

矾山碱性岩体磷铁矿床金的地球化学*

牟保磊 蔡俊军

边振辉

(北京大学地质学系, 北京 100871)

(矾山磷矿, 河北涿鹿 075641)

主题词 金的地球化学 碱性岩体 磁铁磷灰石矿床 层状岩系

提 要 河北矾山钾质碱性岩体, 由3期侵入岩和脉岩正长岩组成。第1期岩石为层状超镁铁质岩系, 具韵律层结构。层状岩系中赋存巨大磁铁磷灰石矿床。碱性岩体全岩225个样品平均含金为 7.8×10^{-9} 。矾山岩体金的丰度为 6.1×10^{-9} , 是地壳金丰度(3.5×10^{-9})的1.74倍。第1期岩石平均金含量为 8.8×10^{-9} , 第2期岩石为 5.1×10^{-9} , 第3期岩石为 7.4×10^{-9} , 正长岩为 4.2×10^{-9} 。第1期侵入岩中辉石岩平均金含量为 9.31×10^{-9} , 黑云辉石岩平均为 7.78×10^{-9} , 伟晶正长黑云辉石岩为 7.40×10^{-9} , 间隙状正长辉石岩为 8.00×10^{-9} , 磁铁磷灰石岩为 13.78×10^{-9} , 磷灰石岩和黑云磷灰石岩为 11.80×10^{-9} , 黑云母岩为 18.63×10^{-9} 。在垂直层状岩系的剖面上, 岩石金含量呈韵律性变化。在东矿区, 岩石金含量由西向东趋于降低。在岩浆液相分离过程中, 金倾向富集在含铁、镁、钙和磷的熔体相中, 而在岩浆结晶分异过程中, 金可能富集在流体相中。

1 碱性岩体地质概况

矾山碱性岩体位于河北涿鹿县矾山镇南侧、官厅水库以西15km处。岩体呈环形, 从外向内依次出现: 由钛榴石辉石正长岩(厚200m)、粗粒辉石正长岩(40~60m)、粗粒正长辉石岩(70~200m)组成的第2期侵入岩似层状岩带; 由辉石岩、黑云辉石岩、伟晶正长黑云辉石岩、磁铁磷灰石岩、磷灰石岩和间隙状正长辉石岩等岩石组成的层状岩系, 为第1期侵入岩; 由粗面状辉石正长岩、细粒正长辉石岩、细粒辉石正长岩和斑状辉石正长岩组成的第3期侵入岩。在这3期侵入岩之后, 还有正长岩、角闪正长岩岩脉或岩墙形成^[1], 最近还发现有碳酸岩^①。

第1期侵入岩层状岩系总厚约1200m。一般自下而上的岩序是, 辉石岩、黑云辉石岩层作为一个单元重复出现, 构成韵律层结构。整个层状岩系自下而上可划分为12个韵律单元。其中第6韵律单元自下而上的岩序是, 辉石岩(厚8m, 夹薄层间隙状正长辉石岩)、伟晶正长黑云辉石岩(94m, 夹薄层中粒黑云辉石岩层, 或为互层, 出现薄层黑云母岩)、粗粒黑云辉石岩(36m, 夹两层磷灰石岩层)、磷灰石岩(3m)、磁铁磷灰石岩(7m)。磷灰石岩含 P_2O_5 36% ±, 磁铁磷灰石岩含 P_2O_5 16% ±, $(Fe_2O_3 + FeO)$ 41% ±, 为优质磷矿石, 并有铁可综合利用。本工作的重点是第1期岩石, 尤其是磷铁矿体(也就是第6韵律单元), 并兼顾第2

* 本项目得到国家教委博士点基金和矾山磷矿的资助

①牟保磊, 边振辉。矾山碱性岩体的碳酸岩。北京大学学报(自然科学版), 待刊。

第一作者简介 牟保磊, 男, 1933年生, 教授。从事岩浆作用地球化学和成矿作用地球化学方面的教学与研究
工作。

收稿日期 1998-06-16, 改回日期 1998-09-03

期、第3期岩石及正长岩。

2 碱性岩体中磷铁矿床金的丰度

2.1 采样、金的分析方法和分析结果评估

在矿区穿脉坑道中,从矿体顶板(即磁铁磷灰石岩顶板)之辉石岩开始,至矿体底部的伟晶正长黑云辉石岩为止,连续采样,每2m一个,每个样重10kg。第1期岩石层状岩系的其他部分、第2期、第3期岩石和正长岩的样品则采自岩心,每个样重1~2kg。金用原子吸收光谱测定,测定时有标样,以监测分析精度。如1992年10月由中国科学院地质研究所测试中心测试的一批样品,标样G1-Au-06的金含量为 54.87×10^{-9} ,测定给出的金含量为 57.35×10^{-9} ,百分标准偏差为 $\pm 4.52\%$,测定精度合乎要求。

2.2 矾山碱性岩体金的丰度

225个全岩样品金的测定结果列于表1。根据分析数据计算了全岩(除表1的第221号

表1 矾山岩体磷铁矿床岩石金分析结果 [$w(\text{Au}) \times 10^{-9}$]

Table 1 Gold analyses of whole rock samples in Fanshan igneous complex [$w(\text{Au}) \times 10^{-9}$]

序号	样品号	Au	岩石及采样位置	序号	样品号	Au	岩石及采样位置
1	Au1	2.7	Or- Bi- Px, 515 中段 15 号穿脉	22	Au63	2.9	Px, 515 中段 2 号穿脉
2	Au2	15.1	Bi- Px, 515 中段 15 号穿脉	23	Au64	3.3	Px, 515 中段 2 号穿脉
3	Au3	16.4	Bi- Ap, 515 中段 15 号穿脉	24	Au65	6.7	Px, 515 中段 2 号穿脉
4	Au4	23.9	Bi- Ap, 515 中段 15 号穿脉	25	Au74	2.3	Or- Bi- Px, 515 中段 17 号穿脉
5	Au5	27.0	Bi- Ap, 515 中段 15 号穿脉	26	Au75	3.5	Or- Bi- Px, 515 中段 17 号穿脉
6	Au6	8.2	Ap, 515 中段 15 号穿脉	27	Au76	7.7	Or- Bi- Px, 515 中段 17 号穿脉
7	Au7	1.5	Bi- Ap, 515 中段 15 号穿脉	28	Au77	3.3	Or- Bi- Px, 515 中段 17 号穿脉
8	Au8	2.5	Bi- Ap, 515 中段 15 号穿脉	29	Au78	5.0	Or- Bi- Px, 515 中段 17 号穿脉
9	Au9	8.9	Bi- Ap, 515 中段 15 号穿脉	30	Au79	2.6	Or- Bi- Px, 515 中段 17 号穿脉
10	Au10	6.8	Bi- Ap, 515 中段 15 号穿脉	31	Au80	32.4	Or- Bi- Px, 515 中段 17 号穿脉
11	Au11	0.8	Px, 515 中段 15 号穿脉	32	Au81	0.8	Or- Bi- Px, 515 中段 17 号穿脉
12	Au12	13.9	Px, 515 中段 15 号穿脉	33	Au82	1.2	Or- Bi- Px, 515 中段 17 号穿脉
13	Au13	14.9	Bi- Px, 515 中段 15 号穿脉	34	Au83	1.2	Or- Bi- Px, 515 中段 17 号穿脉
14	Au14	2.5	Bi- Px, 515 中段 15 号穿脉	35	Au84	0.8	Or- Bi- Px, 515 中段 17 号穿脉
15	Au15	16.7	Or- Bi- Px, 515 中段 15 号穿脉	36	Au85	0.8	Bi- Px, 515 中段 17 号穿脉
16	Au16	11.8	Or- Bi- Px, 515 中段 15 号穿脉	37	Au86	2.2	Or- Bi- Px, 515 中段 17 号穿脉
17	Au17	1.8	Or- Bi- Px, 515 中段 15 号穿脉	38	Au87	1.1	Or- Bi- Px, 515 中段 17 号穿脉
18	Au18	2.6	Bi- Px, 515 中段 15 号穿脉	39	Au88	1.4	Or- Bi- Px, 515 中段 17 号穿脉
19	Au19	1.8	Or- Bi- Px, 515 中段 15 号穿脉	40	Au89	2.2	Or- Bi- Px, 515 中段 17 号穿脉
20	Au61	10.7	Px, 515 中段 2 号穿脉	41	Au20	1.4	Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉
21	Au62	7.7	Px, 515 中段 2 号穿脉	42	Au21	1.5	Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉

续表

序号	样品号	Au	岩石及采样位置	序号	样品号	Au	岩石及采样位置
43	Au22	5.7	Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	77	Au56	11.3	Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉
44	Au23	7.8	Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	78	Au57	4.6	Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉
45	Au24	9.2	Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	79	Au58	8.0	Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉
46	Au25	4.8	Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	80	Au59	9.1	Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉
47	Au26	6.3	Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	81	Au60	27.2	Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉
48	Au27	1.6	Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	82	Au66	3.1	Or- Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉
49	Au28	3.0	Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	83	Au67	7.0	Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉
50	Au29	8.3	Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	84	Au68	2.0	Or- Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉
51	Au30	6.0	Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	85	Au69	1.2	Or- Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉
52	Au31	5.4	Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	86	Au70	1.7	Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉
53	Au32	1.9	Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	87	Au71	2.1	Or- Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉
54	Au33	9.6	Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	88	Au72	1.0	Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉
55	Au34	2.3	Or- Px, 470 中段 29 号穿脉	89	Au73	2.6	Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉
56	Au35	1.1	Or- Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	90	Au90	10.6	Px, 470 中段 29 号穿脉
57	Au36	2.6	Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	91	Au91	8.3	Px, 470 中段 29 号穿脉
58	Au37	5.9	Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	92	Au93	13.5	Px, 470 中段 29 号穿脉
59	Au38	3.1	Or- Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	93	Au94	14.4	Px, 470 中段 29 号穿脉
60	Au39	2.0	Or- Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	94	Au95	6.1	Px, 470 中段 29 号穿脉
61	Au40	1.3	Or- Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	95	Au96	8.5	Px, 470 中段 29 号穿脉
62	Au41	4.0	Or- Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	96	Au97	12.0	Mt- Ap, 470 中段 29 号穿脉
63	Au42	11.0	Or- Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	97	Au1301	13.1	Px, 470 中段 13 号穿脉
64	Au43	16.7	Or- Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	98	Au1302	7.7	Px, 470 中段 13 号穿脉
65	Au44	3.9	Or- Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	99	Au1303	38.1	Px, 470 中段 13 号穿脉
66	Au45	1.3	Or- Bi- Px, 470 中段 29 号穿脉	100	Au1304	5.5	Px, 470 中段 13 号穿脉
67	Au46	1.2	Or- Px, 470 中段 33 号穿脉	101	Au1305	8.7	Px, 470 中段 13 号穿脉
68	Au47	1.3	Or- Bi- Px, 470 中段 33 号穿脉	102	Au1306	22.9	Bi, 470 中段 13 号穿脉
69	Au48	1.6	Or- Bi- Px, 470 中段 33 号穿脉	103	Au1307	22.8	Bi, 470 中段 13 号穿脉
70	Au49	1.1	Or- Bi- Px, 470 中段 33 号穿脉	104	Au1308	19.9	Mt- Ap, 470 中段 13 号穿脉
71	Au50	1.6	Or- Bi- Px, 470 中段 33 号穿脉	105	Au1309	6.6	Mt- Ap, 470 中段 13 号穿脉
72	Au51	5.0	Or- Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉	106	Au1310	50.9	Or- Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉
73	Au52	6.8	Or- Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉	107	Au1311	7.2	Px, 470 中段 13 号穿脉
74	Au53	5.5	Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉	108	Au1312	14.0	Or- Px, 470 中段 13 号穿脉
75	Au54	3.3	Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉	109	Au1313	2.6	Px, 470 中段 13 号穿脉
76	Au55	9.6	Or- Bi- Px, 470 中段 25 号穿脉	110	Au1314	1.9	Px, 470 中段 13 号穿脉

续表

序号	样品号	Au	岩石及采样位置	序号	样品号	Au	岩石及采样位置
111	Au1315	10.2	Bi, 470 中段 13 号穿脉	146	G025	1.1	Bi- Px, CK2- 5, 236m
112	Au1316	10.2	Or- Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	147	G032	2.4	Bi- Px, CK2- 5, 237m
113	Au1317	29.6	Or- Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	148	G046	5.3	Px, CK2- 5, 325m
114	Au1318	4.1	Or- Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	149	G057	19.6	Px, CK2- 5, 376m
115	Au1320	24.7	Or- Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	150	G058	1.8	Px, CK2- 5, 382m
116	Au1321	5.3	Or- Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	151	G060	15.6	Px, CK2- 5, 397m
117	Au1322	3.0	Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	152	G061	6.5	Px, CK2- 5, 404m
118	Au1323	7.8	Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	153	G071	2.8	Bi- Px, CK2- 5, 469m
119	Au1324	2.9	Or- Px, 470 中段 13 号穿脉	154	G073	1.8	Bi- Px, CK2- 5, 487m
120	Au1325	2.6	Or- Px, 470 中段 13 号穿脉	155	G079	7.1	Px, CK2- 5, 545m
121	Au1326	1.7	Or- Px, 470 中段 13 号穿脉	156	G081	2.2	Or- Bi- Px, CK1- 4, 234m
122	Au1327	4.5	Or- Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	157	G093	7.7	Bi- Px, CK1- 4, 315m
123	Au1328	71.2	Or- Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	158	G101	2.2	Or- Bi- Px, CK1- 4, 345m
124	Au1329	31.3	Or- Px, 470 中段 13 号穿脉	159	G108	10.2	Px, CK1- 4, 407m
125	Au1330	2.5	Or- Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	160	G109	1.8	Bi- Px, CK1- 4, 412m
126	Au1331	4.8	Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	161	G110	7.2	Px, CK1- 4, 416m
127	Au1332	1.9	Or- Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	162	G111	1.7	Bi- Px, CK1- 4, 420m
128	Au1333	6.5	Or- Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	163	G112	5.8	Px, CK1- 4, 422m
129	Au1334	3.7	Or- Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	164	G115	6.7	Px, CK1- 4, 431m
130	Au1335	2.6	Or- Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	165	G213	5.1	粗粒 Or- Px, 东风井
131	Au1550	3.6	Bi- Ap, 470 中段 13 号穿脉	166	F405	10.7	Bi- Px, CK6- 5, 230m
132	Au1551	19.7	Bi- Ap, 470 中段 13 号穿脉	167	M012	4.7	Px, CK2- 5, 382.5m
133	Au1552	1.5	Bi- Ap, 470 中段 13 号穿脉	168	M309	4.1	Px, CK110, 304m
134	Au1553	4.9	Bi- Ap, 470 中段 13 号穿脉	169	M310	12.2	Mt- Ap, CK110, 311m
135	Au1554	2.9	Bi- Ap, 470 中段 13 号穿脉	170	M313	10.0	粗粒 Bi- Px, CK110, 329m
136	Au1555	11.9	Bi- Ap, 470 中段 13 号穿脉	171	M316	12.5	Or- Bi- Px, CK110, 362m
137	Au1556	13.7	Bi- Ap, 470 中段 13 号穿脉	172	M323	8.5	Px, CK110, 490m
138	Au1557	20.8	Ap, 470 中段 13 号穿脉	173	M331	15.2	Px, CK110, 671m
139	Au1558	27.7	Ap, 470 中段 13 号穿脉	174	T066	2.6	粗粒 Or- Px, CK104, 320m
140	Au1559	11.6	Mt- Ap, 470 中段 13 号穿脉	175	T077	3.1	G- Di- Or, CK104, 718m
141	Au1567	16.5	粗粒 Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	176	T089	6.0	似粗面状 Di- Or, CK6- 17, 259m
142	Au1568	31.5	粗粒 Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	177	M334	8.9	似粗面状 Di- Or, CK2- 13
143	Au1569	34.0	粗粒 Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	178	T099	2.9	红色正长岩, CK105, 718m
144	Au1570	43.7	粗粒 Bi- Px, 470 中段 13 号穿脉	179	S- 1	7.6	粗粒 Or- Px, 470 中段副井
145	G012	19.8	Mt- Ap 顶板, 515 中段 2 号穿脉	180	S- 2	8.0	G- Or- Px, 470 中段副井

续表

序号	样品号	Au	岩石及采样位置	序号	样品号	Au	岩石及采样位置
181	S- 3	2.8	Bi- Px 综合样	204	C 019	1.5	Or, CK105, 126m
182	S- 4	1.9	粗粒 Di- Or	205	C 020	1.9	Or, CK105, 242m
183	S- 6	13.1	细粒 Di- Or	206	C 021	2.3	Or, CK105, 131m
184	DY- 1	3.0	粗粒 Or- Px, 综合样	207	C 022	4.3	Or, CK105, 267m
185	S- 5	8.1	粗粒 Or- Px, 综合样	208	C 023	2.0	Or, CK105, 302m
186	DY- 2	1.9	粗粒 Or- Px, 515 中段	209	C 024	13.9	Or, CK105, 304m
187	DY- 3	15.6	粗粒 Or- Px	210	C 025	5.3	Or, CK105, 265m
188	DY- 6	5.7	细粒 Di- Or	211	C 026	26.1	Or, CK105, 267m
189	DY- 4	3.6	粗粒 Or- Px, 综合样	212	C 027	2.8	Or, CK105, 280m
190	C 001	2.0	蚀变 Or, CK105, 150m	213	C 028	3.0	Or, CK105, 405m
191	C 002	2.2	蚀变 Or, CK105	214	C 029	1.5	Or, CK105, 368m
192	C 003	1.3	Or, CK105, 145m	215	C 035	5.3	细粒 Or- Px, CK105, 454m
193	C 004	1.6	Or, CK105, 221m	216	C 036	8.6	Px, CK105, 521m
194	C 005	5.4	Or, CK105, 228m	217	C 040	1.5	Or, 470 中段, 车场
195	C 006	4.6	Or, CK105, 235m	218	C 041	1.1	Or, 470 中段, 13 号穿脉
196	C 007	4.6	Or, CK105, 185m	219	B1	1.5	Or, 岩体西南接触带
197	C 009	1.1	Or, CK105, 188m	220	B2	1.5	G- Or, 岩体西南接触带
198	C 010	1.2	Or, CK105, 191m	221	B3	2.3	围岩, 大理岩
199	C 011	2.2	Or, CK105, 195m	222	B4	12.2	Or, 岩体西南接触带
200	C 012	2.3	Or, CK105, 203m	223	B5	0.8	Or, 岩体西南接触带
201	C 013	2.9	Or, CK105, 252m	224	C 016	4.8	Or, CK105, 170m
202	C 015	6.5	Or, CK105, 305m	225	G 013	15.4	Px, 515 中段 2 号穿脉
203	C 018	3.4	Or, CK105, 315m				

注: (1) 样品测试单位及测试者: No. 166~ 173, No. 175~ 178, No. 180~ 181, No. 183~ 185 和 No. 189 为国家地质实验测试中心, 其余为中国科学院地质研究所分析中心 张海政、叶元今等; (2) 岩石代号: Px 一辉石岩; Bi- Px 一黑云辉石岩; Bi 一黑云母岩; Mt- Ap 一磁铁磷灰石岩; Or- Bi- Px 一伟晶正长黑云辉石岩; Ap 一磷灰石岩; Bi- Ap 一黑云磷灰石岩; G- Or- Px 一钛榴石正长辉石岩; Di- Or 一辉石正长岩; Or- Px 一正长辉石岩; G- Di- Or 一钛榴石辉石正长岩; Or 一正长岩

样品外) 金的平均值(7.8×10^{-9})、均方差(80.22)和标准差(8.96), 并按照二倍标准偏差原则^[2], 剔除大于或小于平均值 $\pm 2\sigma$ 的离群值后, 进一步计算了金的算术平均值, 并以此作为矾山岩体金的丰度(6.1×10^{-9})。为了对比, 列出了世界上某些岩石金的丰度(表 2)。

由表 2 可知, 矾山岩体金的丰度为地壳丰度的 1.74 倍, 也高于辉长岩、橄辉岩、金伯利岩、透辉岩和碱性岩类, 只是低于 Bushveld 的边缘相岩石。可以认为, 矾山岩体是金丰度比较高的一类岩体。

表 2 地壳和某些类型岩石金的含量

Table 2 Gold content of the Earth's crust and some rock types

岩石	$w(\text{Au}) \times 10^{-9}$	样品数	地区	资料来源
地壳	3.5			参考文献[3]
层状辉长岩	4.7	13	Skaergaard 岩体	参考文献[4]
辉长岩	3.2	24	北美	参考文献[4]
辉长岩	4.4	518	前苏联	参考文献[4]
金伯利岩	2.8	5	南非及前苏联	参考文献[4]
橄榄岩	2.7	72	前苏联	参考文献[4]
边缘相岩石	10.0		Bushveld 杂岩体	参考文献[5]
碱性岩类	1.4	29	北美	参考文献[4]
透辉岩	2.1	38	赤城小张家口	参考文献[6]

图 1 是矾山岩体岩石金的含量频率直方图。由该图可见,除 1 个非对称的高峰外,还有 5 个小的峰和一些散逸部分。这种状况反应出岩体成因方面的多期次和每期岩石之间组分的巨大区别。但总起来看,矾山岩体金的含量相当集中,高峰含量($0.8 \times 10^{-9} \sim 4.0 \times 10^{-9}$)的样品有 102 个,占全部样品的 45.53%;第 2 个峰($4.1 \times 10^{-9} \sim 9.0 \times 10^{-9}$)的样品有 72 个,占全部样品的 32.14%;第 3 个峰有 11 个样品,占 7.50%;第 4 个峰占 4.91%。前 4 个峰的样品占全部样品的 90.08%。这种情况又反应出矾山岩体中金含量的分布状况基本上是火成岩成岩过程造成的,而在岩石形成后未受到明显的地质事件的影响。

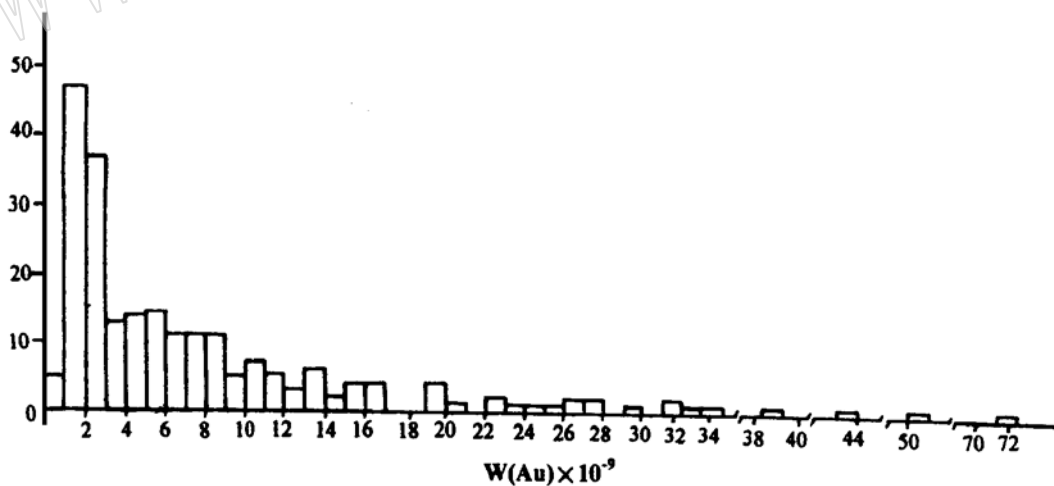


图 1 矾山岩体岩石金含量频率直方图

Fig. 1 Histogram showing gold content of the Fanshan alkaline igneous complex

3 矾山岩体金含量在时间和空间上的变化

3.1 不同期次岩石中金含量的变化

各期次岩石中金的平均含量见表3。由表3可知,第1期岩石含金量最高,第2期岩石含金量明显降低,至第3期岩石含金量又回升,脉岩正长岩含金量最低(但也高于金的地壳丰度)。总观从第1期至第3期岩石直到正长岩,金含量总趋势是降低的。

3.2 第1期层状岩系中不同类型岩石金的平均含量

不同类型岩石金的平均含量列于表4。由表4可见各种类型岩石金含量的降低顺序是:黑云母岩(18.63×10^{-9}),磁铁磷灰石岩(13.78×10^{-9}),磷灰石岩(包括黑云磷灰石岩)(11.80×10^{-9}),辉石岩(9.31×10^{-9}),间隙状正长辉石岩(8.00×10^{-9}),黑云辉石岩(7.78×10^{-9}),伟晶正长黑云辉石岩(7.40×10^{-9})。

表3 矾山岩体不同期次岩石金的平均含量

Table 3 Average gold content of rocks of various period in the Fanshan alkaline igneous complex

岩石期次	样品数	w(Au) × 10 ⁻⁹
第1期	174	8.8
第2期	9	5.1
第3期	6	7.4
正长岩	30	4.2

表4 第1期侵入岩主要类型岩石金平均含量

Table 4 Average gold content of major types of the first period rocks

岩石类型	样品数	w(Au) × 10 ⁻⁹	范围	岩石类型	样品数	w(Au) × 10 ⁻⁹	范围
辉石岩	35	9.31	0.86~38.1	磁铁磷灰石岩	6	13.78	6.6~19.9
黑云辉石岩	49	7.78	1.4~43.7	磷灰石岩及黑云磷灰石岩	17	11.80	1.5~27.7
伟晶正长黑云辉石岩	57	7.40	0.8~71.2	黑云母岩	3	18.63	10.2~22.9
间隙状正长辉石岩	7	8.00	1.2~31.3				

第1期层状岩系内不同类型岩石平均金含量的变化,实际上也反映出金在层状岩系形成过程中在时间和空间上的变化。在层状岩系的每个韵律单元内,其底部是辉石岩(先形成),顶部是黑云辉石岩(后形成),而辉石岩金含量高于黑云辉石岩。所以,在每个韵律单元中,底部岩石金含量高于顶部。同时,含金量最高的3种岩石即磁铁磷灰石岩、磷灰石岩和黑云母岩,仅在层状岩系的第6韵律单元的顶部出现。伟晶正长黑云辉石岩位于第6韵律单元中部。由此可知,在第6韵律单元中,金含量的变化是: $9.31 \times 10^{-9} \sim 8.00 \times 10^{-9}$ (辉石岩夹间隙状正长辉石岩) $\rightarrow 7.40 \times 10^{-9} \sim 7.78 \times 10^{-9}$ (伟晶正长黑云辉石岩夹黑云辉石岩) $\rightarrow 18.63 \times 10^{-9} \sim 11.80 \times 10^{-9} \sim 13.78 \times 10^{-9}$ (黑云母岩、磷灰石岩、磁铁磷灰石岩)。第6韵律单元在整个层状岩系中是形成最晚的岩石^[1]。

以上是从不同类型岩石中金的平均含量进行判断,层状岩系中金的含量显示出韵律性变化。事实上,钻孔岩石金的分析资料也出现这种特征。如表1中样品No. 146~ No. 155和No. 167(CK2-5钻孔)共11个样品,孔深236m~376m,金含量为 $1.1 \times 10^{-9} \sim 19.6 \times 10^{-9}$,382m~397m,金含量为 $1.8 \times 10^{-9} \sim 15.6 \times 10^{-9}$,孔深404m~545m,金含量为 $6.5 \times 10^{-9} \sim 7.1 \times 10^{-9}$,金含量出现韵律性变化。表1中样品No. 156~ No. 164(CK1-4孔)9个

样品也有如 CK2-5 钻孔中金含量的变化规律。

3.3 磷矿体侧向和垂向金含量的变化

根据表 1 数据统计的 2 个中段 7 个穿脉金的平均含量列于表 5。由表 5 可知, 在 515m 中段, 从西向东, 2 号穿脉金的平均含量为 9.5×10^{-9} , 至 17 号穿脉为 4.3×10^{-9} ; 在 470m 中段, 由 13 号穿脉至 33 号穿脉, 金的平均含量由 14.5×10^{-9} 降至 1.4×10^{-9} 。这表明在矿区的水平方向, 从矿区中部至东部, 金的含量有降低的趋势。

在垂直方向上, 470m 中段的 13 号穿脉和 515m 中段的 15 号穿脉在东西向上相差不多, 在一个垂面上, 大致可以对比; 而 470m 中段 13 号穿脉的平均金含量 (14.5×10^{-9}) 明显高于 515m 中段的 15 号穿脉 (9.5×10^{-9})。这表明矿区深部金含量高于顶部。

表 5 不同中段不同穿脉金的平均含量

Table 5 Average gold content of various level and various ort in the Fanshan apatite magnetite deposit

中段号*	穿脉号**	样品数	w(Au) × 10 ⁻⁹	中段号*	穿脉号**	样品数	w(Au) × 10 ⁻⁹
470m	13	48	14.5	515m	2	7	9.5
470m	25	18	6.4	515m	15	19	9.5
470m	29	26	6.1	515m	17	16	4.3
470m	33	5	1.4				

注: * 为海拔高程; ** 为矿体穿脉排列号, 东矿区自西向东为 1, 3, 5 ..., 西矿区自东向西为 2, 4, 6 ..., 两个穿脉间的距离为 60m。

4 矾山碱性岩体不同期次岩石中金与某些主要元素的关系

4.1 不同期次岩石中金与某些主要元素的关系

根据表 4 和表 6 的资料绘制了第 1、第 2、第 3 期岩石和正长岩中金与 6 种主要元素的相关图(图 2)。

表 6 矾山碱性岩体岩石化学成分(× 10⁻²)

Table 6 Chemical composition of various rocks in the Fanshan alkaline igneous complex(× 10⁻²)

岩石	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₃	烧失量	合计	样数
第 1 期岩石*	35.26	2.21	5.68	10.50	8.46	0.19	9.65	19.46	0.55	2.01	4.40	1.73	100.10	
第 2 期岩石*	38.88	3.69	9.81	7.94	6.99	0.22	5.19	16.76	0.96	5.57	1.26	1.84	99.11	
第 3 期岩石	50.24	1.36	15.84	4.67	4.09	0.18	3.85	6.99	2.72	6.83	0.56	2.63	99.96	10
正长岩	50.68	0.50	20.49	2.68	2.40	0.10	0.82	4.23	0.41	12.58	0.20	4.26	99.35	4
辉石岩	35.30	2.46	5.07	12.87	9.13	0.21	9.10	19.35	0.61	1.32	3.23	1.55	100.20	10
黑云辉石岩	39.01	1.85	6.25	5.97	6.62	0.15	11.42	19.92	0.65	2.45	4.17	1.61	100.07	8
伟晶正长辉石岩	37.00	2.77	9.01	3.98	7.70	0.22	11.80	15.73	0.47	4.65	4.91	2.13	100.37	4
间隙正长辉石岩	49.18	0.86	18.51	4.06	2.83	0.11	2.28	7.20	0.50	10.80	0.87	3.91	101.11	3
磁铁磷灰石岩	11.30	1.98	1.05	25.81	15.58	0.18	3.26	23.17	0.23	0.47	16.51	1.30	100.84	2
磷灰石岩	3.27	0.19	1.07	0.95	1.00	0.02	0.45	52.74	0.23	0.34	37.10	2.73	100.09	2

表中数据引自参考文献[1]中的表 6.1、表 6.4 和表 6.5; * 为加权平均值, 其余为平均值

由图 2 可见, 由第 1 期岩石至正长岩, 随着岩石中 SiO₂ 的增加, 金含量显示波浪式降

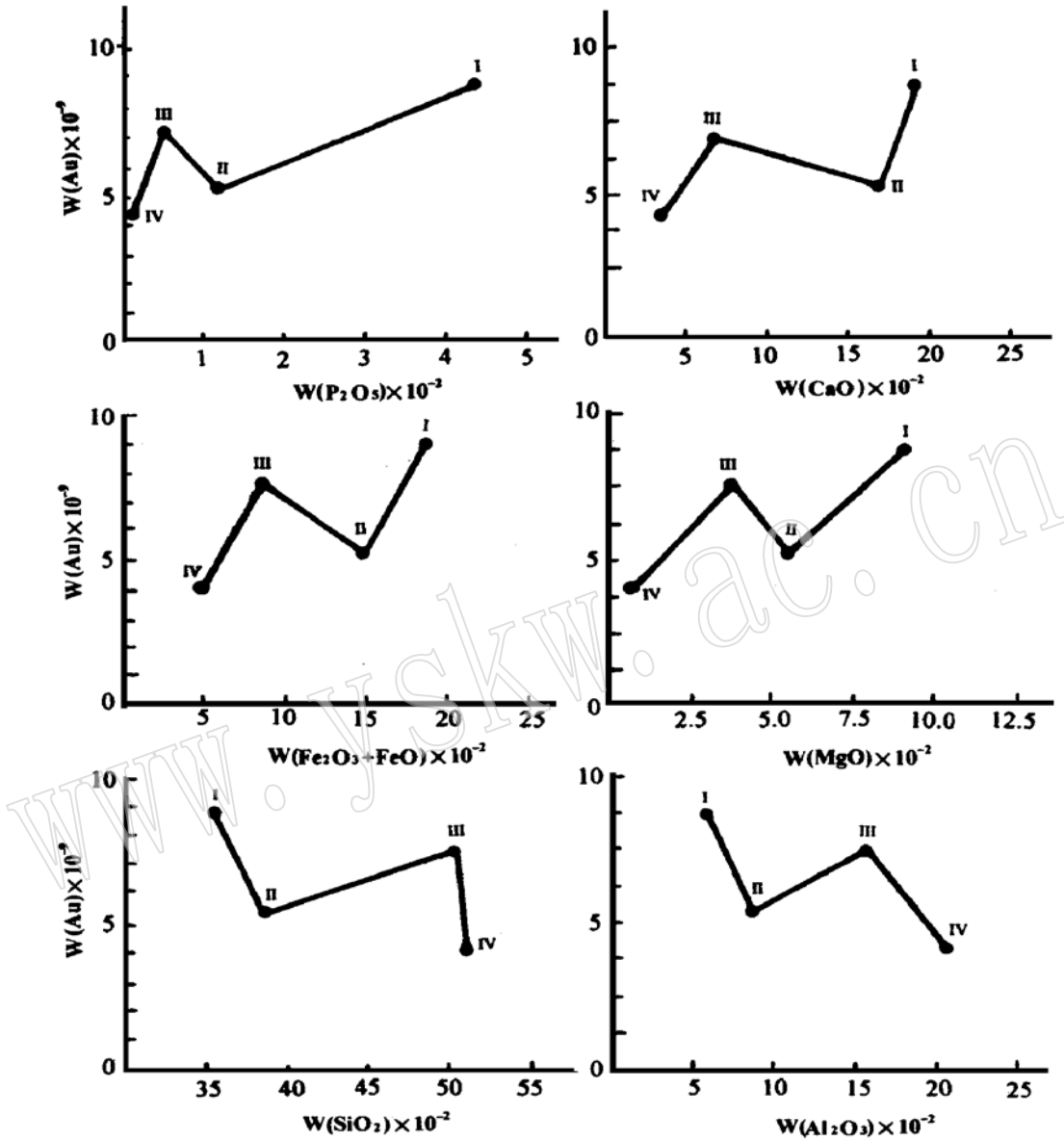


图 2 不同期次岩石和正长岩中金与主要元素相关图

Fig. 2 Correlation diagram of gold and major elements in rocks of various periods and vein rock_syenite

I—第 1 期岩石; II—第 2 期岩石; III—第 3 期岩石; IV—正长岩

低。可以认为, Au 与 SiO_2 呈负相关。 Al_2O_3 和 Au 的关系与 SiO_2 和 Au 的关系类似。图 2 虽然没有绘出 Au 与 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 的关系, 但根据表 4 和表 6 的数据判断, 二者也呈负相关。图 2 中金与 $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ 的关系, 岩石中随着铁的含量降低, 金呈波浪式降低, 金与铁呈正相关。金与 MgO、 P_2O_5 和 CaO 的关系和 Au 与铁的关系类似。

4.2 第 1 期层状岩系内主要类型岩石中金与主要元素的关系

根据表 3 和表 6 绘制了第 1 期层状岩系内主要类型岩石中金与主要元素的相关图(图

3)。由图3可见,层状岩系中金与主要元素的关系较为复杂。Au与 Al_2O_3 呈负相关,为指数关系;Au与MgO呈负相关,但直线拟合程度不高。Au与 SiO_2 呈负相关,但不是简单的直线关系,是一条复杂的曲线。Au与CaO为正相关,但直线拟合度低;Au与 P_2O_5 正相关,大体是一曲线。Au与Fe的关系很特别,开始随岩石中的Fe含量增高Au含量降低,然后随岩石中Fe含量增高,Au含量又升高。

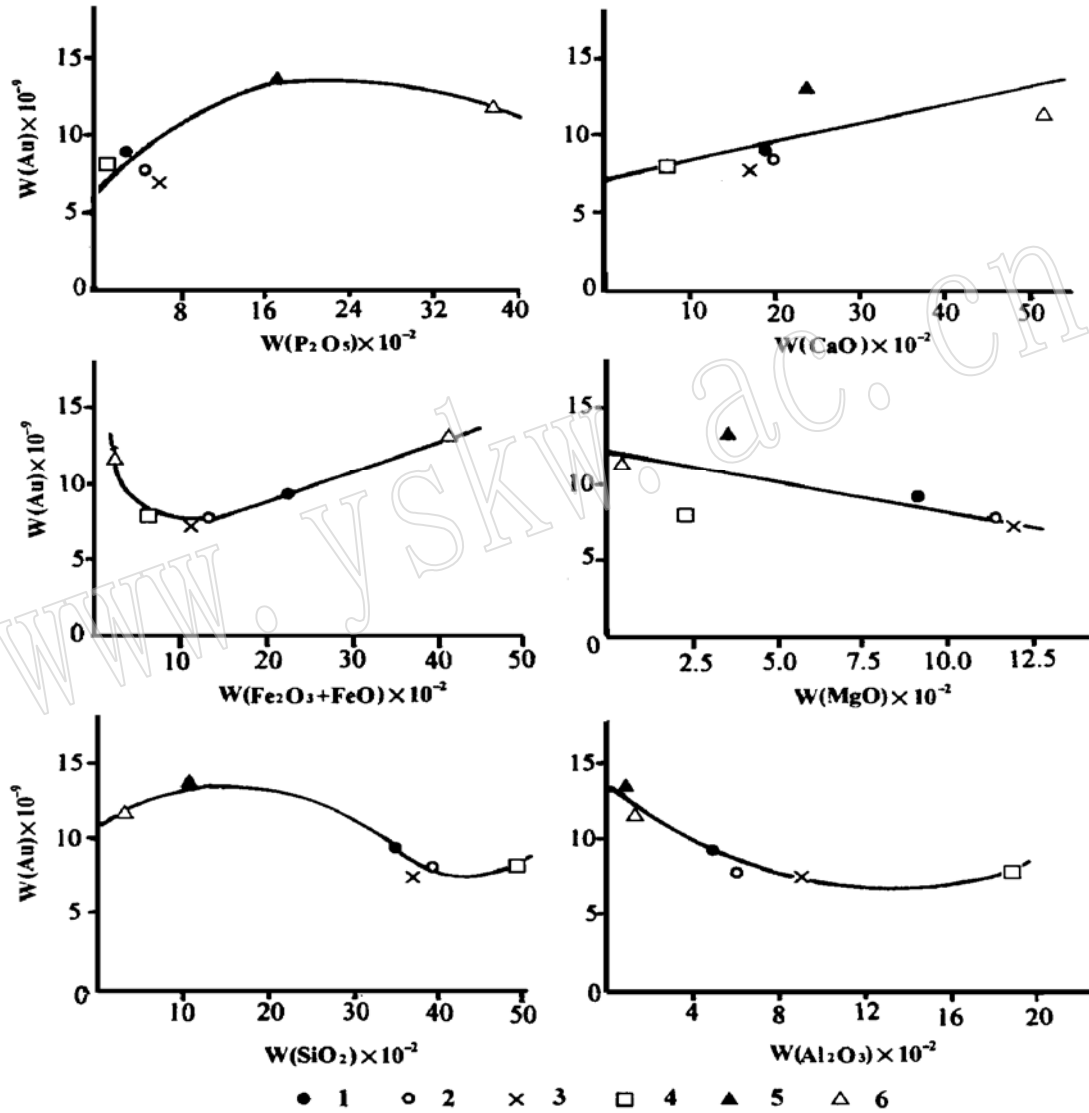


图3 层状岩系内主要类型岩石中金与主要元素相关图

Fig. 3 Correlogram of gold and major elements in the main types of the layered rocks

1—辉石岩; 2—黑云辉石岩; 3—伟晶正长黑云辉石岩; 4—间隙状正长辉石岩;

5—磁铁磷灰石岩; 6—磷灰石岩

矾山碱性岩体是同源岩浆深部液相分离三次侵入形成的^[1]。根据金在不同期次岩石中的分布判断,在这个过程中,金是富集在富含铁、镁、钙和磷而贫 SiO_2 和 Al_2O_3 的硅酸盐

熔体相中,即第1期侵入岩中。而形成第1期岩石层状岩系的岩浆侵位后,是在结晶分异和岩浆脉冲或补偿联合作用下凝结的。因此,金与其他元素的关系呈现出如图3所示的指数关系或其他较为复杂的关系。需要指出的是,岩石中金富集可能与挥发组分有密切的关系。如表4中所列黑云母岩、磁铁磷灰石岩及黑云磷灰石岩和表1中样品No. 141~ No. 144的4个粗粒黑云辉石岩,其平均含金量达 31.5×10^{-9} ,这几类岩石都富含挥发组分 H_2O 、P、F、 CO_2 和S,特别是S。

5 讨 论

铁陨石中金的平均含量为 1.15×10^{-6} (140个样品),球粒陨石平均含金 0.22×10^{-6} (34个样品)^[7],表明金在地幔的亲铁性。岩浆岩中金含量统计表明,以超镁铁质岩和基性岩为最高,酸性岩为最低。形成矾山岩体的物质源自上地幔^[1],所以其金的丰度较高。同时,在深部岩浆液相分离作用过程中,金倾向于富集在富铁、镁、磷而贫硅、铝的硅酸盐熔融体中,因此,矾山第1期岩石含金量最高,而当形成第1期岩石的岩浆侵位后,金在岩浆结晶分异作用过程中可能为不相容元素,倾向于富集在液相中^[7],所以,在层状岩系中,以在整个层状岩系中形成最晚的第6韵律单元顶部的岩石含金量为最高。

国内外均发现有些金矿床与碱性岩有密切的关系^[8-10],对于像矾山这类碱性超镁铁质的正长岩杂岩体尤应重视。本次工作发现该岩体金背景值较高,考虑到岩体的巨大体积(面积约 $30km^2$),矾山岩体所蕴藏的金是相当大的,如果有某种地质作用使岩体中的某些部位的金重新分配,可能会具有经济意义。因此,不仅对第2-3期岩石和西矿区有进一步工作的必要,而且对岩体中的某些脉岩如角闪正长岩、碳酸岩也都需要做进一步调查。

本次工作得到蒋云升高级工程师的支持,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 牟保磊,江培谟,曾贻善等. 矾山杂岩体磷-铁矿床. 北京: 北京大学出版社, 1988.
- 2 程光华, 蒋耀松, 张一球. 概率统计-数学地质丛书. 北京: 地质出版社, 1980.
- 3 黎丹, 倪守斌. 地球和地壳的地球化学元素丰度. 北京: 地质出版社, 1990.
- 4 Wedepohl. Handbook of Geochemistry, Vol II/4, 1974, Table 79- E- J.
- 5 Shape M R. Noble metals in the Margin Rocks of the Bushveld. Econ. Geol., 1986, 71(7): 1286~ 1295.
- 6 彭 岚, 马配学. 河北赤城金家庄金矿床成矿物质来源研究. 贵金属地质, 1992, (2~ 3): 113~ 120.
- 7 刘英俊, 马东升. 金的地球化学. 北京: 科学出版社, 1991.
- 8 王 郁, 蒋心明, 商木元等. 冀西北与碱性岩有关的金矿床地质特征及成因. 地质论评, 1994, 40(4): 368~ 376.
- 9 王义文. 华北地台北缘新类型金矿床成因及找矿前景. 贵金属地质, 1992, 1(1): 8~ 17.
- 10 陈守斌, 贾伟光, 韩仲文. 华北地台北缘三种有潜力的金矿床及找矿方向. 贵金属地质, 1996, 5(2): 138~ 141.

Gold Geochemistry of the Fanshan Alkaline Igneous Complex and Apatite_Magnetite Deposit in Hebei Province

Mu Baolei Cai Junjun

(Department of Geology, Peking University, Beijing 100871)

Bian Zhenhui

(Hebei Apatite Mine, Zhuolu 075641)

Key words: gold geochemistry; alkaline complex; apatite_magnetite deposit; layered rocks

Abstract

The Fanshan potassic alkaline complex was formed by three periods of intrusive rocks, which were all penetrated by vein rocks. The first period intrusive rocks are layered ultramafic rocks that have rhythmic structure. Gigantic apatite_magnetite deposits occur in layered rocks. The main types of first period intrusive rocks are pyroxenite, biotite pyroxenite, pegmatoid orthoclase_biotite pyroxenite, magnetite apatite rock, apatite rock and interstitial orthoclase pyroxenite; the second period intrusive rocks might be divided into three rock types, viz., coarse-grained orthoclase pyroxenite, coarse-grained pyroxene syenite, and coarse-grained schorlomite_orthoclase pyroxenite; the main types of the third period rocks include trachtyoid pyroxene syenite, fine-grained orthoclase pyroxenite, fine-grained pyroxene syenite and porphyroid pyroxene syenite. The three kinds of vein rocks are syenite, hornblende syensite and carbonatite.

Au abundance (6.1×10^{-9}) of the Fanshan complex is 1.74 times that of the crust (3.5×10^{-9}). The determination of rocks of different intrusive periods suggests that the average Au content of the first, second, third period rocks and vein rock syenite are 8.8×10^{-9} , 5.1×10^{-9} , 7.4×10^{-9} and 4.2×10^{-9} , respectively. In addition, Au content of various rocks of the first period was determined: pyroxenite 9.31×10^{-9} , biotite pyroxenite 7.78×10^{-9} , pegmatoid orthoclase_biotite pyroxenite 7.40×10^{-9} , interstitial orthoclase pyroxenite 8.00×10^{-9} , magnetite apatite rock 13.78×10^{-9} , apatite rock and biotite_apatite rock 11.80×10^{-9} , and biotite rock 18.63×10^{-9} . These data suggest that Au content shows vertical rhythmic variation in the profile of the layered rocks, and decreases from west to east. These phenomena imply that Au tended to concentrate in the melt with high content of Fe, Mg, Ca and P during the primary magmatic differentiation and then became richer in the fluid due to magmatic fractional crystallization.