

核幔成矿物质(流体)的反重力迁移 ——地幔热柱多级演化成矿作用

牛树银¹, 侯增谦², 孙爱群¹

(1. 石家庄经济学院 资源环境与工程系, 河北 石家庄 050031 2. 中国地质科学院 矿床地质研究所, 北京 100037)

摘 要 地壳中矿床分布极不均匀,这与地球的形成与演化密切相关。在地球演化的早期,由于在引力收缩和热力膨胀的统一作用支配下,放射性、卤族、稀有、稀土元素及碱金属向上迁移,而贵金属、有色、铁族、铂族等密度较大的元素则有逐渐向地核聚集的趋势,以至于铁、镍、金等元素主要聚集在地核之中。但是,在地球形成圈层结构的同时,由于地球内外温度差、压力差、粘度差等的存在,导致地球发生以地幔热柱多级演化为主要形式的垂向物质运动,两者互为依存,并构成幔壳运动的原动力。地幔热柱多级演化沟通了深部矿质的迁移通道,聚集在地核及核幔界面上的气态金等重元素得以作为地幔热柱的热物质流,呈反重力迁移至岩石圈,并进而以气-液态向近地表迁移,在有利的构造扩容带中聚集成矿。这可能是金银铜铅锌等多种元素的重要成矿作用方式。

关键词 地幔热柱, 幔枝构造, 反重力迁移, 成矿作用

中图分类号: P59; P611 文献标识码: A 文章编号: 1005-2321(2001)03-0095-07

矿床(点)在地壳中的分布极不均匀,这种不均匀表现在时间演化和区域分布两个方面。地史演化上成矿作用表现为成矿物质由少到多,矿床类型由简到繁,成矿频率由低到高,聚矿能力由弱到强,中生代达到极盛^[1]。在分布区域上,常常在局部范围或区段形成某种或某几种元素的工业富集,甚至构成大中型矿床连片分布的巨量堆积,即成矿集中区或矿聚区,如巨大的环太平洋成矿带。中国东部位于濒西太平洋中段,中生代以来亦经历了翻天覆地之巨变,且导致了大规模成矿作用的发生,以致于出现了诸如岩石圈-软流圈系统大灾变^[2]、火山-岩浆大爆发^[3]、成矿大爆发^[4,5]等一系列新认识。这些时空巨变主要取决于地壳运动、构造变形、地内流体、岩浆活动、变质作用、地球物化场等控矿条件的变化。而这些条件的变化又取决于地球的深部过程,尤其是成矿物质的深部来源。因此,地幔热柱多级演化控制的成矿物质反重力运移可能是认识巨量矿质堆积的钥匙。

1 成矿元素的深部来源

地球是太阳系中一个不断演化着的行星(其形成多倾向于宇宙爆炸说),组成地球的各种元素在地球应力场的支配下亦按自身的特征在演化分异着。其总体演化趋势是放射性元素、卤族元素、稀有元素、稀土元素及碱金属元素等向上运移,主要向地壳聚集;而贵金属元素、有色金属元素、铁族元素、铂族元素等比重较大的元素有逐渐向地核聚集的趋势(表1)。以金为例,其在地壳、地幔、地核的丰度值分别为 0.003×10^{-6} 、 0.001×10^{-6} 、 0.900×10^{-6} ^[6],这可能与金的强烈亲铁性有关。在地球形成初期,金属铁镍的下沉成核作用使地球壳幔中的金多被带至地核之中,现在地壳中的金应该是随地幔热柱活动由地核迁移上来的,而地幔只是金的传输通道,金充其量也只是扮演了匆匆过客而已。因此,造成了金在地核中最富、地幔中最贫的分布特征。与宇宙中的陨石相比较(未进行充分分异作用,代表地球的初始状态),球粒陨石中的金含量大约在 $(0.4482.90) \times 10^{-6}$ 之间,陨铁中为 $(0.0558.744) \times 10^{-6}$,陨硫铁中为 $(0.078.00) \times 10^{-6}$,普遍比地壳丰度值高约140~2200倍左

收稿日期: 2000-12-15; 修订日期: 2001-07-13

基金项目: 原地矿部“跨世纪科技人才培养计划项目”(96-08); 教育部高等学校骨干教师资助计划项目(J-00-25)

作者简介: 牛树银(1952—),男,教授,多年来从事构造地质学和构造成矿的教学和科研工作。

右^[7]。可见 地球的分异作用使得金主要集中到地核之中 地核是金元素的巨大储库。

表 1 地球及各圈层部分元素分布表

Table 1 Distribution of partial elements in the Earth and its different layer

元素 分类	元素 (符号)	$w_B/10^{-6}$				
		地壳	上地幔	下地幔	地核	地球
稀碱 金属	锂(Li)	21	4.1	0.5	—	1.4
	铷(Rb)	78	2.6	2.0	—	1.8
	铯(Cs)	1.4	0.3	0.1	—	0.09
碱土 金属	锶(Sr)	480	120	10	—	40
	钡(Ba)	390	76	1	—	23
稀土	钇(Y)	24	5.0	0.5	—	1.7
	镧(La)	39	0.7	0.4	—	0.5
	铈(Ce)	43	1.1	0.7	—	0.8
元素	镨(Pr)	5.7	1.0	0.1	—	0.3
	钕(Nd)	26	5.0	0.8	—	1.7
稀有 元素	铌(Nb)	19	6.0	1.0	0.1	2.1
	钽(Ta)	1.6	0.1	0.01	0.006	0.06
卤族 元素	氟(F)	450	170	100		90
	氯(Cl)	280	50	50		—
	溴(Br)	4.4	1.1	0.5		0.6
	碘(I)	0.6	0.1	0.01		0.04
放射性 元素	铀(U)	4	1.0	0.014	0.003	
	钍(Th)	13.5	4.0	0.056	0.013	
铁族	铬(Cr)	110	1 600	2 000	660	1 500
	锰(Mn)	1 300	1 600	1 500	360	1 200
	铁(Fe)	58 000	95 000	98 000	82 000	32 000
元素	钴(Co)	25	160	200	420	260
	镍(Ni)	89	1 500	2 000	48 000	16 000
铂族	钌(Ru)	0.001	0.1	0.10	16	5
	铑(Rh)	0.001	0.02	0.02	3	1
	钯(Pd)	0.01	0.09	0.12	5.5	1.8
元素	锇(Os)	0.001	0.05	0.05	8	2.6
	铱(Ir)	0.001	0.05	0.05	2.6	0.8
	铂(Pt)	0.05	0.20	0.20	13	4.2
有色 金属	铜(Cu)	55	40			140
	铅(Pb)	12	2.1			13
	锌(Zn)	94	60			180
贵金属	金(Au)	0.003	0.001	0.001	0.9	
	银(Ag)	0.08	0.06	0.005	10	3.2

注:—表示该元素质量分数近为零 据刘英俊等(1987)。

2 成矿物质运移的流体介质

深源流体是地学领域中的前缘课题 研究进展较快 但同时也存在着名词、术语较混乱的情况。毕思文(1996)认为包括气、液及熔体相均为流体^[8];李伟源(1996)所指的流体包括各种成因的液体(H₂O)气 体(CO₂,CO,CH₄,N₂,H₂和H₂S等)超临界液体以及 熔体(地壳深部未凝固岩浆)^[9];曹荣龙(1996)认为地

幔流体的主要化学组分为碳、氢、氧、氮和硫 (CHONS)^[10]杜乐天(1993)则系统阐述了地球内部 的气体圈层,认为自内至外分为:外地核氢气圈、上地 幔软流层气圈、中地壳低速带气圈、天然气-石油气- 煤成气圈及大气圈。与上述气圈对应的流体是氢流 和氢型幔汁、碱型幔汁及氧型幔汁,而进入上部地壳 为HACONS混合流体(H代表氢、卤素及热;A为碱 金属;C为碳;O为氧;N为氮;S为硫族;另外还携 带部分随机分布的不相容元素)。它们是活跃的成矿 介质,甚至是截然不同的矿种(如胶东热液金矿和胜 利油田)的形成都是地幔流体HACONS造成的^[11]。 路凤香等(1996)则根据金伯利岩与流体关系的研究, 将地幔流体划分为超深流体、软流层起源的熔/流体 和与幔源岩浆有关的晚期流体等3种,认为超深流体 来自较深的地幔,或许相当于Haggerty所提出的来自 核幔边界,及杜乐天提出的外核氢气圈,并根据包裹 体研究,推测这种超深流体的组分至少包括C,H,O, N,S,F,Cl,P、碱金属及Fe,Si,Cu,Pb,Zn,Sn,Ag,Au 等^[12]。Huan Zhang I(1996)则更笼统地归纳为:凡具 有流动特征的物质均为流体。总之,不管如何表达, 地球内部存在着大量深源流体毋庸置疑。

此外,大陆超深钻的实施为人们提供了岩石圈上 部流体的真实的例证,联邦德国超深钻(KTB)最惊人 的发现是钻井深部存在大量的游离流体。钻井泵抽 试验和自动记录数据显示了深部流体可以从很远的 和渗透率高的部位流入钻井,充满游离流体的裂隙带 出现的频率与钻井深度不相关,但流体流的规模与深 度有关。从孔深400 m始到9 101 m终孔遇到重要的 富含流体破碎带或含流体层有二十多层次,主要有 二种不同的流体系统:富烃(C,H)的“干”流体和含盐 (Ca-Na-Cl)热水流体。

深源流体含量的问题一直是地质学家关注并努 力探索的重要地学命题之一。很多研究者对以水为 主体的流体做了大致估计,认为地壳中水的含量约占 地壳总质量的3%6%,地幔中水的含量约占地幔总 质量的0.03%0.1%(卢焕章等,1996;徐有生等, 1995)。根据这些估算,可以推算地球各圈层水的含 量。现代海洋的总质量为1.4×10²⁴g;地壳的总质量 为23×10²⁴g。如果取地壳含水量的上限,则地壳中 所含水的总量大约为1.4×10²⁴g。有人认为这个估 计有些偏高,如果按照流体量占地壳总质量的3%- 6%的话,那么含水量应在6.9×10²³1.4×10²⁴g之间。 地幔中水的含量,如果按占地幔总质量的0.03%-

0.1%计算,含水量应在 $(1.24.0) \times 10^{24} \text{g}$ 之间,其含水量下限与地壳中的含水量相当,外地核中水的含量亦相当可观。从这里的估算可以得出一个近似的比值,即海水、地壳、地幔中的流体的质量比较接近,其含水量有地幔>地壳>海洋的趋势。这种质量相近表明其间可能存在着某种平衡和循环关系,也支持了一些早期研究者所认为的地球大气和海洋是通过地球内部的连续脱气聚集形成的理论^[13]。

3 成矿物质的运移途径

地球是物质的,物质是运动的,它不仅在引力收缩和热力膨胀的统一作用支配下形成地球的圈层结构,同时,也在地球内外温度差、压力差、粘度差的作用下发生垂向物质运动。Wilson(1963),Morgan(1971)等在热点的基础上提出了地幔热柱的认识^[14,15]。日本学者 Maruyama(1994),Kumazawa(1994),Fukao(1994)等利用地震层析成像研究地球的深部构造,并以下地幔底部(2 900 km)、上地幔底部(670 km)和岩石圈底部(100 km)为界划分为一、二、三次地幔热柱^[16,18],使地幔热柱研究得到广泛重视,并成为地学研究的前沿课题^[19,26]。牛树银等(1999)认为,地球不仅进行着圈层结构分异,同时存在着垂向物质运动,两者互为依存。重力分异是垂向物质运动的下行机制,地幔热柱多级演化则是垂向运移的上行机制^[27]。路凤香等(2000)用“蘑菇云”模型来描述地幔热物质流的上涌^[28]。杜乐天则用幔汁(HACONS超临界态流体)辐射排放来探讨地球物质的垂向运移^[29];郑建平(2000)通过发现于地幔橄榄岩中的自然铁-偏离正常矿物化学成分矿物的共生体研究认为,它是深部地幔柱上升的含铁和方铁矿流体不均匀的与岩石圈中橄榄岩发生反应,并经固溶体分离的结果,核幔边界层可能是深部流体合适的源区^[30]。

至于地幔热柱的形态,一般认为地幔热柱起源于核幔界面,在下地幔下部呈瓶颈状,向上逐渐呈蘑菇状扩展,在670 km处的上下地幔不连续(剥离)带附近达到最大。穿过上下地幔不连续带,往往以衍生于地幔柱上的若干个小的地幔热柱(Maruyama称二次柱,邓晋福(1992)称地幔亚热柱^[19])继续向上扩展,在约100 km深度的岩石圈底部再形成更小的地幔热柱(相当于Maruyama的三次柱)或称幔枝构造^[31]。地幔热柱的发育打破了地球圈层结构(地核、地幔、地壳)的束缚,实现了地球物质的圈层分异和垂向运动

同时存在、互为依存、相互调整的对立统一。同时也构成了深部成矿物质的运移途径。

4 成矿物质的反重力迁移

金等重元素是如何向地壳迁移并且聚集成矿的呢?这是一个成矿物质反重力运移的问题,而且必须具备特殊的地质条件。

一般情况下,地幔具有一定的可塑性,而金等成矿物质具有往下沉的趋势,只有当核幔界面热扰动特别大、温压条件高到足以突破核幔界面的限制形成规模较大的地幔热柱时,这一过程才能得以实现。这种过程多发生在核幔界面能量积累的高峰期,在热扰动作用下,核幔界面起伏加大。外因条件则是地球之外的中长期天文因素影响较大,潮汐形变使地壳的扁率、地幔的扁率和地核的扁率周期性的发生变化,从而使地壳的容积、地幔的容积和地核的形状周期性地发生变化,导致地核中的流体、核幔边界积累的能量快速冲破核幔界面阻力,形成沿不同深度的贯通裂隙或构造薄弱带向上喷射的地幔热柱。与此同时,下地幔热柱、上地幔热室,甚至软流圈岩浆源都可能形成不同层次的上升地幔热柱,成为地幔热柱强烈活动的高发期,也正是在这种高温高压控制下地幔热柱喷发时,由于深部温压条件高,加之天文因素构成较大潮汐力激发的共同作用下,才能实现地球深部重物质,甚至重金属元素克服重力分异作用,实现反重力分异作用发生,并形成较大面积的溢流玄武岩和大规模的构造岩浆活动,同时必然夹裹一些成矿元素进入浅层地表,在有利的构造扩容带中聚集成矿。

杨学祥等(1998)通过地球数力模型计算表明^[32],由于重物质逐渐下沉,较轻物质不断上浮,使重力位能降低,并释放出大量能量。重力位能降低释放的热能主要集中在地核内。此外,由于在重力分异过程中地壳地幔减压膨胀,转动惯量变大,由角动量守恒原理可知,其自转速度会变小,地核增压收缩,转动惯量变小,自转速度变大。这就形成了核-幔间内快外慢的差异旋转。圈层间角动量交换把旋转能转变成热能,积累于核-幔之间。动能转变成的热能不仅增大了地球内部的温度梯度,而且使核-幔间产生局部热膨胀,这种不均匀的增温和不均匀的热膨胀是地幔被胀裂的主要原因。太阳增大的辐射量可以加大核幔间和内外核间的角动量交换,使差异旋转动能转变为热能积聚在核幔边界和内外核边界,增大了液

核内部的温度梯度,加快了液核的热对流。一旦当液核增温达到某一临界状态,液核内胀作用使地幔胀裂(即薄弱带)核幔边界胀裂部位的周围压力突降,重金属元素迅速气化,并随较轻元素一起在液核内压下沿胀裂薄弱带向上迁移,产生局部(地幔热柱位置)与重力分异作用完全相反的反重力分异作用,形成贯穿幔壳的上涌地幔热柱。地幔热柱在上升过程中遇到上下地幔间、岩石圈—地幔间的层圈拆离,便可形成地幔热柱的多级演化(热柱→亚热柱→幔枝)。

另外,成矿元素本身的特性对其的赋存状态和迁移形式具有非常重要意义。例如铁镍等元素,不仅其密度较大,而且熔点和沸点亦高,所以成为主要成核元素。铜、铅、锌、金、银等元素,尽管其密度也较大,但其熔点和沸点较低(表2),容易进入迁移状态。以金为例,依据金的非专属性、金的特性及新构造出的金的原子结构模型,推测99%的金都集中在地核之中,金以紫色气体状态混合于铁镍之间^[33],在强烈的外核对流及核幔差异旋转过程中,大量的金蒸气聚集在核幔界面附近。一旦由于天文因素激发或地内因素扰动,地核物质便可穿越核幔界面以地幔热柱的形式向地表喷溢,金蒸气亦必然作为地幔热柱的组成成分呈反重力作用一起向上运移。当金蒸气到达地幔软流圈时,一部分金蒸气变成液态,形成气-液混合相,与地幔中的甲烷类物质(CH_4)一起,随地幔热柱多级演化继续向上运移。

表2 元素密度、熔点、沸点对比
Table 2 Correlation of specific gravity, fusion point and boiling point for elements

元素	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	沸点/ $^{\circ}\text{C}$
Au	19.32	1 064.43	2 807.00
Ag	10.50	960.80	2 212.00
Cu	8.509.00	1 083.40	2 567.00
Pb	11.34	327.00	1 525.00
Zn	7.19	419.80	906.00
Ni	8.808.90	1 452.00	3 075.00

这种气-液混合相金在遇到幔源深(韧性剪切)断裂与岩浆一起上涌时,占混合相三分之二的气态金将进入到塑性软化的围岩之中,三分之一的气-液混合相金与岩浆一起进行分异作用。在分异过程中,液态金在地表淡水作用下,可直接变成固态金,而在地表咸水

(海水)作用下,往往以络合物的形式迁移,直到当有淡水或细菌(生物)等因素作用时,则才开始聚集成固态金。所以,金的运移状态可概括为(图1):

- 金的主要来源 地核
- 金的存在状态 紫色气体→气-液混合相→含矿(金)流体→固态金
- 金的迁移形式 地幔热柱→地幔亚热柱→幔枝构造→构造扩容带
- 金的运移途径 地核→D"层→下地幔→上地幔→岩石圈→地壳

金的成矿过程 构造变形→岩浆活动→蚀变作用→成矿作用

当然,金的最终成矿作用也明显受活化剂(水、溶于水中的卤盐、硫、硫化物、二氧化碳等)活化环境(温度、压力、pH值、Eh值、杂质离子)等(能量场)的控制,这些因素将在以后探讨。

银、铅、锌、铜也有类似的特征。
Ganapathy 等(1974)、Kimura 等(1974)、Mason (1966)等研究者用不同方法估算出的丰度值也基本相近。这就更证明了金、银等金属元素以深部来源为主的推断,而变质岩、岩浆岩等不同类型赋矿岩系提供的矿质仅仅是成矿物质的一部分。这也与很多大中型矿床地球化学测试表明成矿物质以深部来源为主的结论相吻合。

5 赋矿围岩与成矿作用

金主要来自深源,部分来自赋矿围岩已逐渐成为共识。胡受奚等(1998)对华北地区花岗岩和变质岩系含金背景值的测定工作也给予了肯定的回答^[34]。

已往很多人之所以认为金来源于原始含金量高的花岗岩中(Boyle,1979;Mantei等,1967;王鹤年,1988),或来源于含金高的地层(矿源层)^[3537],其主要原因是我国80年代以前各种金的分析、测试方法精度较低,有关花岗岩和地层中所测定的金含量值普遍偏高,加之国内外很多盛产金矿的早前寒武纪花岗岩-绿岩地体中,花岗岩经常占有相当大的体积。随着中子活化法和化学-光谱法的普遍使用,使金的分析测试精度达到了 $(0.1\sim0.2)\times10^{-9}$,并对

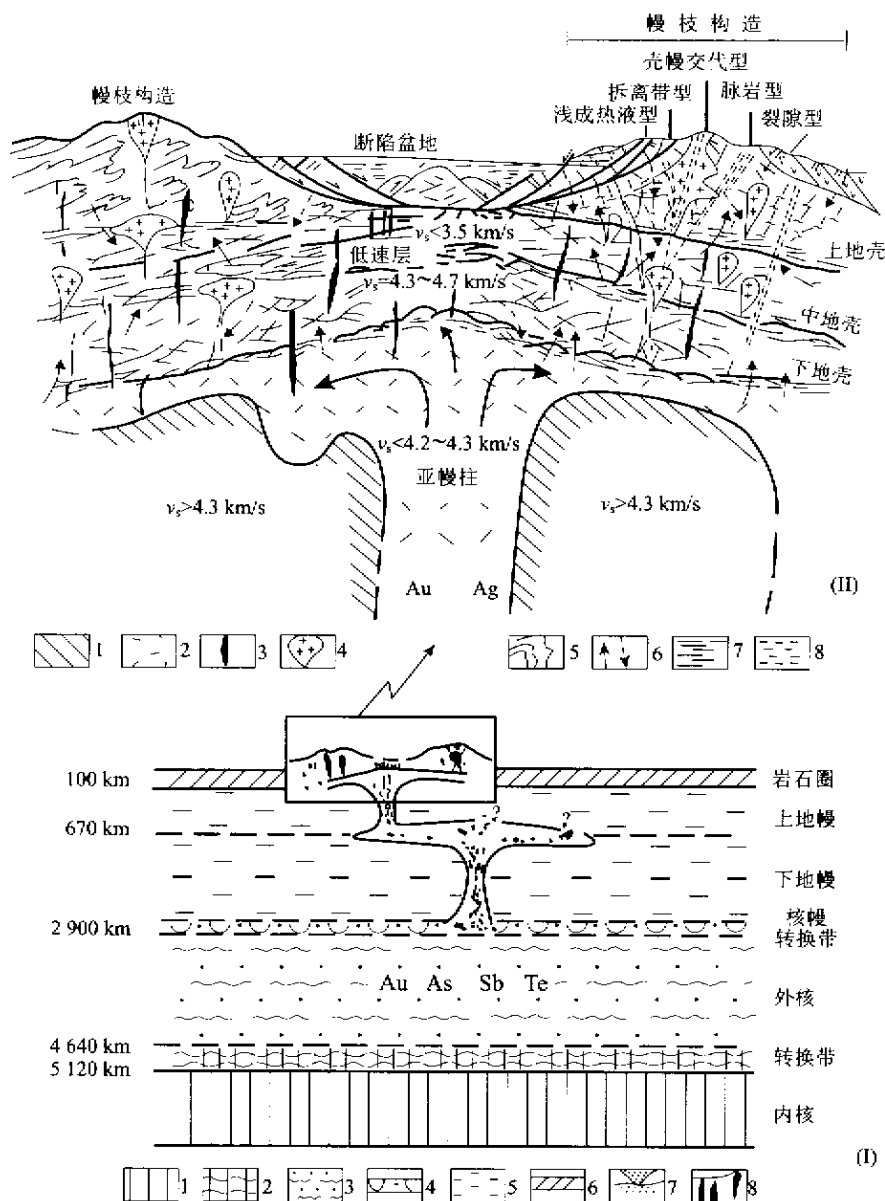


图 1 地幔热柱多级演化及其成矿模式图

Fig.1 Multistage evolution of mantle plume and its metallogenic model

Ⅰ—地幔热柱成矿模式图:1—地球内核;2—内外核转换带;3—外核;4—核幔转换带;5—地幔;6—岩石圈;7—地幔热柱;8—亚热柱;9—幔枝构造。Ⅱ—地幔亚热柱-幔枝成矿模式图:1—岩石圈硬块;2—地幔亚热柱;3—基性岩脉;4—花岗质侵入体;5—变质褶皱岩系;6—深部含矿还原系统流体;7—浅部氧化系统大气降水;8—低速高导层;9—韧性剪切带。

与金矿有关的花岗岩等火成岩和地层进行了大量含金量的测试工作,大大改变了人们对成矿物质来源的认识。

以小秦岭地体为例,河南省第一区调队、南京大学和成都理工学院对盛产金矿的小秦岭地体的地层和火成岩进行了大量测试工作,求得金的区域背景值为 1.06×10^{-9} (324 件样品)^[34, 38, 39]。小秦岭地块中分布的华山、文峪、娘娘山、小河、桂家峪、老牛山等众

多岩体,其分布面积约占 20%,与金矿关系密切的文峪岩体金含量为 0.79×10^{-9} (19 件);时代较老的小河岩体为 0.74×10^{-9} (3 件);桂家峪岩体为 0.71×10^{-9} (1 件)。小秦岭地体的前寒武地层金的背景含量同样较低,其中焕池峪组平均值为 0.6×10^{-9} ;阎家峪组为 0.67×10^{-9} ;观音堂组为 1.05×10^{-9} ;枪马组为 0.5×10^{-9} 。

素有产金大省的胶北地体也是如此,特别是与金

矿密切相关的燕山早-中期花岗岩广泛分布,其面积约占金矿区的三分之一。在时空上与金矿最密切的花岗岩金含量同样不高,如三山岛花岗岩平均为 1.2×10^{-9} (6件样品),上庄花岗岩为 1.2×10^{-9} (3件样品),北戴河花岗岩为 0.9×10^{-9} (3件样品),滦家河花岗岩为 0.9×10^{-9} (2件样品),郭家店花岗岩为 1.4×10^{-9} (14件样品)。胶北地体早前寒武纪地层中金的含量同样也不高,平均为 $(1.32.1) \times 10^{-9}$ 。冀北地区、太行山地区花岗岩和地层的金含量也有类似特征。

综上所述可见,无论是盛产金的小秦岭地体,还是胶北地体,或是冀北地块,并不存在富金的矿源层或含金建造。赋矿的地层中金的含量不仅不高,而且绝大多数却低于地壳丰度值,这表明在诸多产金地区,并不存在人们所设想的金的矿源层或含金建造,金主要来自深源,在有利的地质构造环境下聚集成矿。至于金与岩浆岩间密切的时空和成因联系,是因为岩浆岩和混合岩是强烈构造运动的产物。或者岩浆岩本身就是地幔热柱多级演化的产物,金等成矿物质与岩浆岩等是同步产物,在花岗岩侵入前缘裂隙或幔枝构造扩容带中聚集成矿^[40]。

衷心感谢李廷栋院士、陈毓川院士、陈华山总工等给予的热情指导和鼓励。

参考文献:

- [1] 翟裕生. 区域成矿学[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [2] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾变与成矿环境[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 309-315.
- [3] 陶奎元, 毛建仁, 邢光福, 等. 中国东部燕山期火山-岩浆大爆发[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 316-322.
- [4] 毛景文, 华仁民, 李晓波. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 291-299.
- [5] 华仁民, 毛景文. 试论中国东部中生代成矿大爆发[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 300-308.
- [6] 刘英俊, 马东升. 金的地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [7] 博伊尔 R W. 黄金开发史和金矿床成因[M]. 陈晓秦, 陈振时, 等译. 北京: 原子能出版社, 1991.
- [8] 毕思文. 地球内部流体系统科学统一理论[J]. 地学前缘, 1996, 3(3): 1-8.
- [9] 李伟源. 欧洲共同体国家地壳流体研究的概况和进展[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 313-323.
- [10] 曹荣龙. 地幔流体的前缘研究[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 161-171.
- [11] 杜乐天. 烃碱流体地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [12] 路凤香. 深部地幔及深部流体[J]. 地学前缘, 1996, 3(4): 181-194.
- [13] 李院生, 卢焕章, 陈晓枫, 等. 流体作用在地球动力学演化过程中的意义[J]. 地球科学进展, 1997, 12(2): 138-143.
- [14] WILSON J T. A possible origin of the Hawaiian island[J]. *Can J Phys*, 1963, 41: 863-870.
- [15] MORGAN W J. Convection plumes in the lower mantle[J]. *Nature*, 1971, 230: 42-43.
- [16] MARUYAMA S. Plume tectonics[J]. *J Geol Soc Japan*, 1994, 100(1): 24-49.
- [17] KUMAZAWA M, MARUYAMA S. Whole earth tectonics[J]. *Jour Geol Soc Japan*, 1994, 100(1): 81-102.
- [18] FUKAO Y, MARUYAMA S, OBAYASHI M, et al. Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography[J]. *Jour Geol Soc Japan*, 1994, 100(1): 4-23.
- [19] 邓晋福, 赵海玲, 吴宗絮. 中国北方大陆下的地幔热柱与岩石圈运动[J]. 现代地质, 1992, 3(3): 267-274.
- [20] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”[J]. 现代地质, 1994, 8(3): 349-356.
- [21] 侯增谦, 莫宣学, 朱勤文, 等. “三江”古特提斯地幔热柱——洋岛玄武岩证据[J]. 地球学报, 1996, 17(4): 343-361.
- [22] 侯增谦, 莫宣学, 朱勤文, 等. “三江”古特提斯地幔热柱——洋中脊玄武岩证据[J]. 地球学报, 1996, 17(4): 362-375.
- [23] 王登红. 地幔柱与热点的成矿作用[J]. 地球学报, 1996, 17(4): 393-400.
- [24] 牛树银, 孙爱群, 李红阳, 等. 河淮地幔亚热柱的演化及其对华北地区成矿的控制作用[J]. 地球学报, 1996, 17(4): 413-423.
- [25] 李红阳, 闫升好, 王金锁, 等. 试论冀西北金银多金属矿产富集区地幔热柱及其成矿制约[J]. 地球学报, 1996, 17(4): 401-412.
- [26] 卢记仁. 峨眉地幔柱的动力学特征[J]. 地球学报, 1996, 17(4): 424-438.
- [27] 牛树银, 孙爱群. 地球的物质运动[J]. 科学, 1999, 51(3): 49-52.
- [28] 路凤香, 郑建平, 李伍平, 等. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式: “蘑菇云”模型[J]. 地学前缘, 2000, 7(1): 97-107.
- [29] 杜乐天. 地球排气作用——建立整体地球科学的一条统纲[J]. 地学前缘, 2000, 7(2): 381-390.
- [30] 郑建平, 路凤香, 郑曙, 等. 地幔中自然铁-偏离正常矿物化学成分的矿物交生体与深源流-岩作用[J]. 地质科技情报, 2000, 19(2): 27-30.
- [31] 牛树银, 罗殿文, 叶东虎, 等. 幔枝构造及其成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [32] 杨学祥, 牛树银, 陈殿友. 深部地质与深部过程[J]. 地学前缘, 1998, 5(3): 77-84.
- [33] 霍明远. 金的原子结构模型及其成矿模式[A]. 涂光炽, 等. 金的经济地质学[M]. 北京: 科学出版社, 1991, 1-7.
- [34] 胡爱奚, 陈衍景, 徐金方, 等. 华北地台花岗岩和地层中金含量与金成矿的关系[J]. 高校地质学报, 1998, 4(2): 121-126.
- [35] KEAYS R R. Archean gold deposits and their source rocks: the upper mantle connection[A]. *The Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits. Proceedings of Symposium "Gold"* [C], 1992.
- [36] 杨士望. 论胶东半岛西北部胶东群地层金的矿源层和金矿床的层控性质[J]. 地质找矿论, 1986(1): 1-12.

- [37] 朱奉三. 混合岩化热液金矿床成矿作用初步研究[J]. 地质与勘探, 1980(7):1-9.
- [38] 陈衍景, 富士谷. 豫西金矿成矿规律[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
- [39] 栾世伟, 陈尚迪. 小秦岭地区深部金矿化特征及评价[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1991.
- [40] 牛树银, 孙爱群. 深源流体与地幔热柱的成矿控矿作用探讨[A]. 陈毓川, 等. 当代矿产资源勘查评价的理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1999.

THE ANTI-GRAVITY MIGRATION OF METALLOGENIC FLUID FROM CORE AND MANTLE

NIU Shu-yin¹, HOU Zeng-qian², SUN Ai-qun³

(1. Department of Resources Environment and Engineering, Shijiazhuang Economic University, Shijiazhuang 050031, China; 2. Institute of Mineral Deposits, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract : The distribution of the mineral deposits is nonhomogeneous throughout the crust. This is contributed to the formation and evolution of the Earth. At the beginning, the Earth evolution was uniformly dominated by gravitational contraction and thermal expansion, as a result, radioactive elements, halogen elements, rare elements, REE and alkali metal migrated upward. The high special gravity elements such as noble metal, nonferrous, iron group and platinum group tended to be concentrated to the core and the noble elements such as iron, nickel, gold mainly concentrated toward the core. However, during the layering evolution of the Earth, the differences in temperature, pressure and viscosity within the Earth led the substance of the Earth up to vertically moving in form of multiple evolution of mantle plume. This is the motivity of mantle-crust movement. Multiple mantle plume evolution opened out migration channel for deep substance. The heavy metal elements such as gaseous gold that concentrated in core or at interface between the core and mantle took the form of thermal fluid in mantle plume. They moved up to lithosphere in anti-gravity migration and further came to the crust near surface taking the form of thermal fluid. They could deposit in favorite enlarged structures to form deposits. This might be important metallogenic process for the mineralization of Au, Ag, Cu, Pb, Zn etc.

Key words : mantle plume; mantle-breach structure; anti-gravity migration; metallogenic process