

核幔成矿物质与地幔热柱多级演化成矿

牛树银^{1,2}, 孙爱群¹, 王宝德¹, 马宝军¹, 张建珍¹, 王铮¹, 李斌¹, 王善飞³, 赵荣欣³, 武际春³

(1. 石家庄经济学院资源学院, 河北 石家庄 050031; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 山东黄金集团有限公司, 山东 济南 250100)

摘要: 研究认为金等成矿物质主要来自核—幔源区, 以气态—气液混合态、含矿流体的形式, 通过地幔热柱→地幔亚热柱→幔枝构造→有利构造扩容带, 迁移到幔枝构造外围的韧脆性剪切带、侵入岩体的内、外接触带、各种脉岩与围岩的接触带等有利部位集聚成矿, 并构成矿田→矿床→矿体(脉)的有序排列组合, 表现出不同的矿床类型。因此, 应侧重研究构造成矿作用, 以指导新一轮地质找矿和矿产资源评价。文中还举例分析了胶西北焦家断裂与三山岛断裂的交切关系及其控矿作用。

关键词: 成矿物质; 成矿作用; 地幔热柱; 幔枝构造; 控矿构造

中图分类号: P59; P611

文献标识码: A

0 引言

矿床(点)在地壳中的分布极不均匀, 具体表现在时间演化和区域分布 2 个方面。在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, 中生代达到极至^[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。

中国东部位于西太平洋中段, 中生代以来亦进入了覆地翻天之巨变, 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, 成矿大爆发^[3]等一系列新认识。成矿作用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、地球物化场以及来源于深部成矿物质多寡等控矿条件的变化。而这些条件的变化又取决于地球的深部过程。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重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} , 这可能与金的强亲铁性有关。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, 而地幔提供了金的传输通道, 金在地幔中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^[4-6]。如果考虑地球核、幔、壳所含金的丰度值与地球核、幔、壳之质量百分比, 99.756% 的金都集聚

* 收稿日期: 2012-11-19; 修订日期: 2012-11-28; 编辑: 程光锁

基金项目: 公益性行业科研专项经费项目“我国典型金属矿科学基地研究”(200911007)和中国地质调查局危机矿山研究(20089948, 20109901)项目资助

作者简介: 牛树银(1952—), 男, 河北昌黎人, 教授, 博士生导师, 主要从事构造地质学与成矿控矿的教学和科研工作; E-mail: niusy@sjzue.edu.cn.

在地核之中(表 2)。这种认知也可以通过与宇宙中的陨石相比较来概略分析(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 $(0.448 \sim 2.90) \times 10^{-6}$ 之间,陨铁中为 $(0.055 \sim$

$8.744) \times 10^{-6}$,陨硫铁中为 $(0.07 \sim 8.00) \times 10^{-6}$,普遍比地壳丰度值高 140~2 200 倍。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及特征(10^{-6})

	元素特征				地壳	上地幔	下地幔	地核	地球
	符号	比重(g/cm ³)	熔点(°C)	沸点(°C)					
碱土	锶(Sr)	2.60	769	1384	480	120	10		40
金属	钡(Ba)	3.51	725	1638	390	76	1		23
稀有	铌(Nb)	8.57	2468±10	4297	19	6.0	1.0	0.1	2.1
元素	钽(Ta)	16.60	2996	5425±100	1.6	0.1	0.01	0.006	0.06
放射性	铀(U)	19.05	1132.3	3818	4	1.0	0.014	0.003	
元素	钍(Th)	11.70	1750	4797	13.5	4.0	0.056	0.013	
	铬(Cr)	7.20	1890	2484	110	1600	2000	660	1500
铁族	铁(Fe)	7.86	1535	3000	58000	95000	98000	82000	32000
元素	钴(Co)	8.90	1495	2900	25	160	200	420	260
	镍(Ni)	8.8~8.9	1452	3075	89	1500	2000	48000	16000
	铜(Cu)	8.5~9.0	1083	2595	55	40			140
有色金属	铅(Pb)	11.34	327.3	1744	12	2.1			13
	锌(Zn)	7.14	419.4	907	94	60			180
贵金属	金(Au)	19.3	1063	2807	0.003	0.001	0.001	0.9	0.8
	银(Ag)	10.5	960.8	2212	0.08	0.06	0.005	10	3.2

表 2 地球各圈层中金丰度值分布特征

圈层	质量百分比(%)	金的分布状态		
		金的丰度值(10^{-9})	圈层中比重(10^{-9})	圈层中比例(%)
地壳	0.4	3.0	1.2	0.00423
地幔	68.1	1.0	68.1	0.23962
地核	31.5	900	28350	99.75615
地球	100	284	28419.3	100.000

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,大陆超深钻的实施为人们提供了真实的例证,联邦德国超深钻(KTB)最惊人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 20 多层次,主要有 2 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%,由此,可以推算地球各圈层水的含量。现代海洋的总质量为 1.4×10^{24} g,地壳的总质量为 23×10^{24} g。如果取地壳含水量的上限,则地壳中所含水的总量大约为 1.4×10^{24} g。有人认为这个估计有些偏高,如果按照流量占地壳总质量的 3%~6%估计,那么含水量应在 $6.9 \times 10^{23} \sim 1.4 \times 10^{24}$ g 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 $1.2 \times 10^{24} \sim 4.0 \times 10^{24}$ 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。由此,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,其含水质量有地幔>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。

3 成矿物质的运移途径

地幔热柱多级演化为成矿物质运移提供了通道。一般认为地幔热柱是地球等行星地幔中一大团温度较高、缓缓上升的物质流。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(拆离)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 et al. 的三次柱)^[7]或称幔枝构造^[8]。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(图 1)。

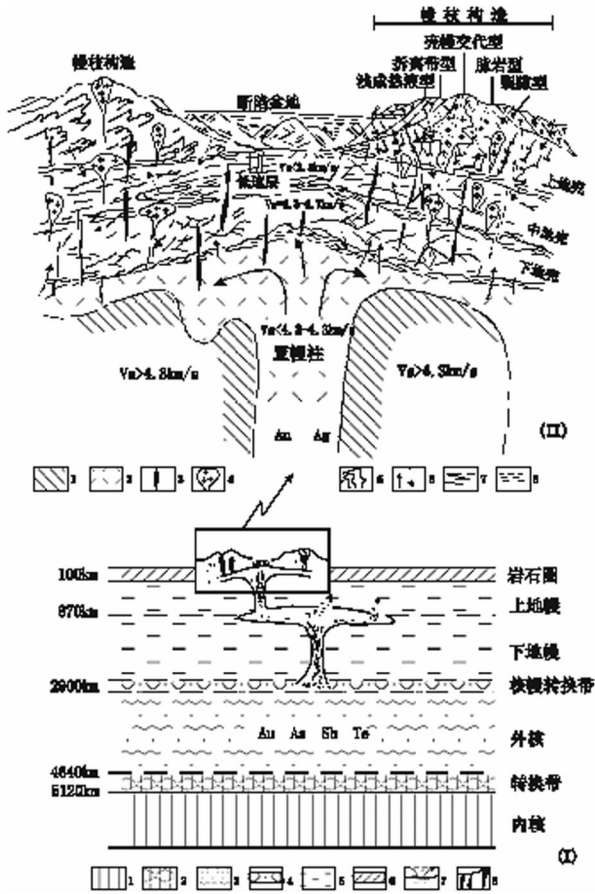


图 1 地幔热柱多级演化系列成矿模式图^[9]

- (I) 地幔热柱成矿模式图: 1—地球内核; 2—内外核间转换带; 3—地球外核; 4—核幔间转换带; 5—地幔; 6—岩石圈; 7—地幔柱构造; 8—深源岩浆作用
- (II) 地幔亚热柱—幔枝成矿模式: 1—岩石圈硬块; 2—地幔亚热柱; 3—基性岩脉; 4—花岗岩侵入体; 5—变质褶皱岩系; 6—深部含矿还原系统流体, 浅部氧化系统大气降水; 7—低速高层; 8—韧性剪切带

4 成矿物质的反重力迁移

按重力分异原理,金等比重较大的元素都应沉向地核,那么,某些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迁移的问

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,而金等成矿物质总体具有往下沉的趋势。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,重元素的反重力迁移才能得以实现。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,实现反重力迁移,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,当物理化学条件适合时,卸载聚集成矿。

另外,成矿元素本身的特性对其的赋存状态和迁移形式亦具有非常重要意义。例如铁镍等元素,不仅其比重较大,而且熔点和沸点亦高,所以成为主要成核元素。金、银等元素,尽管其比重也较大,但其熔点和沸点较低(表 1),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,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,并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(CH₄)一起,随地幔热柱多级演化继续向上运移。

这种气-液混合相金在遇到幔源深断裂,与岩浆一起上涌时,占混合相 2/3 的气态金将进入到塑性

软化的围岩之中,1/3 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:

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。

银、铅、锌、铜也有类似的特征。

不同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、岩浆岩等不同类型的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 幔枝构造控矿举例

胶西北不足全国国土面积 0.25% 的成矿集中区却占有超过全国 25% 的黄金储量。最为值得探讨的科学问题是该区不仅黄金储量巨大,而且成矿时间集中(115±5)Ma,尤以郭家岭幔枝构造区金矿特别集中^[6],并且主要展布在焦家、三山岛和招平等 3 条主干断裂带上(图 2),特别是对成矿作用有明显控制作用的焦家断裂与三山岛断裂的交切关系,是地质学家非常关注并认识不一的关键问题,因此备受国内、外地质学家的广泛关注。

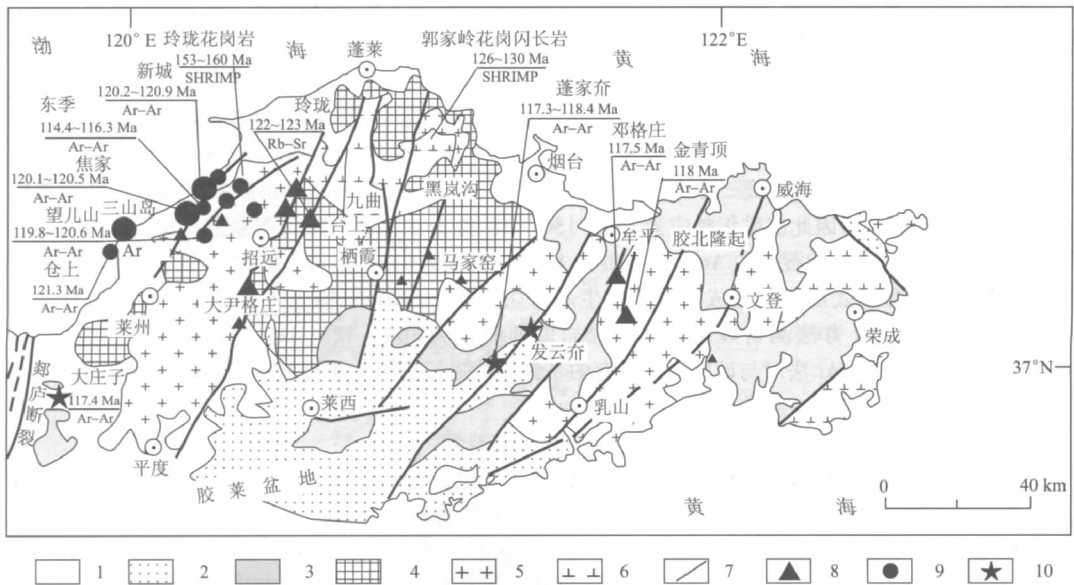


图 2 胶东地区地质构造与金矿展布简图^[10]

1—第四纪沉积物;2—白垩纪火山岩;3—元古宙变质岩系;4—太古宙变质岩系;5—侏罗纪花岗岩;6—白垩纪花岗闪长岩;7—断裂;8—石英脉型金矿床;9—蚀变构造岩型金矿;10—角砾岩型金矿

5.1 主干断裂的切割关系

在胶西北地区,一个多年来争论不休的问题就是著名的焦家断裂与三山岛断裂的切错关系,现阶段有 3 种主要观点:第一种观点是焦家断裂与三山岛断裂相互切错关系,也有人称其为共轭式交切;第

二种观点认为焦家断裂为主,三山岛断裂为次组成“入”字型;第三种观点认为三山岛断裂为主,焦家断裂为次组成“入”字型(图 3)。3 种观点所认识的成矿作用也就不同,应该部署的找矿勘探也应截然不同,甚至有关部门不惜重金要在其交会结合部位打

深钻验证,可见这一问题已经成为科研、生产,甚至主管部门非要搞清不可的关键问题了。

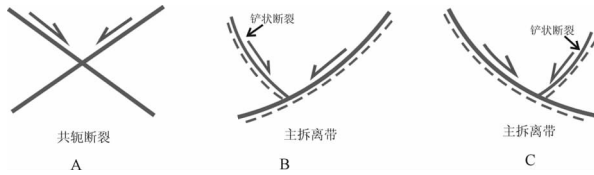


图 3 焦家断裂与三山岛断裂的切错关系模式图

- A. 焦家断裂与三山岛断裂共轭式交会; B. 焦家断裂为主
- “入”字型交会; C. 三山岛断裂为主

5.2 幔枝构造外围主拆离带

从地幔热柱多级演化的视角分析,莱阳是地幔亚热柱,晚燕山期火山-断陷盆地是地幔物质上涌后期导致的热断陷,亚热柱外围西与郭家店幔枝构造(相当于招平矿集区)构成典型的地幔亚热柱-幔枝构造体系。

郭家店幔枝构造是胶西北地区重要的成矿控矿构造,北至招远大秦家,南到崔召,总体呈现以玲珑杂岩体为中心的北东向椭圆形隆起。南东侧为招远-平度断裂带,相当幔枝构造南东侧的主拆离带;北西侧为新城-焦家断裂带,相当于幔枝构造北西侧的主拆离带;三山岛断裂构造则为焦家主拆离带上盘的反倾向铲状断裂。3 条断裂走向相近,倾向各异,共同构成了郭家店幔枝构造外围的主拆离带或铲状断裂,并成为胶西北地区主要的成矿控矿构造。

招远-平度断裂带(简称招平断裂)南起平度城北宋戈庄附近,呈 NNE 走向,向北至南墅以北转为 NE 向,经招远城后再转为 NEE 向,延至龙口市颜家沟一带尖灭。主干断裂总体走向为 $NE30^{\circ} \sim 40^{\circ}$,局部有所偏转,构成 NE-NNE 向招平断裂带。

焦家断裂带北起龙口市黄山馆,南至莱州市朱桥徐村院,主要发育在前寒武纪变质岩系与玲珑花岗岩、郭家店花岗闪长岩接触带或两岩体之接触带。断裂总体走向 $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$,倾向 NW,倾角 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$,呈弧形弯曲状构成一个开阔的弧形,分支复合现象明显。

三山岛断裂带位于胶东半岛的西北端,主要发育在莱州市三山岛-仓上一潘家屋子一带,陆地出露 12 km,其余大部分被第四系覆盖。断裂带宽 20~400 m,总体走向 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$,倾向 SE,倾角 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。

5.3 主干断裂的形成机制

按照幔枝构造的基本认识,燕山运动以来,胶东

地区总体上是以伸展隆升作用为主,尽管期间也会夹有短时间的挤压作用,但就总体来说(或者说按挤压与伸展之算术和)也是以伸展隆升作用为主。从三山岛、焦家、招平 3 条区域性主干断裂特征与郭家店幔枝构造的形成机制结合起来分析表明,在郭家店幔枝构造形成过程中,也许区域上已经存在的上述 3 条断裂被利用和改造为幔枝构造的主拆离带和铲状断裂。由于郭家店幔枝构造的强烈上隆,位于幔枝构造南东侧的招平-破头青断裂、北西侧的焦家断裂则被改造为主要拆离滑脱带。在郭家店幔枝构造形成阶段,两条主要拆离滑脱带为张扭性正断层,三山岛断裂则是焦家拆离滑脱带上盘的铲状断裂(图 4)。

郭家店幔枝构造

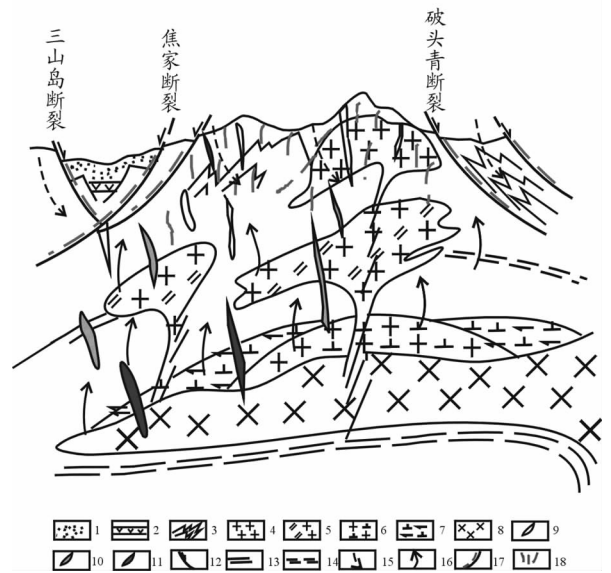


图 4 胶西北地区幔枝构造成矿-控矿模式图

- 1—第四系; 2—白垩纪火山岩; 3—基底变质岩系; 4—花岗岩;
- 5—二长花岗岩; 6—花岗闪长岩; 7—辉石闪长岩; 8—地幔亚热柱侵入岩; 9—酸性岩脉; 10—中性岩脉; 11—基性岩脉; 12—拆离带或铲状断裂; 13—壳间拆离带; 14—剪切带; 15—大气降水; 16—深源上升流体; 17—焦家式金矿; 18—玲珑式金矿

因为焦家断裂带位于郭家岭幔枝构造北西缘的拆离带上,其构造演化应该以正向拆离滑脱为主,从构造地质的配套断裂系统来讲,由于拆离带的正向滑脱作用,往往在拆离带上盘由于构造松弛作用而导致出现反倾向的铲状断裂,两者倾向相反,相对倾斜展布。主拆离带应具有浅(上)部产状相对较陡,向深(下)部逐渐变缓的趋势;而上盘反向铲状断裂也应该具有浅(上)部产状相对较陡,向深(下)部逐渐变缓的趋势,并最终终止于主拆离带之上。也即

从区域构造演化特征、焦家断裂与三山岛断裂的空间位置以及两断裂的空间产状变缓趋势等方面的资料判断,焦家断裂与三山岛断裂之间的关系属于第二种交会关系,即焦家断裂是幔枝构造外围主拆离带,三山岛断裂是上盘铲状断裂,它们共同控制着胶西北地区的成矿作用(图 4)。

6 结论

综合上述可以得出以下几点基本认识:

(1)金等成矿元素主要来自深源,甚至来自核幔界面的超临界层,通过地幔热柱多级演化向上迁移至地壳浅部。

(2)金等元素的迁移可能通过气态→气-液混合态→含矿流体,最终在有利的扩容空间,并在适合的物化环境卸载结晶成矿,这已得到高温高压实验的证实。

(3)在温度压力等物理化学条件控制下,含矿流体可以迁移到幔枝构造的主次级拆离带、岩体内外接触带、构造裂隙带等不同构造部位而形成不同的矿床类型。

(4)在诸多成矿条件中,构造是至关重要的控制因素。因此,选择典型矿区开展矿田构造解剖尤为重要,这对开展探边模底找矿预测、指导新一轮地质

勘查具有重要意义。

参考文献:

- [1] 翟裕生. 成矿系统论[M]. 北京:地质出版社,2010.
- [2] 邓晋福,莫宣学,赵海玲,等. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”[J]. 现代地质,1995,8(3):349-356.
- [3] 毛景文,王志良. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨[J]. 矿床地质,2000,19(4):289-296.
- [4] Niu Shuyin, Hou Quanlin, Hou Zengqian, et al. Cascaded evolution of mantle plumes and metallogensis of core— and mantle— derived elements[J]. ACTA GEOLGICA SINICA, 2003,77(4):522-536.
- [5] 牛树银,孙爱群,王宝德. 地幔热柱与资源环境[M]. 北京:地质出版社,2007.
- [6] 牛树银,孙爱群,张建珍,等. 胶东西北部金矿集中区深部控矿构造探讨[J]. 地质学报,2011,85(7):1094-1107.
- [7] Maruyama S. Plume tectonics[J]. Jour. Geol. Soc. Japan, 1994,100(1):24-49.
- [8] 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.
- [9] 牛树银,李红阳,孙爱群,等. 幔枝构造理论与找矿实践[M]. 北京:地震出版社,2002.
- [10] 毛景文,谢桂清,张作衡,等. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其动力学背景[J]. 岩石学报,2005,21(1):169-188.

Metallogenic Material of Core—mantle and

Metallogenic Materials of Multiple Evolution of Mantle Plume

NIU Shuyin^{1,2}, SUN Aiqun¹, WANG Baode¹, MA Baojun¹, ZHANG Jianzhen¹, WANG Zheng¹, LI Bin¹, WANG Shanfei³, ZHAO Rongxin³, WU Jichun³

(1. Resources College of Shijiazhuang University of Economics, Hebei Shijiazhuang 050031, China; 2. College of Earth Science and Resources of China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 3. Shangdong Gold Group Limited Corporation, Shandong Jinan 250100, China)

Abstract: The studies indicate that the metallogenic materials mainly comes from the core—mantle areas of the earth in the form of gaseous—gas—liquid mixed state—ore—bearing fluid. They migrated to the ductile—brattle zones, intruded internal and external contact zones of intrusives, contact zones between dykes and country rocks and formed mineral resources through mantle plumes to sub—mantle plumes and mantle branch structures, favorable tectonic extension zones. Ordered combination of ore fields, deposits and ore—bodyies(veins) of different deposit types have been formed as well. Therefore, tectonic ore—forming and ore—controlling should be paid more attention in order to guide the new round of geological prospecting and mineral resources evaluation. Cross cutting relation of Jiaojia fault and Sanshandao fracture in north—west Shandong Peninsula and its ore—controlling have been analyzed in this paper.

Key words: Metallogenic materials; metallogenesis; mantle plume; mantle branch structures; ore—controlling structures