

鲁西金矿成矿组分的聚集与演化

陈永清^{1,2} 赵鹏大¹ 刘红光¹

(1. 国土资源部矿产资源定量预测与勘查评价开放研究实验室, 武汉 430074;

2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100083)

摘要: 在地质研究的基础上, 以统计分析为主要手段, 通过对鲁西隆起区太古宙地层、中生代岩体以及不同时代金矿床化学组成的研究, 探索了成矿组分的可能来源、演化和聚集趋势, 提出了矿源层(岩)中元素成矿活度的概念及定量计算方法。研究表明: (1) 在鲁西隆起区, 金的初始矿源是太古宙绿岩带, 金在其中具有双成分分布; (2) 从太古宙至中生代, 虽然成矿时代不同, 成矿作用各异, 但各类金矿床在成矿组分上对含矿建造具有明显的继承性; (3) 含矿建造中成矿组分超量点群与其背景点群的比例以及超量点群中成矿组分的平均质量分数在很大程度上决定了其后生热液矿床的成矿特征。

关键词: 含矿建造; 双成分金分布; 元素成矿活度; 金成矿轨迹; 金矿床; 鲁西。

中图分类号: P618.51; P628⁺.1 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2001)01-0041-08

作者简介: 陈永清, 男, 教授, 1960年生, 1994年毕业于长春地质学院, 获博士学位, 现主要从事矿产资源定量预测与勘查评价的研究与教学工作。

探索成矿物质来源, 追踪成矿轨迹是最终查明矿床定位机制的关键, 也是成矿预测的基础; 而成矿元素的丰度及其赋存形式是鉴别含矿建造和矿源岩的关键因素。Keays等^[1]通过对洋脊玄武岩中贵金属的研究, 强调作为金矿化的矿源岩应当含有超量的金和活泼金。Saager等^[2]通过对南非太古宙绿岩带和欧洲阿尔卑斯山古生代超镁铁质杂岩中金分布研究发现, 金在岩体硅酸盐相和硫化物相中的分配是不均一的, 且具有双成分分布模式。金在硫化物相中以固溶体和包裹体两种形式产出, 并与粒间微粒金一起构成了金质量分数的超量点群($\bar{X}_{Au}=33\times 10^{-9}$, 占总体的19%, $N=98$); 赋存在硅酸盐和氧化物中的金构成了金质量分数的背景点群($\bar{X}_{Au}=1.0\times 10^{-9}$, 占总体的81%, $N=98$)。金的超量点群构成了金的后生矿床的潜在矿源, 这是因为硫化物相中的金和微粒金比硅酸盐和氧化物中的金更易于被流动的热液溶蚀和溶解。Saager等^[2]将这种具有超量点群的岩石定义为矿源岩。刘英俊等^[3]对华南金钨建造的研究得出了类似的结论。成矿元素的双

成分分布是含矿建造的普遍特征^[4]。

1 区域地质概况

鲁西地区系指沂沭断裂以西的基岩隆起区。区内众多的金矿点和一些金矿床初步划分为三种成因类型: (1) 变质热液金矿床; (2) 与侵入岩有关的热液金矿床; (3) 火山热液金矿床。与金矿成矿有关的主要因素包括如下内容: (1) 断裂。以NE向沂沭断裂及NW向断裂为主的断裂系统。在沂沭断裂带内或其附近的中生代火山岩盆地, 一些金矿点受其控制呈NE向分布。在沂沭断裂带以西, NW向断裂系统控制了前寒武纪变质岩系、古生代碳酸盐岩沉积盆地、中生代火山岩盆地和中生代侵入体以及金矿床、矿点的分布。因此, NE向沂沭断裂带及NW向断裂系统构成了研究区的一级控矿地质异常因素。 (2) 地层。本区前寒武纪结晶基底由表壳岩(5%)和深成侵入岩(95%)组成。表壳岩主要包括中太古代(>3000 Ma)沂水岩群和新太古代(>2800 Ma)泰山岩群^[5]。沂水岩群分布于沂水断裂带, 其主要岩性为斜长二辉麻粒岩、二辉角闪斜长片麻岩和斜长角闪岩以及含紫苏磁铁石英岩等一套深变质岩系; 其原

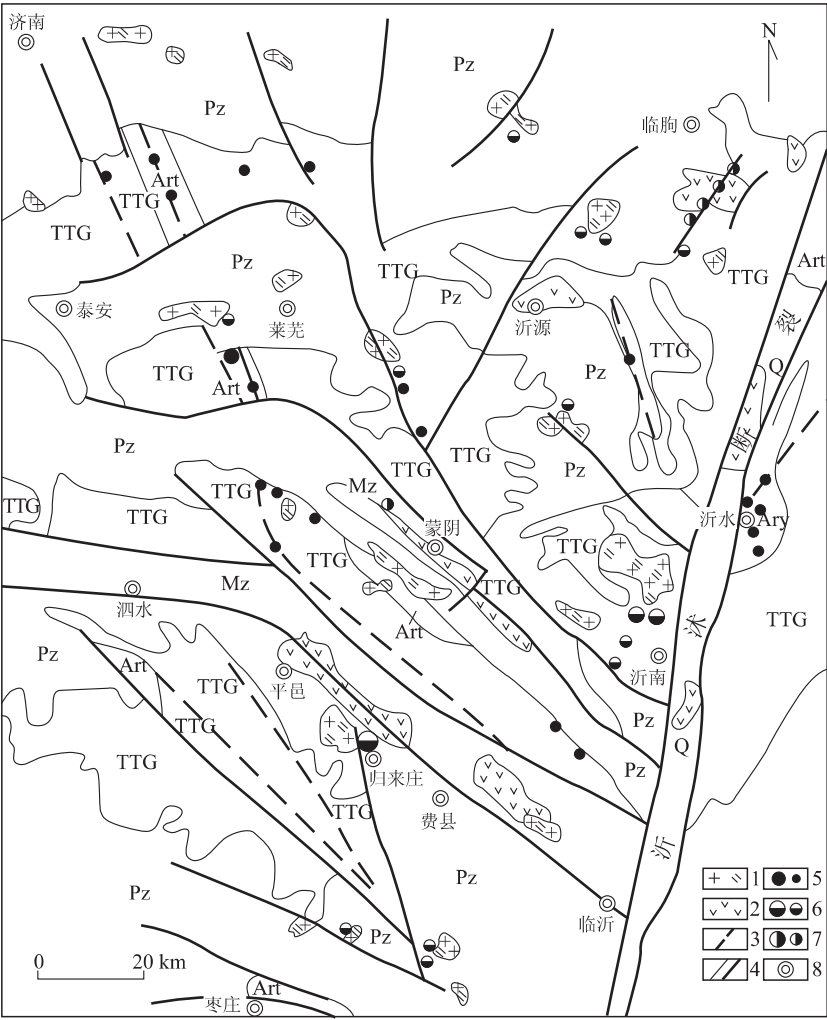


图 1 鲁西隆起区区域地质矿产简图

Fig. 1 Regional outline map of gold mineral resources in the western Shandong uplift terrain

Ary. 沂水岩群; Art. 泰山岩群; TTG. 前寒武纪变质深成杂岩; Pz. 古生代沉积碳酸盐岩; Mz. 中生代碎屑沉积岩. 1. 中生代侵入岩; 2. 中生代火山岩盆地; 3. 韧性剪切带; 4. 断裂; 5. 变质热液金矿床; 6. 侵入岩型热液金矿床; 7. 火山热液金矿床; 8. 地名

岩为超镁铁质—镁铁质熔岩、凝灰岩及泥质砂岩夹硅铁质岩石^[6]. 泰山岩群分布于沂沭断裂带以西的鲁西隆起区,其主要岩性为斜长角闪岩,透闪片岩、角闪黑云变粒岩夹铁闪磁铁石英岩;其原岩为超镁铁质—镁铁质熔岩(科马提岩)、凝灰岩、泥质粉砂岩和硅铁质岩^[7]. 泰山岩群是我国保存最好,发育完整的典型新太古代绿岩带^[7]. (3)中生代岩体. 与岩体有关的金矿床是本区金的主要工业矿床类型. 与金矿有关的侵入体皆为中生代浅成斑状杂岩体,发育于隐伏基底(这里指被古生代沉积碳酸盐岩覆盖的前寒武结晶基底区)区. 金矿床(矿点)通常环绕侵入体分布(图 1). 这类金的工业矿床的形成归结于矿源(前寒武纪结晶基底),热源(中生代侵入岩),有利围岩(古生代沉积碳酸盐岩)和成矿构造等成矿要素

的最佳匹配.

2 绿岩带含金性及其组分的质量分数分布特征

2.1 太古宙绿岩带含金性分析

为研究鲁西太古宙绿岩带的含金性及地球化学特征,为金矿定量勘查评价提供基础信息,从沂水岩群和泰山岩群标准剖面采集了 212 件基岩地球化学样品,由原地矿部武汉综合岩矿测试中心定量分析了 Au (C—ES), Ag (ES), Cu (ICP—AES), Pb(XRF), Zn(ICP—AES), W (POL), Mo (POL), Cr(XRF), Co(ICP—AES), Ni(ICP—AES), V(ICP

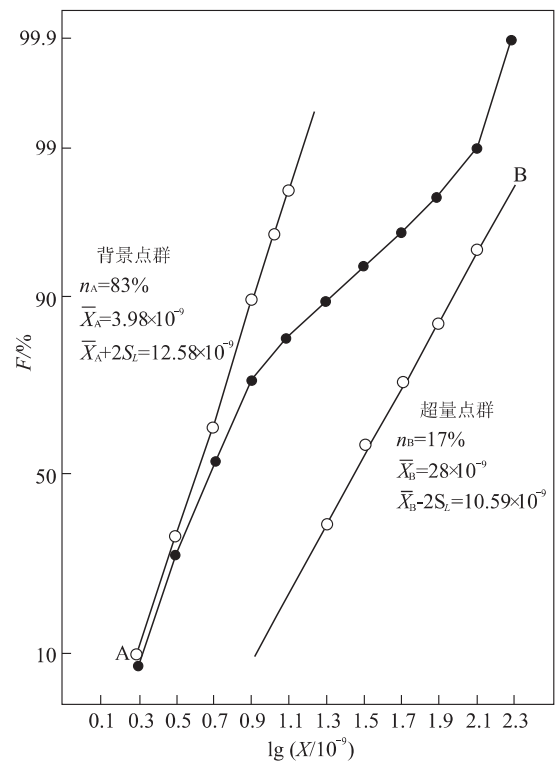


图 2 鲁西太古宙绿岩带金的配分对数累积概率分布
Fig. 2 Partitioned log probability plot of 216 Au values from Archean greenstone belts in the western Shandong uplift terrain

—AES), As (AFS), Sb (AFS), F (ISE), B (ES), K₂O (XRF), Na₂O (ICP—AES), SiO₂ (XRF) 18 种组分. 通过 Au 在鲁西太古宙绿岩带中分布研究表明: (1) 金在鲁西太古宙绿岩带显示高丰度 ($X = 1.3 \times 10^{-9} \sim 200 \times 10^{-9}$; $\bar{X} = 11.86 \times 10^{-9}$), 并显示正偏对数长尾分布的特征; (2) Au 的累积频率分布 (图 2) 表明: Au 在鲁西太古宙绿岩带具有典型的双成分分布特征 (bimodal distribution pattern), 17% (n_B) 的金属属于超量点群 (excess population; $X_B = 10 \times 10^{-9} \sim 200 \times 10^{-9}$, $\bar{X}_B = 28 \times 10^{-9}$), 83% (n_A) 的金属属于背景点群 (background population; $X_A = 1.3 \times 10^{-9} \sim 10 \times 10^{-9}$, $\bar{X}_A = 3.98 \times 10^{-9}$); 前者主要以粒间金和金的硫化物形式赋存于岩石中, 后者主要以晶格金的形式赋存于岩石中.

设成矿元素研究总体为 N , 其总体成矿元素平均质量分数为 $\bar{X}$, 成矿元素背景点群与异常点群分别为 N_A 和 N_B , 其相应的平均质量分数分别为 $\bar{X}_A$ 和 $\bar{X}_B$, 定义元素成矿活度

$$O_a = \frac{N_B \times \bar{X}_B}{N \times \bar{X}} = \frac{N_B}{N} \times \frac{\bar{X}_B}{\bar{X}} = n_B \times \frac{\bar{X}_B}{\bar{X}}. \quad (1)$$

其中, n_B 是成矿元素超量点群所占研究总体的百分比. 元素成矿活度可理解为在后生热液成矿作用过程中, 含矿建造中成矿元素理论上可被利用的程度, 它同含矿建造中成矿元素超量点群和背景点群的比值与超量点群中成矿元素的平均质量分数的乘积成正比, 同背景点群中成矿元素的平均质量分数成反比.

若设 V 为含矿建造体积, D 为含矿建造密度, 含矿建造中成矿元素的潜在资源量 (Q) 的定量表达式可写为:

$$Q = n_B \times \bar{X}_B \times V \times D. \quad (2)$$

金超量点群在鲁西太古宙绿岩带分布 (表 1) 表明: (1) 就金的超量点群样品所占统计样品的百分比而言, 沂水岩群大于泰山岩群. 在沂水岩群内部, 林家官庄组 > 石山官庄组; 在泰山岩群内部, 山草峪组 > 柳杭组 > 雁翎关组. (2) 就超量点群金平均质量分数分布而言, 沂水岩群略高于泰山岩群, 沂水岩群金的成矿活度亦大于泰山岩群, 其中发育韧性剪切带型金矿化 (沂水长家沟). (3) 就组而言, 山草峪组的金成矿活度最高 (76%), 归来庄大型金矿床和龙宝山金矿床矿区出露 (揭露) 的变质地层皆为山草峪组. 纸房 (西南峪) 构造蚀变岩型金矿床等发育于柳杭组. 总之, 鲁西太古宙绿岩带可能构成该区众多类型金矿床的初始矿源层.

表 1 鲁西太古宙绿岩带金超量点群分布及金成矿活度
Table 1 The distribution of Au excess population and Au ore-forming activity of Archean greenstone belts in the western Shandong uplift terrain

年代地层	岩石地层	N	N_B	$n_B/\%$	$\bar{X}/10^{-9}$	$\bar{X}_B/10^{-9}$	$O_a/\%$
太古宇		212	42	19.8	12.6	28	44
上太古界 (2 788~ 2 580 Ma)	泰山岩群	139	21	15.1	10.7	26	37
	柳杭组	34	6	17.6	10.1	27	47
	山草峪组	31	8	25.8	7.4	22	76
	雁翎关组	74	7	9.5	9.7	26	25
中太古界 (3 133~ 2 900 Ma)	沂水岩群	73	21	28.8	16.0	29	52
	林家官庄组	35	13	37.1	22.9	30	49
	石山官庄组	38	8	21.1	9.7	28	61

2.2 太古宙绿岩带元素质量分数分布特征
采自鲁西太古宙绿岩带的 212 件样品参加了统计分析, 其中包括金的背景点群和超量点群, 总之它们被视为成岩阶段的产物. 总体上鲁西太古宇相对地壳克拉克值, 显著富集 ($k \geq 5$) As, B, Au 和 Cr, 富集 ($k \geq 1.2$) Cu, Zn, Sb, W 和 Ni, V, Co, 贫化 ($k < 0.8$) Mo 以及 K, Na, 即具有富集基性组分的特征.

表 2 鲁西太古宙绿岩带元素质量分数分布及浓集趋势

Table 2 Element average contents and concentration patterns of Archean greenstone belts in the western Shandong uplift terrain

地层	参数	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	W	Mo	As	Sb	F	B	Cr	Co	Ni	V	Na	K	Si	*
太古宇	w_B	12.6	80	48	12.4	89	1.2	0.5	27.4	0.4	487	57	761	34	194	142	1.81	0.82	26.3	
	v	2.9	0.6	0.9	0.6	0.4	2.5	2.8	5.7	1.7	1.1	7.3	1.7	0.7	1.5	0.7	0.6	1.1	0.2	①
	k	5	1.1	1.92	0.84	1.37	1.2	0.45	16	1.3	0.93	5.2	6	1.4	3.5	1.45	0.77	0.38	0.91	
泰山岩群	w_B	10.7	80	58	11.1	91	1.3	0.36	41	0.5	370	83	899	39	230	153	1.75	0.71	25.6	②
	k	4	1.1	2.32	0.75	1.4	1.3	0.33	24	1.7	0.70	7.5	7	1.6	4.1	1.56	0.74	0.33	0.89	
柳杭组	w_B	17.1	60	54	9.4	90	1.6	0.16	144	1.4	253	267	851	35	193	160	1.98	0.61	26.46	③
	k	7	0.86	2.16	0.64	1.38	1.6	0.15	85	4.7	0.48	24.3	6.8	1.5	3.4	1.63	0.84	0.29	0.92	
山草峪组	w_B	6.3	110	31	13.8	81	1.6	0.35	11	0.37	579	23	230	18	73	83	2.37	1.93	29.2	④
	k	2.5	1.57	1.24	0.93	1.25	1.6	0.32	6.5	1.23	1.1	2.1	1.83	0.75	1.3	0.85	1	0.90	1.01	
雁翎关组	w_B	9.7	70	64	10.7	95	1.3	0.36	7	0.23	336	23	1202	47	313	179	1.37	0.23	23.71	⑤
	k	4	1	2.56	0.72	1.46	1.3	0.33	4	0.77	0.64	2.1	9.5	1.96	5.6	1.83	0.58	0.11	0.82	
沂水岩群	w_B	16	90	36	14.8	85	0.9	0.61	1.4	0.25	710	7	498	27	125	122	1.92	1.42	27.97	⑥
	k	6.4	1.29	1.44	1	1.31	0.9	0.55	0.82	0.83	1.35	0.64	4	1.1	2.2	1.24	0.81	0.66	0.97	
林家官庄组	w_B	22.9	90	45	13.1	94	1.1	0.19	1.5	0.25	624	12	530	30	123	154	1.82	1.15	26.25	⑦
	k	9	1.29	1.8	0.89	1.45	1.1	0.17	0.88	0.83	1.19	1.1	4.2	1.25	2.2	1.57	0.77	0.54	0.91	
石山官庄组	w_B	9.7	90	27	16.3	76	0.62	1.0	1.4	0.26	788	2.7	468	25	128	93	2.16	1.68	30.46	⑧
	k	4	1.29	1.08	1.1	1.17	0.62	0.91	0.82	0.87	1.5	0.25	3.7	1	2.3	0.95	0.92	0.79	1.1	
地壳丰度 ^[8]		2.5	70	25	14.8	65	1.0	1.1	1.7	0.3	525	11	126	24	56	98	2.36	2.14	28.8	

单位. Au,Ag;10⁻⁹; K,Na,Si;%;其他微量元素;10⁻⁶. w_B 表示元素平均质量分数, v (变异系数)=标准离差/均值, k (浓集系数)=某地质体元素平均质量分数/地壳丰度. * 指元素浓集序列($k\geq 1.2$):①As→B→Au→Cu→(Zn,Sb)→W→Cr→Ni→V→Co;②As→B→Au→Cu→Zn→Sb→W→Cr→Ni→Co→V;③As→B→Au→Sb→Cu→W→Zn→Cr→Ni→(V,Co);④As→Au→B→W→Ag→Zn→Cu→Sb→Cr→Ni;⑤Au→As→Cu→B→Zn→W→Cr→Ni→Co→V;⑥Au→Cu→F→Ag→Zn→Cr→Ni→V;⑦Au→Cu→Zn→Ag→Cr→Ni→V→Co;⑧Au→F→Ag→Cr→Ni. 样数:太古宇 212 个;泰山岩群 139 个;柳杭组 34 个;山草峪组 31 个;雁翎关组 74 个;沂水岩群 73 个;林家官庄组 35 个;石山官庄组 38 个.

成矿元素 Au,Cu 及矿化剂元素 As,B 的富集,为其后金、铜成矿奠定了物质基础,如沂南铜金矿床和岳庄金矿的金—电气石组合.

泰山岩群与沂水岩群相比,泰山岩群更富含基性组分(Cr,Ni,Co,V),以及 B,As,Cu 和 W 等;而沂水岩群则更富含 Au,F.F 亦是后期金矿化的主要矿化剂,如铜石金矿田普遍发育萤石化.

在沂水岩群内部,总体上林家官庄组更富含基性组分(Cr,Ni,Co,V)和 Au,Cu,Zn 以及 B 等元素,而石山官庄组则以相对富含 F 为特征.在泰山岩群内部,雁翎关组更富含基性组分(Cr,Ni,Co,V),和 Cu,Zn 等元素;柳杭组则以显著富集 As,B,Au 为特征,山草峪组的特征是相对富含 Ag,F.富集元素种类的不同及富集程度的差异在某种程度上影响它们的成矿潜力.一般而论,显著富集成矿元素及矿化剂组分的地质单元应具有较大的成矿潜力.

据其变异系数(v)将鲁西太古宇中的组分划分为 4 种类型:(1)极不均匀型($v>2.0$):B,As,Au,Mo,W;(2)不均匀型($v=1.5\sim 2.0$):Cr,Sb,Ni;

(3)较均匀型($v=1.0\sim 1.5$):K₂O,F;(4)均匀型($v<1.0$):SiO₂,Na₂O,V,Co,Cu,Pb,Zn,Ag.其中极不均匀性组分构成鲁西各金矿床中的成矿元素(Au)组合,较不均匀型元素反映了鲁西中、新太古代多旋回的超基性(基性)岩浆喷发至陆源碎屑沉积的非稳定构造环境.

3 中生代侵入岩含矿(金)性分析

从铜石、龙宝山、铁铜沟和铜井 4 个岩体中共采集 138 件样品,定量分析了 Au,Ag,Cu,Pb,Zn,W,Mo,As,Sb,F,B,Cr,Ni,V,K₂O,Na₂O 和 Si₂O 等 18 种组分(分析单位和分析方法同上).通过薄片鉴定等方法,剔除矿化样品 25 件,参与统计的样品共 113 件,其中铜石岩体 41 件,龙宝山岩体 24 件,铁铜沟岩体 32 件,铜井岩体 16 件.组成铜石岩体的主要岩石类型是闪长玢岩和正长斑岩,构成龙宝山岩体的主要岩石类型是辉石正长斑岩和斑状正长岩,构成铁铜沟岩体的岩石类型主要是花岗斑岩和少量

表 3 鲁西中生代侵入岩元素平均质量分数及浓集序列

Table 3 Element average contents and concentration patterns of Mesozoic ore-forming intrusive rocks, the western Shandong uplift terrain

岩体	参数	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	W	Mo	As	Sb	F	B	Cr	Ni	Co	V	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂	*
铜石岩体	w_B	8.36	480	63	48	68	5.1	4.7	3.1	0.48	678	16.7	7	7	6	73	4.29	6.42	62.64	
	s	8.43	480	101	37	31	4.3	10.8	1.7	0.27	237	21.7	4	4	3	30	1.04	2.12	2.93	①
	k	10	9	2	3	0.78	11.1	7.8	2.8	3.4	0.94	3.2	0.09	0.23	0.29	0.58	1.1	2.78	1.07	
龙宝山岩体	w_B	5.4	260	36	36	54	2.47	2.4	2.4	0.55	633	5.2	11	11	8	42	4.66	5.36	62.80	
	s	3.29	290	33	18	47	1.87	1.6	4.2	0.50	324	6.8	12	9	3	24	1.70	1.65	7.24	②
	k	7	5	1.3	2.3	0.60	5.4	4	2.2	4	0.88	0.98	0.14	0.35	0.38	0.34	1.2	2.30	1.08	
铁铜沟岩体	w_B	4.21	100	8	25	68	3.89	0.31	1.96	0.68	393	9.3	157	44	12	50	3.66	3.99	68.13	
	s	2.44	50	11	9	25	8.20	0.28	1.4	0.61	118	6.8	315	72	13	55	1.34	3.03	7.42	③
	k	5	2	0.3	1.6	0.78	8.5	0.52	1.8	4.9	0.55	1.79	2.1	1.42	0.57	0.4	0.95	1.71	1.17	
铜井岩体	w_B	2.55	83	18.6	24.7	79	0.87	0.33	1.15	0.27	741	29.8	78	30	11.2	6.28	3.69	3.30	67.14	
	s	1.19	55	12.2	13.9	15	0.52	0.29	0.52	0.14	504	19.8	58	21.6	7.8	45	1.20	1.63	6.83	④
	k	3	1.5	0.69	1.5	0.9	1.89	0.6	1	1.93	1.03	5.6	1.03	1.0	0.53	0.50	0.3	1.5	1.2	
平均 *		0.81	54	27	16	88	0.46	0.6	1.1	0.14	720	5.3	76	31	21	125	3.87	2.23	58.14	

w_B , 均值; s , 标准偏差; k , (浓集系数)=元素质量分数均值/中国闪长岩元素平均质量分数. 单位, Au, Ag: 10^{-9} ; K, Na, Si: %; 其他微量元素: 10^{-6} . 同位素年龄: 铜石岩体为 232 Ma(K-Ar), 190 Ma ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$); 龙宝山岩体为 174~133 Ma(K-Ar); 铁铜沟岩体为 142~125 Ma(K-Ar); 铜井岩体为 122~108 Ma(K-Ar). *. 指浓集序列($k \geq 1.2$): ①W→Au→Ag→Mo→Sb→B→Pb→As→Cu→K₂O; ②Au→W→Ag→Mo→Pb→As→Cu→K₂O→Na₂O; ③W→Au→Sb→Ag→As→B→Pb→Cr→K₂O→Ni; ④B→Au→Sb→W→Ag→Pb→Cr→Ni→K₂O→SiO₂. **, 指中国闪长岩平均化学组成^[10].

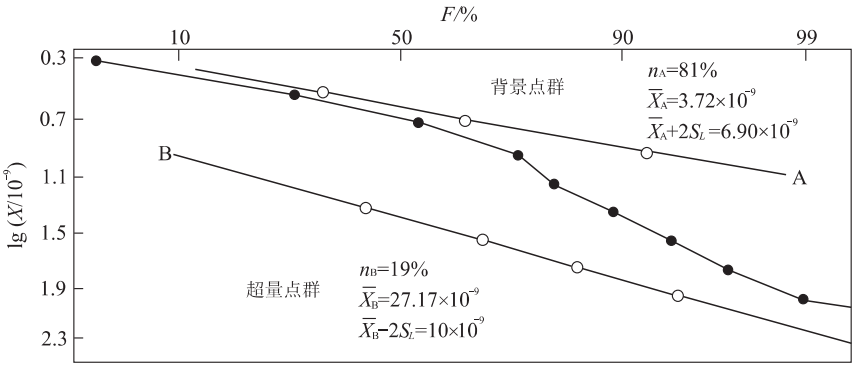


图 3 鲁西中生代侵入岩金的对数累积概率分布

Fig. 3 Partitioned log probability plot of 113 Au values of Mesozoic intrusive rocks in the western Shandong uplift terrain

闪长玢岩,构成铜井岩体的主要岩石类型是角闪闪长玢岩和二长花岗岩.

3.1 超量点群中金的质量分数分布特征

用类似于研究地层中金质量分数分布的方法研究了中生代侵入体中金的质量分数分布特征. 金具有对数双峰分布特征,在正态概率图(图 3)上将金分解为背景点群和超量点群,前者占统计样品总数的 81%, $\bar{X}_A=3.72 \times 10^{-9}$,后者占统计样品总数的 19%, $\bar{X}_B=27.17 \times 10^{-9}$. 在铜石岩体中,金超量点群样品占该岩体统计样品的 34%,金平均质量分数为 16.45×10^{-9} ;在龙宝山岩体中占 25%,金平均质

量分数为 10.56×10^{-9} ;在铁铜沟岩体中占 15.6%,金平均质量分数为 13.94×10^{-9} ;在铜井岩体中为 0.

3.2 元素质量分数分布特征

表 3 列出了元素质量分数在上述各岩体中的分布情况. 与中国闪长岩平均化学组成相对比,它们具有如下特征: (1) 都富集 Au, Ag, Pb, W, Sb, As 和 K₂O 等组分. (2) 除此之外,铜石岩体和龙宝山岩体相对富集 Mo 和 Cu;除龙宝山岩体外,它们共同富集 B,铁铜沟岩体相对富集 Cr 和 Ni. (3) 随着年龄的从老到新,从铜石岩体→龙宝山岩体→铁铜沟岩体→铜井岩体, Au, Ag, Pb, As 和 K₂O 质量分数具

逐渐降低的趋势.

3.3 组合元素分布特征

上述 4 个杂岩体可视为鲁西中生代构造岩浆演化不同阶段的产物,为考查其演化过程中组合元素的地球化学机制,将它们作为一个总体进行主成分分析(表 4).上述 18 种组分能被划分为 5 个相互正交的因子组合(因子载荷绝对值 ≥ 0.5):(1) F_1 :B—Au—Cu—Ag—F;(2) F_2 :Cr—Ni—Co—V—Zn—[SiO₂—Na₂O—K₂O];(3) F_3 :SiO₂—Na₂O—Sb—Pb—Ag—F;(4) F_4 :K₂O—Mo—Au—As;(5) F_5 :W—As—[Na₂O].

表 4 鲁西中生代侵入杂岩体组分正交因子载荷
Table 4 Orthogonal rotation factor loadings of element values of Mesozoic intrusive rocks, the western Shandong uplifted terrain

变量	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
Au	0.066 3	0.119 1	0.721 8	0.444 8	-0.110 8
Ag	0.150 6	0.677 9	0.538 1	0.296 8	-0.085 0
Cu	0.071 4	0.159 9	0.714 1	0.296 8	-0.260 2
Pb	0.031 7	0.698 8	-0.070 9	0.307 5	-0.144 4
Zn	0.549 6	0.427 9	0.063 9	0.281 0	-0.101 7
W	-0.066 5	0.103 6	0.363 5	0.017 1	-0.792 0
Mo	0.171 2	0.041 9	0.196 4	0.928 8	-0.020 5
As	0.059 2	-0.097 6	0.133 0	0.444 5	-0.547 4
Sb	0.213 0	0.772 2	0.032 6	-0.137 1	-0.339 8
F	0.078 6	0.534 5	0.480 4	0.345 2	0.148 7
B	0.101 1	0.003 6	0.885 5	-0.047 6	-0.134 3
Cr	0.929 7	-0.118 4	0.018 3	0.172 1	0.037 2
Co	0.968 2	0.162 0	0.049 7	0.007 5	0.031 9
Ni	0.965 2	-0.049 9	-0.010 8	0.125 5	0.026 2
V	0.769 0	0.255 4	0.355 3	-0.021 3	-0.117 4
Na ₂ O	-0.379 2	0.754 3	0.121 5	0.125 4	0.491 7
K ₂ O	-0.270 1	0.115 4	0.204 5	0.910 1	-0.088 1
SiO ₂	-0.606 4	0.843 7	0.172 8	-0.280 2	0.175 1
方差贡献	4.38	3.46	2.74	2.72	1.50
累积方差贡献/%	24.43	43.72	59.00	74.16	82.52

对上述 5 个组合可作如下地质解释:(1) F_1 组合为典型的成矿元素和矿化剂组合,在整个岩浆演化过程中,它们之间具有明显的正消长关系.该组合明显继承了太古宙绿岩带中金浓集元素组合的特征,并在其后不同类型的热液金矿床中再现. F_1 组合在不同地质时期地质事件中的再现充分说明,鲁西金矿化在成矿组分上具有典型的多阶段演化继承的特点.(2) F_2 组合反映了成岩过程中,酸碱组分与基性超基性组分的反消长关系.(3) F_3 组合揭示了

成矿过程中 Ag,Pb,Sb 和 F 等元素与 K,Na 等碱质组分的正消长关系.(4) F_4 组合揭示了 Au,As,Mo 元素与 K₂O 的正消长关系,并预示在其后的热液矿化阶段,钾化(绢云母化)有利于金的富集.该结论在归来庄金矿床中得到了印证.(5) F_5 组合表明:在成岩过程中,钠质组分增加伴随着 W,As 等元素质量分数的降低;反映在热液蚀变过程中,钠质组分的带入则伴随着 W,As 等元素的带出.

4 成矿组分聚集及其演化

为了进一步揭示成矿组分的继承演化趋势和成矿轨迹,表 4 列出了不同类型金矿床组分的平均质量分数,结合太古宙绿岩带(表 2)以及中生代中酸性和中偏碱性侵入杂岩的平均质量分数(表 3),分别计算了它们的浓集系数(变质热液金矿床的浓集系数等于其矿石组分平均质量分数除以绿岩带相应组分的平均质量分数,与侵入杂岩有关的热液金矿床的浓集系数等于其矿石组分平均质量分数除以侵入杂岩相应组分的平均质量分数).以 $k \geq 1.2$ 为临界值,并按 k 值从大至小将浓集元素排序构成浓集序列(表 5).根据表 5,并结合表 2 和表 3 绘制了金成矿轨迹图(图 4).其结果表明:(1)金的初始矿源可能来自太古宙绿岩带,在其后的变质变形和成岩成矿过程中富集演化,最终形成具有工业价值的金矿床;其中含矿建造中成矿组分超量点群(即超量点群)与其背景点群的比例在一定程度上决定了后生热液矿床的成矿特点.(2)自太古宙绿岩带→中生代岩体→金矿床普遍浓集的元素有: Au, As, Sb, Mo, B, Cu, W, K₂O, 只不过对不同的矿床其浓集强度不同,这表明成矿物质普遍而不同程度地继承了太古宙绿岩带和中生代侵入杂岩的组分,中生代侵入杂岩在上述组分上对太古宙绿岩带亦具有类似的继承性.(3)在浓集强度上除共同强烈富集 Au 外,不同类型矿床存在着差异性,变质热液金矿床(泰安纸房金矿床)以强烈浓集 B,As,Sb 为特征.(4)在与侵入杂岩有关的热液金矿床内部,龙宝山脉状金矿床以强烈富集 Au,Ag,Sb,Pb,Zn,Cu 为特征;铜井矽卡岩型铜(金)矿床以强烈富集 Au,Cu,Mo,Ag 为特征;归来庄隐爆角砾岩型金矿床强烈富集 Au,Ag,W,F,Sb,V;磨坊沟金矿床则强烈富集 Au,Ag,F,B,Sb,As.总之,不同类型金矿床富集元素种类的一致性反映了成矿物质的继承性,其富集程度的差异

表 5 鲁西太古宙绿岩带—中生代侵入杂岩—金矿床元素平均质量分数及浓集趋势

Table 5 Element average contents and concentration pattern of Archean greenstone belts, Mesozoic intrusive rocks and gold deposits in the western Shandong uplift terrain

典型矿床	参数	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	W	Mo	As	Sb	F	B	Cr	Co	Ni	V	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂	*
纸房金矿床	w_1	26.24	1.19	134	13	59	10	2.57	969	14.84	740	479	115	36	57	98	1.69	3.16	63.89	①
金矿床	k_1	2018	15	2.79	1.05	0.66	6.71	5.71	36	34	1.52	8.40	0.15	1.06	0.29	0.69	0.69	2.75	1.13	
龙宝山金矿床	w_2	20.09	35.73	668	3567	2636	8	36.65	33	48	1448	5.47	15	12	18	182	0.049	1.66	43.15	②
金矿床	k_2	2511	132	19	99	39	2.2	16	14.16	92	2.43	0.39	0.25	1.4	0.83	3.09	0.12	0.33	0.67	
铜井金矿床	w_3	7.36	13.43	22148	44	509	4.09	10.56	6.53	4.70	1083	28	28	105	71	57	0.43	0.64	29.77	③
金矿床	k_3	920	50	615	1.2	7.6	1.13	449	2.8	9	1.81	2	0.47	12	3.27	0.97	0.10	0.13	0.46	
归来庄金矿床	w_4	16.69	15.46	30	49	61	42	2.96	18.78	13.45	3570	45	54	5	13	656	0.37	11.53	57.12	④
金矿床	k_4	20.86	57	0.83	1.36	0.91	11.6	1.26	8.1	26	5.98	3.2	0.9	0.58	0.6	11	0.09	2.28	0.88	
磨坊沟金矿床	w_5	10.79	52.95	45	454	279	6.26	3.06	42.77	12.42	39687	48	8.79	6.27	9.58	236	0.16	3.41	59.43	⑤
金矿床	k_5	1349	196	1.25	12.6	4.2	1.73	1.30	18	24	66	35	0.15	0.73	0.44	4	0.04	0.67	0.92	
Mz	w_r	0.008	0.27	36	36	67	3.61	2.35	2.33	0.52	597	14	60	8.56	21.70	58.76	4.11	5.06	64.86	⑥
AR	w_m	0.013	0.08	48	12.35	89	1.49	0.45	27	0.44	487	57	761	34	194	142	2.44	1.15	56.37	

单位, Au, Ag; 10^{-9} ; K, Na, Si; %; 其他微量元素; 10^{-6} . 纸房金矿床样数 11; 龙宝山金矿床样数 25; 铜井金矿床样数 11; 归来庄金矿床样数 21; 磨坊沟金矿床样数 14; Mz. 鲁西中生宙侵入杂岩样数 113; AR. 鲁西太古宙绿岩带样数 212. w_i ($i=1, \dots, 5, r, m$) 分别表示不同地质体中元素平均质量分数, $k_1=w_1/w_m, k_2=w_2/w_r, k_3=w_3/w_r, k_4=w_4/w_r, k_5=w_5/w_r$. 浓集序列 ($k \geq 1.2$): ① Au→As→Sb→Ag→B→W→Mo→Cu→K₂O→F; ② Au→Ag→Pb→Sb→Zn→Cu→Mo→V→F→W→Co; ③ Au→Cu→Mo→Ag→Co→Sb→Zn→Ni→As→B→F→Pb; ④ Au→Ag→Sb→W→V→As→F→B→K₂O→Pb→Mo; ⑤ Au→Ag→F→B→Sb→As→Pb→V→Zn→W→Mo→Cu; ⑥ Au→W→Ag→Mo→Sb→B→K₂O→Pb→As→Cu; ⑦ As→B→Cr→Au→Ni→Mo→Sb→F→K₂O→W→Cu.

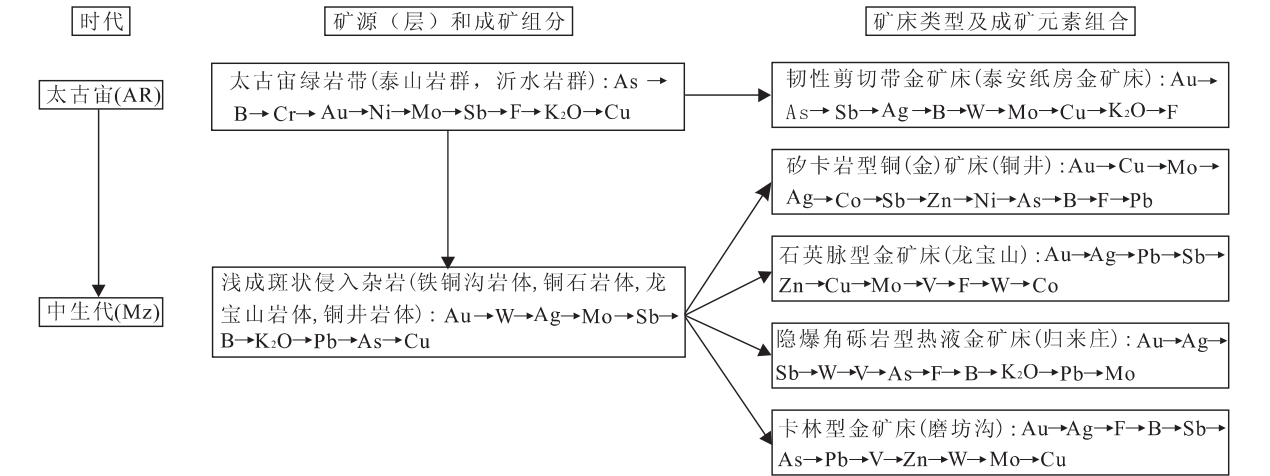


图 4 鲁西金矿成矿组分成矿轨迹

Fig. 4 Ore-forming traces of Au ore-forming elements in the western Shandong uplift terrain

反映了具体成矿环境($t, p, pH, Eh, f(O_2)$)的不同.

(5)含矿建造除富含成矿元素 Au 外,同时亦富含挥发组分(B,F)和碱质组分(K₂O,Na₂O);后者在成矿元素输运和沉淀过程中扮演着重要角色.

该项研究得到了山东地勘局教授级高级工程师徐金方、石玉臣的大力支持,教授级高级工程师王世进、崔炳富,高级工程师李秉仁参加了部分野外取样工作,在此深表感谢!

参考文献:

[1] Keays R R, Scott R B. Precious metals in ocean-ridge basalts: implications for basalts as source rocks for gold mineralization [J]. Econ Geol, 1976, 71(4): 705~720.

[2] Saager R, Meyer M, Muff R. Gold distribution in supracrustal rocks from Archean greenstone belts of southern Africa and from Paleozoic ultramafic complexes of the European Alps: metallogenic and geochemical implications [J]. Econ Geol, 1982, 77(1): 1~24.

[3] 刘英俊,马东升. 华南含金建造的地球化学特征[J]. 地

质找矿论丛,1987, 2(4): 1~14.

[4] 王世称,陈永清. 金矿综合信息成矿系列预测理论体系[J]. 黄金地质,1995, 1(1): 1~7.

[5] 曹国权,王致本,张成基,等. 鲁西前寒武纪地质[M]. 北京:地质出版社,1996. 1~7.

[6] 程志忠. 沂水岩群[A]. 见: 曹国权,王致本,张成基,等. 鲁西前寒武纪地质[C]. 北京:地质出版社,1996. 11~14.

[7] 王致本,董一杰. 泰山岩群[A]. 见: 曹国权,王致本,张成基,等. 鲁西前寒武纪地质[C]. 北京:地质出版社,1996. 14~27.

[8] 鄢明才,迟清华. 中国东部地壳与岩石的化学组成[M]. 北京:科学出版社,1997. 20~21.

[9] 赵鹏大,陈永清,刘吉平,等. 地壳异常成矿预测理论与实践[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1999. 91.

[10] 鄢明才,迟清华. 中国东部地壳与岩石的化学组成[M]. 北京:科学出版社,1997. 84~85.

ACCUMULATION AND EVOLUTION OF ORE-FORMING
COMPOSITION OF GOLD DEPOSITS IN THE
WESTERN SHANDONG UPLIFT TERRAIN

Chen Yongqing^{1,2} Zhao Pengda¹ Liu Hongguang¹

(1. *The Open Laboratory of Quantitative Exploration and Assessment of Mineral Resources, the Ministry of Land and Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 2. *The Development & Research Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China*)

Abstract: This paper addresses the possible source, evolution and accumulation patterns of the ore-forming compositions, on the basis of the geological research, the statistical analysis, and the research into the Archean strata, the Mesozoic intrusive complexes and the chemical composition of gold deposits in different ages in the western Shandong uplift terrain. Then this paper suggests the concept of and the quantitative calculation method for the ore-forming activity of the elements in the mineralized source beds (rocks). The research shows the following three points: (1) In the western Shandong uplift terrain, the initial source of the gold is the Archean greenstone belts characterized by the bimodal gold distribution. (2) A conspicuous inheritance can be observed on the ore-bearing formation in terms of the mineralized compositions of different kinds of gold deposits despite of the different ages and different mineralizations from the Archean to the Mesozoic. (3) The characteristics of epigenetic hydrothermal deposits are determined to a great extent by the ratio between the excessive population of mineralized elements and its corresponding background population in the ore-bearing formation, and also by the average content of mineralized elements in the excessive population.

Key words: ore-bearing formation; bimodal gold distribution; ore-forming activity of element; Au ore-forming trace; gold deposits; western Shandong uplift terrain.