

文章编号:0258-7106(2004)04-0520-13

深部流体及其与成矿成藏关系研究现状*

毛景文 李晓峰

(中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037)

摘要 深部流体(地幔流体)及其成岩成矿作用的研究是当今地质科学研究的前沿领域,最近几年这方面的研究进展较快。文章比较详细地讨论了地幔流体的组成、地幔流体中碳氧、氢氧和稀有气体同位素特征、地幔流体类型和运移形式,以及地幔流体活动的构造背景,并对地幔流体与金属矿床、油气田盆地等成矿成藏作用关系的研究现状进行了介绍。

关键词 地质学 地幔流体 油气藏 金属矿床 稀有气体同位素 稳定同位素 综述

中图分类号:P61

文献标识码:A

最近几年,深部流体一词广泛使用,但是,目前对它尚没有一个确切的定义。毕思文(1996)认为深部流体主要指地幔来源的流体,包括非生物成因的天然气。胡文暄等(2001)认为深部流体指来源于地幔的流体,是一种以 CO_2 等气体组分为主的富气流体。而杨雷等(2001)将盆地基底以下的流体统称为深部流体,主要包括地幔流体和地壳深部流体;深部流体是与深部壳幔环境(物相、温度、压力和氧逸度等)处于平衡的液体、气体和挥发分。笔者在执行国家重点基础发展规划项目“大规模成矿作用与大型矿集区预测”中的“深部流体成矿系统”课题的早期(2000年),曾经将深部流体定义为主要包括地幔流体以及板块俯冲过程中岩石脱水所产生的流体、深变质过程中由脱水作用(dehydration)形成的流体以及在地幔物质上涌有关的岩浆水。由于深部流体来自地球深部,在其向上运移过程中往往与浅部流体(包括大气降水、地层水等)发生混合作用,导致人们对深部流体的认识容易产生差异,因此,如何定义深部流体还有待进一步的研究。鉴于一般文献中缺乏对深部流体物质来源的具体地球圈层的界定,本文将深部流体视为地幔来源的流体,也称地幔流体。

1 地幔流体的组成

1.1 地幔流体的基本组成

地幔曾长期被认为是一种致密的干体系,直到20世纪70年代岩石学家开始注意到地幔交代作用

并通过研究才发现地幔流体的存在。Bailey 在东非和德国的碱性玄武岩中发现辉石岩地幔包体中有云母和角闪石,提出辉石岩可能是地幔橄榄岩经过交代的产物(杜乐天,1996a)。Frey 等(1974)发现亏损的橄榄岩富含 LREE,推测是流体带入的结果。世界上碱性岩浆都是以富 LREE 为特征,源于亏损地幔。Menzies 等(1980)认为这是由于交代作用带入了 LREE,然后经熔融产生碱性岩浆。Frey 等(1974)首次发现玄武岩中地幔包体橄榄岩高镁低钙,并明显富集一系列不相容元素 K、P、Ti、LREE、Th 和 U。Dawson 等(1980)称之为隐蔽交代(cryptic),他认为这是由于交代作用产生的流体为富含 CO_2 的流体,如果流体富含 OH^- ,则出现显交代(patent)。通过详细研究南非等地金伯利岩及其中的包体,Dawson 等(1980)发现金伯利岩中富含一系列不相容元素和自然元素 Ag、Cu、铂族元素、Ni、Fe、石墨等,石榴石边部或全部晶体已经变为混浊,被微晶云母、角闪石、斜长石、尖晶石等集合体所交代,他还发现了云母岩的地幔包体。Navon 等(1988)在博茨瓦纳和扎伊尔的立方金刚石中及包壳金刚石的包壳中发现了显微流体包裹体,并分析了其流体组分,认为该流体代表了这种金刚石生长环境中的流体介质。这一发现表明在150~200 km 深处的地幔仍然存在着流体,引起国内外学者的极大兴趣。郑建平(1994)在中国辽宁复县50号岩管金伯利岩中发现了微小流体包裹体,测定其气相和液相成分

* 本文得到国家重点基础研究规划项目“大规模成矿作用与大型矿集区”(编号:G1999043211)的资助

第一作者简介 毛景文,男,1956年生,博士,研究员,长期从事矿床地质和地球化学研究工作。E-mail: Jingwenmao@263.net。

收稿日期 2004-08-17;改回日期 2004-09-10。张绮玲编辑。

都是以 CO_2 为主, 还有一些 H_2O 、 H_2S 和 CH_4 等。关于地幔流体的成分, Bailey (1978) 最早提出主要由 CO_2 组成, 同时含有碱质组分及 H_2O 、Al、Fe、Mn、Ca、Ti、Rb、Sr、Ba、Zr、Nb、Y、La 等, 还有高浓度 C、卤素和 N_2 ; 更多学者 (Wyllie, 1987; Eggler, 1987; Schneider et al., 1986; Pasteris, 1987; 孙丰月等, 1995) 倾向于它们属于 C-H-O 体系。其他一些学者提出的体系也比较相似, 例如, CO_2 - H_2O -F-Cl-S (Anderson et al., 1987); H-O-C-S-F-Cl (Spera, 1987); C-O-H-S (Eggler, 1987); CO_2 - H_2O (Holloway, 1971), CO_2 - H_2O -F-Cl (Lloyd, 1987) 等。由以上叙述可以看出, 尽管大家在认识上有一些区别, 但总体上可以认为地幔流体是一种以 C-H-O 或 CO_2 - H_2O 为主的流体系统。

胡文暄等 (2001) 通过大量观测数据和理论分析, 指出地球内部蕴含着大量流体, 并未间断地向外释放着。全球陆地火山每年释放出的 CO_2 约有 800 Mt (即每天释放出 200 多万吨), 原始地球中 CO_2 的 72% (质量分数)、 N_2 的 12% (质量分数) 仍然留在地幔中 (Gerlach, 1991; Zhang et al., 1993)。中国东部幔源岩石矿物中流体包裹体的实测结果表明, 绝大多数气泡包裹体的主要成分是 CO 和 CO_2 , 还有一些 N_2 、 H_2 和 CH_4 。Spera (1987) 甚至认为 Fe-Ni 组成的地核是碳的重要储集场所, 由于碳具有易溶于铁的特点, 所以某些铁陨石中具有高含量的碳。Trull 等 (1993) 估计地幔中碳丰度大约为 $50 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$ 。

除了在地幔岩的流体包裹体中发现 H_2O 以外, 过去 10 年间, 大量实验岩石学和矿物分子光谱学研究 (例如, Schrauder et al., 1994; 陈丰, 1994) 证明石榴石、橄榄石、辉石等无水矿物中含有一定量的氢。从 Mao 等 (1992) 的相图粗略地推断, 氢在低压区可能是流体, 而在高压区可能为固体。陈丰 (1996) 认为地球深部是氢的重要储库, 氢主要以吸附或溶解氢、氢化物和固体氢形式存在。Badding 等 (1978) 根据 FeH 的状态方程计算出在 12.5 g/cm^3 密度时地核中 FeH 的摩尔分数为 40%~95%。

杜乐天 (1988; 1989; 1990) 最早注意到地幔流体这一研究前沿, 并观察到碱金属是地幔流体的重要组成部分, 提出将地幔流体概括为 HACOONS 化合物 (H 代表氢, 卤素和热, A 代表碱金属, C 代表碳, O 代表氧, N 代表氮, S 为硫, 简称为幔汁) 系统的观点。他结合以往对矿床形成过程中碱金属交代作用

的研究 (杜乐天, 1983; 1986), 全面论述了地幔流体碱质交代-成矿作用的关系 (杜乐天, 1996a; 1996b), 开创了地幔流体与成矿关系的研究新方向。戎嘉树等 (1995) 在中国东部地幔岩包体中鉴定出直径 1~5 mm 的浆胞, 其中富含大量碱金属和挥发组分, $w(\text{K}_2\text{O})$ 高达 12%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 达 7.5%。这种浆胞由斜方辉石熔融而成, 熔体玻璃中常有新生的橄榄石和铬透辉石。在这种熔体的形成过程中伴随着 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 的带入和 SiO_2 、 MgO 的带出。林传勇等 (1994) 也在吉林省伊通火山群中的尖晶石相的二辉橄榄岩、异剥橄榄岩和辉石岩幔源包体中发现了富 K、Na 玻璃体, 其成分为 $[w(\text{B})]$: SiO_2 52%~60%、 Al_2O_3 20%~24%、 Na_2O 3.0%~10.0%、 K_2O 4.1%~10.6%、 FeO 0.9%~4.4%、 MgO 0.3%~1.8% 和 CaO 0.1%~3.9%。它与以往在国内外已经发现的富钠玻璃 (Frey et al., 1974; Mysen et al., 1975; Francis, 1976; Maaloe et al., 1979; Jones et al., 1983; Scheneider et al., 1986; 郑海飞等, 1987) 不同, 以富钾钠贫钙为特征 (图 1), 这可能反映出前者为地幔本身的流体, 后者是壳幔强烈相互作用区域的产物。朱永峰 (1995) 曾指出洋壳中广泛分布着 $w(\text{K}_2\text{O})$ 约为 1.5% 的碱性玄武岩类岩石, 它们发生熔融的深度很大 (达 400 km), 表明地幔中存在着相当数量的碱金属和水。

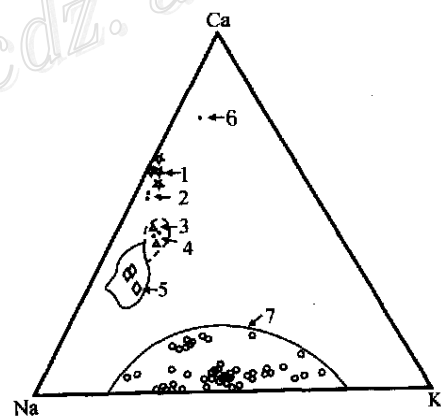


图 1 玻璃体的 Ca-Na-K 图解 (林传勇等, 1994)

1—引自 Mysen 等 (1875); 2—引自 Girod 等 (1981); 3—引自 Maaloe 等 (1979); 4—引自 Francis 等 (1976); 5—引自 Frey 等 (1974); 6—引自郑海飞等 (1987); 7—引自林传勇等 (1994)

Fig.1 Diagram of Ca-Na-K in vitreous body
(after Lin et al., 1994)

1—after Mysen et al., 1875; 2—after Girod et al., 1981; 3—after Maaloe et al., 1979; 4—after Francis et al., 1976; 5—after Frey et al., 1974; 6—after Zheng et al., 1987; 7—after Lin et al., 1994

从上述可以得出结论:地幔流体是一种以 CO_2 - H_2O (或 C-H-O) 和碱金属元素以及其他挥发组分 F 、 Cl 、 S 、 P 、卤素等组成的流体系统。在地幔流体聚集的部位指示出曾发生过地幔交代作用。正是地幔的交代作用和分熔作用导致生成碱性玄武岩浆和碱性岩浆,地幔流体通过排气作用上升到地壳,开始表壳地球化学循环,并参与成岩成矿过程。

1.2 地幔流体的同位素特征

1.2.1 地幔中碳的同位素

地幔中的碳主要以金伯利岩中的金刚石、碳酸岩、地幔包体中的 CO_2 流体包裹体和石墨、大洋中脊溢出的 CO_2 等形式存在,其同位素组成是通过对各类含碳物质的碳同位素测定获得的。

一般认为,碳酸岩中的矿物与金刚石可以作为地幔碳的样品,而且这些样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布体现了地幔 $\delta^{13}\text{C}$ 的分布。但是随着研究工作的不断开展和深入,发现地幔的碳同位素分布十分不均一。如 Galimov(1985)总结了前苏联 700 多个金刚石的数据,虽然大部分金刚石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值落在 $-2\text{‰} \sim -9\text{‰}$ 之间,但范围却宽达 $-34.2\text{‰} \sim +2.4\text{‰}$ 。即使是金伯利岩筒中的金刚石,其 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围也很宽,但主要分布在 $-2\text{‰} \sim -9\text{‰}$ 之间。Deines(1992)对比了前苏联和南非大陆金伯利岩中金刚石的碳同位素分布,它们没有明显的不同, $\delta^{13}\text{C}$ 具有同样宽的范围。

地幔岩中石墨和金刚石的碳同位素数据较少。Jaques 等(1990)报道了橄榄岩中金刚石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 -3.7‰ 和 -5.6‰ 。Deines 等(1987)测定的来自 Roberts Victor 的 2 个石墨-金石榴辉岩中石墨和金刚石的 $\delta^{13}\text{C}$,发现它们落在 $-4\text{‰} \sim -7\text{‰}$ 之间,且石墨比共生的金刚石略富集 ^{13}C 。而 Deines 等(1991)研究了博茨瓦纳的 Orapa 的 70 个榴辉岩中的石墨和金刚石,发现石墨的 $\delta^{13}\text{C}$ 在 $-4.6\text{‰} \sim -7.8\text{‰}$ 之间,而金刚石的 $\delta^{13}\text{C}$ 却落在 $-4\text{‰} \sim -23\text{‰}$ 之间。Boyd 等(1994)研究了非洲南部、澳大利亚和北美等地的八面体金刚石,分出高碳和低碳两类, $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 $-6.4\text{‰} \sim -2.9\text{‰}$ 和 $-19.4\text{‰} \sim -9.5\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}$ 值与 $\delta^{15}\text{N}$ 值呈负相关关系。刘建明等(2003)测得中国鲁西金伯利岩碳同位素组成为 $-4.8\text{‰} \sim -7.6\text{‰}$ 。

地幔包体中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化很大,其范围大致与金刚石相同,如中国东部的超镁铁质地幔包体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-2.9\text{‰} \sim -35.7\text{‰}$ 之间,而且同一样品在不同温度条件下提取出的 CO_2 ,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值不同(储雪蕾

等,1995)。玄武岩的碳同位素组成分布几乎与金刚石、地幔包体相同。已经测得的火山排出的 CO_2 ,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $0\text{‰} \sim -31\text{‰}$ 之间,大部分在 $-4\text{‰} \sim -5\text{‰}$ 之间(储雪蕾,1996)。

作为大陆岩石圈构造背景和地幔交代作用的指示岩石(杨学明等,1998),碳酸岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围较小,在 $-2\text{‰} \sim -8\text{‰}$ 之间。但是,碳是地幔的一个次要元素,其分布可能不均匀,从不同地幔来源岩石或者包体的碳同位素组成来看,地幔样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化很大,大约从 0 变化到 -35‰ ,远远超过地幔中氧的同位素变化范围。目前,大家普遍的共识是,地幔 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围大,显示双峰特征,主峰众数为 -5.5‰ (主要范围: $-2\text{‰} \sim -9\text{‰}$),同时,在 $-15\text{‰} \sim -25\text{‰}$ 区间还有一个低缓的次峰(郑永飞等,1999)。对地幔碳同位素组成不均一的解释有多种,包括地幔原始不均一、深俯冲陆壳物质的混染、多阶段去气、岩浆结晶分异等。通常认为 $\delta^{13}\text{C}$ 高值主峰可能代表了正常地幔原始碳的组成,而负的低值次峰则可能是陆壳深俯冲、拆沉作用等引起的再循环,陆壳物质或地幔多阶段脱气作用造成的(刘建明等,2003)。

1.2.2 地幔中的氢、氧同位素

与地幔碳同位素相比,氧同位素基本落在较窄的范围内,碳酸岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 $+4\text{‰} \sim +27\text{‰}$,原生未蚀变的碳酸岩为 $+6\text{‰} \sim +9\text{‰}$ 。从玄武岩及其中的镁铁质和超镁铁质包体所获得的地幔氧同位素组成范围为 $+5\text{‰} \sim +6\text{‰}$,但总的来说,地幔岩石中 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $(5.7 \pm 0.3)\text{‰}$ (Taylor, 1980)。

中国东部二辉橄榄岩在 1200℃ 释放的 H_2O 的 δD 为 $-31.1\text{‰} \sim -96.4\text{‰}$,平均为 -67.0‰ (吴茂炳等,2003)。Sheppard 等(1970)根据对地幔来源的金云母的分析,认为岩浆或地幔来源水的 δD 值为 $(-48 \pm 20)\text{‰}$;Boettcher 等(1980)测得地幔来源的金伯利岩及其捕虏体中的水的 δD 值为 -50‰ ,而 Taylor 则认为含水地幔的 δD 值为 $-50\text{‰} \sim -80\text{‰}$ 。Pineau 等(1990)报道了大西洋中脊玄武岩玻璃的气泡中 δD 值为 $(-64 \pm 2)\text{‰}$ 。Kyser 等(1984)认为大洋玄武岩的 δD 为 $(-80 \pm 5)\text{‰}$,总的来说,地幔中的氢同位素数值变化范围在 $-50\text{‰} \sim -80\text{‰}$ 。

1.2.3 地幔中的稀有气体同位素

地幔中稀有气体同位素研究以 He、Ar 同位素研究最为深入,其次是 Ne。对地幔的稀有气体同位素研究是从研究地幔来源的岩石入手的。这些岩石中

包含着地幔稀有气体的组成,如火山岩、火山气体、地幔捕虏体和金刚石等。在地幔来源的各种物质中,由于陆相火山岩在喷发的时候混染了大气组分的稀有气体,而弧后火山岩(被认为是第三种地幔来源的岩石)可能受俯冲时地壳物质的混染,因此,海相火山岩被认为是研究地幔稀有气体最好的样品,洋中脊玄武岩和洋岛玄武岩常常被用来研究地幔物质的组成。虽然两种岩石均来自地幔,但是它们的组成却不相同。洋中脊玄武岩主要来源于亏损地幔或者是脱气的地幔;而洋岛玄武岩却是热点(或地幔柱)火山岩,代表了亏损相对较少和缺少挥发分的地幔物质。由于这两种岩石的年龄偏新,因此大洋火山岩所提供的信息仅仅是现代或者近代地幔组成的信息。利用金刚石来研究地幔的稀有气体同位素为研究地质历史时期地幔的物质组成提供了可能,因为大部分金刚石都形成于前寒武纪。一些学者对地幔捕虏体、地幔岩中的巨晶矿物进行了地幔物质的稀有气体同位素组成的研究(徐胜等,1997;2002; Scarsi, 2000; Matsumoto et al., 2000; 2001; 2002; 徐士进等, 2003),但是这些成果多是建立在洋岛玄武岩和大洋玄武岩研究的基础上的。

洋中脊玄武岩的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值比较集中,而热点火山岩的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值具有较宽的变化范围,最高的是洋中脊玄武岩的几倍(Zindler et al., 1986; Kurz, 1993)。Zindler 等(1986)认为洋岛玄武岩 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值的波动是岩浆喷发之前岩浆源区放射成因 ^4He 叠加的结果,而 Hiyagon(1986)则认为导致这种现象发生的原因是热点玄武岩地幔源区的不均一性。

20 世纪 80 年代以来,对大西洋及太平洋洋中脊玄武岩的研究表明, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值很集中,为 $(8 \pm 1)\text{Ra}$ (Ra 为大气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值 1.4×10^{-6}),显示 MORB 源区 He 同位素组成的均一性。洋岛玄武岩大多出露于大洋中的热点区,如冰岛、夏威夷、Samoa 等,它们多具有高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值,如夏威夷最年轻的 Loihi 海山玄武岩玻璃中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值变化在 $15\text{Ra} \sim 35\text{Ra}$ 。而 Breddam 等(2001)在冰岛发现了 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值高达 42.9Ra 的玄武岩。

Ozima 等(2002)总结了地幔物质的稀有气体同位素特点,结果显示洋中脊玄武岩 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $0.9 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-5}$; Loihi 洋岛玄武岩 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $0.7 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$; Samoan 捕虏体 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $1.2 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5}$; 金刚石

中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $0.01 \times 10^{-5} \sim 20 \times 10^{-5}$ 。而不同来源地幔物质的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值则变化较大,洋中脊玄武岩为 $10\,000 \sim 30\,000$; Loihi 洋岛玄武岩为 $400 \sim 4\,000$; Samoan 捕虏体为 $350 \sim 12\,000$; 金刚石中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值 >300 。相对来说,Ne 同位素则比较均一, $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 和 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 比值在洋中脊玄武岩中分别为 $9.8 \sim 13$ 和 $0.029 \sim 0.06$;在 Loihi 洋岛玄武岩中分别为 $9.6 \sim 12$ 和 $0.026 \sim 0.04$;在 Samoan 捕虏体中分别为 $9.8 \sim 12$ 和 $0.029 \sim 0.042$;在金刚石中分别为 $11.4 \sim 12$ 和 $0.04 \sim 0.06$ 。

1.3 地幔流体类型和运移形式

Kanoeika 等(1985)通过稀有气体 He-Ar 同位素研究,将地幔流体分为 3 个主要源区,即①地幔柱型(plume 或 P 型)源区,约 670 km 深的下地幔与上地幔的交界处或核幔界面;②洋中脊拉斑玄武岩型下面的亏损地幔,包括洋区和大陆区的岩石圈地幔,也可能包括软流圈和整个上地幔;③岛弧型(arc 或 AC 源区):岛弧深部和贝奥夫带以上的地幔,包含俯冲作用带来的再循环物质。路风香(1996)通过对华北金刚石的系统研究,推测地幔流体可能有 3 种来源,一是来自核幔之间的超深流体,二是软流层起源的熔-流体,三是与幔源岩浆有关的晚期流体。杜乐天(1988)根据地幔流体在地球的垂向分布将它们分成 4 个类型:①氢流(发自液态铁外地核或核幔边界);②氢型幔汁(H-HACONS 流体),由氢流路过下、中地幔演化而成,各种不相容元素均以氢化物形式存在;③碱型幔汁(A-HACONS 流体),由氢型幔汁穿过上地幔进一步演化而成,特点是流体中特别富含碱金属;④氧型幔汁(O-HACONS 流体),由碱型幔汁沿破裂带上涌进入地壳进一步演化而成。在流体中出现氧的化合物(例如 CO_2 、 H_2O 、 SO_2),但仍然富含 H_2 、烃类、CO、碱金属化合物等强还原性流体成分。氧型幔汁渗入是形成花岗质岩浆、安山质岩浆及低速带的主要因素。

在地幔流体研究早期,认为富含 CO_2 - H_2O 的地幔流体运移到上地幔相当于角闪石相稳定区的深度(约 $120 \sim 170\text{ km}$), H_2O 与地幔岩发生了强烈的地幔交代作用,形成角闪石橄榄岩,其结果是地幔流体中的 H_2O 被大量消耗。由于 CO_2 对各种微量元素的溶解度极低,导致大量元素的沉淀富集,形成一个特定的交代带(Wylie, 1987)。随着进一步研究,对于地幔流体的研究不仅仅局限于地幔本身,例如,在夏威夷、冰岛等地幔柱区,地幔流体正在源源不断上

涌,其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $7\sim 9\text{ Ra}$;在中国东部沿郯庐断裂的一系列断陷盆地中的富氮 CO_2 气藏(图2)都显示出地幔流体卸载的迹象(Mao et al., 2002a)。根据地幔流体的活动特点,曹荣龙等(1995)提出的交代作用类型包括:①原地地幔交代作用,地幔流体在地幔中进行的交代作用;②上升过程中的交代作用,地幔岩包体被寄主岩浆携带上升过程中可能发生的地幔流体交代作用,部分仍处于地幔的压力-温

度范围,部分则可能已处于地壳的条件;③地幔中的地幔交代作用,地幔流体穿过莫霍面在相应于岩石圈地壳的物理化学条件下对地壳物质产生的交代作用和成岩成矿过程。

地幔流体是如何迁移的?这是大家关心的科学问题。迁移包括两个方面,其一是在地幔内部,其二是迁移到地壳或表壳。在地幔内部,按照传统的动力学观点,可将地幔流体的迁移划分为渗滤机制(percolation-controlled)和扩散机制(diffusion-controlled)(Bodinier et al., 1990)。Lundstrom (1995)通过研究玄武岩的抽提作用(basalt extraction)提出了两种地幔流体迁移模式:平衡空隙流动(equilibrium porous flow)和动态熔融(dynamic melting),并认为前者是地幔流体的主要迁移模式。对于地幔流体向地幔以外运移,也存在两种形式:地幔流体随着地幔岩浆的侵位或喷溢向地壳及向地表转移;地幔流体通常呈超临界状态,具有高密度、高扩散系数、介于气体与液体之间的黏度和超高溶解度,因而富含不相容元素和碱金属元素。已知在岩浆喷溢的间歇期,甚至在一些壳幔相互作用的地区仍然有明显的地幔流体活动,所以说后一种形式具有更大的普遍性。丁清峰等(2001)推测当地幔流体沿深大断裂迁移时,往往会形成线状热异常。另外,杨雷等(2001)提出超基性岩的次生蚀变,例如,橄榄岩的蛇纹石化可以把封存在地幔来源的 H 释放出来,在油气盆地中富集。对于地幔流体的运移方式仍然不十分清楚,有不少问题亟待解决。张荣华等(2001)认为研究深部流体至少有3个问题值得进一步研究,即地球深部流体的性质,尤其是跨越临界态时的变化特点,深部流体的流动过程以及矿物与溶液的反应动力学过程。

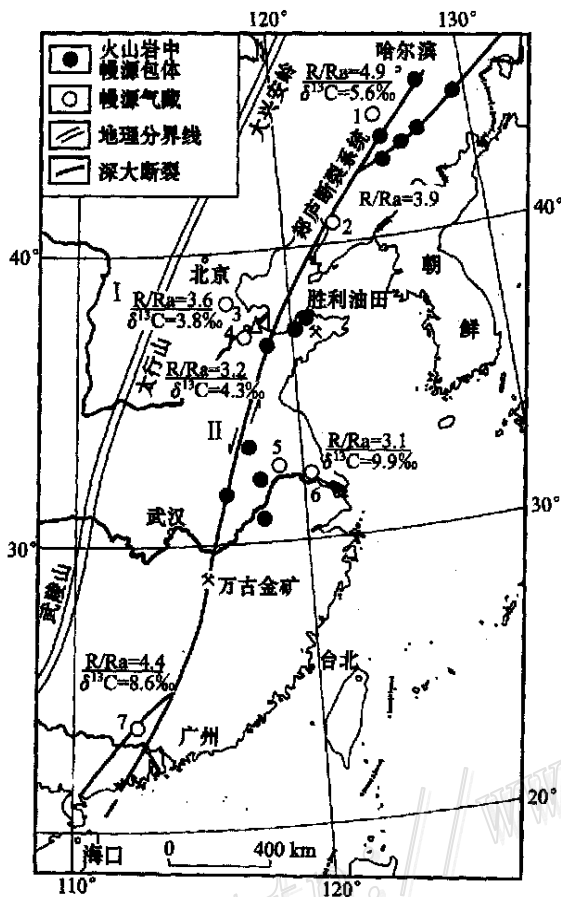


图2 沿郯庐断裂系统主要气藏和幔源包体分布图
(根据陶明信等,1996修改)

各气藏的氦同位素和碳同位素值标注在内。I—大兴安岭-太行山-武陵山构造-地球物理梯度带,分割西部隆起带和东部断陷带;II—郯庐断裂带。二氧化碳和氦气藏:1—万金塔;2—界3井;3—黄骅;4—胜利;5—闵桥;6—黄桥;7—三水

Fig.2 Distribution of major gas fields with mantle derived enclaves in volcanic rocks along the Tanlu fault zone system (modified after Tao et al., 1996)

The helium and carbon isotope in major gas fields are included. I—Tectonic-geophysical gradient belt along Da Hinggan Mountains, Taihang Mountains and Wuling Mountain, which separates the west uplift belt from the east depression belt; II—Tanlu fault zone. Gas fields and CO_2 resources: 1—Wanjinta; 2—Jie 3 Jing; 3—Huangye; 4—Shengli; 5—Minqiao; 6—Huangqiao; 7—Sanshui

1.4 地幔流体的来源及主要活动区的构造背景

地幔流体来源何处?是地球深部固有的,还是从外部捕获而来?从曹荣龙等(1995)、张鸿翔等(2000)、刘丛强等(2001)、丁清峰等(2001)等对这一问题的探讨来看,主要认识有两种:①地球内部固有的。在地球形成早期,从星云团到固体地球演化阶段,连续不断的脱气作用产生了大气圈和水圈,但是仍然有部分 H 和 C 被保存在地核和地幔中。正如Spera(1987)和Badding等(1978)所指出的那样,在核幔中存在巨大的 H 储库和 C 储库。黎诺(1993)根据地球质量和旋转等物理特点坚持认为地核是空心的或仅有气体存在,这在当时被认为是奇谈怪论,

今天来看也许有一定道理; ②地壳流体在板块运动中被携带入地幔。通常在洋壳板块俯冲到大陆板块下部时, 赋存在大洋岩石中的空隙水和含水矿物中的结晶水在软流圈逐渐被熔化, C-H-O 和一些其他表壳组分重新被携入地幔, 开始新的地球化学循环。此外, 认为是在岩石圈加厚区, 下地壳作为山根的一部分受挤压被楔入岩石圈深部(邓晋福等, 1996), 相应的地壳物质及流体同样可以被带入地幔。后两种形式的壳幔相互作用可能是大陆地幔流体来源的主要方式。

顾名思义, 地幔流体主要存在于地幔, 尽管不排除部分核幔边界, 甚至地核来源。地幔流体运移受一定构造环境的制约。目前来看, 主要有 4 种: ①地幔柱区; ②大陆裂谷区; ③大陆减薄区(或伸展带); ④深大断裂及其次一级断裂(包括大型走滑断裂带中的拉分盆地)。这些构造环境可以总结为岩石圈物质的发散地带。在这些地带, 地幔物质和流体(包括岩浆)向上涌动, 强烈的壳幔相互作用, 导致地幔流体的壳幔运移, 甚至飘逸到大气圈。

2 地幔流体与成矿成藏作用

同研究地幔岩中地幔流体相比较, 与成矿作用有关的地幔流体研究的难度更大。由于当地幔流体离开地幔后, 将与不同源的流体(包括变质流体、地层建造水、大气降水等)发生混合作用, 逐渐被稀释, 况且在目前条件下, 还没有有效地区分地幔流体与岩浆流体的方法。杜乐天(1996a; 1996b)强调碱交代作用作为地幔流体成矿的标志, 但这不是排他性的证据。因为无论是在与 I 型花岗岩有关的斑岩-矽卡岩矿床成矿系统、与 S 型花岗岩有关的钨锡矿床成矿系统、与碱性花岗岩有关的稀有-稀土-金成矿系统, 还是在浅成低温热液矿床的成矿系统中, 都发育有碱质交代作用, 例如钾长石化、黑云母化、绢云母化和冰长石化。在与陆相火山岩-次火山岩有关的宁芜玢岩铁矿中发育十分强烈的钠长石化和钠柱石化(宁芜研究项目编写小组, 1978)。到目前为止, 尽管只有极少数矿床具有显著的地幔流体成矿的遗迹, 但对于绝大多数矿床来说, 这项研究仍然处于探索阶段, 目前的研究更多是鉴别是否有地幔流体参与成矿作用。

2.1 与地幔流体活动有关的典型矿床

超大型矿床的形成有其特殊性, 有些矿床往往

在全球是独一无二的, 例如澳大利亚的 Olympic Dam U-Cu-Au-REE 矿和内蒙古的白云鄂博稀有-稀土-铁矿。曹荣龙等(1995)对白云鄂博稀土矿床进行了比较深刻的解剖, 提出这一超大型矿床是地幔流体交代的产物, 其证据有: ①稀土矿石和单矿物的铈初始比值 $I_{Sr}(t)$ 低于 0.7030; ②稀土矿物独居石 Sm-Nd 等时线确定的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始值 ($\epsilon_{\text{Nd}} = 8.4$) 显示为地幔来源; ③多种氟碳酸盐稀土矿物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 $-4.12\text{‰} \sim -5.19\text{‰}$, 表明成矿流体中的 CO_2 来自地幔; ④金属硫化物中硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值平均为 -0.71‰ , 与陨硫一致; ⑤稀土氟碳酸盐、霓石、萤石和重晶石等矿物的流体包裹体的成分属于 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 体系, 且 CO_2 多于 H_2O , 包裹体中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-4.18\text{‰} \sim -8.53\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 平均值为 8.1‰ , 为典型的岩浆流体或地幔流体。此外, 在白云鄂博矿区东西长 30 km、南北宽 4 km 的范围内, 普遍出现了渗透性的萤石化、钠闪石化、霓石化、磷灰石化、云母化以及钾长石化现象。这种富碱、富铁、富挥发组分的围岩蚀变组合也是地幔流体成矿的一个重要特征。

碲是一种分散元素, 在地球圈层中的分布为 (w_{Te}): 地壳 0.0004×10^{-6} , 地幔 0.01×10^{-6} , 地核 0.52×10^{-6} (黎彤, 1976)。在地质地球化学循环过程中, 碲趋向于分散。然而在四川大水沟却形成了一个罕见的碲高度富集、特高品位(碲品位 $w_{\text{Te}} 1\% \sim 15\%$, 最高可达 30%) 的独立矿床(曹志敏等, 1995; 陈毓川等, 1996)。大水沟碲矿形成的时代为 94 Ma(毛景文等, 1997), 但是在区内未见 90~100 Ma 时期岩浆活动的记录。13 条 NNE 向的矿脉全部分布于夹在三叠纪大理岩中的玄武岩层内, 当矿脉延伸到碳酸盐岩内时即尖灭。矿脉内金属矿物以黄铁矿、磁黄铁矿、辉碲铋矿等为主, 局部出现几乎纯的金属矿物集合体, 非金属矿物为碳酸盐类、富钾硅酸盐矿物及石英、电气石。虽然成矿围岩是基性岩类, 但在矿脉两侧发育的蚀变带则以富钾硅酸盐为主。成矿流体为 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 组合, 矿脉中碳酸盐类的碳、氧同位素, 金属硫化物的硫同位素, 白云母、黑云母和石英的氢、氧同位素以及惰性气体同位素一致表明成矿流体来自地幔(Mao et al., 2002b)。壳幔相互作用过程的地幔排气可能是形成这类特殊矿床的主要因素。

2.2 地幔流体参与金属矿床成矿作用

碳、氢、氧、硫同位素及成矿时代、与非岩浆活动

有关的碱质交代作用及其流体特征等联合研究可以比较有效地探讨地幔流体与成矿作用。但是,如前所述,由于地幔流体在上升过程中通常与其他来源的流体发生混合作用,在大多数矿床中没有鲜明的地幔流体的标记,只能在某些方面捕获到地幔流体参与成矿过程的信息。氦同位素被认为是示踪地幔流体的有效方法。Zindler等(1986)提出亏损地幔的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $7\sim 9\text{ Ra}$,而地壳仅为 $0.01\sim 0.05\text{ Ra}$ (Stuart et al., 1995)。近几年,氦同位素研究显示,不少金属矿床在成矿作用过程中有地幔流体的参与。哀牢山金矿的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $0.42\sim 0.78\text{ Ra}$ (Burnard et al., 1999);云南马厂箐斑岩铜矿中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 $0.56\sim 1.75\text{ Ra}$ (胡瑞忠等, 1997);韩国 Dae Hwa W-Mo 矿 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 $0.33\sim 2.68\text{ Ra}$ (Stuart et al., 1995);四川大渡河金矿田 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 $0.16\sim 0.86\text{ Ra}$ (李晓峰等, 2004)。华北克拉通北缘是一个壳幔相互作用强烈的地带, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值在其中的后沟金矿为 1.5 Ra ,在黄土梁金矿为 0.66 Ra ,牛圈金矿为 2.07 Ra ,小营盘金矿为 1.57 Ra ,金厂峪金矿为 3.57 Ra ,胡杖子金矿为 $1.73\sim 9\text{ Ra}$,花市金矿为 4.64 Ra ,沙坡峪金矿为 2.07 Ra ,鱼耳崖金矿为 3.14 Ra ,田家村金矿为 3.14 Ra ,兴隆银矿为 4.93 Ra (王宝德等, 2003),在东坪金矿 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 $0.3\sim 5.2\text{ Ra}$ (毛景文等, 2001; Mao et al., 2003)。蔡明海等(2004)测得广西大厂矿田长坡-铜坑锡多金属矿得成矿流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $1.2\sim 2.9\text{ Ra}$,茶山铋矿的成矿流体中该值为 0.78 Ra ,这些结果说明从矿化活动中心向外,含矿流体中地幔流体的数量已减少。张连昌等(2002)测得胶东邓格庄石英脉型金矿的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 $1.93\sim 2.14\text{ Ra}$,焦家蚀变岩型金矿的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 $1.64\sim 2.36\text{ Ra}$,蓬家夼和发云夼拆离带中角砾岩型金矿的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 $0.43\sim 0.79\text{ Ra}$,说明从石英脉型和破碎蚀变岩型到角砾岩型矿石,地幔流体在成矿流体中所占的比例降低,这与硫、氢、氧、碳同位素研究结果相吻合。位于郯庐大断裂旁侧的湖南万古金矿具有很高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值,达 $3\sim 7.2\text{ Ra}$,计算结果表明成矿流体成分有 $45.2\%\sim 95.7\%$ 来自地幔(Mao et al., 2002a)。

2.3 地幔流体与盆地气藏

过去十几年间,在中国东部的含油气盆地中,发现了28个 CO_2 气藏,主要分布在松辽盆地、渤海湾盆地、苏北盆地和莺歌海盆地。其中松辽盆地的万

金塔气田、苏北盆地的黄桥气田和三水盆地的沙头圩气藏已经开发(戴金星等, 1995; 李先奇等, 1997)。同时在这些油气田中氦浓度超过了 0.05% 而达到了氦气藏的工业品位(陶明信等, 1996, 1997)。更有意义的是这些二氧化碳和氦气藏都显示出非烃原岩,表明它们与深部岩浆活动关系密切(徐永昌等, 1998; 戴金星等, 1995; 陶明信等, 1996)。不少学者对这些气藏进行了碳、氧同位素和氦同位素测定(徐永昌等, 1998; 陶明信等, 1996; 李先奇等, 1997),结果表明氦气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值为 $0.7\sim 7.2\text{ Ra}$,主要集中在 $3\sim 7.2\text{ Ra}$ 之间, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值变化在 $573\sim 7744$ 之间,主要集中于 $1000\sim 2000$;二氧化碳气的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 $-3.4\%\sim -16.9\%$,绝大部分在 $-4\%\sim -9\%$ 之间。这些结果反映出,无论是二氧化碳还是氦气都主要来源于地幔。在陶明信等(1996)的工作基础上,将主要的二氧化碳气藏和氦气藏的氦同位素及 $\delta^{13}\text{C}$ 值标在图2中,可以看出,沿着郯庐断裂及其在华南的延伸部分两侧的气藏都清楚地显示出地幔来源。事实上,沿郯庐断裂带新生代深源火山岩非常发育,从黑龙江方正、鸡西,至山东蓬莱、临句和安徽的女山,岩性为碱性橄榄岩、碧玄岩和霞石岩,其中地幔包体丰富(赵大升等, 1983),流体包裹体中 CO_2 含量均较高,普遍在 $50\%\sim 60\%$,最高达 80% (杨学勇等, 1999)。已经发现的气藏与出露的地幔包体在空间分布上吻合较好,说明两者来源的一致性。一般认为,这些幔源岩浆成因的 CO_2 和氦气是通过构造-岩浆活动以断裂为通道将深部的气体释放出来,并在适宜的构造部位和圈闭环境中聚集成藏的。在漆家福等(1995)研究的基础上,陈永见等(1999)提出的新生代渤海湾幔源 CO_2 成藏模式(图3)比较好地反映了成藏过程。 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比值是示踪气藏来源的有效方法(许多等, 1999), $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比值为 $2\times 10^9\sim 7\times 10^9$ 被认为是地幔来源气体的范围(Lollar et al., 1997),壳源气体该比值往往大于 7×10^9 。Giggenbach(1993)在新西兰的研究表明,随板块俯冲进入地幔,沉积碳重新释放,与幔源气体混合,导致火山气体的 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比值大幅度升高,而随着远离火山岛弧,沉积碳的影响逐渐减弱,至弧后拉张地区已经完全成为地幔源气体。Porcelli等(1992)通过对大陆伸展区幔源包体的研究,指出大陆幔源气体具有与大洋相同的 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比值。

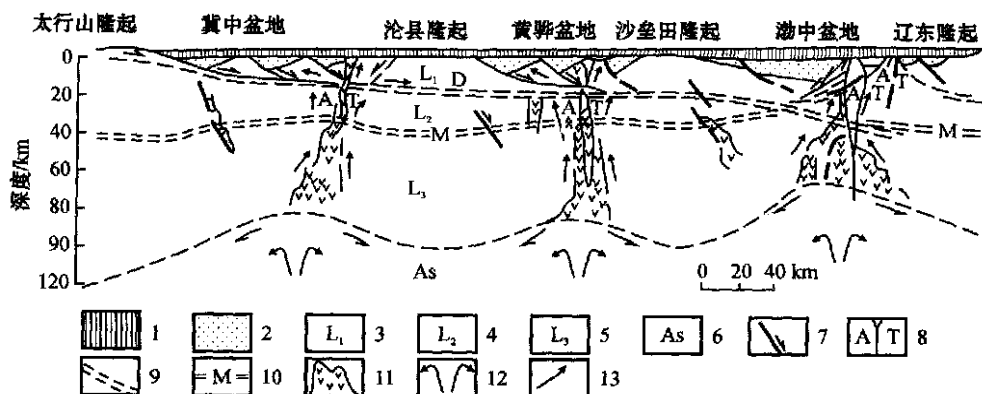


图 3 渤海湾新生代裂陷盆地的幔源岩浆 CO₂ 气藏的生成模式图(据漆家福等, 1995; 陈永见, 1999)

1—第四系和上第三系; 2—下第三系; 3—上部地壳脆性伸展构造; 4—下部地壳脆性伸展与韧性伸展互层, 有大量基性岩墙侵入; 5—壳下岩石圈韧性伸展层, 有基性岩墙底辟侵入; 6—软流圈; 7—裂陷盆地中主干伸展断裂; 8—走滑断层及深断层; 9—中下地壳中的拆离断层; 10—莫霍面(壳幔截面); 11—岩浆源区及其通道; 12—软流圈中的热对流及其对上覆岩石圈的拖曳; 13—幔源岩浆 CO₂ 气运移方向

Fig.3 Model diagram showing the formation of the CO₂ reservoir of mantle-derived magmatic origin in the Cenozoic rift basin of Bohai Gulf(affer Qi et al., 1995; Chen et al., 1999)

1—Quaternary and Upper Tertiary; 2—Lower Tertiary; 3—Brittle extensional structures in upper crust; 4—Transitional zone between brittle and ductile extensional structures with the intrusion of base dikes beneath the crust; 5—Ductile extensional zone beneath lithosphere; 6—Asthenosphere; 7—Major faults in depression basin; 8—Strike-slip fault and deep fault; 9—Fractures in middle and lower crust; 10. Moho; 11—Sources and path of magma; 12—Heat convection in asthenosphere and its dragging force on lithosphere; 13—Pathway of mantle-derived CO₂

由于 CO₂ 气藏与石油的时空分布和成因上的密切关系,关于无机生油的研究越来越多。Schneider 等(1986)提出地幔流体的种类受氧逸度的控制,当氧逸度较高时,地幔流体主要是 CO₂-H₂O;当氧逸度较低时,地幔流体种类为 CH₄-H₂O。Giardini 等(1982)和 Sugisaki 等(1994)甚至认为在地幔中可能存在无机石油或碳水化合物。夏林圻等(1996)测定地幔的石榴石二辉橄榄岩中 CH₄ 和 H₂ 的摩尔分数分别高达 12.1% 和 10.8%。赫英等(2001a)推测岩石圈不同圈层的界面处可能孕育不同类型的气体,从浅部到深部, H₂O、CO₂、CH₄、H₂ 有顺次富集的趋势。岩石圈与软流圈界面可能是 CO₂ 的聚集带,而氢有更深的来源。上述表明,地幔中至少存在可以形成石油的物质组分,一旦这些组分运移到地壳浅部而且得以保存,必然形成油气田。金之钧等(2002)对东营凹陷的天然气烷、烃进行了碳同位素(包括 CO₂、CH₄、C₂H₆、C₃H₈)测定,指出其成因可能是地幔流体与有机成因的油气的混合。甲烷的碳同位素数据分为高 δ¹³C 值和低 δ¹³C 值两个区,前者出现于地幔流体强烈活动的断裂带中,而后者为有机类型。

2.4 断陷盆地中固体矿产与气藏共生

按照人们的传统认知,在山区勘查金属矿床,在盆地寻找石油天然气藏。过去 10 年,在渤海湾盆地

发现油气藏、CO₂ 气藏、氢气藏与金矿化有着密切的关系。杨申镛等对胜利油田原油灰分和区内一些花岗片麻岩、玄武岩、辉绿岩、泥岩和砂岩等岩石样品进行了测试分析,发现原油富含贵金属,其中 w_{Au} 为 0.0009 × 10⁻⁶ ~ 0.001 × 10⁻⁶, w_{Ag} 为 0.096 × 10⁻⁶ ~ 0.639 × 10⁻⁶, w_{Ni} 为 0.02 × 10⁻⁶ ~ 0.08 × 10⁻⁶。片麻岩和玄武岩含金分别为 0.0424 × 10⁻⁶ 和 0.02 × 10⁻⁶ ~ 0.08 × 10⁻⁶ (华仁民等, 2001)。赫英等(1995)在胜利油田非烃气藏对玄武岩和辉绿岩的含金量测定,发现气藏区的岩石 w_{Au} 0.0031 × 10⁻⁶ ~ 2.15 × 10⁻⁶,大部分在 0.20 × 10⁻⁶ ~ 0.92 × 10⁻⁶ 之间,而非气藏区同类岩石的含金量为 0.0012 × 10⁻⁶ ~ 0.0055 × 10⁻⁶。因此,赫英等(2001b)指出二氧化碳含量是盆地和火山岩类演化到一定阶段的产物,富集地幔岩浆去气是其形成的主要机制。杜乐天(1996)初步提出一个这方面的成矿成藏模型图,简明地刻划出两者之间的密切关系。建立两者之间的成因关系和桥梁对于探讨同一地质背景下,地幔排气对形成不同形式的资源具有重要意义。

3 结论

地幔流体及其与成岩成矿的关系一直是大家关

注的科学问题。地幔流体的组成及其如何从深部地幔运移到成岩成矿成藏系统以及其在运移过程中的水-岩反应仍然是个悬而未决的问题。从已有的研究成果来看, H_2O 和 CO_2 是地幔流体的主要气相组分。在不同的大地构造背景下,地幔流体参与不同金属矿床和油气藏成油气作用已经成为被广泛接受的客观事实。在大型矿集区以及大型、超大型矿床的成矿作用过程中有地幔流体的参与,地幔流体参与矿产资源形成的程度及其参与方式是否是形成大型、超大型矿产资源的主要因素和巨量金属堆积的控制因素还有待于进一步深入研究。可以预见,随着国民经济发展对矿产资源需求的不断扩大,以及新的成矿学理论和研究方法的不断发展,深部流体与成岩成矿的关系必将越来越受到广大地质学家的青睐,并最终将在深部流体的来源、运移方式及其在运移过程中的水-岩反应,以及深部流体对形成大型、超大型矿床的控制因素等方面取得重要的成果。

References

- Anderson E L. 1987. Composition of the earth[J]. Science , 243 : 367 ~ 370 .
- Badding J V, Hemley R J and Mao H K. 1978 . High-pressure chemistry of hydrogen in metals: in situ study of iron hydride[J]. Nature , 353 : 421 ~ 424 .
- Bailey D K. 1978 . Continental rifting mantle degassing[A]. In: Neumann and Ramberg , eds . Petrology and Geochemistry of Continental Rifting[C]. 1 ~ 13 .
- Bi S W. 1996 . A universal theory of system science for fluids in the earth [J]. Earth Science Frontiers (China University of Geoscience , Beijing) , 3(3 - 4) : 1 ~ 8(in Chinese with English abstract) .
- Bodinier J L, Vasseur G and Vernieres J. 1990 . Mechanism of mantle metasomatism: geochemical evidence from Lherz orogenic peridotite [J]. Journal of Petrology , 31 : 597 ~ 628 .
- Boettcher A L and O'Neil J R. 1980 . Stable isotope, chemical and petrographic studies of high-pressure amphiboles and micas: evidence for metasomatism in the mantle source regions of alkali basalts and kimberlites[J]. Am. J. Sci. , 280(A) : 594 ~ 621 .
- Boyd S R, Pineau F and Jowoy M. 1994 . Modelling the growth of natural diamond[J]. Chemical Geology , 116 : 29 ~ 42 .
- Breddam K and Kurz M D. 2001 . Helium isotope signatures of Iceland alkaline lavas[J]. EOS Trans. Am. Geophys. Union. , 82 : 1315 .
- Burnard P G, Hu R, Turner G, et al. 1999 . Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Aulashan gold deposits, Yunnan Province, China[J]. Geochim. Cosmochim. Acta , 63 : 1595 ~ 1604 .
- Cai M H, Mao J W, Liang T, et al. 2004 . Helium and argon isotopic components of fluid inclusions in Dachang Tin-polymetallic deposit and their geological implications[J]. Mineral Deposits , 23(2) : 225 ~ 231(in Chinese with English abstract) .
- Cao R L and Zhu H S. 1995 . The mantle fluid and metallogeny[J]. Advance in Earth Science , 10(4) : 324 ~ 329 (in Chinese with English abstract) .
- Cao Z M, Wen C Q, Li B H, et al. 1995 . The discussion on the genesis of the first tellurium deposit, China[J]. Science in China (Series B) , 25(6) : 647 ~ 654 (in Chinese) .
- Chen F. 1994 . The discovery of hydrogen in the interior of earth[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry , 13(3) : 156 ~ 157 (in Chinese) .
- Chen F. 1996 . Hydrogen—the important source of fluid in earth interior [J]. Earth Science Frontiers (China University of Geoscience , Beijing) , 3(3-4) : 72 ~ 79 (in Chinese with English abstract) .
- Chen Y C, Mao J W, L R N, et al. 1996 . Geology and geochemistry of the Dashuigou tellurium (gold) deposit in western Sichuan, China [J]. Beijing: Atomic Energy Press. 1 ~ 146 (in Chinese with English abstract) .
- Chen Y X, Liu D L, Y X Y, et al. 1999 . A primary study on the relationship between the Tancheng-Lujiang fault system and mantle-derived magmatogenic CO_2 in east China[J]. Geology and Geochemistry , 27(1) : 38 ~ 48 (in Chinese with English abstract) .
- Chu X L. 1995 . The preliminary study on C and O isotope in CO_2 fluid inclusions in ultramafic xenolith, east China[J]. Chinese Science Bulletin , 40(1) : 63 ~ 64 (in Chinese) .
- Chu X L. 1996 . Carbon isotopes in mantle[J]. Advance in Earth Sciences , 11(5) : 447 ~ 452(in Chinese with English abstract) .
- Dai J X, Song Y, Dai C S, et al. 1995 . The inorganic gas in east China and its gas-forming condition[M]. Beijing: Science Press. 1 ~ 211 (in Chinese with English abstract) .
- Dawson J B and Pinkerton H J. 1980 . Eruption of Oldoinyo Lengai, Tanzania: exceptionally viscous and large carbonatite lava flows and evidence for coexisting silicate and carbonatite magma[J]. Geology , 22 : 709 ~ 802 .
- Deines P, Harris J W and Gurney J J. 1987 . Carbon isotopic composition, nitrogen content and inclusion composition of diamonds from the Roberts Victor kimberlite, South Africa: evidence for $\delta^{13}C$ depletion in the mantle[J]. Geochim. Cosmochim. Acta , 51 : 1227 ~ 1243 .
- Deines P, Harris J W, Robinson D N, et al. 1991 . Carbon and oxygen isotope variation in diamond and graphite eclogites from Orapa, Botswana[J]. Geochim. Cosmochim. Acta , 55 : 515 ~ 524 .
- Deines P. 1992 . Mantle carbon: concentration, mode of occurrence and isotopic composition[A]. In: Schidlowski, et al. , eds . Early organic evolution: implications for mineral and energy resources[C]. Berlin: Springer-Verlag. 133 ~ 146 .
- Deng J F. 1996 . Continental root and plume structure in China, the key to continental geodynamics[M]. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese with English abstract) .
- Ding Q F and Sun F Y. 2001 . Advance on mantle-derived fluid[J]. Geological Science and Technology Information , 20(3) : 21 ~ 30(in Chinese with English abstract) .
- Du L T. 1983 . Geochemistry common features and classification of alkaline metasomatism[J]. Mineral Deposits , 2(1) : 33 ~ 41 (in Chinese with English abstract) .
- Du L T. 1986 . Geochemical principles of alkaline metasomatism[J]. Science in China (Series B) , 81 ~ 90 (in Chinese) .
- Du L T. 1988 . H-A-C-O-N-S mantle ichor[J]. Geotectonica et Metallogenic , 12(1) : 87 ~ 94 (in Chinese with English abstract) .
- Du L T. 1989 . The great significance of the mantle ichor, H-A-C-O-N-S fluid[J]. Geotectonica et Metallogenic , 13(1) : 91 ~ 98 (in Chinese with English abstract) .
- Du L T. 1990 . Hypothesis of mantle ichor (HACOONS)[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry , (1) : 39 ~ 42 (in Chinese) .

- Du L T. 1996a. Geochemical principles of hydrocarbon alkali-fluids (reconstruction of hydrothermalism and magmatism theory)[M]. Beijing: Science Press. 1 ~ 552 (in Chinese with English abstract).
- Du L T. 1996b. The relationship between crustal fluids and mantle fluids [J]. Earth Science Frontiers (China University of Geoscience, Beijing), 3(4): 172 ~ 180 (in Chinese with English abstract).
- Eggler D H. 1987. Solubility of major and trace elements in mantle metasomatic fluids: experimental constraints[A]. In: Menzies, ed. Mantle Metasomatism[C]. 21 ~ 39.
- Francis D M. 1976. The origin of amphibole in lherzolite xenoliths from Nunivak Island, Alaska[J]. Journal of Petrology, 17(3): 357 ~ 378.
- Frey F A and Green D H. 1974. The mineralogy, geochemistry and origin of lherzolite inclusions in Victorian basanities[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 38(7): 1023 ~ 1059.
- Galimov E M. 1985. The relation between formation conditions and variation in isotope composition of diamonds[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 49(1): 118 ~ 142.
- Gerlach T M. 1991. Present-day CO₂ emissions from volcanoes[J]. EOS, 72(23): 249 ~ 255.
- Giardini A, Melton C and Mitchell R. 1982. The nature of the upper 400 km of the Earth and its potential as the source for non-biogenic petroleum[J]. J. Petrol. Geol., 5: 173 ~ 190.
- Giggenbach W F. 1993. Isotopic composition of helium and CO₂ and CH₄ contents in gases produced along the New Zealand Part of a convergent plate boundary[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 57(14): 3427 ~ 3455.
- Girod M, Dautria, J M and De Givoani R. 1981. A first insight into the constitution of the upper mantle under the Hoggar area (southern Algeria): the lherzolite in the alkali basalts[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 77(1): 66 ~ 73.
- He Y, Wang D Y, Zhu Z Q, et al. 1995. Possibility of gold-bearing volcanic and its significance in nongas-field, Shengli gas field, China [J]. Mineral Deposit, 14(3): 291 ~ 292 (in Chinese with English abstract).
- He Y, Mao J W, Wang R T, et al. 2001a. Carbon dioxide-rich and gold-bearing fluids degassed from mantle-derived magma, reality and possibility[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geoscience), 8(4): 265 ~ 269 (in Chinese with English abstract).
- He Y, Wang D Y and Liao S L. 2001b. Volcanic rocks, basin evolution and related CO₂-Au mineralization in Shengli oil-field, China[J]. Chinese Journal of Geology, 36(4): 454 ~ 464 (in Chinese with English abstract).
- Hiyagon H and Ozima M. 1986. Partition of noble gases between olivine and basalt melt[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 50: 2045 ~ 2057.
- Holloway J R. 1971. Composition of fluid phase solutes in a basalt-H₂O-CO₂ system[J]. Geological Society of American Bulletin, 82: 233 ~ 238.
- Hu R Z, Bi X W, Turner G, et al. 1999. Helium and argon isotopic geochemistry of gold mineralization fluid of Ailaoshan gold mineralization belt[J]. Science in China (Series D), 29(4): 321 ~ 330 (in Chinese).
- Hu W X, Sun R, Zhang W L, et al. 2001. Characteristics of gold ore-forming fluids and metallogenic process by mutual mixing and acting of deep-derived fluids and shallow-seeped ones[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geoscience), 8(4): 281 ~ 288 (in Chinese with English abstract).
- Hua R M, Yang S B, Li B L, et al. 2001. Preliminary study on the concentrations of gold and other ore elements in crude oil and oil-field water of the Jiyang depression[J]. Geology J. China Univ., 7(3): 345 ~ 351 (in Chinese with English abstract).
- Jaques A L, O'Neill H St C and Smith C B. 1990. Diamondiferous peridotite xenoliths from the Argyle (AKI) lamproite pipe, Western Australia[J]. Contributions to Mineral Petrology, 104: 255 ~ 275.
- Jin Z J, Zhang L P, Zeng C H, et al. 2002. Compound genesis hydrocarbon related to Dongying depression and mantle-derived CO₂-rich fluids[J]. Chinese Science Bulletin, 47(16): 1276 ~ 1280 (in Chinese).
- Jones A P, Smith J V and Dawson J B. 1983. Glasses in mantle xenoliths from Olmani, Tanzania[J]. Journal of Geology, 91(2): 167 ~ 178.
- Kanoeka I and Takaoka N. 1985. Noble-gas state in the earth's interior - some constraints on the present state[J]. Chemical Geology, 52: 75 ~ 95.
- Kurz M D. 1993. Mantle heterogeneity beneath oceanic island: some inference from isotopes[J]. Proc. Roy. Soc. London, A342: 91 ~ 103.
- Kyser T K and O'Neil J R. 1984. Hydrogen isotope systematics of submarine basalts[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 48: 2123 ~ 2133.
- Li N. 1993. Hollow structure model of the earth[J]. Bulletin of the Institute of Mineral Deposit, Chinese Academy of Geological Science, 26(1): 1 ~ 27 (in Chinese with English abstract).
- Li T. 1976. The earth content of chemical element[J]. Geochimica, 5(3): 167 ~ 174 (in Chinese with English abstract).
- Li X F, Mao J W, Wang D H, et al. 2004. Helium and argon isotopic systematics in fluid inclusion of the gold deposits along the Daduhe river, Sichuan Province, Southwestern China[J]. Acta Geologica Sinica, 78(2): 403 ~ 410 (in Chinese with English abstract).
- Li X Q and Dai J X. 1997. Geochemical characteristics and genetic analysis of CO₂ fields (pools), in East China[J]. Experimental Petroleum Geology, 19: 215 ~ 221 (in Chinese with English abstract).
- Lin C Y, Xu Y G, Shi L B, et al. 1994. K- and Na-rich glasses in mantle xenoliths from Yitong, Jilin Province, China: Evidence for upper mantle fluids[J]. Chinese Science Bulletin, 39(9): 820 ~ 823 (in Chinese).
- Liu C Q, Huang Z L, Li H P, et al. 2001. The geofluid in the mantle and its role in ore-forming processes[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geoscience), 8(4): 231 ~ 243 (in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Zhang H F, Sun J G, et al. 2003. Geochemical research on C-O and Sr-Nd isotopes of mantle-derived rocks from Shandong Province, China[J]. Science in China (Series D), 33(10): 921 ~ 930 (in Chinese).
- Lloyd F E. 1987. Characterization of mantle fluids in spinel lherzolites and alkali clinopyroxenites from the West Eifel and Southwest Uganda[A]. In: Menzies, ed. Mantle Metasomatism[M]. 91 ~ 120.
- Lollar B S, Ballentine C J and O'Nions R K. 1997. The fate of mantle derived carbon in a continental sedimentary basin: Integration of C/He relationship and stable isotope signature[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 61(1): 2295 ~ 2307.
- Lu F X. 1996. Deep mantle and its fluids[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geoscience), 3(4): 181 ~ 186 (in Chinese with English abstract).
- Lundstrom C C. 1995. Mantle melting and basalt extraction by equilibrium porous flow[J]. Science, 270: 1958 ~ 1960.
- Maaloe S and Prinzlau I. 1979. Natural partial melting of spinel lherzo-

- litef J]. *Journal of Petrology*, 20(4) : 727 ~ 741 .
- Mao H K and Hemley R J. 1992 . Hydrogen at high pressure [J]. *Journal of American Sciences*, 80(5 - 6) : 234 ~ 247 .
- Mao J W, Chen Y C and Li H Y. 1997 . Study of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating on the Dashuigou Tellurium Deposit, Sichuan [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(4) : 397 ~ 399 (In Chinese with English Abstract) .
- Mao J W and Wei J X. 2000 . Helium and argon isotopic components of fluid inclusion and tracing to the source of metallogenic fluid in the Dashuigou tellurium deposit of Sichuan Province [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(1) : 58 ~ 61 (in Chinese with English abstract) .
- Mao J W and Li Y Q. 2001 . Fluid inclusions of the Dongping gold telluride deposit in Hebei Province, China: involvement of mantle fluid in metallogenesis [J]. *Mineral Deposits*, 20(1) : 23 ~ 36 (in Chinese with English abstract) .
- Mao J W, Kerrich Robert, Li H Y, et al. 2002a . High $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in the Wangu gold deposit, Hunan Province, China: implications for mantle fluid along the Tanlu deep fault zone [J]. *Geochemical Journal*, 36(3) : 197 ~ 208 .
- Mao J W, Wang Y T, Ding T P, et al. 2002b . Dashuigou tellurium deposit in Sichuan Province, China: an example of mantle fluid evolving in mineralized process: evidences from C, O, H, S Isotopes [J]. *Resource Geology*, 52(1) : 15 ~ 23 .
- Mao J W, Li Y Q, Goldfrab R, et al. 2003 . Fluid inclusions noble gas studies of the Dongping gold deposit, Hebei Province, China: A mantle connection for mineralization [J]. *Econ. Geol.*, 98 : 517 ~ 534 .
- Matsumoto T, Honda M and McDougall I. 2000 . Noble gases in pyroxenites and metasomated peridotites from the newer volcanics, southeastern Australia: implications for mantle metasomatism [J]. *Chem. Geol.*, 168 : 49 ~ 73 .
- Matsumoto T, Chen Y and Matsuda J. 2001 . Concomitant occurrence of primordial and recycled gases in the Earth's mantle [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 185 : 35 ~ 47 .
- Matsumoto T, Seta A and Matsuda J. 2002 . Helium in the Archean komatiites revised: significantly high $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios revealed by fractional crushing gas extraction [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 196 : 213 ~ 225 .
- Menzies M A and Halliday A. 1980 . Lithosphere domains beneath the Archean and Proterozoic crust of Scotland [J]. *Journal of Petrology*, 275 ~ 302 .
- Mysen B O and Botcher A L. 1975 . Melting of a hydrous mantle: 1 . phase relations of natural peridotite at high pressure and temperatures with controlled activities of water, carbon dioxide and hydrogen [J]. *Journal of Petrology*, 16(3) : 549 ~ 593 .
- Navon O, Hutcheon I D and Rossman G R. 1988 . Mantle derived fluid in diamond micro-inclusions [J]. *Nature*, 335(27) : 784 ~ 789 .
- Ningwu Research Group. 1978 . Ningwu porphyrite iron ores [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 196p (in Chinese) .
- Ozima M and Podosek F A. 2002 . Noble gas geochemistry [M]. Cambridge University Press. 1 ~ 217 .
- Pasteris J D. 1987 . Fluid inclusions in mantle xenoliths [A]. In: Nixon P H, ed. *Mantle xenoliths* [C]. John Wiley and Sons. 691 ~ 707 .
- Pineau F and Metzger E A. 1990 . Carbon isotopes in xenoliths from the Hualalai volcano, Hawaii, and the generation of isotopic variability [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54 : 2117 ~ 2127 .
- Porcelli D R, O'Nions R K, Galer S G, et al. 1992 . Isotopic relationship of volatile and lithophile trace elements in continental ultramafic xenoliths [J]. *Contribution of Mineralogy and Petrology*, 110 : 528 ~ 538 .
- Qi J F, Zhang Y W and Lu K Z. 1995 . Extensional pattern and dynamic process of the Cenozoic rifting basin in the Bohai bay [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 14(4) : 216 ~ 323 (in Chinese with English abstract) .
- Rong J S and Du L T. 1995 . Godization of orthopyroxene in mantle xenoliths [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(1) : 28 ~ 42 (in Chinese with English abstract) .
- Scarsi P. 2000 . Fractional extraction of helium by crushing of olivine and clinopyroxene: effects on the $^3\text{He}/^4\text{He}$ measured ratio [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64(21) : 3751 ~ 3762 .
- Schneider M E and Egger D H. 1986 . Fluids in equilibrium with peridotite minerals: implication from mantle metasomatism [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50(3) : 711 ~ 724 .
- Schrauder M and Navon O. 1994 . Hydrous and carbonatitic mantle fluids in fibrous diamonds from Jwaneng, Botswana [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58(2) : 761 ~ 771 .
- Sheppard S M F and Epstein S. 1970 . D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of minerals of possible mantle or lower crustal origin [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 9 : 232 ~ 239 .
- Spera F J. 1987 . Dynamics of tranthosphere migration of metasomatic fluids and alkaline magma [A]. In: Menzies, ed. *Mantle Metasomatism* [C]. 1 ~ 18 .
- Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P, et al. 1995 . Resolving mantle and crustal contribution to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa-W-Mo mineralization, South Korea [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59 : 4663 ~ 4673 .
- Sugisaki R and Immure K. 1994 . Mantle hydrocarbons: Abiotic and biotic [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58(11) : 2527 ~ 2542 .
- Sun F Y, Shi Z L and Feng B Z. 1995 . Gold ore geology, lithogenesis and metallogenesis related to the differentiation of mantle-derived C-H-O fluids in Jiaodong Peninsula, Eastern China [M]. Changchun: Jilin People's Press. 1 ~ 70 (in Chinese with English abstract) .
- Tao M X, Shen P, Xu Y C, et al. 1997 . Characteristics and formation conditions of mantle source helium reservoir in North Jiangsu Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 8(3) : 1 ~ 8 (in Chinese with English Abstract) .
- Tao M X, Xu Y C, Shen P, et al. 1996 . Tectonic and geochemical characteristics and reserved conditions of a mantle source gas accumulation zone in eastern China [J]. *Science in China (Series D)*, 26(6) : 531 ~ 536 (in Chinese) .
- Taylor H P. 1980 . The effects of assimilation of country rocks by magma on $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ systematics in igneous rocks [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 47 : 243 ~ 254 .
- Trull, et al. 1993 . C-He systematics in hotspot xenoliths: implications for mantle carbon content and carbon recycling [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 118 : 43 ~ 64 .
- Wang B D, Niu S Y, Sun A Q, et al. 2003 . Helium and argon and lead isotopes in gold deposits and their source of ore-forming materials in north Hebei Province [J]. *Geochimica*, 32(2) : 181 ~ 187 (in Chinese with English abstract) .
- Wu M B and Liu C Y. 2003 . Carbon and hydrogen existing forms and their isotopic compositions in mantle fluids [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 24(4) : 273 ~ 276 (in Chinese with English abstract) .
- Wyllie P J. 1987 . Metasomatism and fluid generation in mantle xenoliths [A]. In: Nixon P H, ed. *Mantle Xenoliths* [C]. John Wiley & Sons. 609 ~ 622 .
- Xia L Q, Xia Z C and Xu X Y. 1996 . Inclusion of xenolith in mantle peridotites, magmatic inclusion and glass [A]. In: Du L T, Liu R X, Deng J F, eds. *Geochemistry of mantle fluids and ashenor*

- sphere[C]. Beijing: Geol. Pub. House. 233 ~ 234.
- Xu D, Zhou Y Q, Zhu Y N, et al. 1999. $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$ ratio of mantle-derived CO_2 gas pools and its formation mechanism in East China[J]. *Oil & Gas Geology*, 20(4): 290 ~ 294(in Chinese with English abstract).
- Xu S J, Fang Z, Matsumoto T, et al. 2003. Helium and argon isotopes in mantle megacryst minerals from Nushan and Yingfengling in Southeast China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(10): 1087 ~ 1091(in Chinese).
- Xu S and Liu C Q. 1997. Helium isotopic compositions of mantle-derived xenoliths in the eastern China and its implication to the geochemical evolution of mantle[J]. *Chinese Science Bulletin*, 42(11): 1190 ~ 1193(in Chinese).
- Xu S and Liu C Q. 2002. Noble gas abundances and isotopic compositions in mantle-derived xenoliths, NE China[J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 47(2): 141 ~ 146(in Chinese).
- Xu Y C, Shen P, Liu W H, et al. 1998. Geochemistry of rare gas in natural gas[M]. Beijing: Science and Technology Press. 1 ~ 10(in Chinese with English abstract).
- Yang L and Jin Z J. 2001. The effect of hydrogen from deep fluid on hydrocarbon generation[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geoscience, Beijing)*, 8(4): 337 ~ 342(in Chinese with English abstract).
- Yang X M and Yang X Y. 1998. Carbonatite: A probe rock for the tectonic setting of continental lithosphere and mantle metasomatism [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 41(Supp.): 228 ~ 235(in Chinese with English abstract).
- Yang X Y, Liu D L and Tao S Z. 1999. Compositions and implications of inclusions in the typical mantle rocks from East China[J]. *Acta Petrol. Sinica*, 20(1): 19 ~ 23(in Chinese with English abstract).
- Zhang H X, Xu Z F, Huang Z L, et al. 2000. The primary characters and origin of mantle fluids[J]. *Geology- Geochemistry*, 28(2): 1 ~ 7(in Chinese with English abstract).
- Zhang L C, Shen Y C, Li H M, et al. 2002. Helium and argon isotopic composition of fluid inclusions and tracing to the source of ore-forming fluids for Jiaodong gold deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 559 ~ 565(in Chinese with English abstract).
- Zhang R H and Hu S M. 2001. The evolution of deep earth fluids and ore genesis[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geoscience)*, 8(4): 297 ~ 310(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y and Zindler A. 1993. Distribution and evolution of carbon and nitrogen in earth[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 117: 331 ~ 345.
- Zhao D S, Xiao Z Y and Wang Y F. 1983. Characteristics and genesis of Cenozoic volcanic rocks in Tanlu fractured zone and its neighboring area[J]. *Acta Geologica Sinica*, (2): 128 ~ 140(in Chinese with English abstract).
- Zheng H F and Feng J L. 1987. Glass microlites in the inclusions of the Hannouba Basalt and Their significance[J]. *Geological Review*, 33(1): 12 ~ 31(in Chinese with English abstract).
- Zheng J P, Lu F X, Guo H, et al. 1994. Study of fluid inclusions in diamonds[J]. *Chinese Science Bulletin*, 39(3): 253 ~ 256(in Chinese).
- Zheng Y F. 1999. Stable isotope geochemistry of mantle, in chemical geodynamics[M]. Beijing: Science Press. 62 ~ 118(in Chinese with English abstract).
- Zhu Y F. 1995. Mantle heterogeneity and mechanism of mantle fluid's formation[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, (1): 42 ~ 44(in Chinese).
- Zindler A and Hart S R. 1986. Chemical geodynamics[J]. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14: 493 ~ 571.

附中文参考文献

- 毕思文. 1996. 地球科学流体系统科学统一理论[J]. *地学前缘*, 3(3-4): 1 ~ 8.
- 蔡明海, 毛景文, 梁婷, 等. 2004. 广西大厂锡多金属矿床氦、氩同位素特征及其地质意义[J]. *矿床地质*, 23(2): 225 ~ 231.
- 曹荣龙, 朱华寿. 1995. 地幔流体与成矿作用[J]. *地球科学进展*, 10(4): 324 ~ 329.
- 曹志敏, 温齐春, 李保华, 等. 1995. 首例独立砾矿床成因探讨[J]. *中国科学(B辑)*, 25(6): 647 ~ 654.
- 陈丰. 1994. 地球深部分子氢(H_2)的发现[J]. *矿物岩石地球化学通讯*, 13(3): 156 ~ 157.
- 陈丰. 1996. 氢——地球深部流体的重要源泉[J]. *地学前缘*, 3(3-4): 72 ~ 79.
- 陈永见, 刘德良, 杨晓勇, 等. 1999. 郯庐断裂系统与中国东部幔源岩浆成因 CO_2 关系的初探[J]. *地质地球化学*, 27(1): 38 ~ 48.
- 陈毓川, 毛景文, 骆耀南, 等. 1996. 四川大水沟砾(金)矿床地质和地球化学[J]. 北京: 原子能出版社. 1 ~ 146.
- 储雪蕾. 1995. 中国东部新生代玄武岩中超镁铁质捕虏体中的 CO_2 包裹体的碳氧同位素初步研究[J]. *科学通报*, 40(1): 63 ~ 64.
- 储雪蕾. 1996. 地幔的碳同位素[J]. *地球科学进展*, 11(5): 447 ~ 452.
- 戴金星, 宋岩, 戴春森, 等. 1995. 中国东部无机成因气藏及其气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社. 1 ~ 211.
- 邓晋福. 1996. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社.
- 丁清峰, 孙丰月. 2001. 地幔流体研究进展[J]. *地质科技情报*, 20(3): 21 ~ 30.
- 杜乐天. 1983. 碱交代作用的地球化学共性和归类[J]. *矿床地质*, 2(1): 33 ~ 41.
- 杜乐天. 1986. 碱交代作用的地球化学原理[J]. *中国科学(B)*, (1): 81 ~ 90.
- 杜乐天. 1988. 幔汁 H-A-C-O-N-S 流体[J]. *大地构造与成矿学*, 12(1): 87 ~ 94.
- 杜乐天. 1989. 幔汁(H-A-C-O-N-S 流体)的重大意义[J]. *大地构造与成矿学*, 13(1): 91 ~ 99.
- 杜乐天. 1990. 幔汁(H-A-C-O-N-S)假说[J]. *矿物岩石地球化学通讯*, (1): 39 ~ 42.
- 杜乐天. 1996a. 轻碱流体地球化学原理——重论热液作用和岩浆作用[M]. 北京: 科学出版社. 1 ~ 552.
- 杜乐天. 1996b. 地壳流体与地幔流体间的关系[J]. *地学前缘*, 3(4): 172 ~ 180.
- 赫英, 王定一, 祝总祺, 等. 1995. 胜利油田非气藏区火山岩的含金性及其意义[J]. *矿床地质*, 14(3): 291 ~ 292.
- 赫英, 毛景文, 王瑞廷, 等. 2001a. 幔源岩浆去气形成富二氧化碳含金流体——可能性与现实性[J]. *地学前缘*, 8(4): 265 ~ 269.
- 赫英, 王定一, 廖胜利. 2001b. 胜利油田火山岩类盆地演化及其 CO_2 -Au 成藏效应[J]. *地质科学*, 36(4): 454 ~ 464.
- 胡瑞忠, 毕献武, Turner G. 等. 1999. 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)*, 29(4): 321 ~ 330.
- 胡文暄, 孙睿, 张文兰, 等. 2001. 金成矿流体的特点及深-浅部流体相互作用成矿机制[J]. *地学前缘*, 8(4): 281 ~ 288.
- 华仁民, 杨申铤, 李保利, 等. 2001. 济阳拗陷原油及油田水中金银等元素含量研究[J]. *高校地质学报*, 7(3): 345 ~ 351.
- 金之钧, 张刘平, 曾溅辉, 等. 2002. 东营凹陷与幔源富 CO_2 流体有关的复合成因烷烃[J]. *科学通报*, 47(16): 1276 ~ 1280.
- 黎诺. 1993. 地球空心结构模式[J]. *中国地质科学院矿床所刊*, 26(1): 1 ~ 27.

- 黎彤. 1976. 化学元素的地球丰度[J]. 地球化学, (3): 167~174.
- 李先奇, 戴金星. 1997. 中国东部二氧化碳气田(藏)的地化特征及成因分析[J]. 石油实验地质, 19: 215~221.
- 李晓峰, 毛景文, 王登红, 等. 2004. 四川大渡河金矿田成矿流体来源的氩氩硫氧同位素示踪[J]. 地质学报, 78(2): 403~410.
- 林传勇, 徐义刚, 史兰斌, 等. 1994. 幔源包体中 K, Na 玻璃体: 上地幔流体的证据[J]. 科学通报, 39(9): 820~823.
- 刘从强, 黄智龙, 李和平, 等. 2001. 地幔流体及其成矿作用[J]. 地学前缘, 8(4): 231~243.
- 刘建明, 张宏福, 孙景贵, 等. 2003. 山东幔源岩浆岩的碳-氧和锶-钕同位素地球化学研究[J]. 中国科学(D辑), 33(10): 921~930.
- 路风香. 1996. 深部地幔及深部流体[J]. 地学前缘, 3(4): 181~186.
- 毛景文, 陈毓川, 李红艳. 1997. 四川石棉县大水沟碲矿床⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄研究[J]. 地球学报, 18(4): 397~399.
- 毛景文, 李荫清. 2001. 河北省东坪碲化物金矿床流体包裹体研究: 地幔流体与成矿关系[J]. 矿床地质, 20(1): 23~36.
- 毛景文, 魏家秀. 2000. 大水沟碲矿床流体包裹体的 He、Ar 同位素组成及其示踪成矿流体的来源[J]. 地球学报, 21(1): 58~61.
- 宁芜研究项目编写小组. 1978. 宁芜玢岩铁矿[M]. 北京: 地质出版社. 196页.
- 漆家福, 张一伟, 陆克政. 1995. 渤海湾新生代裂陷盆地的伸展模式及其动力学过程[J]. 石油实验地质, 14(4): 216~323.
- 戎嘉树, 杜乐天. 1995. 地幔包体中斜方辉石 GOD 化现象[J]. 岩石学报, 11(1): 28~42.
- 孙丰月, 石准立, 冯本智. 1995. 胶东金矿地质及幔源 C-H-O 流体分异成岩成矿[J]. 长春: 吉林人民出版社. 1~170.
- 陶明信, 徐永昌, 沈平, 等. 1996. 中国东部幔源气藏集聚带的大地构造与地球化学特征及成藏条件[J]. 中国科学(D辑), 26(6): 531~536.
- 陶明信, 沈平, 徐永昌, 等. 1997. 苏北盆地地幔源氢气藏的特征与形成条件[J]. 天然气地球化学, 8(3): 1~8.
- 王宝德, 牛树银, 孙爱群, 等. 2003. 冀北地区金矿床氩、氩、铅同位素组成及其成矿物质来源[J]. 地球化学, 32(2): 181~187.
- 吴茂炳, 刘春燕. 2003. 地幔流体中碳氢的赋存形式及其同位素组成[J]. 新疆石油地质, 24(4): 273~276.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996. 地幔橄辉岩捕虏体中的包裹体、岩浆包裹体和玻璃[A]. 见: 杜乐天, 刘若新, 邓晋福, 主编. 地幔流体和软流层(体)地球化学[C]. 北京: 地质出版社. 233~234.
- 徐胜, 刘从强. 1997. 中国东部地幔包体的氩同位素组成及其地幔地球化学演化意义[J]. 科学通报, 42(11): 1190~1193.
- 徐胜, 刘从强. 2002. 我国东北部幔源包体中稀有气体丰度和同位素组成[J]. 科学通报, 47(2): 141~146.
- 徐士进, 方中, 松本拓也, 等. 2003. 女山和英峰岭地幔巨晶矿物中的 He 和 Ar 同位素特征及其地质意义[J]. 科学通报, 48(10): 1087~1091.
- 徐永昌. 1998. 天然气中稀有气体地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 1~10.
- 许多, 周瑶琪, 朱岳年, 等. 1999. 中国东部幔源 CO₂ 气藏的 CO₂/He 比率及形成机制[J]. 石油天然气地质, 20(4): 290~294.
- 杨雷, 金之钧. 2001. 深部流体中氢的油气成藏效应初探[J]. 地学前缘, 8(4): 337~342.
- 杨晓勇, 刘德良, 陶士振. 1999. 中国东部典型地幔岩中包裹体成分研究及意义[J]. 石油学报, (1): 19~23.
- 杨学明, 杨晓勇. 1998. 碳酸岩是大陆岩石圈构造背景和地幔交代作用的指示岩石[J]. 地球物理学报, 41(增刊): 228~235.
- 张鸿翔, 徐志芳, 黄智龙, 等. 2000. 地幔流体基本特征及成因[J]. 地质地球化学, 28(2): 1~7.
- 张连昌, 沈远超, 李厚民等. 2002. 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, 18(4): 559~565.
- 张荣华, 胡书敏. 2001. 地球深部流体演化与矿石成因[J]. 地学前缘, 8(4): 297~310.
- 赵大升, 肖增岳, 王艺芬. 1983. 郟庐断裂带及其邻近地区的新生代火山岩特征及成因探讨[J]. 地质学报, (2): 128~140.
- 郑海飞, 冯家麟. 1987. 汉诺坝玄武岩包体中微晶-玻璃及其意义[J]. 地质论评, 33(1): 12~31.
- 郑建平, 路风香, 郭晖, 等. 1994. 金刚石中流体包裹体的研究[J]. 科学通报, 39(3): 253~256.
- 郑永飞. 1999. 地幔稳定同位素地球化学[A]. 见: 郑永飞, 主编. 化学地球动力学[C]. 北京: 科学出版社. 62~118.
- 朱永峰. 1995. 地幔的不均一性及地幔流体的形成机制[J]. 矿物岩石地球化学通讯, (1): 42~44.

Mantle-derived Fluids in Relation to Ore-forming and Oil-forming Processes

Mao Jingwen and Li Xiaofeng

(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The researches on mantle-derived fluids in relation to ore-forming and oil-forming processes constitute one of the forefront fields in the earth science. Based on the research results of this fields in combination with the achievements of the project "Deep Fluids Ore-forming System" supported by the Major State Basic Research Programs of People's Republic of China, this paper has reviewed the compositions, types and migration forms of mantle-derived fluids, discussed O, H, C and noble gas isotopes of mantle-derived fluids and proposed the origins of mantle-derived fluids and its tectonic setting in the active areas. The current researches on the relationships of mantle-derived fluids to the formation of metallic deposits and oil-gas field basins are also reported in this paper.

Key words: geology, mantle-derived fluids, oil-gas, metal deposit, noble gas isotope, stable isotope