeling of compositional variations in Archean komatite-hosted nickel sulfide deposits in Western Australia[J]. Economic Geology, 1993, 88: 804~ 806
- [33] Lambert D D, Foster J G, Frick L R, *et al*. Geodynamics of magmatic Cu-Ni-PGE sulfide deposits: New insights from the Re-Os isotope system[J]. Economic Geology, 1998, 93(2): 121~ 136
- [34] 赵振华. 元素地球化学[A]. 见: 欧阳自远, 主编. 地球化学: 历史、现状和发展趋势[C]. 北京: 原子能出版社, 1996, 48~ 55.
- [35] Taylor S R, McLennan S M. The significance of the rare earths in geochemistry and cosmochemistry[A]. In: Gschneidner Jr K A, L Eyring, eds Handbook on the Physics and Chemistry of the Rare Earths[C]. Amsterdam: Elsevier, 1988. 479~ 485
- [36] Hanston G N. Rare earth elements in petrogenetic studies of igneous systems[J]. Ann Rev Earth Planet Sci, 1980, 8: 371~ 406
- [37] Hanski E J, Smolkin V F. Iron and LREE-enriched mantle source for early Proterozoic intraplate magmatism as exemplified by the Pechenga ferropicrites, Kola Peninsula, Russia[J]. Lithos, 1995, 34: 107~ 125
- [38] Moller P, Morteau G, Hoefs J, *et al*. The origin of the ore-bearing solution in Pb-Zn veins of the Western Herz, Germany, as deduced from rare-earth element and isotope distributions in calcites[J]. Chemical Geology, 1979, 26: 197~ 215
- [39] 陈骏, 王鹤年. 成矿流体作用过程的REE示踪研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 1997, 33(流体地质专辑): 28~ 35.
- [40] Smedley P L. The geochemistry of rare earth elements in groundwater from the Cammenellis area, southwest England[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55: 2 726~ 2 779
- [41] Johannesson K H, Zhou X P, Stetzenbach K J, *et al*. Rare earth elements and groundwater mixing[J]. EOS, 1995, 76, F276
- [42] Johannesson K H, Stetzenbach K J, Hodge V F. Rare earth elements as geochemical tracers of regional groundwater mixing[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(17): 3 605~ 3 618
- [43] 陈光远, 鲁安怀. 矿物成分标型继承性与金矿矿物来源[J]. 地学前缘, 1994, 1(3, 4): 204~ 209.
- [44] 马东升. 地壳中大规模流体运移的成矿现象和地球化学示踪——以江南地区中—低温热液矿床的地球化学研究为例[J]. 南京大学学报(自然科学), 1997, 33(流体地质专辑): 1~ 10.
- [45] 何知礼, 杜加锋. 流体包裹体研究的某些进展与发展趋势[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 306~ 312.
- [46] 方中. 开拓我国同位素地质研究新方向——评矿物岩石惰性气体同位素地球化学进展[J]. 地质论评, 1996, 42(4): 329~ 333.
- [47] 王先彬. 气体地球化学[A]. 见: 欧阳自远, 主编. 地球化学: 历史、现状和发展趋势[C]. 北京: 原子能出版社, 1996. 67~ 74.
- [48] 徐永昌, 沈平, 陶明信, 等. 东部油气区天然气中幔源挥发份的地球化学—I 氯资源的新类型: 沉积壳层幔源氮的工业储集[J]. 中国科学(D): 1996, 1~ 8.
- [49] 徐永昌. 天然气中的幔源稀有气体[J]. 地学前缘, 1996, 3(3): 63~ 71.
- [50] Stuart F M, Turner G. The abundance and isotopic composition of the noble gases in ancient fluids[J]. Chemical Geology, 1992, 101: 97~ 109
- [51] 胡瑞忠, 毕献武, Turner G, 等. 马厂箐铜矿床黄铁矿流体包裹体He-Ar同位素体系[J]. 中国科学(D 辑), 1997, 27(6): 503~ 508.
- [52] Turner G. Hydrothermal fluids and argon isotope in quartz veins and cherts[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1988, 52: 1 443~ 1 448
- [53] Stuart F M, Turner G. The abundance and isotopic composition of the noble gases in ancient fluids[J]. Chemical Geology, 1992, 101: 97~ 109
- [54] Stuart F M, Turner G, Duckworth R C, *et al*. Helium isotopes as tracers of trapped hydrothermal fluids in ocean-floor sulfides[J]. Geology, 1994, 22: 823~ 826

REVIEW ON THE GEOCHEMICAL TRACING OF MINERALIZING FLUID

NI Shijun, TENG Yanguo, ZHANG Chengjiang, WU Xiangyao

(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: This article introduces some methods of ore-forming fluid's geochemical tracing.

With the isotope geochemical tracing method, one may trace the sources of mineralogenesis and diagenesis, and infer to the geochemical feature of the sources. With using the isotope's similar chemical property, on the other hand, one may trace the physicochemical condition and evolved process of minerals with isotopic fraction law and isotopic composition of minerals when they begin to form. Here we mainly talk about the isotopic tracing of H, O, C, Si, Cl, Pb, Sr, B, Re-Os, Li etc.

Rare earth elements are produced by mantle melting, basalt melting, assimilation, differentiation, the interaction between carbonatite and H₂O and CO₂. They are also good tracers used to study immiscibility fluid. Other trace elements are also very important to trace the geochemical process of diagenesis and depositing.

The study of fluid inclusion has become the important method by which people obtain the information on fluid acting process and fluid property evolution because one may get the sources of mineralizing fluid, fluid's physicochemical parameters, fluid's thermal and dynamic process.

Recently, with the noble gas isotope tracing, it has become a new trend of geochemical research. It is important to identify the source of oil, natural gas, and hydrothermal fluid.

Key words: Mineralizing fluid; Geochemical tracing; Fluid geochemistry.