

胶东地区地质体的 含金性与金成矿关系*

孙景贵

(南京大学地球科学系, 南京, 210093)

摘 要 本文以新近的测试分析资料为基础, 较系统地论述了胶东金矿集中区地质体的含金性。大量的测试资料表明: 变质岩和地层中金的丰度并非很高($w(\text{Au}) 1.9 \times 10^{-9} \sim 4.5 \times 10^{-9}$), 而与金矿有关的花岗岩金的量更低($w(\text{Au}) 0.27 \times 10^{-9} \sim 1.83 \times 10^{-9}$)。地质体的成因、演化与金矿化的相互关系, 表现随岩石成分向酸性变化和碱交代程度增加过程, 金及相关成矿元素的含量降低; 花岗岩形成过程和碱交代作用过程是促使金活化转移的主要过程, 断裂活化、深部流体作用导致岩体的“去根”可能是金进一步成矿的重要机制。

关键词 地质体, 含金性, 活化迁移, 胶东

1 引言

世界上许多重要热液金矿产于前寒武纪(太古代—早元古代)花岗岩—绿岩地体中。如: 南非卡普尔、津巴布韦地体和西澳伊尔岗的西南和东北区、加拿大的阿比提比、瓦必岗和大奴湖区以及我国华北地台南缘的华熊、东缘的胶东、辽南、东北缘的夹皮沟等地区。上述热液金矿集中区的形成均与特定的地质背景(花岗岩—绿岩)有密切的关系, 早已为研究者所重视、并进行了成矿物质、溶液的来源以及成矿模式等多方面的研究^[1-4], 为现代成矿理论的研究奠定了基础。现代成矿理论中, 有关成矿物质的来源问题, 主要有两种观点: (1) 认为金来源于含量高的地层(矿源层)或含金建造^[5,7]; (2) 认为金来源于原始金含量较高的花岗岩^[8-11]。对胶东金的成矿物质来源主要认识有: (1) 金来源于胶东群^[5,6]; (2) 金来源于中生代花岗岩^[8,11]; (3) 金主要来源于地幔^[1,12]。近年笔者在胶东地区工作积累了一批有关金及相关成矿元素含量测试的最新资料, 本文试图从胶东金矿集中区地质体的含金性入手, 结合地质体的成因、演化, 论述金的成矿物质来源和金矿成矿作用的基本问题。

* 国家自然科学基金项目(49733120)及国家教委基金项目(3951-002)联合成果

收稿日期 1999-01-08 改回日期 1999-04-01

作者简介: 孙景贵, 男, 36 岁, 博士。

2 区域金矿地质概况

研究表明, 胶东地区是由一个经历了吕梁期、晋宁期、加里东期、海西期, 特别是中生代印支期—燕山期多旋回构造运动, 相应发育多时代变质、变形和花岗岩的成岩、成矿作用具早前寒武纪和中生代地质体组成的典型“双层”地质构造, 并蕴藏以内生热液金矿床为主(即: 金矿床、含金银矿床和含金(银)铅锌矿床)^①的多金属矿化发育的地区。前寒武纪主要发育晚太古代胶东群、“TTG”岩系, 早元古代荆山群(粉子山群)、超镁铁-镁铁质岩, 晚元古代钙碱性花岗质片麻岩等变质地层及古深成侵入岩, 它们普遍发生角闪—(麻粒)岩相的中(高)级变质、变形作用, 局部发育震旦纪蓬莱群变质地层, 进入中生代在其东南部发育高压—超高压级的变质、变形作用。中生代产出大量花岗岩(交代地幔型、交代重熔型和壳-幔混合型)^②、钙碱性火山岩及沉积岩。热液金矿主要赋存在中生代燕山中—晚期花岗杂岩体内及接触带的断裂体系中。

3 区域地质体的含金性

区域成矿理论研究表明, 成矿作用与地质体性质、成矿元素组成再分配作用的行为有密切的关系。从地质体的含金性角度出发, 结合其成因、演化规律, 可为揭示金矿床的成矿物质来源、活化、迁移富集规律提供一定的基础资料。

3.1 前寒武系地质体的含金性

胶东地区前寒武纪地质体经历了多期变质、变形作用。显然, 地质体中的金等成矿元素也遭受了多期改造、活化和迁移, 而现在所测得的金含量均为再分配的数值量。

3.1.1 太古界胶东岩群的含金性 有关胶东岩群的含金性问题很早就被研究者所关注, 并进行了大量的工作。随着测试精度的提高, 人们逐渐认识到胶东岩群的金含量并非很高[$w(\text{Au})$ 5.8×10^{-9} ; 12×10^{-9} ; 22.91×10^{-9} ; $1.3 \times 10^{-9} \sim 2.0 \times 10^{-9}$]^[10, 13, 24, 25], 多数接近于或低于地壳的丰度值[$w(\text{Au})$ $3.5 \sim 4 \times 10^{-9}$]及岩石圈丰度值[$w(\text{Au})$ 4.8×10^{-9}]^[14]。但是, 一般性讲, 胶东岩群不同组的金含量有一定的差别, 富阳岩组和民山岩组相对低[$w(\text{Au})$ $1.42 \times 10^{-9} \sim 6.5 \times 10^{-9}$]; 蓬乔岩组含量较高[$w(\text{Au})$ $5.1 \times 10^{-9} \sim 20 \times 10^{-9}$](表 1); 在岩性方面, 偏基性的岩石(斜长角闪岩、角闪石岩等)和粘土质-杂砂质副变质片麻岩(角闪黑云变粒岩、富铝长英片麻岩等)含金量较高, 前者一般为 $w(\text{Au})$ $5.30 \times 10^{-9} \sim 5.7 \times 10^{-9}$ 、高值为 $w(\text{Au})$ $15 \times 10^{-9} \sim 89 \times 10^{-9}$, 后者含量一般为 $w(\text{Au})$ $3 \times 10^{-9} \sim 7 \times 10^{-9}$ 、高达 $w(\text{Au})$ 15×10^{-9} 、 29×10^{-9} (表 2), 显然, 除个别岩石(如磁铁石英岩等)外, 金含量并不很高, 与岩石的克拉克值相当。这一点与胶东岩群不同岩组的含量是一致的, 显示基性变质岩和粘土质-杂砂质副变质片麻岩、石英岩等

① 孙景贵. 胶东半岛东部金矿成矿背景及区域成矿模式(博士论文). 1998

② 同①

岩类、或以它们为主的地层金的含量偏高。

表 1 胶东岩群不同组的含金量

Table 1 Gold contents in distinctive formation of Jiaodong Group $w(\text{Au})/10^{-9}$

地 层	胶东地区	胶东东部区	胶东北地区
富阳岩组	(253) 1. 42	(17) 3. 10	6. 50
民山岩组	(253) 1. 42		
蓬乔岩组	5. 22	(16) 5. 10	20. 00
资料来源	〔5〕	本文	〔5〕

() 内为样品数, 以下同

表 2 胶东岩群不同岩性含金量对比表

Table 2 Gold contents in distinctive lithologic units of Jiaodong Group $w(\text{Au})/10^{-9}$

岩 性	胶东部	胶西北部	资料来源
角闪斜长片麻岩	(6) 3. 30		本文
黑云斜长片麻岩	(10) 2. 73		
斜长角闪岩	(4) 5. 30		
角闪石岩	5. 70	89. 00	〔5〕
斜长角闪岩	4. 48	15. 00	
角闪黑云斜长片麻岩	2. 70	9. 90	
角闪黑云变粒岩	3. 80	29. 17	
云母片岩	2. 00	7. 20	
透闪透辉岩	2. 94	7. 00	
大理岩	2. 60	7. 00	
富铝片麻岩	1. 83 ~ 2. 94	7. 00	
		15. 8	
磁铁石英岩		(4) 120	〔2〕
褐铁矿矿石		(3) 160	

3. 1. 2 元古界荆山岩群(粉子山岩群)、蓬莱岩群及榴辉岩的含金性 随着对区域基础地质研究的不断深入, 推动了元古代地质体含金性的研究。有关资料显示: 其含金性[$w(\text{Au})$ $0. 70 \times 10^{-9} \sim 2. 70 \times 10^{-9}$] 在某种程度上与太古界胶东群并无明显的差别, 并且它们的金含量均值均低于地壳及岩石圈的丰度值^{〔4, 25〕}。从笔者的测试结果上看, 荆山岩群地层的陡崖岩组[$w(\text{Au})$ $3. 7 \times 10^{-9}$]、野头岩组[$w(\text{Au})$ $3. 80 \times 10^{-9}$]、禄格庄岩组[$w(\text{Au})$ $1. 71 \times 10^{-9}$], 与原粉子山群、蓬莱群相比, 荆山岩群的金含量偏高(表 3); 在岩性方面, 荆山岩群地层中的透辉石岩、透辉透闪变粒岩、透辉石英岩金含量相对较高($w(\text{Au})$ $4. 1 \times 10^{-9} \sim 7. 4 \times 10^{-9}$)、接近或略超过地壳及岩石圈的丰度值, 这些岩性原岩代表富铝质、钙镁质及硅质岩石, 体现原岩以杂砂质为主的岩石及相应的地层金含量较高(表 4)。

表 3 元古界地层的含金对比表

Table 3 Correlation table of gold contents in Proterozoic strata $w(\text{Au}) / 10^{-9}$

地 层 单 位		样品数	平均值	资料来源
荆山岩群	禄格庄岩组	13	1.71	本文
	野头岩组	12	3.80	
	陡崖岩组	79	3.70	
粉子山岩群	小魏家岩组	113	1.92	[6]
	禄家芥岩组	3	2.31	
荆山岩群		19	1.79	[6]
粉子山岩群		218	1.50	
蓬莱岩群		21	2.00	

表 4 荆山岩群不同岩性的含金量对比表

Table 4 Gold contents in distinctive lithologic units of Jingshan Group $w(\text{Au}) / 10^{-9}$

组	禄 格 庄 岩 组					野 头 岩 组				陡 崖 岩 组					
岩石名称	黑云片岩	石榴黑云片岩	斜长透辉石岩	蛇纹石化大理岩	斜长角闪岩	透辉透闪变粒岩	含透辉石英岩	透辉大理岩	蛇纹石化大理岩	透辉石英岩	含石墨英岩	白云石英片岩	透辉石岩	含石墨黑云变粒岩	含石墨富铝片岩
样品数	4	3	3	7	3	4	1	1	2	2	2	1	1	5	12
均值	1.7	1	1.5	0.81	3.7	4.9	6.3	4.1	3.2	6.4	5	3.6	7.4	5.4	4.8

以上有关该区前寒武系地层的金含量资料表明,不同群、组的含金性并不存在明显的含金高的层位,地层中(唐家沟岩组、林家寨岩组,其次是荆山群的陡崖岩组、野头岩组)含金量的偏高或相对低与其构成的岩石组合有关,即偏镁铁质、原岩以杂砂质为主的岩石金含量相对高,但值域也基本变化在岩石正常的丰度范围。

3.1.3 古深成侵入体及榴辉岩的含金性 对研究区代表性的古深成侵入岩(花岗片麻岩、超基性-基性岩等)进行了相应含金量的测定。从岩性的含金性上分析,超基性岩的金含量相对高,一般为 $w(\text{Au})\ 6.20 \times 10^{-9} \sim 6.95 \times 10^{-9}$,高值可达 $w(\text{Au})\ 68 \times 10^{-9}$, [有的测试结果可达 $w(\text{Au})\ 100 \times 10^{-9}$ 以上],明显高于地壳的克拉克值;花岗质片麻岩[$w(\text{Au})\ 3.50 \times 10^{-9} \sim 4.50 \times 10^{-9}$]、榴辉岩(印支期初期^[25],作为变质岩放此讨论)的含量低于地壳及岩石圈的丰度值,表明花岗质岩石和高压变质岩的含量低,其它岩性在地壳丰度值范围内。花岗岩化和榴辉岩相变质作用及退变过程(榴辉岩→斜长角闪岩)金含量略减少,即丢失部分金(表 5)。

表 5 古深成侵入体、榴辉岩类的含量表

Table 5 Gold contents in the paleohypogene rocks and eclogites

岩石名称	$w(\text{Au}) / 10^{-9}$		
蛇纹石化橄榄岩	(10)68.00		109
辉石-二辉石岩	(2)6.20	6.95	21.0
斜长角闪岩	(10)5.86	4.98	4.00
花岗闪长质片麻岩	(2)3.50	4.20	41.0
二长花岗质片麻岩	(4)4.50	3.62	15.0
榴辉岩	(2)4.00	胶东部	胶西北部
榴闪岩	(6)2.00		
榴辉岩质斜长角闪岩	(8)3.00		
资料来源	本文	[5]	

3.2 中生代地质体的含金性

中生代与岩浆作用、火山作用有关的地质体含金性表现:

碱性花岗岩(交代地幔型,如石岛、艾山岩体等)的含金量偏高,变化范围为 $w(\text{Au})\ 3.54 \times 10^{-9} \sim 12.03 \times 10^{-9}$,其内部的包体含量高达 $w(\text{Au})\ 56 \times 10^{-9}$;其次,交代重熔型(崑崙山、玲珑岩体)花岗岩 $w(\text{Au})\ 4.07 \times 10^{-9} \sim 11.50 \times 10^{-9}$ 、壳-幔混合型花岗杂岩(如伟德山岩体) $w(\text{Au})\ 3.00 \times 10^{-9} \sim 7.50 \times 10^{-9}$ (表 6)。

火山岩的含金量为 $w(\text{Au})\ 3.00 \times 10^{-9} \sim 8.5 \times 10^{-9}$,银的含量 $w(\text{Ag})\ 105 \times 10^{-9} \sim 232.5 \times 10^{-9}$;金含量在碱性脉岩为 $w(\text{Au})\ 8.60 \times 10^{-9}$ 、酸性脉岩为 $w(\text{Au})\ 5.50 \times 10^{-9} \sim 6.50 \times 10^{-9}$ 、煌斑岩 $w(\text{Au})\ 2.00 \times 10^{-9} \sim 6.50 \times 10^{-9}$,多数脉岩的金含量变化均在地壳丰度值范围内,相对而言有些脉岩(碱性花岗斑岩、橄榄拉辉煌斑岩等)及岩浆包体的含量偏高(表 7)。

表 6 中生代花岗岩的含金量对比表

Table 6 Gold contents in Mesozoic granite $w(\text{Au}) / 10^{-9}$

岩石名称	岩性	样品数	金含量均值	资料来源
地幔交代型花岗岩	辉石正长岩	3	7.55	本文
	角闪正长岩	3	3.54	
	石英正长岩	4	6.67	
	正长花岗岩	6	12.03	
	角闪二长正长岩(包体)	1	56.00	
交代重熔型花岗岩	崑崙山石榴二长花岗岩	5	11.50	[15]
	崑崙山中粗粒二长花岗岩	4	5.80	
	崑崙山花岗岩	53	7.03	
	玲珑花岗岩	430	4.50	
	滦家河花岗岩		9.10	
壳-幔混合型花岗岩	鹤山花岗岩	13	4.07	[15]
	伟德山石英二长闪长岩	2	7.50	本文
	伟德似斑状角闪二长花岗岩	6	3.00	[15]
	郭家岭花岗闪长岩	30	6.10	[10]

表 7 火山岩、脉岩的含金量对比表

Table 7 Gold contents in volcanic rocks, dykes of Mesozoic					$w_B/10^{-6}$
岩石名称		样品数	Ag 均值	Au 含量平均值	资料来源
火山岩类	安山质集块角砾岩	2	232.5	8.50	本文
	安山质晶屑凝灰岩	1	105	3.00	
碱性	斜长伟晶岩	1	130	6.50	
酸性	钾长伟晶岩			5.50	
脉岩	碱性花岗斑岩			8.60	
煌斑岩类	闪斜煌斑岩	5		5.52	[16]
	橄榄拉辉煌斑岩	1		6.50	
	蚀变闪斜煌斑岩	3		2.03	
	蚀变煌斑岩	1		2.00	
	闪斜煌斑岩	3		2.71	[17]
	云斜煌斑岩	2		2.60	
	拉辉煌斑岩	2		2.45	

以上有关变质地层、古深成侵入岩及榴辉岩的含金性系统研究表明, 含金量较高的地质体或岩性主要是镁铁质成分较高的变质岩(除榴辉岩类外)及碱质程度较高的岩浆岩及脉岩。若单从含金性角度看, 它们均不构成金含量较高的简单矿源地质体, 但显示地质体经过多期再造作用, 尤其是花岗岩化、高压变质过程具明显的去金作用、转移富集。

4 壳-幔过程对成矿的贡献

大型脉金矿的形成仅仅依赖于‘矿源层’或‘矿源岩’是不够的, 它需要多方面的条件密切配合。胶东金矿集中区地质体并无金含量特殊高的岩石或地层, 用单一的背景值或简单的地质过程解释金含量从 10^{-9} 量级的岩石或地层迁移富集几千倍甚至上万倍是不完全的(如: 沉积岩、岩浆岩、变质岩)。上述区域地质体的含金性表明, 其含量均低于或略高于地壳的克拉克值, 这一点与南非巴伯顿绿岩带(科马提岩为 $w(\text{Au})\ 0.27 \times 10^{-9} \sim 0.45 \times 10^{-9}$)、澳大利亚西南 Mt. Clifford 绿岩带[$w(\text{Au})\ 0.49 \times 10^{-9}$]背景含金性一致, 金背景含量低^[18], 相比之下, 我们的分析值可能还系统偏高。金是陨石的微量组份, 铁质陨石和球粒陨石的金属相都具有较高的含金量[$w(\text{Au})\ 0.055 \times 10^{-6} \sim 8.744 \times 10^{-6}$; $0.448 \times 10^{-6} \sim 2.9 \times 10^{-6}$]^[14]; 地壳和地幔的平均金含量并不高, 分别为 $w(\text{Au})\ 0.004 \times 10^{-6}$ 、 0.005×10^{-6} , 地核中含金高达 $w(\text{Au})\ 2.6 \times 10^{-6}$ ^[18, 19], 显示深部或地幔以下的区域可能是提供金成矿物质的主要场所。胶东金矿集中区的形成均与钙碱性煌斑岩、偏碱的钙碱性交代重熔型花岗岩及壳-幔混合型化岗岩相伴生及在基底(晚太古代绿岩、早元古代为孔达岩系、晚元古代叠加钙碱性花岗质片麻岩等)构造岩浆作用发展起来的, 为具强烈壳-幔物质交换的结果。

现代地球物理资料揭示的地壳模式, 上地壳主要是由沉积岩和侵入的花岗岩类组成; 中地壳由相当于混合岩的岩石组成; 下地壳主要由麻粒岩的岩石组成。胶东前寒武纪变质岩大致可

划分三个亚区: 桃村断裂以西主体为深变质的麻粒岩相区; 桃村断裂-米山断裂之间为麻粒岩-角闪岩相区; 米山断裂以东为角闪岩相-榴辉岩相区。因此, 出露的岩石可看作地壳(中、下)不同层位的组成, 将不同层位的成矿元素的含量均值列表 8, 从表中成矿元素对上地幔的丰度系数看出: 中、下地壳 Cu(1.3, 0.26~2.8)、Au(0.8, 0.34~0.76)、Zn(1.03, 0.64~1.83)、Ni(0.014, 0.19~0.024)、Co(0.18, 0.23~0.32)、Cr(0.08, 0.13~0.17)的贡献不明显, Ag(10.7, 10~17)、Mo(11.3~22.5)的贡献相对明显, Pb(57.18, 62.42~73.97)和 Mn(1700~4590)的贡献大; 地幔(富集地幔)来源的超基性-基性(Au: 4.42, Ag: 45)及斜长角闪岩(Au: 1.17, Ag: 50)、碱性岩浆及其岩浆包体(Au: 1.46, 11.2)对金成矿的贡献较大; 榴辉岩、交代重熔

表 8 胶东地区地质体(中、下地壳)的成矿元素的含量/富集系数

Table 8 Metallogenic element contents and enrichment coefficient in geological bodies of the Jiaodong region

地质体名称		样品数	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Ni	Co	Cr	Mn	Mo
胶东群		42	4. 10 ⁺	106. 7	41.07	18. 87	64. 54	33. 93	19. 33	82. 2	600	
			0. 80	10. 7	1.33	57. 18	1. 03	0. 014	0. 18	0. 08	1700	
荆山群		104	3. 15	170	86.38	20. 96	40. 30	57. 65	33. 55	128. 8		
			0. 63	17	2.80	63. 15	0. 64	0. 024	0. 32	0. 13		
荆山群	禄格庄组	13	1. 71	100	37. 5	24. 5	115				1300	6. 8
			0. 34	10	1. 21	74. 24	1. 83				4400	11. 3
	野头组	12	3. 8	100	19. 1	24. 4	94. 6				1300	6. 3
			0. 76	10	0. 62	73. 93	1. 51				4400	10. 5
	陡崖组	(79)	3. 7	100	54. 5	20. 6	230	46. 68	24. 5	173. 2	1350	13. 6
			0. 74	10	1. 76	62. 42	3. 66	0. 019	0. 23	0. 17	4590	22. 5
辉石岩-二辉石岩		12	37. 1	500	61. 14	26. 64	75. 89	841. 9	53	1303		
			7. 42	50	1. 98	80. 72	1. 21	0. 351	0. 50	1. 28		
斜长角闪岩		10	5. 85	450	61. 74	13. 72	571. 5	97. 56	48. 12	237. 3	2550	
			1. 17	45	2. 0	41. 57	9. 09	0. 041	0. 46	0. 23	8670	
花岗质片麻岩		6	4. 0	110. 4	18. 68	31. 28	45. 3	23. 8	18. 88	21. 38	449	1. 56
			0. 80	11. 04	0. 60	94. 79	0. 72	0. 010	0. 18	0. 02	1526	2. 60
榴辉岩		16	3. 0	261. 4	38. 02	22. 23	307. 6	128. 1	53. 0	346. 9		1. 35
			0. 60	26. 14	1. 23	67. 36	4. 90	0. 054	0. 79	0. 34		2. 25
地幔交代型	正长岩	17	7. 45	152. 8				14. 32	7. 73	67. 5		
			1. 49	15. 28				0. 006	0. 07	0. 07		
	深源包体	1	56		51	50	80	36	34. 4	28. 6		
			11. 20		1. 65	151. 5	1. 27	0. 002	0. 33	0. 03		
交代重熔型	石榴二长花岗岩		0. 27	81. 44	8. 30	3. 64	18. 75	5. 43	14. 38	19. 46		
			0. 054	8. 144	0. 27	11. 03	0. 30	0. 002	0. 14	0. 02		
	石榴二长花岗岩	5	1. 16	61. 64	10. 1	36. 06	24. 12	3. 76	3. 28	11. 54		
			0. 232	6. 164	0. 33	109. 3	0. 38	0. 002	0. 03	0. 01		
	中粒二长花岗岩		0. 21	69. 52	6. 44	7. 26	20. 00	2. 20	3. 04	12. 50		
			0. 042	6. 952	0. 21	22	0. 32	0. 001	0. 03	0. 01		
	粗粒二长花岗岩	5	1. 83	137. 4	10. 12	27. 23	30. 37	3. 3	3. 08	7. 4		
			0. 366	13. 74	0. 33	82. 51	0. 48	0. 001	0. 03	0. 01		

$w(\text{Au}, \text{Ag}) / 10^{-9}, w_{\text{B}} / 10^{-6}$ * 元素含量富集系数

型花岗岩的金富集系数更小(Au: 0. 042 ~ 0. 366) 。显示与幔源有成因联系的地质体或岩石比中、下地壳成因的岩石或地质体对金等成矿元素贡献大。因此, 从含金性角度来看, 地幔(乃至地核) 是提供金的主要来源; 从地质体成因演化角度来看, 高压变质作用、向酸性岩浆演化过程富集系数明显减小, 金发生转移, 这一过程明显对形成金矿有利; 碱性岩的富集系数相对高、具有富集的特征、表现为金的载体。

对壳-幔混合型花岗岩的研究结果(表 9) : 随岩浆演化 Au 的富集系数略降低(1. 08 ~ 0. 78) , Ag(50 ~ 21. 25) 呈降低的趋势, Cu(0. 356 ~ 0. 256) 、Zn(0. 94 ~ 0. 8) 的变化不明显, Pb 的富集系数(63. 64 ~ 75. 76) 略有增加, 对金、银、铜等成矿元素均发生转移, 尤以银为甚。在转移过程中, 由于金、银地球化学性质上具有亲铁和亲硫性, 因此, 金可赋存在铁镁质矿物和副矿物(如磁铁矿、黄铁矿) 中, 构成金、银等成矿元素的载体(胶东中生代花岗岩的黑云母 $0.6 \times 10^{-9} \sim 3.4 \times 10^{-9}$, 磁铁矿 $0.4 \times 10^{-9} \sim 9.8 \times 10^{-9}$, 石英脉的黄铁矿 $0.12 \times 10^{-6} \sim 1.20 \times 10^{-6}$, 长英质矿物(斜长石 $1.3 \times 10^{-9} \pm$, 石英 $0.27 \times 10^{-9} \pm$)^[20, 21] 金、银的含量极低, 是铁、镁以及金、银的清洁物。

表 9 壳-幔混合型花岗岩类的成矿元素含量富集系数*

Table 9 Metallogenic element contents and enrichment coefficient in granite
of crust-mantle mixed styles

岩石名称	样品数	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Mn	Mo	W	Sn
辉石闪长岩	10	5. 4	500	11	21	59		6. 5	50	5
		1. 08	50	0. 356	63. 64	0. 9392		10. 83	66. 7	6. 33
石英二长闪长岩	9	4. 18	45. 6	26. 5	17. 0	60		4. 21	1. 39	
		0. 816	45. 60	0. 858	51. 52	0. 9551		7. 015	1. 85	
角闪二长花岗岩	22	3. 9	212. 5	7. 9	25	50	313. 5	6. 9	50	5. 61
		0. 78	21. 25	0. 256	75. 76	0. 7959	1066. 0	11. 50	66. 7	7. 10
闪长玢岩	9	160	600	50	38	168	100	110		10
		32	60	1. 619	115. 2	2. 674	340. 02	183. 3		12. 7
煌斑岩	15	33. 5	100							
		6. 7	10							
细粒闪长岩	2	42. 7	550	50	10	450	2250	23		10
		8. 54	55	1. 619	30. 30	7. 163	7650	38. 33		12. 7

* 样品由长春科技大学测试中心完成, 部分样品来自山东地质六队; 上地幔成矿系数= 岩石成矿元素/ 上地幔成矿元素丰度; 上地幔成矿元素丰度: Mo 以涂里干和费德波(1961) 指出的基性岩和超基性岩平均含量为基础, 按 Ring Wood 地幔岩模式计算的世界上地幔元素; $w(\text{Au}, \text{Ag}) / 10^{-9}$, $w(\text{Pb}) / 10^{-6}$

以上分析可以看出, 原生金、银主要来源于地幔, 在壳-幔交换过程中作为次生金(银) 进入地壳。

对该区典型矿床的氢氧同位素地球化学研究表明, 金矿床(如玲珑、焦家、大尹格庄、乳山、牟平等金矿) 的氢、氧同位素的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}} - 2.07\text{‰} \sim 9.33\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} - 37.04\text{‰} \sim -154.98\text{‰}$, 并与区域交代重熔型花岗岩的氢、氧同位素明显一致(交代重熔型花岗岩全岩 $\delta^{18}\text{O} + 7.4\text{‰} \sim +8.8\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}} + 7.48\text{‰} \sim +10.9\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{长石}} + 7.1\text{‰} \sim +9.0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{Bi}} + 2.01\text{‰} \sim +5.21\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} + 4.7\text{‰} \sim +9.1\text{‰}$, $\delta^{18}\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} - 37.4\text{‰} \sim -89.4\text{‰}$), 反映岩浆水为主、具地幔初生水, 并有

一定的大气水参与的特征,而交代重熔型花岗岩的原岩又主要是胶东群和荆山群及花岗质片麻岩、超镁铁-镁铁质岩等;含金铅锌矿床(如大时家) $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} + 0.8\text{‰} \sim + 4.95\text{‰}$, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} - 39\text{‰} \sim - 76.6\text{‰}$,成矿溶液以岩浆水为主;含金银矿床 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} - 3.1\text{‰} \sim - 29\text{‰}$, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} - 73\text{‰} \sim - 123\text{‰}$,成矿溶液以大气水为主。因此,胶东地区金矿的成矿溶液来源十分复杂,用单一的机制是无法揭示的。成岩物质的来源演化的不同,成矿溶液也具有地幔、地壳及不同程度的大气水参与(岩浆水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} + 6\text{‰} \sim + 10\text{‰}$, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} - 40\text{‰} \sim - 80\text{‰}$;变质水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} + 4\text{‰} \sim + 20\text{‰}$,据 Brown, 1981;地幔初生水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} + 4.5\text{‰} \sim + 7\text{‰}$, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} - 60\text{‰} \sim - 100\text{‰}$,据 Craig, 1976 和黑田, 1978)。

5 金(银)成矿元素的活化、富集机制

金的自然状态多种多样,主要以天然元素状态和类质同相产出,或是作为含有银、铜或铂等金属的各种合金主要组成部分。金具有很强的亲铁性,还很容易与碲、铋、锑相结合,形成多种矿物^[11],且已被产出状态所证明,如果将上述那种铁质陨石和球粒陨石的金属相作为地幔原生金的话,显然原生金主要赋存在地幔或地核。金在地幔岩浆过程中地球化学行为主要取决于硫的含量,硫化物具有非常高的金元素的分配系数,在地幔部分熔融过程中,如果硫不饱和,则金元素进入岩浆中,相反被保存在硫化物相中。结合这一原理,研究区主要为不同地质时期岩浆作用、火山作用形成的地质体,前寒武纪地质体中存在超基性、基性和中酸性古深成侵入岩,火山岩均为强烈壳-幔交换,地幔部分熔融或地壳部分熔融形成的产物,这些地质体均为贫镁、富铁为特征^①,均未形成典型的硫化物矿床,这种特征显示形成岩浆作用过程以富铁、贫镁及硫为主的过程。因此,无论从地幔部分熔融,还是从地壳部分熔融作用的角度上看,其作用过程均有利于从地幔或地壳中提取金元素,这种作用可能是导致原生金等成矿元素从地幔或地核被提升到地表或地壳深部作为次生金赋存在以镁铁质为主的基性或超镁铁质岩中的主要形式(即镁铁质矿物中)。特别是中生代苏鲁A-型俯冲过程,强烈的幔-壳交换过程使大离子半径元素被排挤到岩浆熔体中(榴辉岩相对其它镁铁质岩的金含量明显低, $w(\text{Au}) 2.0 \times 10^{-9} \sim 4.0 \times 10^{-9}$),形成的花岗岩的金含量也并不是很高(表6~9),尤其是与金矿床成因密切相关的交代重熔型花岗岩类、壳幔混合型花岗岩等更明显,胶东群及荆山群被交代、重熔形成的花岗岩类的金(银)的含量又表现降低的趋势。即:前寒武纪壳-幔过程使金(银)等成矿物质“第一次”从地幔活化、作为次生元素赋存在前寒武纪镁铁质矿物及副矿物(磁铁矿、碲-硫铁矿物等)相对较高的地质体中;中生代壳-幔交换作用体现高压-超高压变质作用^[25]、富集地幔提供金等成矿元素和流体(C-H-O-Si-K等)及导致前寒武纪地质体发生大规模交代(碱交代为主)-重熔作用,形成碱质-钙碱质花岗岩浆,并使得前寒武纪地质体中的金也得以活化(释放)、转移,成矿元素因强烈的去硅、碱交代作用在接触带中富集或进入岩浆体中,当岩浆结晶向酸性岩浆演化,Fe、Mg、Au、Ag等比重大的成矿元素又被排除,向岩浆结晶晚期转移,赋存在硫化物及氧

① 同 P44①

化物(如黄铁矿、磁铁矿等)副矿物中。从成岩角度上分析,相对稳定的环境条件下向根部转移聚集。研究表明,岩体的接触带和根部又是深部流体、断裂活动的主要场所。因此,由韧性转入脆性的断裂和深部流体作用,能量的聚集必然导致这些部位的再度活化,进一步形成更富含成矿元素(Fe、Mg、Au、Ag等)的岩浆,压力降低、能量释放发生熔-溶离作用、并沿断裂上升侵位,结晶形成脉岩、石英脉型矿床(如玲珑、乳山等金矿床)和蚀变岩型矿床(如焦家、大尹格庄等金矿床)(两者断裂程度不同);含金银矿床与壳-幔混合型花岗岩有密切的成因关系,其成矿物质的富集是壳-幔分层熔融形成的岩浆、经混合后分离结晶的基础上富集的(如夏庄含金银矿等)。

有关含金铅锌矿床的形成。从上述两个过程均有一定程度的铅、锌富集。就前者来看,形成的矿床以含金铅锌矿为主,后者应为含银为主的铅锌矿。研究区形成的类型均为以含金、银(主要以银)为主的铅锌矿床,且在空间上与壳-幔混合型花岗岩有一定成因关系,从铅锌活化的角度上看,壳-幔岩浆作用提供部分银、金,伴随前寒武纪地质体被活化提供的铅锌物质迁移富集成矿(如大时家含金银铅锌矿等)。事实上,在金矿床的晚期也往往伴生铅锌矿化,也证明上述两种作用均可导致形成铅锌矿,故铅锌主要来源于围岩、银主要来自壳-幔混合型花岗岩。

上述形式表明,强烈的壳-幔物质交换是使金等成矿物质活化、转移的根源,陆-陆俯冲高压变质作用过程亦表现大离子元素(K、Si、Au、Ag等)被排挤以不同的方式进入到地壳或岩浆体系中,进而导致该区广泛的交代、重熔形成大规模岩浆以及分层熔融、混合形成壳幔岩浆过程,体现该区成矿重要的地质背景。

6 结论与讨论

区域地质体的含金性研究表明,它们的含金量虽有一定的差别,但并不存在特定的矿源层或矿源岩,其含量基本上在克拉克值范围内变化。成矿物质的来源具有多源性质。区域前寒武纪、中生代的强烈壳-幔过程,特别是中生代构造-岩浆作用及活化、去根作用是形成该区金矿集中区的主要因素。

在地球化学性质上,金不具有亲氧、亲氟和亲花岗岩元素的特征,但又与花岗岩有密切的时空和成因联系,而花岗岩的形成又是强烈构造运动后的产物^[14, 19, 23, 24]。因此,岩浆体中的成矿物质多下沉于底部或岩体基部;同时,接触带又是去硅、碱和成矿元素聚集的有利场所、亦是成矿物质聚集的部位;主岩体固结之后,再次发生构造作用,导致根部已固结或未完全固结的岩体接触带及根部进一步活化,地幔热流的作用、能量的积累,必然会导致大量的成矿流体沿断裂发育的部位上升;含矿流体进入到上部已固结的岩石,发生熔-溶离作用、形成中低温富镁、铁质的、中—低温富铝的熔浆和中—低温成矿溶液,在有利的构造部位分别形成(也可能同时形成)煌斑岩、伟晶岩、石英岩脉及矿体。这种现象与该区金矿床的地质特征相一致,矿区内经常存在上述几种脉岩共生现象(如玲珑、乳山金矿、三甲金矿床等),既有同成矿期的煌斑岩脉岩,又有成矿前、成矿后的煌斑岩,成矿既与花岗岩、伟晶岩、石英岩脉有密切的关系、又与煌斑岩密切伴生,具壳-幔交换作用的成矿性质。拉张环境的碱交代、岩浆分异作用导致比重相对

大的载体矿物微粒聚集在岩浆体的根部和边部(交代为主)形成成矿元素集中区已被地质现象所证实,在其成岩后或晚期,通过深部(交代上地幔、下地壳、上地壳)构造、流体(碱质为主)进一步作用,导致岩体的根部、边部和相关的变质岩系中发生再度活化作用,形成壳-幔混合富含金等元素的成矿熔-溶(指岩浆与溶液的临界状态)体;随后,成矿熔浆-溶体上升进入脆性断裂域,压力释放,成矿熔体发生熔-溶离作用,在有利的构造部位赋存、结晶形成矿床及伴生的各种类型的脉体。这一事实与该区的大型的金矿床就位于交代重熔型花岗岩岩体的边缘带(接触带)和中心部位(相应的下部应为根部)的压扭性脆性断裂体系中的有利部位(扩容部位)是一致的。胶东地区金矿床(大型或超大型及中型、小型)主要分布在中生代交代重熔型花岗岩内部及围岩接触带的断裂体系中,从西往东:莱州西北成矿带,招掖成矿带,栖霞-蓬莱成矿带,以及研究区的牟平-乳山成矿带等。莱州西北成矿带主要矿床为三山岛、仓上两个特大型、大型金矿,其围岩为胶东岩群地层、交代重熔型花岗岩的外接触带,控矿断裂主要为三山岛 NNE 向断裂(三山岛断裂南段)。招掖成矿带由三个亚矿带组成(焦家-新城、灵山-北郭和玲珑),主要金矿类型有焦家式、玲珑式及介于两者之间的灵山沟式,矿床主要分布在玲珑花岗岩体内部及内外接触带中,控矿断裂主要为 NNE-NE-NEE 向压扭性断裂。栖霞-蓬莱成矿带主要由栖霞金矿、百里店金矿、大流口金矿等矿床构成,控矿断裂为 NNE 向,其次为北西向(如马家窑金矿),围岩为胶东群变质岩,其深部为交代重熔型花岗岩(玲珑)。乳山-牟平成矿带主要有乳山金矿、邓格庄金矿等,矿体赋存在交代重熔型花岗岩(昆嵛山)及围岩变质片麻岩(荆山群及其元古宙花岗质片麻岩),控矿断裂及/或容矿断裂主要为 NNE-NE 向压扭性断裂,尚存在受 NW 向及近 EW 向的断裂系统所控制的矿床(如范家埠金矿、蓬家乔金矿等),矿体赋存在交代重熔型花岗岩(鹤山)接触带上。含金铅锌矿床既受 NE 向压扭断裂控制,又存在 NW 向张扭断裂控制型式,围岩为元古代花岗片麻岩。含金银矿床主要受晚期 EW 向断裂破碎带所控制,赋存在壳-幔混合型花岗岩的近中心部位。

本文仅为研究成果的一部分,有关内容尚待研究发表之中。

参考文献

1. Emmons N H. Gold deposits of the world. New York Mac Graw Hill Book Co. Inc 562, 1937
2. Mantei E J. Brownlow A H. Variation in gold content of minerals of the Marysville quartz diorite stock Montana. *Geochem et Cosmochem Acta*, 1967, 31: 225 ~ 215
3. Condie K C. Archean greenstones belts. Elsevier, Amsterdam, 1981
4. 沈保丰, 骆辉. 华北陆台太古宙绿岩带金矿的成矿特征. *华北矿产地质*, 1994, 9(1): 87 ~ 95
5. 朱奉三. 混合岩化热液金矿床成矿作用初步研究专辑. *地质与勘探*, 1980, (7): 1 ~ 9
6. 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. *地质找矿论丛*, 1986, 1(1): 10 ~ 28
7. Keays R R. Archean gold deposits and their source rocks: the upper connection. The geology, geochemistry and genesis of gold deposits. *Proceedings of symposium "gold"*, 1992
8. Boyle R W. the geochemistry of gold and its deposits. *Geological survey Canada Bulletin*, 1979, Vol. 280
9. 王鹤年, 等. 胶东金矿含金建造的地球化学研究. 1988, (3): 195 ~ 208
10. 姚凤良, 刘连登, 孔庆存, 等. 胶东西北部脉状金矿. 吉林科学技术出版社, 1990

11. 王鹤年, 等. 胶东西北部混合岩、花岗岩及其与金矿化关系. 南京大学学报(地质版增刊), 1988, (4): 29 ~ 40
12. 孙丰月, 石准立, 冯本智. 胶东金矿地质及幔源 C-H-O 流体分异成矿. 长春: 吉林人民出版社, 1995
13. 孙景贵, 姚凤良. 胶东金矿床的形成条件及源区性质刍议. 世界地质, 1997, 16(1): 43 ~ 49
14. R W 博伊尔[加]. 金的地球化学及金矿床. 北京: 地质出版社, 1984
15. 裘有守, 等. 山东招远-掖县地区金矿区域成矿条件. 辽宁科技出版社, 1988
16. 季海章, 赵懿英, 卢冰, 等. 胶东地区煌斑岩与金矿关系初探. 地质与勘探, 1992, (2): 15 ~ 16
17. 翟建平, 胡凯, 陆建军. 乳山金矿煌斑岩及流体和氢氧锶同位素研究. 矿床地质, 1996, 15(4): 364 ~ 358
18. 何谷先. 浅谈金的成矿控制因素. 黄金科学技术, 1995, (3): 33 ~ 36
19. 胡受奚, 胡志宏, 郭继春. 中国东部花岗岩类的成岩和成矿及其与构造环境的关系. 矿床地质, 1991, 10(2): 57 ~ 96
20. 徐金方. 胶北地块与金矿有关的花岗岩类的研究. 山东地质, 1989, (2)
21. Goldschmidt V M. Geochemistry. Clarendon press, Oxford, 1954. 730
22. 刘英俊. 金的地球化学. 北京: 科学出版社, 1991
23. 胡受奚, 王鹤年, 王德滋, 等. 中国东部金矿地质学及地球化学. 科学出版社, 1998
24. 胡受奚, 赵懿英. 华北地台金成矿地质. 科学出版社, 1988
25. Ames L, Zhou G Z, Xing B C. Geochronology and isotopic character of ultrahigh pressure metamorphism with implications for collision of the sino-korean and Yangtze cratons, Central China. Tectonics, 1996, 15(2): 472 ~ 489

RELATIONS OF GOLD ABUNDANCE IN GEOLOGIC BODIES TO GENESIS OF GOLD DEPOSITS, JIAODONG

Sun Jinggui

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093)

Abstract

The paper deals with the gold abundance in the geologic bodies of the gold deposit-concentrated zone in Jiaodong Area on the basis of recent new analytical data. It shows that the gold abundance in the metamorphic rocks or strata is rather low ($1.9 - 4.5 \times 10^{-9}$ in average), and in the relevant granites is only $0.27 - 1.83 \times 10^{-9}$ in average. The gold contents decrease with increasing granitization, migmatization and amount of felsic minerals. the granitization and alkali metasomatism are the main process for gold mobilization. Faulting activation and deep leaching by which mineralizing elements were out of the bodies' root are the possible major mechanism for mobilization of gold.

Key words geological body, Au-bearing property, mobilization, Jiaodong