

内蒙古喀喇沁旗安家营子金矿床热液蚀变过程中元素迁移特征及其地质意义

茹 朋^{1,2}, 李晓芳³, 王亚珂³

(1. 河南省地质研究院; 2. 河南省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室; 3. 河南省地质科学研究所有限公司)

摘要:安家营子金矿床在成矿过程中发生了广泛的热液蚀变作用,蚀变类型从早到晚依次为钠长石化、绢云母化、硅化、黄铁绢英岩化、绿泥石化等。通过对各类蚀变岩样品及其原岩的主要元素、微量元素进行测试分析,详细研究了热液蚀变过程中元素迁移特征。结果表明:①主要元素 SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 呈现逐渐降低特征;②微量元素中大离子亲石元素 K、Rb、Th 显示出增加趋势,而 Sr 呈现减少趋势,Bi 在所有蚀变中都表现出明显升高特征;③稀土元素总量呈现升高趋势;④成矿元素 Bi、Cu、Zn 在黄铁绢英岩化和硅化阶段具有较高的含量。结合岩相学特征,进一步揭示了成矿元素卸载从绢英岩化阶段开始,大量集中在硅化阶段,为矿体定位及圈定提供依据。

关键词:热液蚀变;元素迁移;安家营子金矿床;喀喇沁旗;主要元素;微量元素

中图分类号:TD11 P618.51

文章编号:1001-1277(2024)05-0064-09

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20240514

引 言

安家营子金矿床位于内蒙古自治区赤峰市喀喇沁旗楼子店乡境内,距离赤峰市约 58 km,是赤峰—朝阳金矿带的重要组成部分^[1]。近三十年来,针对热液型金矿床的成矿大地构造背景、成矿年龄、成矿流体性质及来源、成矿物质沉淀机制及热液蚀变特征等方面研究已有大量成果^[2-15]。本文在上述研究基础上,对安家营子金矿床蚀变岩进行主、微量元素地球化学分析,重点研究了热液蚀变过程中元素迁移特征,总结了元素带入带出规律,为今后成矿作用及找矿勘查提供帮助。

1 区域地质特征

安家营子金矿床位于华北克拉通北缘东段,北邻兴蒙造山带。晚太古代,区域内形成结晶基底,主体为绿岩建造、TTG 岩系、钾质系列花岗岩等。元古宙至古生代,该区受古亚洲洋张开、闭合影响,发育陆源碎屑岩建造和东西向韧性剪切带。印支晚期,区域进入板内构造活动阶段,出现强烈的火山活动并发育广泛的盆岭构造^[16-17]。在隆起区出露太古代结晶基底,并有大量以印支期—燕山期为主的中酸性岩体侵入其中。在凹陷区普遍出露中生代、新生代中酸性火山岩、陆相砂砾岩及松散砂砾石沉积层等。区域内金

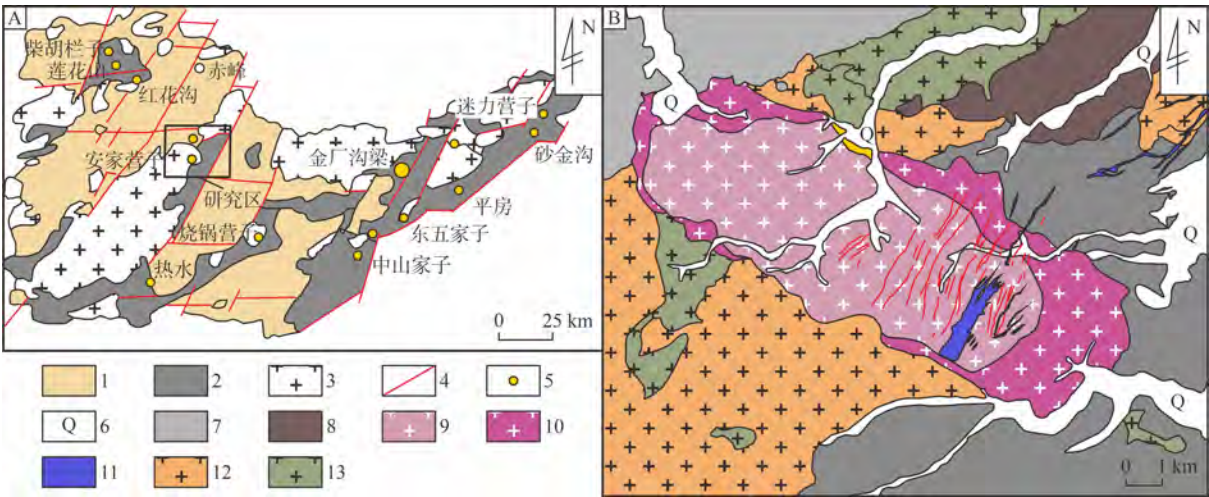
矿床主要产出在隆起区内的太古代结晶基底及侵入其中的花岗岩中(见图 1-A)。

2 矿区及矿床地质特征

2.1 矿区地质特征

矿区出露地层主要为太古界建平群、元古界明安山群、中生界,以及新生界第三系、第四系(见图 1-B)。其中,建平群主要分布在矿区东部,岩性主要为黑云母斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩等,变质程度较高,普遍达到麻粒岩相,变质年龄为 2 481 Ma^[18]。明安山群主要由绿泥石英片岩、黑云母石英片岩等组成。矿区构造主要为北北东向脆性断裂,集中分布在安家营子岩体中心东南部约 20 km² 范围内。矿体往往呈脉状、扁豆状、透镜状产于脆性断裂中,并且产状与其一致。

矿区大面积出露岩浆岩。规模较大的有矿区西南部的喀喇沁岩基和矿区中部的安家营子岩体。前者形成时代为燕山早期,岩性主要为二长花岗岩;后者形成时代为燕山晚期 132~138 Ma,岩性主要为花岗岩及二长岩,矿体即产于该岩体内。此外,区内还发育大量石英斑岩脉、流纹斑岩脉等酸性岩脉,这些岩脉多呈北北东向,并穿切安家营子岩体且与矿体相互穿插,岩脉形成年龄为 124.9~126.6 Ma。



1—中生界 2—太古界 3—中生代花岗岩 4—金矿床 5—断裂 6—第四系
7—第三系 8—元古界 9—晚白垩世花岗岩 10—晚白垩世石英岩
11—晚白垩世石英斑岩、流纹斑岩岩脉 12—侏罗纪二长花岗岩 13—三叠纪花岗岩

图 1 安家营子金矿床区域地质简图 (A) 和矿区地质图 (B)

Fig. 1 Regional geological sketch of Anjiayingzi Gold Deposit (A) and geological map of the gold district (B)

2.2 矿床地质特征

矿区内矿体赋存于安家营子岩体边缘或内部的北东东向断裂内,主要有漏风岭—南大洼、头道沟—夹壁墙 2 条矿化带。矿化带长达数千米,宽数百米,走向一般为 15°~30°,倾向南东,倾角一般为 60°~80°。矿体赋存于矿化带中,产状与矿化带一致,长度一般为几十米到几百米,宽度从几十厘米到几米,最宽可达 20 m 以上。矿体主要呈脉状、扁豆状、透镜状分布,并且具有膨胀狭缩、分支复合、尖灭再现、成群分布的特征。

矿区金矿化类型主要有黄铁绢英岩型、黄铁绢英岩化碎裂花岗岩型、黄铁矿化硅化(钾化)花岗岩型、黄铁石英脉型等 4 种^[2]。矿石中金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿及少量辉钼矿等。其中,黄铁矿是主要载金矿物。脉石矿物主要有石英、绢云母、钾长石、绿泥石、绿帘石、黑云母、方解石、高岭石等。

矿区蚀变岩极其发育,在各个采区均有分布。蚀变类型按照从早到晚依次为钠长石化、绢云母化、硅化、黄铁绢英岩化、绿泥石化等。这些蚀变分布主要受断裂控制,但未见明显的蚀变分带,往往独立、分散分布,亦很少相互叠加。

3 样品采集及分析测试

本次测试的 22 件样品全部采自安家营子金矿床井下巷道,均未受到地表风化作用影响,其变化均由与金矿化相关的热液活动引起。主要对未蚀变的花岗岩,以及钠长石化、绢云母化、绿泥石化、硅化、黄铁绢英岩化的花岗岩进行详细的镜下鉴定及主、微量元

素分析,并对钠长石化、绢云母化、绿泥石化、硅化蚀变岩进行了元素带入带出量分析。

主量元素和微量元素分析均在中国科学院地质与地球物理研究所完成。主量元素测试利用碱熔法将样品熔制成玻璃片,采用顺序式 X 射线荧光光谱仪(XRF-1500)完成,利用国家一级岩石标样 GBW 07101 为基体效应校正,每 10 个样品附带 1 个平行样品,利用标准曲线法校正。微量和稀土元素含量测试利用酸溶液法制备样品,在电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS, Element X)上进行测试,一般每 10 个待测样品选取 1 个为平行样品,并附有空白样品检测。以 GSR 为标样进行质量监控,采用标准曲线法来校正,相对偏差一般小于 5 %。

4 分析结果

4.1 元素迁移特征分析方法

为讨论热液蚀变过程中元素的活动性,对原岩及典型蚀变岩的主量元素(Si、Al、Fe、Mg、Ca、Na、K、P)、稀土元素、大离子亲石元素(Cs、Rb、Sr、Ba、Pb、U)、高场强元素(Nb、Ta、Ti、Zr、Hf、Th、Ga)和过渡族金属元素(Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Bi)进行了分析,结果见表 1、表 2。

本次研究使用文献[19]的研究方法对元素的带入带出进行描述,该方法能对蚀变过程的质量变化进行直观有效分析,因此,被大量运用于各种热液矿床蚀变的研究中,如蚀变岩型金矿床、斑岩型铜矿床、VMS 型矿床等^[14-15]。根据式(1)计算元素的带入带出量:

表 1 安家营子金矿床原岩与典型蚀变岩主量元素分析结果

Table 1 Analysis results of major elements in protolith and typical altered rocks from Anjiayingzi Gold Deposit %

元素及 参数	安家营子岩体		钠长石化花岗岩		弱绢云母化花岗岩		强绢云母化花岗岩				
	3YP-1	3YP-3	2NDW-12	Jan-12	3YP-8	3YP-10	3YP-17	2GBG-X-4A	3GBG-7	3GBG-9	3GBG-10
SiO ₂	68.40	65.72	68.08	69.01	68.75	68.86	63.76	66.83	68.18	67.87	68.78
TiO ₂	0.42	0.63	0.41	0.44	0.41	0.43	0.57	0.46	0.49	0.54	0.40
Al ₂ O ₃	15.03	15.88	14.57	14.15	14.84	14.84	13.98	15.27	15.23	16.19	14.77
TFe	3.08	3.12	2.90	2.41	2.87	3.13	2.80	3.26	2.94	2.57	2.31
MgO	1.07	2.31	1.13	1.01	1.10	1.03	1.07	0.99	0.98	0.89	0.94
CaO	2.41	2.29	2.01	1.49	1.86	2.04	4.74	2.08	1.94	1.00	1.51
Na ₂ O	4.37	3.94	4.42	3.28	3.65	3.79	0.26	0.19	1.56	0.22	0.29
K ₂ O	3.90	4.71	4.58	6.04	5.43	5.04	7.28	7.09	6.65	6.89	8.83
P ₂ O ₅	0.16	0.29	0.16	0.16	0.15	0.16	0.21	0.18	0.19	0.2	0.14
LOI	0.44	0.58	1.22	1.56	0.58	0.90	4.84	3.06	2.66	2.64	2.60
合计	99.28	99.47	99.48	99.55	99.64	100.20	99.51	99.41	100.82	99.01	100.57

元素及 参数	绿泥石化花岗岩					绢英岩化-黄铁绢英岩化花岗岩			硅化花岗岩		
	3NDW-9	2NDW-10	3NDW-8-7	3NDW-10	3NDW-11	2LM-14	2LM-X-2A	2LM-12	LM-9-3	LM-9-1	Feb-12
SiO ₂	65.63	66.52	67.24	66.88	66.72	75.97	70.01	75.48	77.91	77.82	77.60
TiO ₂	0.62	0.53	0.49	0.48	0.49	0.21	0.18	0.18	0.10	0.09	0.09
Al ₂ O ₃	14.92	15.05	15.01	14.83	14.81	12.59	12.35	13.02	11.21	11.11	11.35
TFe	3.24	3.48	3.62	2.99	2.98	1.87	7.64	1.69	1.72	1.76	1.10
MgO	1.32	1.21	1.31	1.03	1.04	0.40	0.54	0.34	0.18	0.15	0.14
CaO	2.40	2.36	2.08	2.12	2.12	0.33	0.12	0.18	0.34	0.18	0.37
Na ₂ O	3.64	3.82	4.09	3.37	3.34	2.35	0.14	1.12	1.79	2.26	2.19
K ₂ O	5.10	4.93	4.47	5.39	5.41	5.43	5.42	6.67	6.09	5.82	6.11
P ₂ O ₅	0.23	0.2	0.19	0.19	0.19	0.04	0.04	0.04	0.02	0.01	0.02
LOI	2.78	1.74	1.20	2.58	2.58	1.20	4.8	2.02	1.30	1.04	0.90
合计	99.88	99.84	99.70	99.86	99.68	100.40	101.2	100.74	100.66	100.24	99.87

表 2 安家营子金矿床原岩与典型蚀变岩微量元素分析结果

Table 2 Analysis results of micro elements in protolith and typical altered rocks from Anjiayingzi Gold Deposit 10⁻⁶

元素及 参数	安家营子岩体		钠长石化花岗岩		弱绢云母化花岗岩		强绢云母化花岗岩				
	3YP-1	3YP-3	2NDW-12	Jan-12	3YP-8	3YP-10	3YP-17	2GBG-X-4A	3GBG-7	3GBG-9	3GBG-10
La	37.60	48.74	38.86	39.45	39.27	38.48	54.56	44.18	42.64	45.38	35.86
Ce	69.03	83.99	67.15	70.77	68.62	70.38	95.02	68.79	72.75	77.92	59.63
Pr	7.73	9.34	7.49	7.80	7.5	7.82	10.25	8.13	8.16	8.77	6.48
Nd	25.42	30.62	23.95	25.31	23.98	25.59	32.96	25.75	25.92	28.05	20.60
Sm	4.18	5.12	3.99	4.16	3.87	4.19	5.42	4.46	4.23	4.58	3.20
Eu	0.90	1.08	0.99	0.73	0.78	0.85	1.61	1.03	1.05	0.91	0.57
Gd	2.90	3.72	2.72	2.88	2.75	2.96	4.10	3.21	3.01	3.19	2.2
Tb	0.40	0.51	0.39	0.39	0.37	0.40	0.58	0.42	0.41	0.42	0.28
Dy	2.03	2.70	2.08	1.90	1.85	2.15	3.18	2.13	2.20	2.07	1.48
Ho	0.38	0.53	0.40	0.36	0.36	0.39	0.64	0.42	0.44	0.4	0.29
Er	1.05	1.48	1.08	1.05	0.97	1.06	1.72	1.17	1.20	1.09	0.80
Tm	0.17	0.24	0.16	0.17	0.15	0.17	0.25	0.18	0.18	0.16	0.12
Yb	1.09	1.62	1.08	1.14	0.99	1.17	1.73	1.24	1.26	1.07	0.78
Lu	0.17	0.25	0.17	0.18	0.15	0.18	0.26	0.20	0.20	0.17	0.12
Y	10.54	14.07	10.16	10.13	10.05	10.69	17.52	11.68	11.97	10.72	7.17
Sc	7.17	10.78	6.25	6.46	6.87	7.08	7.23	5.63	6.55	7.60	5.98

表 2(续)

Table 2(continued)

10⁻⁶

元素及 参数	安家营子岩体		钠长石化花岗岩		弱绢云母化花岗岩		强绢云母化花岗岩				
	3YP-1	3YP-3	2NDW-12	Jan-12	3YP-8	3YP-10	3YP-17	2GBG-X-4A	3GBG-7	3GBG-9	3GBG-10
V	41.40	42.27	37.04	40.80	38.20	40.58	41.90	49.58	36.58	51.20	36.85
Cr	219.62	199.58	155.28	297.68	225.95	249.49	229.41	186.10	222.18	283.09	247.76
Co	7.90	13.33	7.51	5.40	7.11	8.26	3.77	5.94	4.25	5.46	6.33
Ni	12.73	17.76	8.68	14.42	13.97	12.27	12.68	11.15	10.32	20.10	11.02
Cu	13.81	20.92	11.09	23.52	10.13	10.65	159.40	666.13	111.23	267.61	232.77
Zn	25.11	61.65	35.65	22.84	31.99	37.74	57.09	89.67	68.53	1 734.96	55.55
Ga	19.96	19.80	16.17	17.47	18.68	18.78	19.94	21.70	18.93	22.01	19.02
Rb	137.61	161.77	154.10	206.02	196.85	183.72	334.90	396.76	312.14	387.57	389.68
Sr	512.59	710.55	425.74	366.54	544.97	531.99	412.13	155.40	243.27	65.65	229.54
Zr	176.95	366.44	222.84	213.64	165.53	218.85	296.30	221.80	318.29	240.49	165.73
Nb	16.80	16.26	15.08	16.46	16.15	17.05	21.95	18.29	18.33	20.42	15.20
Cs	2.28	6.58	2.13	2.82	3.62	3.85	4.61	4.12	4.86	3.84	4.26
Ba	620.56	1155.86	980.95	1 005.72	1 058.13	1 033.07	954.38	736.27	870.69	540.05	1 321.02
Hf	5.05	9.85	6.02	5.94	4.58	5.91	8.28	6.08	8.68	6.57	4.54
Ta	1.56	1.32	1.41	1.51	1.45	1.55	2.00	1.62	1.65	1.83	1.38
Tl	0.53	0.68	0.64	0.87	0.73	0.70	1.53	0.63	1.42	1.67	1.77
Pb	18.43	20.38	18.54	15.79	22.19	23.96	28.14	29.54	17.87	30.60	23.27
Bi	0.03	0.08	0.05	0.58	0.04	0.06	0.20	3.27	0.09	0.53	0.80
Th	38.14	19.55	19.74	25.05	22.63	22.55	37.82	25.80	22.19	30.24	20.20
U	8.29	6.99	4.83	8.68	5.92	5.99	6.29	8.41	6.44	10.00	5.43
Zr/Hf	35.05	37.19	37.01	35.96	36.15	37.03	35.80	36.50	36.65	36.62	36.47
Nb/Ta	10.79	12.35	10.71	10.90	11.18	11.02	10.99	11.26	11.14	11.16	11.02
δEu	0.75	0.72	0.87	0.61	0.70	0.70	1.00	0.79	0.85	0.69	0.62
ΣREE	153.06	189.94	150.51	156.29	151.64	155.79	212.28	161.29	163.64	174.18	132.42

元素及 参数	绿泥石化花岗岩					绢英岩化-黄铁绢英岩化花岗岩			硅化花岗岩		
	3NDW-9	2NDW-10	3NDW-8-7	3NDW-10	3NDW-11	2LM-14	2LM-X-2A	2LM-12	LM-9-3	LM-9-1	Feb-12
La	50.62	36.73	46.21	40.02	39.88	74.93	52.22	57.27	46.42	34.66	44.34
Ce	89.54	64.02	80.25	70.08	69.39	136.84	92.15	105.23	90.40	57.91	78.90
Pr	9.87	6.84	8.77	7.66	7.57	14.98	9.88	11.11	10.23	7.03	8.85
Nd	33.02	22.19	28.31	24.66	24.18	49.10	32.19	36.49	34.92	23.26	28.43
Sm	5.25	3.70	4.69	4.03	3.95	8.05	5.10	5.65	5.15	3.35	3.94
Eu	0.90	0.86	1.10	0.92	0.90	0.73	0.55	0.54	0.32	0.33	0.39
Gd	3.68	2.68	3.33	2.93	2.78	6.66	4.17	4.59	3.97	2.22	2.61
Tb	0.49	0.38	0.44	0.38	0.36	1.03	0.67	0.68	0.57	0.29	0.35
Dy	2.51	2.13	2.38	1.79	1.73	6.01	3.73	3.89	3.04	1.52	1.75
Ho	0.45	0.43	0.47	0.35	0.33	1.23	0.74	0.81	0.61	0.27	0.34
Er	1.23	1.17	1.25	0.93	0.89	3.50	2.07	2.34	1.70	0.78	0.91
Tm	0.20	0.17	0.19	0.14	0.14	0.55	0.32	0.38	0.26	0.12	0.14
Yb	1.32	1.15	1.24	0.97	0.95	3.54	2.19	2.61	1.75	0.85	0.98
Lu	0.20	0.18	0.19	0.16	0.15	0.53	0.33	0.39	0.27	0.14	0.16
Y	11.44	11.08	11.86	8.96	8.62	33.87	17.60	22.26	16.45	6.84	8.20
Sc	8.67	7.54	9.53	9.07	7.73	4.21	7.64	7.27	6.19	3.64	2.65
V	55.43	49.08	52.62	57.60	44.46	11.07	14.87	12.62	5.66	5.30	5.14
Cr	238.81	199.44	210.06	207.49	211.52	266.88	300.11	355.17	446.54	393.43	391.81
Co	5.63	7.19	16.24	38.71	11.69	5.36	8.20	7.01	6.14	4.70	4.49
Ni	12.82	13.07	14.78	15.45	14.35	5.92	2.15	8.14	10.95	8.82	8.83
Cu	43.84	6.68	30.71	104.81	9.20	14.82	15.58	79.06	93.72	31.92	50.53
Zn	57.03	43.73	38.41	35.15	34.56	228.34	8.62	1 129.20	737.05	38.77	318.91
Ga	18.04	19.60	20.39	19.40	18.42	16.89	23.58	16.07	12.59	10.72	11.46
Rb	204.67	194.24	200.46	212.00	213.60	271.54	297.84	370.17	256.11	229.15	250.96

表 2(续)

Table 2(continued)

10⁻⁶

元素及 参数	绿泥石化花岗岩					绢英岩化-黄铁绢英岩化花岗岩			硅化花岗岩		
	3NDW-9	2NDW-10	3NDW-8-7	3NDW-10	3NDW-11	2LM-14	2LM-X-2A	2LM-12	LM-9-3	LM-9-1	Feb-12
Sr	403.01	575.66	607.62	416.36	413.65	77.24	23.40	50.39	33.04	46.28	54.87
Zr	257.55	238.23	225.68	225.19	216.97	183.64	173.84	163.17	138.95	145.96	108.21
Nb	22.36	18.48	18.57	20.69	17.55	31.14	20.37	25.29	12.43	8.39	9.29
Cs	6.54	20.29	17.49	7.54	7.58	3.71	3.87	4.61	3.68	4.23	5.01
Ba	1 047.60	869.13	862.41	995.53	984.68	460.33	207.03	416.98	251.89	390.30	400.79
Hf	7.06	6.36	6.14	5.99	5.88	6.07	5.38	5.55	5.21	5.10	3.80
Ta	1.99	1.69	1.62	1.71	1.60	4.46	2.8	4.01	1.66	1.06	0.93
Tl	1.10	1.07	0.96	0.83	0.83	1.41	1.01	1.71	1.32	1.22	1.31
Pb	33.57	19.54	19.45	14.69	14.48	119.90	204.32	599.59	214.00	220.10	98.55
Bi	0.27	0.10	0.04	0.47	0.48	0.14	39.39	4.66	1.13	4.32	1.01
Th	24.51	23.85	25.01	24.38	24.81	58.19	43.58	47.22	38.54	32.28	43.12
U	4.74	5.75	7.79	5.68	5.48	20.88	12.06	15.44	10.49	10.32	10.43
Zr/Hf	36.49	37.45	36.73	37.59	36.90	30.25	32.32	29.38	26.67	28.61	28.45
Nb/Ta	11.26	10.95	11.45	12.11	10.95	6.99	7.27	6.31	7.48	7.94	9.94
δEu	0.59	0.79	0.81	0.78	0.78	0.30	0.36	0.31	0.21	0.35	0.35
ΣREE	199.26	142.62	178.80	155.00	153.19	307.67	206.32	231.99	199.60	132.73	172.09

$$\Delta C = (C^{\text{F}}_{\text{immobile}}/C^{\text{A}}_{\text{immobile}})C^{\text{A}} - C^{\text{F}} \quad (1) \quad (\%/10^{-6}).$$

式中:ΔC 为元素带入带出量(%/10⁻⁶);选择 Al₂O₃ 作为最不活泼元素(immobile),C^F_{immobile}、C^A_{immobile} 分别为新鲜样品和蚀变样品中 Al₂O₃ 的质量分数(%);C^F 和 C^A 分别为新鲜样品和蚀变样品中元素质量分数

安家营子金矿床不同蚀变岩元素带入带出量见表 3。将蚀变岩和相应原岩的元素含量适当缩放后投在 Isocon 图解上,并且选择热液活动中最不活泼的 Al₂O₃ 作为 Isocon 线^[20-21],结果见图 2。

表 3 安家营子金矿床不同蚀变岩元素带入带出量

Table 3 Calculated gains and losses for different altered rock elements in Anjiayingzi Gold Deposit

%/10⁻⁶

元素	钠长石化 花岗岩	弱绢云母化 花岗岩	强绢云母化 花岗岩	绿泥石化 花岗岩	硅化 花岗岩	元素	钠长石化 花岗岩	弱绢云母化 花岗岩	强绢云母化 花岗岩	绿泥石化 花岗岩	硅化 花岗岩
SiO ₂	6.71	4.60	4.85	1.91	40.04	Cs	-1.76	-0.54	-0.02	7.88	1.50
Fe ₂ O ₃	-0.24	0.02	-0.28	0.28	-1.00	Rb	44.10	48.48	220.47	62.60	188.24
MgO	-0.54	-0.58	-0.70	-0.47	-1.47	Sr	-185.2	-50.78	-399.57	-111.12	-549.98
CaO	-0.47	-0.32	-0.11	-0.06	-1.94	Ba	180.87	200.72	-11.78	97.53	-409.47
Na ₂ O	-0.01	-0.28	-3.69	-0.37	-1.29	Pb	-0.93	4.63	27.92	1.67	225.09
K ₂ O	1.41	1.15	3.17	0.94	3.97	U	-0.37	-1.44	1.65	-1.54	6.70
P ₂ O ₅	-0.05	-0.06	-0.03	-0.02	-0.20	Nb	0.45	0.76	3.13	3.70	-2.71
LOI	0.99	0.26	2.70	1.74	0.98	Ta	0.13	0.12	0.33	0.35	0.24
La	-1.03	-2.68	3.14	1.04	14.40	TiO ₂	-0.07	-0.09	-0.02	0.02	-0.40
Ce	-2.29	-4.13	1.81	0.80	27.78	Zr	-36.81	-71.54	-16.11	-30.69	-91.25
Pr	-0.31	-0.56	0.22	-0.10	3.45	Hf	-1.01	-1.99	-0.42	-0.94	-0.97
Nd	-1.51	-2.21	0.08	-0.61	11.73	Th	-4.74	-5.32	-0.51	-3.46	23.46
Sm	-0.27	-0.45	-0.05	-0.17	1.06	Ga	-1.78	-0.38	0.63	-0.03	-3.92
Eu	-0.07	-0.14	0.09	-0.03	-0.51	Sc	-2.14	-1.71	-2.00	-0.17	-3.25
Gd	-0.29	-0.33	0.01	-0.12	0.73	V	0.06	-0.81	1.64	11.85	-34.44
Tb	-0.04	-0.05	-0.01	-0.03	0.09	Cr	34.15	37.97	45.40	11.46	355.80
Dy	-0.22	-0.28	0.02	-0.18	0.53	Co	-3.67	-2.61	-5.20	5.84	-3.58
Ho	-0.05	-0.07	0.01	-0.04	0.10	Ni	-2.81	-1.58	-2.18	-0.65	-2.12
Er	-0.12	-0.20	0.02	-0.13	0.29	Cu	1.25	-6.55	237.94	23.07	63.50
Tm	-0.02	-0.03	-0.01	-0.03	0.04	Zn	-11.9	-7.07	314.96	-0.11	459.12
Yb	-0.16	-0.23	-0.06	-0.19	0.29	Bi	0.28	-0.01	0.82	0.23	2.91
Lu	-0.02	-0.04	-0.01	-0.03	0.05	Tl	0.21	0.14	0.89	0.39	1.17
Y	-1.38	-1.50	0.25	-1.54	2.16						

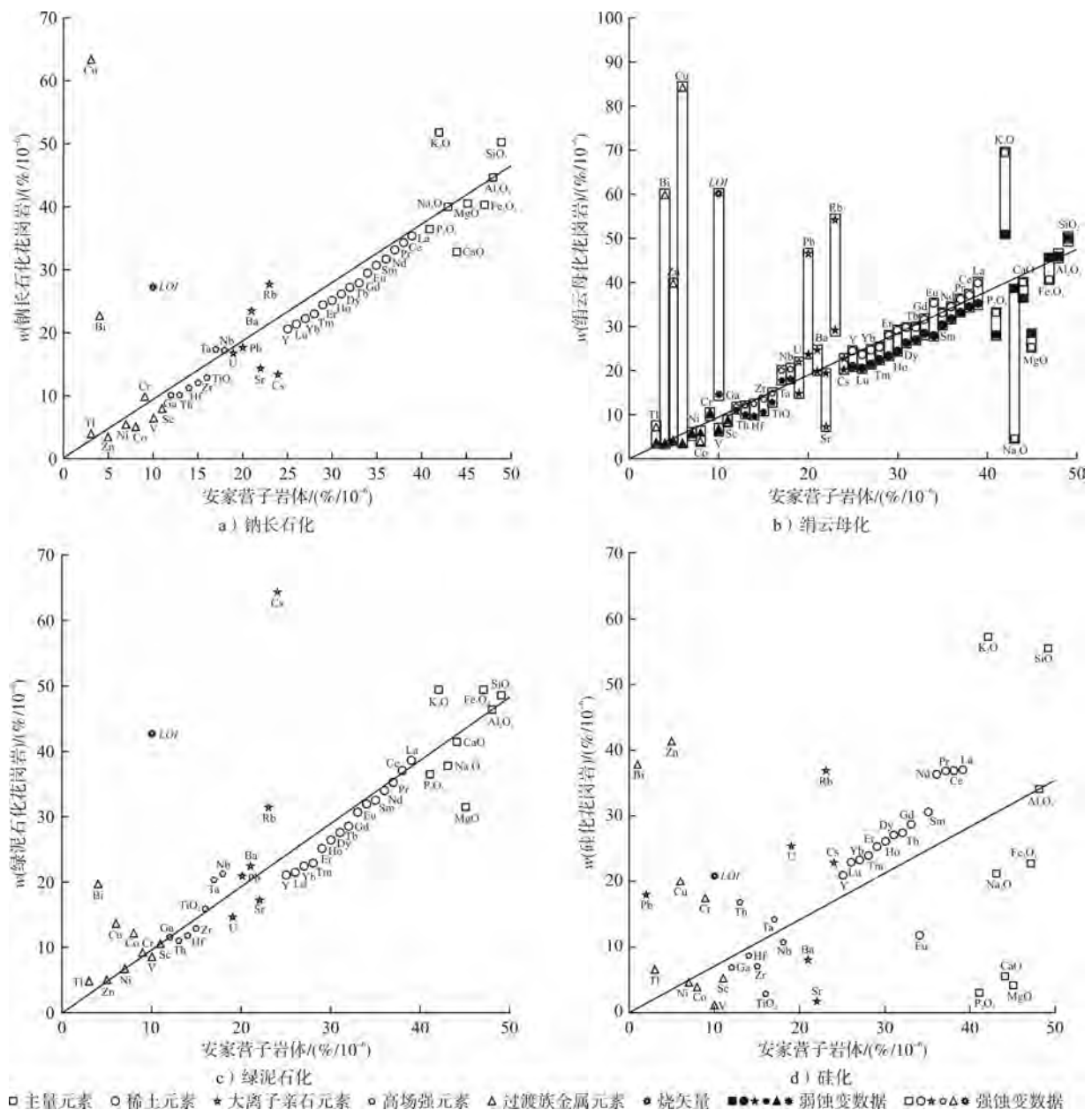


图2 原岩及蚀变岩 Isocon 图解

Fig.2 Isocon diagrams of protolith and altered rocks

4.2 元素迁移特征

4.2.1 钠长石化

钠长石化花岗岩主要采自南大洼采区井下巷道中,其原岩为安家营子岩体。将钠长石化花岗岩和安家营子岩体的元素含量分别投在 Isocon 图解上进行比较。结果显示,钠长石化花岗岩最典型的特征是更长石几乎全部转变为钠长石,并出现大量的绢云母、绿帘石和钾长石的蚀变矿物组合。虽然在钠长石化花岗岩中出现大量钠长石,但从 Isocon 图解中可见 Na₂O 含量并没有增加,而 CaO 含量明显降低,表明钠长石化蚀变没有从流体中获得大量 Na,而是更长石的去钙长石化形成钠长石,这一过程伴随着绢云母和钾长石大量生成,因此其 K₂O 含量明显上升。Fe₂O₃ 和 MgO 含量变化不大,说明部分黑云母向绿泥

石的转变没有造成 Fe、Mg 丢失,同时部分 Fe 可能以氧化物形式进入钠长石孔洞中,使其变红。P₂O₅ 含量没有明显变化,表明磷灰石在钠长石化中保持稳定,并没有分解。稀土元素在钠长石化花岗过程中呈现出较低的活动性。钠长石化花岗岩中稀土元素的总量同安家营子岩体的稀土总量和配分形式基本相同(见图3)。安家营子岩体中稀土元素主要赋存在斜长石和副矿物(如锆石、独居石、磷灰石等)中,在钠长石化蚀变过程中,斜长石蚀变为钠长石,基本保存了其中的稀土元素,而副矿物也基本没有分解,所以稀土元素保持不变。大离子亲石元素在钠长石化过程中表现出相对较高的活动性。Rb 相对富集,它可能代替了钠长石内部的绢云母和热液钾长石中 K。安家营子岩体为高 Sr、Ba 花岗岩,Sr 主

要赋存于斜长石和钾长石中,而 Ba 主要富集在钾长石中,斜长石中较少。钠长石化蚀变过程中岩浆期的钾长石没有受到影响,而更长石则全部蚀变为钠长石,所以 Sr 含量明显降低,而 Ba 含量没有明显变化,还可能因为热液钾长石的出现表现出略微增加。此外,Cs、U、Pb 含量变化很小,表明钠长石化蚀变过程中活动性较弱。高场强元素和过渡族金

属元素在钠长石化蚀变过程中表现出非常弱的活动性。因为在钠长石化蚀变过程中,楣石、磷灰石、锆石等副矿物都没有发生明显蚀变,所以富集在其中的 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素基本保持不变。过渡族金属元素中,除了 Bi,其他元素基本保持不变,表明钠长石化蚀变过程中过渡族金属元素的活动性不强。

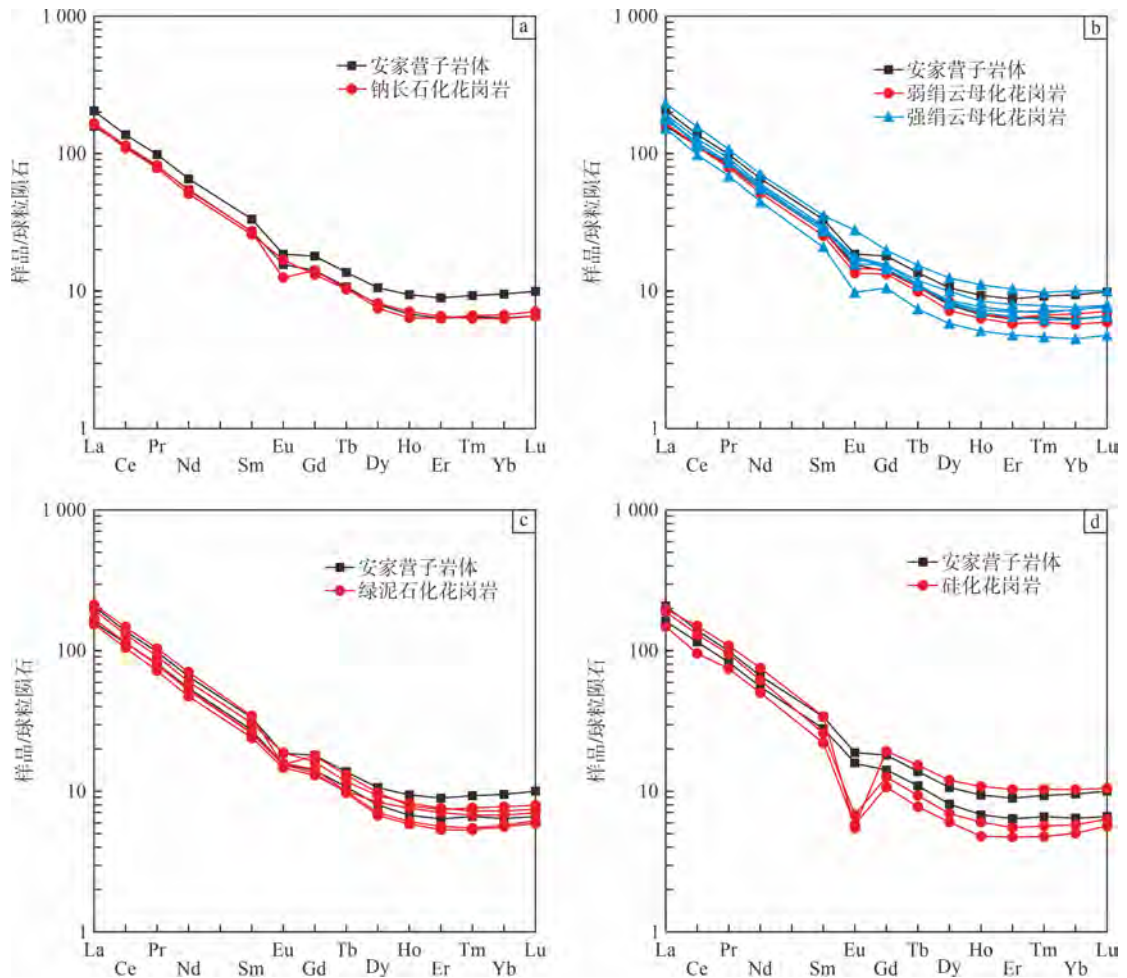


图3 原岩及蚀变岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图

Fig.3 Chondrite standardized distribution pattern of rare earth elements in protolith and altered rocks

4.2.2 绢云母化

绢云母化花岗岩采自阳坡采区,其原岩为安家营子岩体。绢云母化花岗岩中最明显的变化是斜长石蚀变为绢云母,因此 Na₂O 含量急剧降低,K₂O 含量及烧失量明显升高,而且从弱蚀变到强蚀变中变化比较明显。斜长石的分解造成 CaO 丢失,但绢云母化花岗岩中 CaO 含量没有明显降低,可能是因为碳酸盐或者绿帘石脉出现。此外,黑云母的分解导致 MgO 含量减少。

稀土元素在绢云母化过程中活动性较弱。绢云母化花岗岩的稀土元素总量同安家营子岩体稀土元素总量和配分形式基本一致,强弱不同程度的蚀变对其总量和配分形式都没有明显的影响。由于在绢云

母化蚀变过程中副矿物基本保持稳定,所以稀土元素总量的变化不大。大离子亲石元素在绢云母化过程中表现出较强的活动性。随着蚀变加强,Rb 和 Pb 含量急剧增加,其可能取代了绢云母或钾长石中的 K。斜长石全部转化为绢云母导致 Sr 含量明显降低,而 Ba 含量基本不变,表明钾长石在绢云母化过程中蚀变较弱,而 U、Cs 依然保持较弱的活动性。绢云母化蚀变中高场强元素的活动性同钠长石化蚀变类似,表现出较弱的活动性,而过渡族金属元素则表现出相对较强的活动性。Cu、Zn、Bi 含量明显增加,表明在绢云母化过程中可能有金属硫化物的沉淀。

4.2.3 绿泥石化

绿泥石化花岗岩采自南大洼采区,其原岩为安家

营子岩体。绿泥石化明显的特征是黑云母分解为绿泥石,以及出现大量绢云母与其共生^[10]。由于黑云母的分解,MgO含量明显降低,Fe₂O₃含量不但没有降低反而稍微增加,可能是由于绿泥石化中有黄铁矿沉淀导致的。由于蚀变中出现大量绢云母,所以K₂O含量增多,而随着斜长石向绢云母转化,Na₂O含量降低,CaO含量也应该降低,但图3-c显示其含量基本保持不变,则可能是由于绿泥石化过程中有部分方解石出现的原因。

稀土元素在绿泥石化过程中活动性较低。绿泥石化中稀土元素的配分形式同安家营子岩体基本相同。大离子亲石元素的变化同钠长石化蚀变类似,Rb相对富集,Sr相对亏损,其与绢云母的出现、斜长石的分解关系密切,但Cs含量显著增加,可能表明Cs在绿泥石化过程中活动性较大。高场强元素中主要是Nb、Ta轻微增加,其他都保持不变,而且Nb与Ta、Zr与Hf没有出现明显分馏。过渡族金属元素中Co、Cu、Bi含量增加,其他变化不大,可能与黄铁矿等硫化物的出现有关。

4.2.4 硅化

硅化花岗岩采自李麻子沟采区6中段,虽然蚀变岩型金矿床的硅化大多是叠加在其他蚀变之上,尤其是和绢云母化、黄铁矿化组成的黄铁绢英岩化,但观察样品采区的部分硅化并没有叠加在强烈的其他蚀变之上,所以仍用安家营子岩体作为原岩进行投图。

硅化的明显特征是石英交代岩浆期矿物^[16],因此硅化花岗岩中SiO₂含量明显升高,Na₂O、CaO含量明显降低,说明斜长石大量分解,Fe₂O₃和MgO含量降低表明黑云母分解,而这些被分解的矿物大多被石英取代。P₂O₅含量大幅降低,表明磷灰石在硅化中也被分解。但是,K₂O含量却明显增加,可能有含K矿物生成,如绢云母和钾长石。

稀土元素在硅化中的活动性比其他蚀变稍微加强。稀土元素在Isocon图解上呈现出含量增加的趋势,轻稀土元素含量出现了相对较大的增加(Sm除外),Sm和重稀土元素含量增加程度则相对较弱。这一现象可能是由于本身花岗岩成分差异造成的,也可能是由于流体带来稀土元素引起的,但同其他蚀变相比,轻稀土元素明显表现出了更强的活动性,这在三山岛金矿床蚀变岩的研究中更为明显^[22]。其硅化中的稀土元素配分形式同安家营子岩体类似,但出现了非常明显的Eu负异常,Isocon图解上也显示出明显的丢失。

大离子亲石元素和高场强元素在硅化中表现出比钠长石化、绢云母化、绿泥石化更强的活动性。

Rb、Pb含量增加可能与K₂O含量增加有关,其能取代K进入含钾矿物中。Ba和Sr都显示出明显丢失,主要由于硅化过程中钾长石和斜长石可能都被石英取代。Cs富集可能表明其在硅化流体中的活动性较强。Nb、Hf、Zr、Ga表现出丢失,Th表现出富集,虽然这种丢失和富集状态可能受到花岗岩成分的不均一性影响,但Nb、Ta和Zr、Hf这些元素具有相似的离子半径和电子价态,在岩浆过程中通常不发生分馏,在硅化中出现了明显分馏,表明高场强元素可能在硅化中活动性较强。而钠长石化、绢云母化、绿泥石化中这些元素在Isocon图解上虽然也有含量上的轻微变化,但 $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$ 值、 $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 值保持不变,所以这些蚀变中的变化可能是由于成分的不均一引起的。TiO₂大量丢失同P₂O₅含量降低表明金红石发生了大量分解。

过渡族金属元素中Cu、Bi、Zn和Cr含量明显增加,可能和黄铜矿的出现有关,而Co、Ni变化不大,Sc、V含量出现了降低。

5 讨论

安家营子金矿床蚀变岩分布较广,但连续分带性并不明显,主要受到矿区断裂性质转换影响。花岗岩的结构和矿物根据蚀变类型的不同,展示出不同程度改造,在这个过程中,元素被活化迁移。

通过对安家营子金矿床不同蚀变的详细研究发现,各类蚀变中主量元素和大离子亲石元素活动性较强,表现为K、Rb带入,Sr带出,CaO、MgO、Fe₂O₃等随着斜长石、黑云母分解而表现出不同程度的带出,SiO₂带入在硅化中尤其明显,Ba并没有大量带入,这与矿区中缺少钾长石化相关。高场强元素和稀土元素在钠长石化、绢云母化、绿泥石化中都表现出较弱的活动性,在硅化中的活动性则相对较强,表现为轻稀土元素富集,TiO₂明显带出和Th明显带入,Nb-Ta和Zr-Hf出现了明显的分馏。过渡族金属元素中,Bi在所有蚀变中都表现出明显的增加,而且在绢云母化和硅化中增加程度最大,表明Bi同含金热液流体关系紧密,Bi含量同金品位成正比,这在实际找矿工作中得到了充分验证。而Cu、Zn只在绢云母和硅化阶段大量带入,在钠长石化和绿泥石化变化较小,说明在绢云母化和硅化阶段硫化物可能大量沉淀,而这一过程和金的沉淀关系密切。

综上所述,随着矿物交代反应的进行,各种蚀变中主量元素都可以被强烈改变。稀土元素在蚀变中的活动性较低,在钠长石化、绢云母化、绿泥石化中只发生了厘米级的运移,沉淀在绢云母、绿泥石等热液矿物中^[23],稀土元素含量基本不变,只有硅化中轻稀

土出现富集。大离子亲石元素的部分元素活动性较强。高场强元素作为传统惰性元素,在钠长石化、绢云母化、绿泥石化中活动性很低,但在硅化中活动性很强,甚至还出现了元素对的分馏。过渡族金属元素在钠长石化和绿泥石化中活动性较低,但在绢云母化和硅化中活动性较强,表明后 2 种蚀变和矿化的关系更紧密。

6 结 论

1) 伴随安家营子金矿床的形成,发生了大规模、多期次的水岩反应。从早到晚依次是:钠长石化、绢云母化、硅化、黄铁绢英岩化、绿泥石化等。

2) 蚀变过程成中主量元素和大离子亲石元素在所有蚀变中都表现出较强的活动性,而过渡族金属元素在绢云母化和硅化表现出强烈的富集,高场强元素和稀土元素只在硅化中表现出一定的活动性,表明硅化和绢云母化与金矿化可能有紧密联系,而这 2 种蚀变叠加的黄铁绢英岩化的矿化性更好。

【参考文献】

[1] 陈伟军,刘红涛. 赤峰—朝阳金矿化集中区主要金矿类型及地质特征研究[J]. 黄金科学技术,2006,14(5):1-7.

[2] 王义文,谢锡才,刘晓利,等. 安家营子金矿田矿床类型及地质地球化学特征[J]. 黄金,1997,18(11):3-9.

[3] 谢锡才,王义文,董万成,等. 安家营子金矿田矿床及同源岩体同位素地球化学[J]. 贵金属地质,1997,6(3):171-182.

[4] 李永刚,翟明国,苗来成,等. 内蒙古安家营子金矿与侵入岩的关系及其地球动力学意义[J]. 岩石学报,2003,19(4):808-816.

[5] 李永刚,翟明国,杨进辉,等. 内蒙古赤峰安家营子金矿成矿时代以及对华北中生代爆成矿的意义[J]. 中国科学(D辑:地球科学),2003,33(10):960-966.

[6] 李永刚,翟明国,苗来成,等. 内蒙古赤峰地区安家营子金矿成矿流体研究[J]. 岩石学报,2004,20(4):961-968.

[7] 彭丽娜. 内蒙古赤峰市金蟾山金矿床成矿机制与成矿构造背景研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2010.

[8] 张宇,黄斐,叶萍,等. 内蒙古安家营子金矿流体包裹体及氢氧硫同位素研究[J]. 矿产与地质,2020,34(2):236-246.

[9] 崔霄峰,张宇,李肖龙. 内蒙古喀喇沁旗安家营子金矿蚀变及其

分布研究[J]. 地质与勘探,2021,57(1):1-13.

[10] 王跃,周奇明,张金龙,等. 鲁西地区新太古代地壳增生事件——来自花岗岩和二长花岗岩 U-Pb 年代学、Hf 同位素和岩石地球化学的证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2022,52(2):463-485.

[11] 齐雨宁,孙国胜,冯德胜,等. 内蒙古敖汉旗岱王山金矿床流体包裹体特征及矿床成因[J]. 黄金,2024,45(3):67-71.

[12] 李欣航,白令安,胡乔帆,等. 桂西北金牙金矿床成矿流体性质与成矿机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2023,53(3):840-852.

[13] 王俊德,任晓仲,杜晓阳,等. 豫西上官金矿床成矿流体特征[J]. 黄金,2022,43(12):19-25.

[14] 刘建民,赵国春,徐刚,等. 辽东半岛金矿成矿作用与深部资源勘查[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2021,51(6):1613-1635.

[15] 何军成,刘军,李小伟,等. 黑龙江省团结沟浅成低温热液金矿床成因——锆石 U-Pb 定年、元素地球化学和 Hf-S-Pb-He 同位素证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2023,53(5):1437-1466.

[16] FU L B, WEI J B, CHEN H Y, et al. The relationship between gold mineralization, exhumation of metamorphic core complex and magma cooling: Formation of the Anjiayingzi Au deposit, northern North China Craton[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 73(2):222-240.

[17] TRUMBULL R B, LEHRBERGER G, SATIR M, et al. Granitoid-hosted gold deposits in the Anjiayingzi District of Inner Mongolia, People's Republic of China[J]. Economic Geology, 1996, 91(5):875-895.

[18] 崔文元,王长秋,张承志,等. 辽西—赤峰一带太古代变质岩中锆石 U-Pb 年龄[J]. 北京大学学报(自然科学版),1991,27(2):229-237.

[19] GRANT J A. The isocon diagram—A simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration[J]. Economic Geology, 1986, 81(8):1976-1982.

[20] BARRETT T J, MACLEAN W H. Mass changes in hydrothermal alteration zones associated with VMS deposits of the Noranda area[J]. Exploration and Mining Geology, 1994, 3(2):131-160.

[21] HEZARKHANI A. Mass changes during hydrothermal alteration/mineralization at the Sar-Cheshmeh porphyry copper deposit, Southeastern Iran[J]. International Geology Review, 2006, 48(9):841-860.

[22] LI X C, FAN H R, SANTOSH M, et al. Hydrothermal alteration associated with Mesozoic granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong Gold Province, China[J]. Ore Geology Reviews, 2013, 53:403-421.

[23] WARD C D, MCARTHUR J M, WALSH J N. Rare earth element behavior during evolution and alteration of the Dartmoor granite, SW England[J]. Journal of Petrology, 1992, 33(4):785-815.

Characteristics of element migration during hydrothermal alteration in Anjiayingzi Gold Deposit, Harqin Banner, Inner Mongolia, and its geological significance

Ru Peng^{1,2}, Li Xiaofang³, Wang Yake³

(1. Henan Academy of Geology;

2. Henan Key Laboratory of Metallogenic Geological Processes and Resource Utilization;

3. Henan Institute of Geological Sciences Co., Ltd.)

Abstract: Extensive hydrothermal alteration occurred to Anjiayingzi Gold Deposit during mineralization. The sequence of alteration types from early to late is albitization, sericitization, silicification, pyrite sericitization, chloritization. Through the analysis of major and micro elements in various altered rock samples and their original rocks, this paper studied the characteristics of element migration during hydrothermal alteration in detail. The results show that ①the main elements SiO₂, CaO, MgO, Fe₂O₃ and TiO₂ show a gradual decreasing feature; ②the large ion lithophile elements K, Rb, Th in the micro elements show an increasing trend, while Sr shows a decreasing trend, and Bi shows an obvious increasing feature in all alterations; ③the abundance of rare earth shows an increasing trend; ④the ore-forming elements Bi, Cu and Zn have high contents in the pyrite sericitization and silicification stages. Combining with the petrographic characteristics, it is further revealed that the unloading of ore-forming elements starts from the stage of pyritization, and is concentrated in the silicification stage, providing a basis for the positioning and delineation of ore bodies.

Keywords: hydrothermal alteration; element migration; Anjiayingzi Gold Deposit; Harqin Banner; major element; micro element