第三章　金矿床成矿作用地球化学

第一节　成矿元素地球化学

成矿元素是指能够形成矿石矿物（包括脉石矿物）的一类元素。在地壳中它们普遍呈现分散状态，含量低，主要以非矿物形式存在。但在地球化学异常或矿床中，这些元素往往表现为集中状态，含量相对较高，且主要以特定的矿物形式存在。长期以来，人们采用浓集克拉克值来衡量元素的集中和分散程度，事实上，除 Si、Al、Fe 等少数元素外，多数成矿元素均有较高的浓集克拉克值，如 Au、Hg 等元素其数值可高达数万～数十万。研究表明，成矿元素集中和分散程度不仅取决于核外电子层结构及其地球化学性质，而且还反映着该元素所经历的成岩、成矿过程和机制。因此，通过对成矿元素的统计分析，不但可以揭示它们在矿区地层和含矿层中的分布、变化及相互间的关系，探讨地球化学元素在成矿过程中的演化特征，而且还可为指导本地区某种（些）元素的地球化学找矿提供有用信息。据此，分别在东昆仑地区的五龙沟金矿、开荒北金矿、大场金锑矿和东大滩锑金矿采集了化探原生晕样品，部分矿区还测制了典型元素地球化学剖面，每件样品分别分析了 Au、Ag、As、Sb 等 19 种元素，然后对成矿元素的均值、众数、标准差、方差等参数加以统计，并进行了成矿元素丰度型式、R 型聚类和 R 型因子分析。

一、成矿元素有关参数统计结果

4 个矿床 16 种元素的均值、中位数、众数、标准差、方差、偏度、峰度、全距、最大值和最小值等的统计结果见表 3-1～表 3-4，在五龙沟金矿、开荒北金矿、大场金锑矿和东大滩锑金矿采集的样品数分别为 43、153、29 和 38 件。从表中可以看出，由于样品皆采自各个矿区内，包括部分矿石和矿化岩石，因此，象 Au、Sb 等致矿元素及 As、Cu、Pb、Zn 等相关元素、活动性元素含量变化范围较大，但对于不同矿区又有所不同。五龙沟金矿的 Au、As 含量最小值分别为 1.5×10^{-9} 和 7.08×10^{-6}，最大值为 8344×10^{-9} 和 3200×10^{-6}，变化较大，均值分别为 767×10^{-9} 和 636×10^{-6}，含量高，标准差为 1520×10^{-9} 和 827×10^{-6}，也较大；Sb 的含量一般，为 $0.84\sim132\times10^{-6}$，平均 22.6×10^{-6}，标准差 33.6×10^{-6}；Pb、Zn 含量较高，均值分别为 61.1×10^{-6} 和 318×10^{-6}。开荒北金矿的 Au、As、Sb 含量最小值分别为 0.7×10^{-9}、4.3×10^{-6} 和 0.43×10^{-6}，最大值分别为 $>10000\times10^{-9}$、1120×10^{-6} 和 4800×10^{-6}，均值为 306×10^{-9}、68.1×10^{-6} 和 38.4×10^{-6}，标准差分别为 1495×10^{-9}、167×10^{-6} 和 389×10^{-6}；Cu 含量高，均值为 265×10^{-6}，最大达 14422×10^{-6}。大场金矿的 Au、As、Sb 含量最小值分别为 12.4×10^{-9}、20.7×10^{-6} 和 1.3×10^{-6}，最大值分别为 $>10000\times10^{-9}$、21440×10^{-6} 和 1344×10^{-6}。由于样品大多发生过不同程度的金、锑矿化作用，因此它们的均值较高，分别为 2132×10^{-9}、3557×10^{-6} 和 114×10^{-6}。标准差分别为 3098×10^{-9}、5168×10^{-6} 和 329×10^{-6}，皆较大；东大滩矿床的 Au、As、Sb 含量分别变化于 $7\sim>1000\times10^{-9}$、$6\sim19840\times10^{-6}$ 和 $1\sim13280\times10^{-6}$，除 Au、As 有较高的平均含量和标准差外，Sb 的均值和标准差都高于其它矿床，其值分别为 546×10^{-6} 和 2153×10^{-6}，此与该矿床锑矿化强烈、产出有大量金锑共生矿体和独立锑矿体有关。除上述变化较大的元素外，其它元素的含量一般变化较小，均值较低，标准差也较小。值得注意的是，各矿区的 Ag 平均含量都不高，介于 $0.28\sim0.47\times10^{-6}$，且变化范围小，标准差为 $0.42\sim1.48\times10^{-6}$。

总体上，除 Co、Ni、Cr、Ti、V 的平均含量低于地壳克拉克值外，Au、As、Sb、Bi、Hg、W、Pb、Zn、Ag 的平均值都不同程度地高于地壳克拉克值，其中 Au、As、Sb 的平

表 3-1　五龙沟金矿床成矿元素参数统计一览表

	Au	As	Sb	Bi	Hg	W	Mo	Cu	Pb	Zn	Ag	Co	Ni	Cr	Ti	V
样数	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
均值	767	636	22.6	0.58	58.8	1.66	3.45	55.2	61.1	318	0.39	5.61	16.2	35.9	2660	80.4
均值标准误差	232	126	5.13	0.04	10.3	0.17	0.91	3.94	24.7	136	0.12	0.81	2.37	7.44	331	15.4
中位数	62.5	170	8.6	0.53	28	1.2	1.1	45	26	74.5	0.22	2.7	9.1	21.1	1980	47.1
众数	1.5	44	0.9	0.43	21	0.76	0.5	39	25	41.3	0.25	2	5.9	5	66.9	5.5
标准差	1520	827	33.6	0.25	67.4	1.14	5.96	25.8	162	891	0.82	5.32	15.6	48.8	2172	101
方差	2310467	684074	1130	0.06	4543	1.31	35.6	668	26159	794345	0.67	28.3	242	2381	4716705	10263
偏度	3.40	1.49	2.07	2.50	2.30	1.30	4.17	2.15	6.16	4.31	5.68	1.56	1.95	3.96	1.23	3.78
偏度标准误差	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
峰度	14.4	1.62	3.76	8.48	4.95	0.99	21.4	6.57	39.2	20.0	34.7	1.61	3.63	20.4	2.05	19.1
峰度标准误差	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
全距	8343	3193	131	1.4	299	4.48	35.7	139	1067	5012	5.33	20	67.1	295	10274	615
最小值	1.5	7.08	0.84	0.26	21	0.32	0.3	25	8.3	27.8	0.06	1.5	5	5	66.9	5.2
最大值	8344	3200	132	1.66	320	4.8	36	164	1075	5040	5.38	22	72.1	300	10341	620
总量	33000	27328	972	25.0	2529	71.3	148	2374	2626	13680	16.6	241	695	1546	114360	3458

表 3-2　开荒北金矿床成矿元素参数统计一览表

	Au	As	Sb	Bi	Hg	W	Mo	Cu	Pb	Zn	Ag	Co	Ni	Cr	Ti	V
样数	153	153	153	153	153	153	153	153	153	150	153	153	153	153	153	153
均值	306	68.1	38.4	0.87	32.6	2.92	0.44	265	79.5	131	0.47	10.6	25.4	63.3	4206	89.6
均值标准误差	121	13.5	31.5	0.25	2.15	1.31	0.02	107	18.3	17.5	0.12	0.30	0.92	2.19	175	3.24
中位数	7.6	25.2	1.48	0.45	26	1.56	0.38	85	27.1	100	0.11	10.9	26.4	68.7	4347	91.6
众数	3.6	44	1	0.31	25	1.46	0.26	81.2	25	107	0.12	10.4	5	73.5	55.1	71.2
标准差	1495	167	389	3.15	26.6	16.2	0.29	1327	226	214	1.48	3.76	11.4	27.1	2166	40.1
方差	2236369	27735	151478	9.91	705	263	0.08	1761281	51095	45872	2.18	14.1	129	736	4689781	1604
偏度	5.89	4.71	12.2	11.1	6.47	12.3	5.55	9.14	5.36	9.84	4.65	-0.44	3.19	-0.90	-0.05	0.11
偏度标准误差	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
峰度	34.9	23.8	150	130	52.6	153	46.1	90.6	30.4	108	20.9	-0.26	28.1	0.10	-0.09	1.03
峰度标准误差	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
全距	9999	1116	4800	37.8	262	202	2.9	14398	1762	2507	9.17	16.2	113	105	10680	239
最小值	0.7	4.3	0.43	0.19	18	0.3	0.18	23.8	8.3	21.9	0.05	1.6	4.7	5	55.1	5
最大值	>10000	1120	4800	38	280	202	3.08	14422	1770	2529	9.22	17.8	118	110	10735	244
总量	46793	10420	5880	134	4982	447	67.5	40613	12159	19599	72.2	1618	3883	9691	643553	13715

表 3-3　大场金锑矿床成矿元素参数统计一览表

	Au	As	Sb	Bi	Hg	W	Mo	Cu	Pb	Zn	Ag	Co	Ni	Cr	Ti	V
样数	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
均值	2132	3557	114	1.87	46.6	2.83	0.59	73.5	35.8	76.1	0.28	7.7	14.8	30.7	2238	50.5
均值标准误差	575	960	61.2	0.72	5.33	0.46	0.08	13.2	7.38	11.1	0.08	1.17	2.86	5.14	431	8.70
中位数	370	1360	4.4	0.69	35	1.98	0.4	53.8	20.8	60.7	0.14	5.9	8.9	15.9	941	29.2
众数	120	20.7	3.2	0.69	35	1.02	0.38	18.8	20.8	24.1	0.12	2.8	5	5.4	50.5	7.5
标准差	3098	5168	329	3.88	28.7	2.50	0.46	71.3	39.7	59.6	0.42	6.31	15.4	27.7	2322	46.9
方差	9598091	26707730	108497	15.1	822	6.24	0.21	5083	1580	3556	0.18	39.8	237	765	5392372	2195
偏度	1.46	2.07	3.31	3.53	1.21	1.11	2.99	3.65	2.47	1.71	4.00	1.92	2.54	0.68	0.92	0.85
偏度标准误差	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
峰度	1.01	4.37	10.2	11.8	0.43	0.15	10.5	16.0	6.35	2.86	18.3	4.56	7.38	-0.95	-0.26	-0.37
峰度标准误差	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
全距	9988	21419	1343	16.9	104	8.4	2.22	380	172	241	2.23	28.2	68.6	87.1	7824	154
最小值	12.4	20.7	1.3	0.32	.16	0.32	0.26	18.8	6.2	21.4	0.06	1.8	5	5.4	50.5	5
最大值	>10000	21440	1344	17.2	120	8.72	2.48	399	178	262	2.28	30	73.6	92.5	7875	159
总量	61833	103155	3304	54.2	1352	82.0	17.1	2132	1039	2207	8.26	223	430	892	64895	1464

表 3-4　东大滩锑金矿成矿元素参数统计一览表

	Au	As	Sb	Bi	Hg	W	Mo	Cu	Pb	Zn	Ag	Co	Ni	Cr	Ti	V
样数	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
均值	1449	2345	546	2.57	22.7	2.80	0.36	56	24	71.0	0.31	8.8	18	271	3957	64.6
均值标准误差	459	805	349	0.9	0.61	0.5	0.03	4.3	3.01	5.4	0.2	0.8	2	224	611	8.15
中位数	90	80	30	0.68	22.0	2	0	55	20.3	73.8	0	10	21	51	3485	72.8
众数	75	6	17.2	0.3	18.0	0.6	0	49	16.7	40.3	0.1	14	5	5	47.4	83.9
标准差	2827	4961	2153	5.73	3.74	3.10	0.20	26.6	18.6	33.4	1.20	4.91	10.6	1379	3766	50.2
方差	7990681	24613133	4635981	32.9	14.0	9.63	0.04	709	344	1115	1.44	24.1	112	1900608	14179256	2522
偏度	2.08	2.2	5.9	3.39	0.2	3.16	3.3	0.79	3.0	-0.05	6.14	-0.1	0.19	6.16	1.08	0.43
偏度标准误差	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
峰度	3.30	4.11	35.6	11.7	-1.30	13.2	13.8	3	12.2	-0.06	37.8	-1.49	-1.2	38	1.32	-0.59
峰度标准误差	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
全距	9993	19834	13279	27.7	12	17.3	1	139	105	150	7	16	34	8538	15922	184
最小值	7	6	1.0	0.28	18	0.2	0.20	5.0	5.0	5.4	0.06	1.8	4.8	5.0	47.4	5.0
最大值	>10000	19840	13280	28	30	17.5	1.3	144	110	155	7.5	17.4	38.5	8543	15969	189
总和	55067	89098	20736	98	863	106	13.5	2128	913	2697	11.7	335	683	10309	150365	2453

均含量可高出数十倍～数百倍，甚至上千倍，各矿区 Ag 的平均含量仅为地壳克拉克值的 3.5～6 倍。与元素的区域地球化学背景相比，一些元素富集，一些元素亏损，在元素地球化学剖面上表现为跳跃的峰或谷，反映了元素在热液活动或成矿过程中的带入、带出特征。

二、相关系数及 R 型聚类分析

五龙沟金矿、开荒北金矿、大场金锑矿和东大滩锑金矿成矿元素的相关性分析结果见表 3-5～表 3-8，相应的成矿元素 R 型聚类分析谱系图见图 3-1。

在五龙沟金矿，如取置信水平（相关系数）>0.5，则有 Au-As-W、Mo-V、Co-Ni-Ti 和 Sb-Bi-Pb-Sn-Zn-Cu 四个组合，相关系数分别为 0.60、0.91、0.63 和 0.5，其中 Au 和 As 强烈正相关，相关系数达 0.73，其它元素不具有相关性。

在开荒北金矿，成矿元素在相关系数 r>0.5 的情况下可分为 Au-Pb-Ag-As-Sb-Cu、Bi-Hg-Co-Ni 和 Rb-Cr-Ti-V-Ba 三个组合，相关系数分别为 0.56、0.61 和 0.50。这 3 个组合比较复杂，Au 与 Pb、Ag 相关性最好，相关系数为 0.86，其次是与 As 和 Sb、Cu 呈密切正相关。其余元素不具有明显的规律性。

在大场金锑矿床，如取相关系数>0.5，则有 Au-As、Mo-Co-Ni-Rb-Ba-Cr-Ti-V、Cu-Sn-Ag-Pb-Zn 和 Sb-Bi 四个组合，它们的相关系数分别为 0.93、0.76、0.59 和 0.99，其中 Au 与 As 为高度正相关，其次是与 W，相关系数为 0.41。

在东大滩锑金矿，如按相关系数>0.4 可将成矿元素分为 Au-As-Hg-W、Sb-Bi、Cu-Zn-Co-Ni-Ti-Ba-V、Pb-Ag 四个组合，相关系数分别为 0.42、0.49、0.48。Au 与 As 呈较强的正相关关系，相关系数为 0.64，其次与 Hg 和 W，相关系数分别为 0.46 和 0.42。

综合上述可见，各矿床元素组合均具有多群体性，这一方面反映出不同种类的成矿元素因地球化学性质的差异而在共生组合上“物以类聚”性，另一方面则反映了各矿区内所经历的地质作用的复杂性及成矿的多期次性。在各矿区 Au 与 As 表现出十分明显的强正相关性，相关系数为 0.64～0.93，因此其可以作为各矿区找金的重要近程指示元素。在五龙沟、大场和东大滩矿床，Au 还与 W 具有一定的相关性，相关系数分别为 0.60、0.41 和 0.42，另外，在东大滩和开荒北金矿分别与 Hg 和 Ag、Sb、Cu、Pb 呈现出一定相关性，除此之外，与其它元素的相关性则较差。值得注意的是，Au 与 Ag 的相关性在各矿区表现得十分不一致，在开荒北金矿中为强正相关关系，相关系数达 0.89，在五龙沟金矿为一般相关关系，相关系数为 0.42，而在大场和东大滩矿床中则为负相关关系。除开荒北金矿外，其余各矿床 Sb 与 Bi 均具有较强的相关性，尤其是大场金锑矿床 Sb、Bi 的相关系数达 0.99，五