

矿物-熔体间元素分配系数资料及 主要变化规律*

千 国 鏢

(地质矿产部宜昌地质矿产研究所, 宜昌 443003)**

主题词 矿物-熔体 元素分配系数 资料 变化规律

提 要 本文提供了不同成分的8大类主岩(偏铝质(超)基性岩、过碱性(超)基性岩、偏铝质中性岩、过碱性中性岩、偏铝质酸性岩、过碱性酸性岩、过铝质酸性岩、超酸性岩)中28个矿物(橄榄石、单斜辉石、斜方辉石、角闪石、黑云母、金云母、斜长石、钾长石、石英、磁铁矿、钛铁矿、石榴石、锆石、磷灰石、绿帘石、黄玉、榍石、堇青石、蓝方石、石榴石、霞石、白磷钙矿、镁铁钛矿、板钛矿、黄长石、钙钛矿、尖晶石、金红石)的69个化学元素(Li、Rb、Cs、K、Na、Ca、Sr、Ba、Mn、Fe、Mg、Cu、Pb、Zn、Co、Ni、Be、La、Ce、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y、Sc、Cr、In、Ga、Al、B、Cd、Sb、Bi、U、Th、Zr、Hf、Si、Ti、Ge、Sn、Mo、Nb、Ta、W、V、P、F、Cl、S、N、O、C、As、Pu、Re、Os、He、Ne、Ar、Xe、Kr)和1个化学一价原子团OH的分配系数。综合分析对比表明,矿物、熔体的成分和结构是分配系数的最重要的控制因素。对前人未讨论过的矿物结构和熔体铝过饱和度这两个因素应引起重视。最后,本文分析了矿物-熔体间元素分配系数的研究现状、存在问题,指出了这一领域今后的研究方向。

1 引 言

矿物-熔体间的元素分配系数对研究岩浆起源和演化以及有关的成矿作用有极其重要的意义,目前已被广泛用于与玄武质、安山质、花岗质岩石成因有关的深部岩石熔融和岩浆结晶分异以及成矿过程等方面的研究。近三、四十年来,国内外广大地质学者很重视这方面的研究,发表了大量有关矿物-熔体间元素分配系数及其地质应用的论文和专著。

由于影响元素分配系数的因素很多,其中又以矿物、熔体的成分和结构影响最大^[1],因此,要避免得出错误结论或片面结论,在模拟岩石成因过程时,必须采用多个元素的、适合于所研究的矿物和主岩成分的分配系数。然而,现有的大量分配系数资料分散于国内外(主要是国外)的大量文献中,而且单篇文献中的分配系数资料所涉及的矿物、岩石成分范围和元素种类有限,同时也缺乏与其它研究资料的充分对比。此外,即使是国外一些学者前些年综合整理出的分配系数资料^[2-4]所涉及的元素种类(≤ 30)和矿物种类(< 15)也很有限,尤其是其主岩成分划分过于笼统,一般仅分为两大类,即玄武质+安山质岩石和英安质+流

* 中国地质科学院青年地质科技基金资助项目

** 现在地址: Department of Geological and Atmospheric Sciences, Iowa State University, Ames, IA 50011, U.S.A

本文于1991年12月5日收到,1993年1月15日改回。

纹质岩石(大多数学者常常采用、往往也是仅仅采用稀土元素分配系数 K_{REE} 来模拟岩石成因过程。实际上,许多主要造岩矿物和副矿物的 K_{REE} 值在玄武质、安山质、英安质和流纹质岩石中明显不同:在基性岩中 $K_{\text{REE}} < 1$, $K_{\text{LREE}} < K_{\text{HREE}}$;在中性岩中 $K_{\text{REE}} \leq 1$, $K_{\text{LREE}} \leq K_{\text{HREE}}$;但在酸性岩中 $K_{\text{REE}} > 1$, $K_{\text{LREE}} > K_{\text{HREE}}$ *。进一步说,酸度相同、但碱度、铝过饱和度不同的主岩中同一矿物的 K_{REE} 特征也明显不同),显然这不能满足研究工作的需要,也很可能会导致许多研究者采用不适当的分配系数资料而得出错误结论。总之,这种分配系数资料分散、不系统、难以参照使用的状况使研究者立即找到所需的元素分配系数,给研究工作带来很多困难。

为改变这一状况,笔者近几年来较系统地查阅、收集了国内外几百篇文献中发表的2万多个分配系数数据,并按矿物、主岩成分进行分类统计,以试图建立起一套比较完整、实用的矿物-熔体间元素分配系数资料。

2 元素分配系数资料

2.1 统计方法

首先,对所有的分配系数资料按主岩、矿物的成分进行分类统计,然后,根据笔者初步总结出的分配系数变化规律对它们进行评估,并计算其算术平均值。一般而言,对于一定成分的主岩和矿物,元素的分配系数仍有其特定的数值范围,而且用不同方法(如:斑晶/基质法和实验方法)测得的分配系数值和不同研究者所测得的分配系数值比较接近。对于同一类主岩、同一种矿物、同一种元素而言,通过不同研究者研究资料的充分对比,剔除个别异常值(特高值或特低值)。

应当指出的是,由于稀土元素在元素性质和分配系数大小方面均表现出一定的系统性变化,而不同研究者所提供的 K_{REE} 资料所涉及的稀土元素有多有少,为尽量客观地反映出 K_{REE} 的变化规律,笔者内插了极少数空缺的 K_{REE} 值。对于极少数很零散(只涉及1—2个或3—4个稀土元素)的 K_{REE} 值舍去不用(除非对该类主岩中该种矿物而言它们是唯一的资料)。由于 K_{Y} 与其它 K_{REE} 值一起表现出系统变化,而许多文献中缺 K_{Y} 值,因此与其它 K_{REE} 值相比,有时 K_{Y} 平均值稍偏低或偏高(见表2、3、4、7)。

2.2 主岩成分分类

根据文献中的火成岩成分或实验所采用的熔体成分,将主岩分为8大类:Ⅰ—偏铝质(超)基性岩(拉斑玄武岩、科马提岩、苦橄岩等);Ⅱ—过碱性(超)基性岩(碱性玄武岩、碱玄岩、白榴岩、霞石岩等);Ⅲ—偏铝质中性岩(安山岩);Ⅳ—过碱性中性岩(响岩、粗面岩等);Ⅴ—偏铝质酸性岩(流纹岩、高硅流纹岩、英安岩);Ⅵ—过碱性酸性岩(碱性流纹岩、碱流岩等);Ⅶ—过铝质酸性岩(翁岗岩、黄玉流纹岩、锂氟花岗岩等);Ⅷ—超酸性岩(白岗岩)。

2.3 元素分配系数资料

表1—表17列出了上述8大类主岩中28个矿物(橄榄石、单斜辉石、斜方辉石、角闪石、

* LREE、MREE、HREE 分别代表轻、中、重稀土元素(后同)。

续表

MI		概 概 石											
HR		I			II			IV			VI		
EL		RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE
Sc		0.04-0.42	17	0.25	0.15-0.37	27	0.19	0.92-1.74	5	1.30	4.80-9.31	3	6.40
Cr		0.26-2.10	54	0.76	0.35-3.00	4	1.74	4.00-19.0	5	7.78	19.5	1	19.5
In		0.06-0.60	2	0.33									
Ga		0.24-0.31	3	0.28	0.012-0.31	16	0.06						
Al		0.003-0.05	63	0.011	0.002-0.11	27	0.017						
B					0.50-1.10	3	0.87				0.002	3	0.00
											0.22	1	0.22
U		0.024-0.027	2	0.026	0.03-0.04	24	0.034	0.01-0.14	4	0.08	0.12-0.69	3	0.33
Th		0.02-0.03	2	0.025	0.02-0.03	24	0.024	0.01-0.12	4	0.07	0.28-3.20	3	1.30
Zr		0.001-0.28	6	0.112	0.06-0.07	24	0.068	0.01-0.07	5	0.04			
Hf		0.02	1	0.02	0.02-0.04	24	0.031	0.01-0.09	4	0.07	0.12-1.78	3	0.72
Sj		0.70-0.94	91	0.79	0.78-0.98	39	0.85	0.86-0.98	4	0.94	0.15-0.25	3	0.19
Ti		0.007-0.08	8	0.04	0.002-0.07	13	0.022	0.03	1	0.03	0.15-0.25	3	0.19
Gc		0.62-0.74	24	0.68	0.57-1.38	7	0.80	1.06	1	1.06	1.83-2.29	2	2.06
Sn					0.32-1.04	4	0.57	0.12	1	0.12			
Mo								0.06	1	0.06	0.10-1.41	3	0.91
Nb		0.01-0.04	2	0.025				0.01	3	0.01			
Ta		0.02	1	0.02	0.02-0.03	24	0.023	0.01-0.14	3	0.09			
V		0.03-0.22	3	0.10	0.04-0.06	2	0.05						
P		0.22	1	0.22									
F		0.07-0.19	2	0.13									
Cl		1.04	1	1.04									
S		0.04-0.11	2	0.075	0.30-0.78	4	0.60						
N		3.07	1	3.07									
O		0.94	1	0.94									
C		2.36	1	2.36									
As		1.21	1	1.21									
OH		1.06-1.56	2	1.31									
Hc		0.07	1	0.07									
Nc		0.006-0.08	2	0.043									
Ar		0.050-0.18	7	0.13									
Kr		0.15	1	0.15									
Xc		0.30	1	0.30									

注: 1. MI-矿物; HR-主岩 (详见正文); EL-元素; RAN-范围; N-数据个数; AVE-平均值 (后同)。

2. K_{Fe} 表示 Fe^{+2} 或 $TiFe$ 的分配系数 (后同)。

表 2 单斜辉石的元素分配系数
Table 2 Element partition coefficients of clinopyroxene

MI	斜 辉 石																
	单			斜			辉			石							
	I		II		III		IV		V		VI						
HR	RAN	AVE	RAN	AVE	RAN	AVE	RAN	AVE	RAN	AVE	RAN	AVE					
EL																	
Lj	0.10	1	0.10			0.21-5.50	7	2.55	0.78-1.80	2	1.29	1	1.39	0.16-0.56	2	0.36	
Rb	0.001-0.1015	0.02	0.008-0.2848	0.04		0.01-0.06	5	0.03	0.01-0.05	10	0.03	0.00-0.01	4	0.00	1	0.09	
Cs	0.001-0.3310	0.04	0.002-0.3118	0.05		0.33	1	0.33	0.03-0.05	4	0.04			1.30	1	1.30	
K	0.001-0.2416	0.02	0.002-0.3128	0.04		0.00-0.50	13	0.17	0.01-0.08	2	0.05	0.00-0.01	4	0.00			
Na	0.07-0.80	11	0.06-1.15	44	0.27	0.06-0.14	12	0.10	0.07-0.14	3	0.11	0.10-0.25	6	0.15	0.11-0.17	4	0.14
Sr	0.05-0.68	29	0.07-0.79	40	0.20	0.05-0.51	13	0.17	0.15-0.26	5	0.22	0.43	1	0.43	3.40	1	3.40
Ba	0.001-0.6315	0.14	0.002-0.7437	0.15		0.02-0.15	11	0.08	0.01-0.32	6	0.08	0.67-2.30	3	1.16	0.22	1	0.22
Ca	1.56-2.37	12	0.20-3.60	46	1.86	2.17-6.01	14	3.01	4.72-7.00	3	5.58	9.50-39.4	6	20.0	69.0-94.1	4	80.5
Mn	1.40-2.33	7	0.47-2.00	31	1.10	0.50-1.89	9	1.15	2.92	1	2.92	7.90-47.0	6	26.8	21.6-34.5	4	27.9
Fe	0.57-1.46	9	0.33-1.85	44	0.84	0.20-3.82	17	1.35	4.52-6.76	3	5.77	7.36-14.5	6	11.2	15.1-18.3	4	17.3
Fe ³⁺			0.34-1.77	9	0.85				3.30	1	3.30				5.60-12.4	4	9.38
Mg	1.79-9.23	13	1.03-5.40	45	3.02	4.62-17.0	14	7.30	13.3	1	13.3	23.8-85.0	5	40.8			
Cu	0.05-0.08	3	0.07			0.06-2.50	7	1.69									
Pb	0.009-0.01	3	0.01			0.10-0.70	2	0.40	0.10-0.19	3	0.14						
Zn	0.24-1.05	4	0.19-0.96	7	0.52	0.53-4.28	4	1.89	2.18-2.78	2	2.48	7.50-19.0	2	13.3	7.20-20.7	4	12.9
Co	0.76-1.50	5	0.44-1.55	52	1.02	1.00-8.00	20	2.01	1.15-47.0	15	11.9	56.0-88.0	2	72.0	6.10-17.0	6	11.4
Ni	1.95-10.0	6	0.53-7.40	20	2.23	2.30-65.0	18	11.1	4.10	1	4.10	28.3	1	28.3			
Bc			0.20	1	0.20	0.14-0.56	5	0.34	0.15-0.31	3	6.21	0.78	1	0.78	0.62	1	0.62

续表

MI	斜 辉 石																	
	单 斜			斜 辉			辉 石			石								
	I		II		III		IV		V		VI							
EL	RAN	AVE	RAN	AVE	RAN	AVE	RAN	AVE	RAN	AVE	RAN	AVE						
La	0.02—0.70	15	0.24	0.02—0.70	34	0.18	0.15—0.85	3	0.41	0.07—0.85	16	0.35	0.76—13.1	5	5.65	0.49—24.0	6	9.04
Cc	0.04—0.72	17	0.27	0.03—0.85	37	0.21	0.19—2.00	6	0.68	0.10—1.29	16	0.62	1.21—10.3	6	5.55	0.80—21.6	6	8.61
Nd	0.07—0.95	17	0.36	0.07—0.90	36	0.35	0.65—2.17	6	1.07	0.18—2.34	16	1.41	2.30—11.1	6	6.83	1.50—17.0	6	8.10
Sm	0.09—0.86	17	0.48	0.12—1.20	37	0.53	0.70—1.81	5	1.22	0.20—6.18	16	2.54	3.60—11.8	6	7.77	1.61—14.1	6	7.14
Eu	0.09—0.72	17	0.42	0.14—1.20	37	0.52	0.60—2.00	5	1.13	0.26—13.9	16	3.35	3.20—9.40	6	5.28	1.60—12.0	6	6.11
Gd	0.10—0.88	17	0.51	0.20—1.15	37	0.59	1.35—1.41	2	1.38	0.28—10.0	13	3.35	9.29	1	9.20			
Tb	0.10—0.98	17	0.54	0.21—1.10	35	0.61				0.30—8.63	16	2.95	4.61—12.9	6	8.35	1.18—6.90	6	4.10
Dy	0.11—0.98	17	0.54	0.25—1.18	37	0.65	1.22—2.63	3	1.77	0.31—7.50	13	2.82	4.50—12.3	6	7.78			
Ho										0.25—5.00	13	2.48						
Er				0.20—1.17	37	0.66	1.07—2.25	3	1.55	0.23—3.50	13	1.52	5.60	1	5.60			
Yb	0.09—1.23	17	0.53	0.15—1.05	37	0.62	0.79—3.18	6	1.60	0.23—2.63	16	1.27	3.51—11.6	6	5.53	1.27—6.40	6	3.99
Lu	0.07—2.50	16	0.66	0.12—1.12	35	0.60	0.80—1.81	4	1.25	0.23—2.70	16	0.85	3.32—10.7	5	5.28	1.75—8.10	6	5.33
Y	0.50—1.30	4	0.90	0.36—0.53	2	0.45	0.65—4.76	8	1.42	0.66—1.12	3	0.86	4.00	1	4.00			
Eu/Eu*			0.85			0.93			0.87			1.14			0.62			
Cc/Cc ^o			0.90			0.79			0.92			0.70			0.89			
La/Yb			0.45			0.29			0.26			0.28			1.02			
Cc/Yb			0.51			0.34			0.13			0.49			1.00			

续表

MI	单 斜 辉 石																	
	I			II			III			IV			V			VI		
	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE
HR																		
EL																		
Sc	1.74—5.50	4	3.98	0.60—4.90	52	2.82	4.16—17.0	6	8.05	6.41—334	15	65.9	44.0—96.0	5	67.6	60.0—172	5	107
Cr	3.30—83.0	7	32.0	0.67—11.0	21	5.11	2.10—706	12	120	1.90—30.5	6	6.98	15.7	1	15.7			
In	1.70	1	1.70															
Ga	0.24	1	0.24	0.14—0.71	21	0.38	0.29—0.65	4	0.41									
Al	0.11—0.99	15	0.49	0.06—0.83	61	0.36	0.12—0.36	12	0.22	0.28	1	0.28	0.05—0.10	6	0.08	0.02	4	0.02
B				0.40	1	0.40	0.02—0.13	6	0.10	0.22—0.36	2	0.29	1.41—2.30	2	1.86	0.24—0.26	2	0.25
U	0.002—0.04	6	0.01	0.004—0.08	39	0.06	0.03—0.08	3	0.07	0.02—0.09	6	0.07	0.07—0.41	2	0.24	0.12—1.00	4	0.56
Th	0.002—0.05	6	0.03	0.003—0.15	45	0.06	0.01—0.05	3	0.03	0.01—0.14	10	0.08	0.09—6.60	5	2.47	0.00—3.40	6	1.25
Zr	0.06—0.66	49	0.18	0.05—0.65	46	0.30	0.12—0.41	10	0.26	0.24—1.02	9	0.68	0.60	1	0.60	0.23—0.71	3	0.45
Hf	0.07—0.93	13	0.38	0.03—2.30	53	0.52	0.28—0.35	2	0.32	0.19—1.54	17	0.78	0.37—0.97	3	0.63	0.30—1.50	6	0.85
Si	0.83—1.40	13	1.01	0.91—1.40	45	1.03	0.81—0.96	20	0.86	0.81	1	0.81	0.68—0.74	6	0.71	0.62—0.64	4	0.63
Ti	0.28—0.95	10	0.58	0.15—1.98	38	0.67	0.29—2.00	17	0.87	2.77	1	2.77	0.62—1.00	6	0.75	1.92—2.15	4	2.03
Gc				1.44—1.46	4	1.45	1.15	1	1.15				2.51—2.84	2	2.68			
Sn				0.53	1	0.53	0.64—3.06	5	1.46	0.13—5.73	4	1.92	0.52	1	0.52	0.49	1	0.49
Mo										0.12	1	0.12						
Nb	0.005—0.15	12	0.04	0.01—0.04	5	0.02	0.10—0.30	2	0.20	0.03	2	0.03	0.80	1	0.80	0.03	1	0.03
Ta	0.01—0.70	4	0.18	0.02—0.23	40	0.10	0.04—0.08	2	0.06	0.00—0.50	13	0.29	0.09—0.77	5	0.45	0.01—0.10	3	0.04

续表

MI	单 斜 辉 石																		
	I			II			III			IV			V			VI			
	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	
HR																			
EL																			
V	1.08—1.60	3	1.26	0.70—0.85	3	0.79	0.77—18.0	9	6.39										
P	0.023—0.03	2	0.03	0.11	1	0.11	0.13—0.26	2	0.20										
W							0.91—1.25	2	1.08	1.25—1.67	3	1.38							
F				0.38	1	0.38	0.23—1.75	9	0.71	0.75	1	0.75	1.85	1	1.85	0.08—0.87	2	0.48	
Cl							0.20—0.32	2	0.26										
N							0.83	1	0.83										
O							0.96	2	0.96										
C							2.50—4.10	2	3.30										
As							0.04—0.05	2	0.05										
Pu	0.05—0.17	3	0.10																
Rc	0.04	1	0.04																
Os	0.08	1	0.08																
Nc	0.30—0.60	3	0.47																
Ar	0.50—0.70	3	0.60																
Kr	0.14—0.50	3	0.28																
Xc	0.20	1	0.20																

注: K⁺平均值在主岩 I 中稍偏高, 在主岩 II、IV、V 中稍偏低。

表 3 斜方辉石的元素分配系数

Table 3 Element partition coefficients of orthopyroxene

MI	斜 方 辉 石											
	I			II			III			V		
HR												
EL	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE
Lj							0.16—1.50	8	0.44			
Rb	0.00—0.42	2	0.21	0.06	1	0.06	0.001—0.12	6	0.03			
Cs							0.30—0.75	2	0.53	0.44—0.77	2	0.61
K	0.001	1	0.00				0.000—0.11	50	0.02			
Na	0.075	1	0.08	0.04	1	0.04	0.002—0.05	46	0.02	0.01—0.03	4	0.02
Sr	0.01—0.08	3	0.04	0.003	1	0.00	0.005—0.19	13	0.04			
Ba	0.00—0.01	2	0.01				0.003—0.13	9	0.04	0.01—0.30	4	0.09
Ca	0.03—0.40	18	0.14	0.18	1	0.18	0.04—1.04	55	0.20	0.66—2.11	7	1.11
Mn	0.41—2.10	4	1.11	1.23	1	1.23	1.17—33.6	10	7.74	37.0—53.5	4	45.4
Fe	0.46—1.80	19	0.85	1.18	1	1.18	0.45—9.20	53	1.33	17.7—28.2	7	23.3
Mg	1.76—7.00	20	2.85	4.25	1	4.25	2.35—50.6	55	7.05	3.36—162	7	84.6
Cu							0.03—4.00	6	0.82			
Pb							0.86	1	0.86			
Zn							0.35—18.5	7	8.24			
Co	2.00—4.00	3	2.67	1.30—2.10	5	1.70	0.95—59.0	9	10.5	84.0—196	2	140
Ni	4.00—7.40	3	5.47	2.40	1	2.40	1.80—11.7	6	5.20			
Bc							0.28—0.47	2	0.38			
La				0.001—0.012	5	0.007				0.72—18.0	4	7.64
Ce	0.003	1	0.00	0.003—0.010	3	0.008	0.02—0.54	8	0.16	0.87—15.6	4	6.62
Nd	0.03	1	0.03	0.009—0.017	2	0.011	0.03—1.02	8	0.26	1.20—14.0	4	6.08
Sm	0.01	1	0.01	0.012—0.026	6	0.019	0.05—1.06	8	0.30	1.51—9.30	4	4.75
Eu	0.02	1	0.02	0.017—0.026	6	0.022	0.06—0.27	8	0.15	0.81—3.30	4	1.84
Tb	0.05	1	0.05	0.041—0.075	3	0.050				1.80—6.30	4	3.69
Dy	0.12	1	0.12				0.12—0.55	7	0.36	1.80—4.40	4	2.83
Er	0.16	1	0.16				0.16—0.73	7	0.52			
Yb	0.11	1	0.11	0.089—0.200	6	0.140	0.24—0.99	7	0.72	2.01—2.60	4	2.28
Lu	0.11	1	0.11	0.110—0.250	6	0.180	0.65—1.14	7	0.85	2.10—3.30	4	2.48
Y	0.18—0.20	2	0.19				0.30—0.80	4	0.49	0.90—1.00	4	0.93
Ce/Cc*						0.69						0.97
La/Yb						0.05						3.35
Ce/Yb			0.00			0.06			0.22			2.90
Sc	0.21—1.65	11	0.62	0.80—1.60	5	1.10	0.36—7.51	8	2.77	14.0—28.1	7	20.3
Cr	10.0	1	10.0	2.80—8.80	4	5.90	1.09—530	52	30.8	0.62—0.71	2	0.67
In	0.45	1	0.45									
Ga	0.70	1	0.70				0.50—0.70	5	0.59	0.81—1.00	3	0.86
Al	0.02—0.43	19	0.17	0.48	1	0.48	0.02—0.17	50	0.09	0.03—0.06	4	0.05
B							0.04—0.15	4	0.09			
U							0.09	1	0.09	0.12—0.30	4	0.22
Th				0.05—0.21	2	0.13	0.13—0.18	3	0.15	0.11—7.80	4	3.34
Zr	0.03—0.18	2	0.10				0.08	1	0.08	0.20	1	0.20
Hf				0.027—0.06	6	0.04	0.04—0.20	2	0.12	0.18—0.22	2	0.20
Si	1.04—1.15	18	1.08	1.09	1	1.09	0.84—1.04	66	0.95	0.63—0.73	4	0.70
Ti	0.10—0.36	3	0.23	0.17	1	0.17	0.01—0.50	36	0.13	0.34—0.87	5	0.53
Ce										1.95	1	1.95
Sn							0.50—0.60	2	0.55			
Mo							0.55	1	0.55			
Nb	0.15	1	0.15				0.35—1.11	2	0.73	0.80	1	0.8
Ta							0.20—0.70	3	0.50	0.13—1.29	4	0.65
V	0.60	1	0.60				0.09—29.2	9	4.74	4.40—10.1	3	6.51
W							1.11	1	1.11			
P							0.07—0.38	3	0.16			
F							0.18—4.25	10	0.76			
Cl							0.07—0.26	4	0.13			
O							0.96	4	0.96			
N							0.05—0.60	3	0.27			
As							0.02—0.15	4	0.06			

注：主岩V中Kr平均值稍偏低。

表 4 角闪石的元素分配系数
Table 4 Element partition coefficients of amphibole

MI	角 闪 石																	
	I		II		III		IV		V		VI		VII					
HR	RAN	N AVE	RAN	N AVE	RAN	N AVE	RAN	N AVE	RAN	N AVE	RAN	N AVE	RAN	N AVE				
EL																		
Lj	0.22—0.30	2	0.26		0.18—2.20	3	0.87	0.79	1	0.79	1	1.50	1	1.50	1	1.20	1	1.20
Rb	0.33—0.43	3	0.39	0.03—0.41	15	0.13	0.01—0.16	4	0.06	0.14	1	0.14	1	0.10	1	0.04—0.09	2	0.06
Cs	0.05—0.20	2	0.13	0.50	1	0.50	1.00	1	1.00		1	0.33	1	0.33	1	1.00	1	1.00
K	0.17—1.40	20	0.48	0.18—1.12	12	0.59	0.07—0.33	4	0.19		2	0.14	2	0.14	2	0.10—0.28	2	0.19
Na	0.55—0.82	18	0.67	0.46—0.92	12	0.60	0.08—0.41	3	0.16		2	0.50	2	0.50	1	0.69	1	0.69
Sr	0.48—0.64	3	0.56	0.30—0.79	9	0.60	0.02—0.26	4	0.14	0.87—9.77	6	4.13	4	0.38	1	0.79	1	0.79
Ba	0.42—0.73	2	0.58	0.45—6.40	11	1.20	0.04—0.10	4	0.07	0.23—3.54	6	1.64	5	0.27	1	0.01	1	0.01
Ca	1.10—3.00	2	2.05	1.04—3.43	6	1.66	1.80—6.31	4	4.18	9.40—23.7	5	13.2	5	13.2	1	8.25	1	8.25
Mn				0.57—1.05	5	0.64	11.0—11.9	2	11.5	12.5	1	12.5	1	12.5	1	4.44	1	4.44
Fe				0.83—4.77	7	2.04	6.85	1	6.85	11.4—16.4	5	14.0	5	14.0	1	10.8	1	10.8
Mg				1.18—10.5	6	3.20	8.79—24.2	2	16.5	56.3—237	5	116	5	116	1	37.8	1	37.8
Cu	0.05	1	0.05															
Pb							0.45	1	0.45									
Zn	0.40	1	0.40	0.68	1	0.68	5.56—7.00	2	6.28	1.22—3.59	6	2.52						
Co	2.00	1	2.00	1.10—16.0	19	2.37	7.50—45.0	2	26.3	13.5—46.6	11	19.5	1	31.2	1	17.0—19.0	3	18.0
Ni	6.80	1	6.80	0.87—2.20	2	1.54	7.20	1	7.20									
Bc							0.98—1.93	2	1.46	0.35	1	0.35						
La	0.25	1	0.25	0.06—0.60	11	0.18	0.85	1	0.85	0.67—1.44	6	0.89						
Cc	0.32	1	0.32	0.10—0.49	13	0.28	0.09—1.77	5	1.02	1.05—2.06	6	1.57	1	6.40	1	0.05—2.80	5	1.07

续表

MI	角 闪 石														
	I		II		III		IV		V		VI		VII		
HR	RAN	N AVE	RAN	N AVE	RAN	N AVE	RAN	N AVE	RAN	N AVE	RAN	N AVE	N AVE		
EL	RAN	N	RAN	N	RAN	N	RAN	N	RAN	N	RAN	N	N		
Al			0.75—0.97	6	0.90						0.36	1	0.85	1	0.19
Sb									4.15	1	4.15	3	0.00—0.04	3	0.03
B			0.11—0.17	2	0.14	0.31	1	0.31	0.10—1.20	6	0.89	1	0.19	1	0.19
U	0.10	1	0.06—0.15	11	0.08	0.40	1	0.40					0.02	1	0.02
Th	0.50	1	0.02—0.11	21	0.04	0.22	1	0.22	0.02—0.07	9	0.06		0.00—0.04	3	0.02
Zr	0.50	1	0.37—1.20	11	0.47	0.31—1.40	2	0.85	0.37—1.77	11	0.67	1	0.05—0.10	4	0.08
Hf	0.50	1	0.22—0.91	20	0.50	6.00	1	6.00	0.54—1.19	11	0.85		0.04—0.08	3	0.05
Si			0.66—0.91	6	0.84				0.62	1	0.62	1	0.56	1	0.62
Ti	1.50	1	1.99—4.98	6	2.87	3.00	1	3.00	7.00—7.22	2	7.11	2	10.4	1	10.4
Gc									1.44	1	1.44	1			
Sn			5.18	1	5.18	4.29	1	4.29					0.57	1	0.57
Nb	0.80	1	1.30	1	1.30	1.30	1	1.30	4.00	1	4.00	1	0.79	1	0.79
Ta			0.19—0.62	19	0.36	0.30	1	0.30	1.25	1	1.25	1	0.26—0.33	3	0.30
V	3.40	1	18.0	1	18.0	18.0	1	18.0	34.0—92.0	4	61.1	4			
W			2.91—3.45	2	3.18	1.20	1	1.20							
P													0.63	1	0.63
F			0.40	1	0.40	11.8	1	11.8					0.27	1	0.27

注：主岩 III 中 Kr 平均值偏低。

表 5 黑云母的元素分配系数
Table 5 Element partition coefficients of biotite

MI	黑 云 母																		
	I			III			IV			V			VI			VII			
HR	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	
EL																			
Li				0.39-14.5	9	4.47	1.20-175	9	28.0	2.52-71.4	4	21.3	3.00-9.70	7	6.15	0.76-33.7	10	10.4	
Rb	3.20	1	3.20	0.72-3.50	11	1.65	0.72-3.84	15	1.76	1.10-20.8	11	4.48	1.25-2.22	5	1.85	1.33-6.60	11	3.44	
Cs				0.36-2.40	10	1.49	1.00-3.25	8	1.48	1.12-15.1	9	5.20	0.67-6.25	6	3.15	1.76-13.4	8	7.29	
K	3.40-3.88	3	3.64	1.01-5.63	9	2.42	0.63-2.08	15	1.31	1.38-2.10	11	1.78	0.98-1.79	5	1.54	1.49-4.55	12	2.69	
Na	0.12-0.23	3	0.19	0.10	1	0.10	0.12-0.20	3	0.17	0.12-0.18	6	0.16				0.31	1	0.31	
Sr	0.21	1	0.21	0.12-0.83	10	0.38	0.08-1.13	15	0.48	0.29-0.78	5	0.59	0.10-0.64	3	0.39	0.02-2.23	14	0.82	
Ba	1.70-11.0	4	5.90	1.53-18.0	12	8.75	1.09-27.8	15	7.05	3.70-36.0	8	12.1	10.3-11.3	2	10.8	0.53-18.6	14	3.39	
Ca	0.004-0.02	2	0.01	0.62	1	0.62	0.05-0.10	3	0.07	0.02-0.21	6	0.11				0.07	1	0.07	
Mn	0.24-0.94	3	0.49	6.00	1	6.00	3.43	1	3.43	7.90-205	6	67.7				3.33	1	3.33	
Fe	1.13-1.65	3	1.33				7.28-8.88	3	7.81	7.00-33.7	6	18.8				10.8	1	10.8	
Fe ³⁺	0.46	1	0.46	4.21	1	4.21										46.5	1	46.5	
Mg	1.58-2.18	3	1.97	22.0	1	22.0	7.64-35.0	3	25.9	45.6-920	6201								
Cu				1.47-10.0	10	4.78													
Pb				0.11-3.01	10	0.86	0.03-1.88	10	0.49	0.10-1.60	7	0.65	0.15-0.42	3	0.30	0.23-3.39	24	1.27	
Zn				3.06-10.0	10	5.47	2.08-31.5	10	9.45	9.41-230	9	50.1	10.0-30.6	3	17.0	1.91-98.0	25	20.9	
Co	0.17-2.60	4	1.50				19.0-23.0	3	21.7	79.0-101	3	88.7				10.8-43.0	4	26.2	
Ni	1.10	1	1.10	1.30-19.0	3	7.20	1.30-19.0	3	7.20							4.22	1	4.22	
Bc				0.18-0.56	9	0.33				1.54	1	1.54	0.19-0.66	6	0.37	0.22-8.06	11	1.88	

续表

MI	黑 云 母																	
	I			II			IV			V			VI			VII		
HR	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVF	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE
EL	0.92—1.38	3	1.12	0.50	1	0.50	0.79—0.92	3	0.88	0.93—1.02	6	0.98	0.05—0.25	5	0.19	1.10—6.80	15	2.38
A1							0.13	2	0.13	0.13—1.20	6	0.44						
Bi				0.50	1	0.50	0.12—0.13	3	0.12	0.27—2.00	6	1.11				1.00—2.60	3	1.78
B				0.05—0.18	6	0.11	2.50	2	2.50	0.79—1.81	6	1.20						
U				0.27—2.10	2	1.19	0.37—1.80	3	1.32	0.44—0.84	6	0.65				1.07—1.90	3	1.37
Th	0.02—0.05	3	0.04	0.03	1	0.03	0.52—0.59	3	0.54	0.46—0.52	6	0.49				0.51	1	0.51
Zr				1.17	1	1.17	11.7—13.1	3	12.4	15.2—66.7	6	35.5				17.8	1	17.8
Hf	0.07—0.11	3	0.10	0.27—2.10	2	1.19	0.52—11.4	10	2.59	1.92—3.85	6	2.59						
Si	0.76—0.88	3	0.81	1.54	1	1.54	0.52—11.4	10	2.59	0.46—4.81	6	3.19				1.10—39.4	18	9.90
Ti	1.94—3.73	3	2.99	1.94	1	1.94	0.56—0.63	3	0.58	1.71—5.70	3	3.71						
Ge	1.51—1.64	2	1.58	1.54	1	1.54	0.55—7.86	11	1.95	4.01—9.50	3	6.37						
Sn				0.90—6.15	8	2.24	0.56—0.63	3	0.58	1.20—1.91	6	1.48						
Mo				1.94	1	1.94	0.55—7.86	11	1.95	0.82—10.4	6	3.97						
Nb				5.25	1	5.25	8.30—41.3	9	18.8	2.40—5.00	2	3.70						
Ta	0.24—0.52	3	0.33	2.86	1	2.86	8.30—41.3	9	18.8	2.40—5.00	2	3.70						
W				0.54—17.5	8	3.35	8.30—41.3	9	18.8	2.40—5.00	2	3.70						
V				133	1	133	8.30—41.3	9	18.8	2.40—5.00	2	3.70						
F				9.78—18.6	3	13.2	8.30—41.3	9	18.8	2.40—5.00	2	3.70						
Cl				9.78—18.6	3	13.2	8.30—41.3	9	18.8	2.40—5.00	2	3.70						

注：主岩Ⅷ中云母为锂白云母或黑鳞云母。

续表

MI	照 云 母						石 榴									
	I, II		III		IV		II		III		IV		V			
HR	RAN	N	AVE	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE		
EL																
Er	0.034	1	0.034	1	0.171											
Tm																
Yb	0.042	1	0.042	1	0.165	0.042—0.047	2	0.045	1	10.0	37.4	1	37.4	13.8—48.1	7	32.6
Lu	0.046	1	0.046	1	0.208	0.140	1	0.140	1	10.0	26.9	1	26.9	13.5—49.9	7	28.6
Y	0.030	1	0.030	1										9.8—49.9	7	17.8
Eu/Eu*			0.98		1.06					1.05				22.7—30.7	3	27.3
Cc/Cc*					1.08											0.89
La/Yb					1.08											0.81
Cc/Yb			0.81		1.42						1.62					1.42
Sc						32.3—26.8	2	25.0						2.20—8.15	5	4.42
Cr						28.3—43.4	2	35.9						3.91—9.90	3	6.66
Al	1.36—1.48	6	1.43								0.13—0.22	8	0.18	0.05—0.17	5	0.14
U						0.20	1	0.20						0.58—2.10	5	1.54
Th						0.08	1	0.08						1.74—8.30	5	5.22
Zr	0.60	1	0.60											2.51—6.30	6	4.33
Hf						0.05—0.10	2	0.07						4.87—19.8	5	10.3
Sj	0.62—0.78	6	0.73								0.50—0.53	8	0.54	0.48—0.53	5	0.50
Ti	0.90—1.85	7	1.15								11.2—20.2	8	14.1	16.2—81.5	5	32.2
Nb	1.00	1	1.00								3.51—7.60	8	5.36	5.41—21.6	5	9.36
Ta						0.26—0.34	2	0.30			10.6—19.6	8	15.0	14.0—113	9	60.5

续表

MI	斜 长 石																					
	I			II			III			IV			V			VI			VII			
HR	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	
Tm																						
Yb	0.01-0.29	10	0.07	0.01-0.13	5	0.04	0.02-0.30	33	0.07	0.01-0.13	4	0.07	0.06-0.13	6	0.09	0.17-0.71	9	0.58				
Lu	0.01-0.25	10	0.08	0.02-0.12	3	0.07	0.03-0.10	30	0.06	0.01-0.11	4	0.06	0.06-0.13	6	0.09	0.18-0.66	4	0.54				
Y	0.01-0.03	5	0.03				0.01-0.19	10	0.04				0.04-0.21	7	0.12	0.38-0.58	4	0.50				
Eu/Eu*			6.43			6.85			7.74			15.7			33.9							5.71
Ce/Ce*			1.12			0.96			0.94			0.79			0.93							0.91
La/Yb			2.43			3.50			4.14			3.71			4.22							1.02
Ce/Yb			2.00			2.75			3.14			2.14			3.00							0.83
Sc	0.01-0.14	8	0.05	0.01-0.04	22	0.03	0.06-0.17	2	0.12	0.01-0.13	12	0.05	0.02-0.07	6	0.06							
Cr	0.01-0.60	5	0.23	0.04-0.08	8	0.07	0.03-0.25	3	0.14	0.41-0.59	7	0.48										
In	0.03	1	0.03																			
Ga	0.58-1.70	8	1.03	0.69-1.27	21	0.93	0.88-1.00	3	0.97				0.95-2.30	7	1.31							
Al	1.25-2.64	34	1.74	1.50-2.91	37	1.87	1.39-2.04	25	1.73				1.61-1.94	9	1.86	1.79	1	1.79	1.62	1	1.62	1.62
Sb													1.30-1.50	2	1.40							
Bi							0.50	1	0.50													
B	0.82	1	0.82				0.04-0.16	8	0.09	0.19-0.75	2	0.47	0.04-2.30	16	0.83	0.14-0.18	3	0.16	0.26-6.20	26	1.40	1.40
U	0.01	2	0.01	0.01-0.06	20	0.05	0.01-0.07	4	0.03	0.04	5	0.04	0.05-0.13	6	0.09							
Th	0.01-0.08	3	0.04	0.00-0.05	21	0.04	0.03-0.23	2	0.13	0.00-0.05	7	0.04	0.04-0.08	6	0.07	0.002	1	0.00	0.18	1	0.18	0.18
Zr	0.01-0.04	2	0.03	0.01-0.13	22	0.08	0.03-0.50	2	0.26	0.00-0.16	6	0.13	0.04-0.36	7	0.12							
Hf	0.01-0.36	5	0.11	0.00-0.05	21	0.04	0.05-0.13	2	0.09	0.01-0.03	7	0.02	0.06-0.29	6	0.12	0.10	1	0.10	0.33	1	0.33	0.33

续表

MI	斜 长 石																											
	I			II			III			IV			V			VI			VII									
	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE							
Si	0.84—1.20	34	0.93	0.86—1.13	24	0.98	0.89—1.01	25	0.92						0.81—0.84	9	0.82					0.91	1	0.91	0.83	1	0.83	
Ti	0.00—0.06	12	0.03	0.04—0.16	12	0.07	0.05	1	0.05						0.05	1	0.05											
Ge				0.47—0.56	4	0.51	0.44—0.50	2	0.47						0.74—1.41	4	0.99											
Sn				0.01—0.32	8	0.08	0.32—0.92	9	0.57						0.51—0.53	2	0.52						0.67	1	0.67	0.08—0.34	28	0.24
Mo							0.89	1	0.89																			
Nb	0.01	1	0.01	0.005	1	0.01	0.03—1.00	2	0.51						0.06	1	0.06											
Ta	0.03—0.15	3	0.08	0.01—0.04	21	0.03	0.04—0.55	3	0.36						0.02—0.78	8	0.13											
V	0.01—0.10	2	0.05	0.02—0.04	2	0.03	0.07—0.10	2	0.14																			
W							0.54—1.81	7	1.16						0.71—1.58	5	0.94						1.20	1	1.20	0.13—1.80	28	0.63
P	0.02—0.66	2	0.34																									
F	0.03—0.20	2	0.12				0.10—4.00	8	1.34						0.21—0.89	2	0.55											
Cl	0.31	1	0.31												0.14	1	0.14											
S	0.03—0.05	2	0.04																									
N	0.62	1	0.62																									
O	1.01	1	1.01																									
C	0.45	1	0.45																									
As	0.29	1	0.29																									
OH	0.43—0.66	2	0.55																									
Hc				0.005—0.01	2																							
Ar	0.60	1	0.60																									

注：主岩 I、III 中 Kr 平均值偏低；主岩 VII 中斜长石为钠长石或钠质斜长石。

表 8 钾长石的元素分配系数
Table 8 Element partition coefficients of K-feldspar

MI	钾 长 石																		
	II			III			IV			V			VI			VII			
HR	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	
EL																			
Li	0.50-0.90	5	0.80	0.42	1	0.42	0.06-0.36	7	0.18	0.36-1.43	7	0.84	0.07-1.40	5	0.60	0.04-0.58	20	0.13	
Rb	0.37-1.76	7	0.84	0.66-1.02	3	0.83	0.11-3.22	25	0.66	0.26-2.40	32	0.76	0.13-3.74	36	0.69	0.44-7.19	22	2.53	
Cs				0.33	1	0.33	0.01-0.14	7	0.07	0.03-1.39	15	0.50	0.00-0.44	21	0.04	0.79-3.16	14	1.84	
K	1.15-3.09	12	1.59	1.32-2.03	4	1.69	0.84-2.86	14	1.24	0.94-4.64	31	1.87	0.58-3.06	24	1.56	1.36-9.72	22	4.52	
Na	1.44-2.70	7	1.88	1.01	2	1.01	0.47-0.99	3	0.82	0.53-1.80	12	1.23	0.90-2.70	22	1.53				
Sr	1.68-3.74	7	2.65	3.87-7.24	3	5.45	0.73-17.3	28	6.14	1.00-7.30	8	3.44	0.66-9.20	15	2.28	0.38-1.74	24	1.09	
Ba	0.53-4.27	6	1.59	4.49-15.9	3	8.84	1.37-18.1	29	5.49	1.01-24.0	13	7.87	0.80-44.0	51	7.84	0.53-3.03	24	1.81	
Ca	0.10-0.45	7	0.19	0.48-0.69	2	0.59	0.20-1.53	10	0.65	0.13-0.53	8	0.29	0.20-0.92	12	0.44				
Mn	0.01-0.11	3	0.07							0.02-0.04	3	0.03	0.01-0.03	4	0.02				
Fe	0.01-0.07	9	0.04							0.06-0.13	9	0.09	0.07-0.20	24	0.14				
Mg	0.02-0.12	3	0.08																
Cu				0.11-0.26	4	0.17													
Pb	0.58-0.76	4	0.67	0.51-2.13	10	1.19	0.08-1.37	13	0.56	0.48-4.10	16	1.42	0.42-2.02	9	0.88	0.44-4.68	37	1.19	
Zn	0.13	1	0.13	1.38-1.49	2	1.44	0.01-0.07	2	0.04	0.07-0.83	4	0.27	0.04-0.10	9	0.07	0.28-0.72	15	0.49	
Co	0.001	3	0.00				0.01-0.50	9	0.19	0.09-0.19	3	0.15	0.03-0.39	6	0.22				
Ni	0.07	1	0.07				0.50	2	0.50										
Bc	1.60-2.90	2	2.25	0.13	1	0.13	0.06-0.60	12	0.18	0.08-0.78	7	0.41	0.09-0.85	14	0.28	0.05-0.72	22	0.37	
La	0.02-0.22	4	0.080	0.11-0.16	2	0.13	0.004-0.24	12	0.082	0.07-0.20	7	0.11	0.02-0.15	14	0.10	0.42-0.69	3	0.57	
Ce	0.01-0.12	4	0.042	0.04-0.13	3	0.08	0.008-0.22	15	0.046	0.02-0.12	7	0.06	0.01-0.10	14	0.06	0.43	6	0.43	
Nd							0.007-0.22	10	0.042	0.03-0.11	7	0.05	0.01-0.09	12	0.04	0.48	6	0.48	
Sm	0.001-0.007	4	0.004	0.02-0.08	3	0.04	0.002-0.22	15	0.029	0.02-0.08	7	0.04	0.02-0.05	14	0.03	0.39	6	0.39	
Eu	0.04-0.38	4	0.21	1.13-6.56	3	3.92	0.440-2.35	15	1.131	3.04-6.50	7	4.01	0.60-9.56	14	5.92	0.61	6	0.61	
Gd										0.02-0.07	7	0.04							
Tb				0.01-0.11	3	0.06				0.01-0.06	7	0.04	0.01-0.04	14	0.02	0.26	6	0.26	

表 9 石英和锆石的元素分配系数

Table 9 Element partition coefficients of quartz and zircon

MI	英										石									
	III		V		VI		VII		II		III		IV		V					
HR	RAN	N AVE	RAN	N AVE	RAN	N AVE	RAN	N AVE	RAN	N AVE	RAN	N AVE	RAN	N AVE	RAN	N AVE				
EL																				
Li	0.22	1	0.22	4	0.68	0.20-0.39	3	0.30	0.02-1.25	3	0.61									
Rb	0.18	1	0.18	6	0.019										1.91-4.40	2				
Cs	0.25	1	0.25	6	0.039											3.16				
K				5	0.024	0.00-0.04	2	0.02												
Na				6	0.034	0.002	1	0.00							0.01	2				
Sr	0.38	1	0.38	3	0.33	0.43-0.89	2	0.66	0.10-0.50	2	0.30									
Ba				8	0.08	1.04-1.20	2	1.12	0.93-1.97	2	1.45	1	0.25							
Ca				4	0.039										0.01-0.03	2				
Mn				1	0.006	0.0001									1.26-1.78	2				
Fe				1	0.006	0.001										1.52				
Mg																				
Cu	0.06-0.62	3	0.28																	
Pb	0.05-0.11	2	0.08	6	0.22	0.07-0.23	2	0.15	0.03-0.14	3	0.07									
Zn	0.30-1.38	3	0.72	2	1.13	0.24			0.55-1.18	2	0.86									
Co																				
Bc	0.14	1	0.14	5	0.11	0.02-0.05	2	0.04	0.01-0.27	7	0.10	1	0.01			9.10-23.1				
La				4	0.015				0.38	1	0.38	1	0.08	1	1.39	7.20-26.6				
Cc				4	0.014									1	1.75	10.0-23.5				
Nd				4	0.016									1	1.14	4.60-22.0				
Sm				4	0.014									1	1.90	11.1-17.7				
Eu				4	0.056									1	1.25	12.0-20.0				
Gd														1	6.67					
Tb				4	0.017									1	14.0	36.9-37.1				
Dy				4	0.015									1	26.0	95.0-108				
Er														1	99.0					
Yb				4	0.017									1	163	490-564				
Lu				4	0.014				0.26	1	0.26	1	138	1	635	648				
Y									0.11	1	0.11	1	172	1	211	236				

表 10 磁铁矿的元素分配系数
Table 10 Element partition coefficients of magnetite

MI	磁 铁 矿																		
	I			II			III			IV			V			VI			VII
	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	
HR																			
EL																			
Li							5.83	1	5.83										
Rb			0.32-0.34	16	0.33		0.04	1	0.04	0.03-0.14	10	0.13							
K							0.03	1	0.03										
Na										0.01-0.04	2	0.02							
Sr							0.13-0.55	5	0.25	0.19-0.66	2	0.43	0.59	1	0.59				
Ba							0.03-0.86	5	0.38	0.05-0.36	2	0.21	0.38	1	0.38				
Ca							0.02-0.50	3	0.27				0.01-0.03	4	0.02	1	0.05		
Mn	1.40-4.44	2	2.92				0.87	1	0.87	11.5	1	11.5	15.2-23.3	6	19.1	1	20.5	1	17.8
Fe	5.04	1	5.04				6.46-12.7	2	9.28	14.0-21.0	2	17.5	28.7-127	6	66.3	1	47.6	1	66.9
Mg							0.10	1	1.01	0.89-1.50	2	1.20	0.34-29.0	6	6.43	1	0.75	1	2.70
Cu	0.15-0.42	2	0.29																
Pb							1.14-12.1	4	6.70	1.80	1	1.80							
Zn	2.60-3.10	2	2.85				10.9-53.6	5	31.9	0.55-13.6	4	9.76	36.0-110	5	66.0	1	22.0		
Co	3.40-11.4	3	7.40				3.97-13.7	2	8.84	17.0-43.0	16	36.0	46.0-197	3	119	1	13.0		
Ni	12.2-47.5	4	26.5				93.0	1	93.0										
Bc							0.29-2.17	5	1.25	0.15	1	0.15	1.23	1	1.23				
La	0.02-0.10	2	0.06				0.66-1.45	3	1.00	0.05-0.45	9	0.17	0.80-26.0	6	9.70	1	32.0		
Ce	0.02-0.09	2	0.05				0.54-1.22	3	0.92	0.04-0.66	9	0.18	1.02-27.0	7	11.4	1	26.0	1	1.30
Nd	0.03-0.06	2	0.04				0.73-1.52	3	1.15	0.02-0.80	9	0.30	1.50-25.0	7	9.74	1	18.0	1	1.70
Sm	0.02-0.04	2	0.03				0.85-1.49	3	1.25	0.06-0.98	8	0.31	1.90-15.0	7	6.87	1	12.5	1	1.80
Eu	0.03	2	0.03				0.43-0.70	3	0.60	0.03-0.74	8	0.25	0.44-11.0	7	2.98	1	7.20	1	1.30
Gd	0.02	2	0.02																
Tb	0.02	2	0.02				0.77-1.08	3	0.93	0.04-3.26	7	0.64	2.00-7.50	6	4.30	1	3.70	1	1.90
Dy	0.02	1	0.02				1.33	1	1.33										
Yb	0.02	2	0.02				0.69-1.02	2	0.86	0.01-0.42	8	0.23	1.60-4.80	4	3.16	1	2.40	1	1.50
Lu	0.02	1	0.02				0.37-0.80	2	0.59	0.08-0.39	8	0.20	1.01-2.20	4	1.61	1	1.30	1	0.90
							0.73	3	0.73	0.51-0.94	3	0.73	0.91-1.50	3	1.21	1	1.40		

表 11 钛铁矿的元素分配系数

Table 11 Element partition coefficients of ilmenite

MI	钛 铁 矿														
	I			II			III			IV		V		VI	
HR															
EL	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	N	AVE	N	AVE	N	AVE
Rb										1	0.47				
Cs										1	0.08				
K							0.03	1	0.03						
Na										1	0.04				
Sr										1	0.68				
Ba										1	0.40				
Ca				0.002—0.02	2	0.01	0.02—0.04	2	0.03			1	0.01	1	0.07
Mn	1.90	1	1.90	1.21—1.44	2	1.33	3.85	1	3.85			1	39.7	1	20.2
Fe				1.69—3.01	3	2.31	4.92—10.4	2	7.66	1	20.0	1	21.9	1	23.7
Mg				0.60—1.28	3	0.97	1.75—2.58	2	2.17	1	7.00	1	0.78	1	1.20
Cu	1.46	1	1.46												
Zn	0.38	1	0.38									1	125	1	7.81
Co	2.20	1	2.20									1	4.30	1	26.0
Ni												1	3.50		
Be												1	0.04		
La	0.03—0.10	2	0.06							1	0.39	1	7.10	1	1.31
Ce	0.03—0.11	2	0.07	0.002—0.011	3	0.005						1	7.81	1	1.19
Nd	0.04—0.14	2	0.09	0.001—0.007	3	0.003						1	7.60	1	1.19
Sm	0.05—0.15	2	0.10	0.001	1	0.001						1	6.90	1	0.68
Eu	0.02—0.10	2	0.06	0.001—0.004	3	0.002				1	0.30	1	2.50	1	0.40
Gd	0.05—0.14	2	0.09	0.006	1	0.006									
Tb	0.10—0.14	2	0.12							1	0.40	1	6.50	1	0.36
Dy	0.13—0.20	2	0.17	0.010—0.020	3	0.013						1	4.90	1	0.37
Yb	0.17—0.39	2	0.28									1	4.11	1	0.55
Lu	0.19—0.47	2	0.33	0.060—0.090	4	0.073						1	3.60	1	0.74
Eu/Eu*			0.63			0.57									
Ce/Ce*			0.93										1.06		0.95
La/Yb			0.21										1.73		2.38
Ce/Yb			0.25										1.90		2.16
Sc	1.80	1	1.80							1	1.50	1	5.90	1	18.5
Cr	10.0	1	10.0	6.00—21.9	3	15.6				1	4.20	1	3.01		
In	2.50	1	2.50												
Ga	0.14	1	0.14												
Al				0.04—0.85	3	0.30	0.02—0.11	2	0.06			1	0.001	1	0.001
B														1	0.09
U										1	0.44	1	3.20	1	0.06
Th										1	0.55	1	7.50	1	0.43
Zr	0.28	1	0.28	0.27—0.38	22	0.31				1	0.40				
Hf	0.94	1	0.94	0.39—0.44	8	0.42				1	0.38	1	3.11	1	0.65
Si				0.001	1	0.00	0.005	2	0.01					1	0.002
Ti	50.0	1	50.0	6.44—13.1	3	8.74	18.4—30.9	2	24.7	1	100	1	117	1	380
Ge												1	0.34		
Sn				3.00—6.43	4	4.72									
Mo												1	3.00	1	11.0
Nb	0.80	1	0.80	0.80—1.03	9	0.89	2.26—4.56	2	3.41						
Ta							2.68—6.58	2	4.63	1	0.53	1	106	1	18.0
V				12.0	1	12.0									
W							2.84	1	2.84	1					
F														1	1.83

表 12 石榴石的元素分配系数
Table 12 Element partition coefficients of garnet

MI	石 榴 石													
HR	I			II			III			VII			VIII	
EL	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	N	AVE
Rb	0.50	1	0.50	0.15—0.25	2	0.20	0.01	1	0.01					
Cs				0.45—0.57	2	0.51								
K	0.002—0.04	4	0.01	0.004—0.12	12	0.07	0.02	1	0.02					
Na	0.01—0.05	7	0.03	0.002—0.53	21	0.18								
Sr	0.01—0.17	4	0.09	0.01—0.16	7	0.09	0.015	1	0.02					
Ba	0.10—0.28	2	0.19	0.07—0.11	3	0.10	0.017	1	0.02					
Ca	0.47—1.43	8	1.11	0.50—0.95	7	0.73	0.87—1.06	2	0.97	0.53—1.15	3	0.82	1	0.75
Mn	0.60—7.67	9	3.98	0.94—10.6	7	3.17	21.5—25.7	2	23.6	18.8—28.3	3	24.4		
Fc	0.42—2.84	9	1.74	0.20—2.68	21	0.82	4.92—9.82	2	7.37	7.55—9.59	3	8.35	1	289
Fc ³⁺				0.40	1	0.40								
Mg	2.39—3.48	7	2.97				2.01—2.18	2	2.10	3.35—7.66	3	4.91		
Co	0.70—1.80	5	1.08	0.53—0.97	4	0.78	1.70—9.00	3	4.17	2.20—3.60	3	2.93	1	18.1
Ni	0.15—5.10	3	1.83											
La	0.004—0.24	4	0.11	0.001—0.12	4	0.04	0.03—0.37	2	0.23	0.28—0.54	3	0.40		
Ce	0.008—0.22	4	0.11	0.007—0.14	4	0.05	0.35—0.53	2	0.44	0.51—0.93	3	0.74		
Nd	0.04—0.29	4	0.17	0.04—0.23	2	0.13	0.53—0.81	2	0.67	0.73	1	0.73		
Sm	0.21—0.64	4	0.41	0.07—0.60	6	0.27	1.25—5.50	3	3.14	0.76—1.04	3	0.89	1	2.22
Eu	0.33—0.85	4	0.58	0.19—1.00	6	0.44	1.37—1.52	3	1.46	0.17—0.31	3	0.24	1	5.60
Gd	0.86—1.43	3	1.19	0.46—2.10	6	1.10	5.20—13.6	3	9.77	3.70—5.30	3	4.77		
Tb				0.53—4.10	5	1.45	7.10—19.6	2	13.4	7.20—11.9	3	9.33	1	214
Dy	28.9—3.23	3	3.06	2.11—2.56	2	2.34								
Ho	5.00	1	5.00	1.24—13.2	5	4.17	23.8—31.2	2	27.4	18.4—34.5	3	27.0		
Er	5.21—7.04	3	5.85	4.24—4.54	2	4.39								
Tm				4.80	1	4.80								
Yb	4.00—9.26	4	6.91	4.03—35.6	6	10.6	26.0—53.0	3	39.7	26.9—67.0	3	49.3	1	904
Lu	5.50—10.0	4	7.67	5.40—41.0	6	12.5	23.5—57.0	3	36.7	24.6—64.0	3	45.2	1	786
Y	2.00—11.4	6	6.95											
Eu/Eu*			0.73			0.64			0.23			0.08		
Ce/Ce*			0.79			0.59			0.98			1.31		
La/Yb			0.02			0.00			0.01			0.01		
Ce/Yb			0.02			0.01			0.01			0.02		
Sc	1.64—5.50	2	3.57	1.35—11.6	13	2.96	3.90—27.6	4	14.6	13.6—20.2	3	17.7	1	1470
Cr	2.33—44.3	3	17.5	1.13—3.60	16	1.95	3.70—17.5	2	10.6	3.70	1	3.70		
Al	1.20—3.06	8	1.57	1.29—7.88	21	2.34	1.12—1.16	2	1.14	1.37—1.49	3	1.43	1	1.38
U				0.30	1	0.30								
Th				0.50—0.60	2	0.55								
Zr	0.30—0.74	7	0.54	0.15—0.73	8	0.53	0.50	1	0.50	1.20	1	1.20		
Hf	0.69	1	0.69	0.14—0.91	12	0.55	0.53—0.57	2	0.55					
Si	0.69—0.83	7	0.76	0.81—1.54	21	1.01	0.59—0.62	2	0.61	0.53—0.55	3	0.54	1	0.50
Ti	0.08—1.77	10	0.67	0.08—0.59	21	0.33	0.40—0.50	3	0.44	0.04—0.13	3	0.07		
Mo							0.42	1	0.42					
Nb	0.02—0.10	4	0.05	0.02—0.15	4	0.08								
Ta	0.06—0.17	3	0.12											
V	0.20—1.45	2	0.83											
P				0.04—0.06	3	0.05	0.10	1	0.10	0.06—0.23	2	0.15		

表 13 磷灰石的元素分配系数
Table 13 Element partition coefficients of apatite

MI	磷 灰 石																						
	I			II			III			IV			V			VI							
HR	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN		
Na			0.14	1	0.14																		
Sr			1.10—6.40	4	3.13	1.31—1.41	2	1.36															
Ba	1	0.04																					
Ca			6.35	1	6.35																		
Mn	1	0.13		1	1.82																		
Fe			0.07	1	0.07																		
Mg			0.11	1	0.11																		
Cu	1	0.28																					
Zn	1	0.24																					
Co	1	0.02	0.04—0.07	2	0.05																		
Ni			0.43—2.30	2	1.37																		
La	1	8.60	1.00—20.0	3	9.93	7.45—34.0	3	19.1	5.00—30.3	13	16.9	75.0—150	2	113	24.5—38.0	3	32.8						
Ce	1	11.2	1.10—21.0	3	10.7	12.2—90.9	8	34.2	6.00—34.1	14	21.4	90.0—200	2	145	26.8—43.0	3	36.6						
Nd	1	14.0	1.40—20.0	3	11.1	19.1—81.1	8	45.6	7.00—54.3	12	26.8	160—320	2	240	35.0—38.0	3	36.8						
Sm	1	14.0	1.60—16.0	3	9.87	20.7—89.8	8	51.3	8.00—95.0	12	29.7				26.7	1	26.7						
Eu	1	9.60	1.10—15.0	3	9.37	14.5—88.8	8	36.0	6.00—102	11	30.2				40.0	1	40.0						
Gd	1	15.8				21.7—160	4	61.2	8.00—94.0	9	33.4				13.8	1	13.8						
Tb	1	15.4	1.50—13.0	3	7.97				27.1—41.4	3	32.9												
Dy						16.9—90.0	8	43.9	8.00—25.0	9	15.9				7.60	1	7.60						
Ho	1	13.3							5.90—22.7	4	10.3				9.10	1	9.10						
Er						11.3—51.2	8	26.3	4.20—13.8	10	8.00				5.30	1	5.30						

表 14 尖晶石、金红石的元素分配系数

Table 14 Element partition coefficients of spinel and rutile

MI	尖 晶 石						金 红 石				
	I			II			III			IV	
EL	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	N	AVE
Li							0.07	1	0.07		
Rb	0.01	1	0.01								
K	0.01	1	0.01				0.000	1	0.00		
Na				0.20	1	0.20	0.000	1	0.00		
Sr	0.01	1	0.01				0.000	1	0.00		
Ba	0.01	1	0.01								
Ca				0.001—0.05	6	0.0017	0.00—0.06	41	0.03		
Mn	1.00—3.00	56	1.33	1.23—1.28	2	1.26	1.21—2.67	2	1.94		
Fe	0.58—1.76	56	1.38	1.75—2.37	8	2.03	1.01—4.35	42	1.75	1	3.50
Fe ³⁺	2.47—12.0	56	4.44								
Mg	0.73—1.81	56	1.30	1.01—2.17	8	1.76	0.70—3.61	42	1.57		
Cu							0.03	1	0.03		
Zn							0.62	1	0.62		
Co	1.90—10.0	3	4.73				3.21	1	3.21		
Ni	5.00—5.90	3	5.33								
La				0.010	1	0.010					
Ce	0.08	1	0.08								
Sm	0.05	1	0.05	0.006	1	0.006					
Eu	0.03	1	0.03	0.006	1	0.006					
Tb				0.008	1	0.008					
Yb	0.02	1	0.02	0.008	1	0.008					
Lu				0.021	1	0.021					
La/Yb						1.25					
Ce/Yb			4.00								
Sc				0.05	1	0.05	0.29	1	0.29		
Cr	51.0—956	66	323	77.0—209	3	149	62—27700	41	1032		
Al	0.87—1.80	56	1.30	0.58—3.40	8	2.59	0.63—1.63	42	1.13	1	0.06
Ga				3.72—4.85	5	4.45	1.99	1	1.99		
B							0.006	1	0.006		
Zr				0.05	2	0.05					
Si				0.002—0.01	7	0.005	0.00—0.03	41	0.007		
Ti	0.25—1.00	56	0.63	2.03—2.50	2	2.27	0.08—1.00	32	0.59	1	33.1
Ge				0.11	1	0.11					
Nb										1	29.8
Ta										1	14.7
V				38.0	1	38.0	3.92	1	3.92		
F							0.03	2	0.03		
Cl							0.06	1	0.06		
O							0.91	1	0.91		
S							0.30	1	0.30		
As							0.05	1	0.05		
OH							0.1 —0.22	2	0.17		
N							0.62	1	0.62		

表 15 褐帘石、黄玉、堇青石的元素分配系数

Table 15 Element partition coefficients of allanite, topaz and cordierite

MI	褐帘石			黄玉			堇青石		
HR	V			VII			VII		
EL	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE
Na	0.01—0.03	2	0.02						
Ca	11.1—21.3	5	15.0						
Mn	17.1—31.5	4	23.0						
Fe	12.8—22.6	4	16.2						
Mg	7.8—107	2	57.4						
Pb							0.10—0.72	11	0.37
Zn	24.0—30.0	2	27.0	4.00	1	4.00	0.84—2.74	3	1.80
Co	41.2—44.0	2	42.6	10.0—18.0	3	13.3			
Ni				0.60	1	0.60			
Bc							0.07—0.22	3	0.13
La	920—2827	3	2003	0.78—1.10	2	0.94			
Ce	635—2494	3	1731	1.02—1.16	2	1.09			
Nd	463—1840	3	1234	0.86—0.98	2	0.92			
Sm	205—977	3	646	0.63—1.08	2	0.86			
Eu	81.0—122	3	101	0.24—0.40	2	0.32			
Tb	71.0—311	3	206	0.43—0.47	2	0.45			
Dy	123—150	2	137						
Yb	8.9—37.0	3	23.5	0.65—0.76	2	0.71			
Lu	7.7—44.0	3	24.6	0.68—0.86	2	0.77			
Y	28.4—45.0	2	36.7						
Sc	49.4—62.3	2	55.8	0.30—0.75	3	0.52			
Cr	369—391	2	380	1.58—2.12	3	1.90			
Al	0.89—1.15	5	1.02						
B							0.09—1.60	2	0.84
U	6.50—17.0	3	12.5						
Th	168—548	3	379	0.85—1.20	2	1.03			
Hf	10.1—28.0	2	19.1	0.78—1.25	2	1.02			
Si	0.39—0.43	5	0.41						
Ti	4.71—32.4	5	18.5						
Sn							0.08—0.34	10	0.20
Ta	1.90—4.42	2	3.16						
V				5.50	1	5.50			
W							0.63—6.87	9	1.87
P	5.00—15.0	2	10.0						
F	2.83	1	2.83				8.68—19.9	8	12.9
Cl	3.00	1	3.00						

表 16 铈铁钛矿、钙钛矿、黄长石、白磷钙矿、板钛矿的元素分配系数
Table 16 Element partition coefficients of armalcolite, perovskite, melilite, whitlockite and brookite

MI	铈铁钛矿				钙钛矿				黄长石				白磷钙矿				板钛矿			
	II		II		II		II		II		II		I, II		II		II			
	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE	RAN	N	AVE		
Rb																				
Cs																				
K																				
Na																				
Sr																				
Ba																				
Ca	0.018	1	0.02																	
Mn	0.44	1	0.44																	
Fe	1.09	1	1.09																	
Mg	1.24	1	1.24																	
Co																				
Ni																				
La	0.014	1																		
Sm	0.10	1																		
Eu	0.05-0.006	2																		
Gd	0.08	1																		
Tm																				
Yb																				
Lu	0.046	1																		
Y																				
Sc																				
Cr	7.00-16.5	2	11.8																	
Al	0.18	1	0.18																	
U																				
Zr	0.90-1.26	6	1.16																	
Th	1.47-1.48	3	1.48																	
Si																				
Ti	8.63	1	8.63																	
Nb	1.40-1.67	11	1.54																	
V	18.0	1	18.0																	
Pu																				

注：铈铁钛矿的K_{REB}中，Sm + Tm, Eu + Gd和Gd + Lu分别由3人测定。

黑云母、金云母、斜长石、钾长石、石英、磁铁矿、钛铁矿、石榴石、锆石、磷灰石、褐帘石、黄玉、楣石、堇青石、蓝方石、白榴石、霞石、白磷钙矿、镁铁钛矿、板钛矿、黄长石、钙钛矿、尖晶石、金红石) 的 69 个化学元素 (Li、Rb、Cs、K、Na、Ca、Sr、Ba、Mn、Fe、Mg、Cu、Pb、Zn、Co、Ni、Be、La、Ce、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y、Sc、Cr、In、Ga、Al、B、Cd、Sb、Bi、U、Th、Zr、Hf、Si、Ti、Ge、Sn、Mo、Nb、Ta、W、V、P、F、Cl、S、N、O、C、As、Pu、Re、Os、He、Ne、Ar、Xe、Kr) 和 1 个化学一价原子团 OH 的分配系数值。

3 元素分配系数主要变化规律

这些元素分配系数资料的综合分析对比表明, 对一定的元素而言, 矿物、熔体的成分和结构是分配系数的最重要控制因素。对于前人未讨论过或注意很少的矿物结构、熔体碱度、铝过饱和度等因素, 应引起足够重视。

① 随矿物结构由架状→层状→链状→岛状, 低价元素 (< 2 价) 的分配系数逐渐减小, 高价元素 (≥ 2 价) 的分配系数逐渐增大。而且, 随 K_{REE} 的增大, $K_{\text{Eu}/\text{Eu}^*} (= 2K_{\text{Eu}}/(K_{\text{Sm}} + K_{\text{Gd}}))$ 由大变小, $K_{\text{Ce}/\text{Ce}^*} (= 2K_{\text{Ce}}/(K_{\text{La}} + K_{\text{Nd}}))$ 由小变大。

② 矿物中的主元素或能以类质同象形式进入矿物晶格的元素, 其分配系数较大, 反之, 其分配系数较小。对 REE 而言, 含大离子半径元素的矿物, $K_{\text{LREE}} > K_{\text{HREE}}$; 含小离子半径元素的矿物, $K_{\text{LREE}} < K_{\text{HREE}}$; 含中等离子半径元素的矿物, K_{MREE} 大于 K_{LREE} 和 K_{HREE} 。

③ 酸度相近时, 随主岩碱度的增高, 1 价元素的分配系数变化不大或稍有减小, 2 价及高价元素的分配系数明显减小。同时, $K_{\text{LREE}/\text{HREE}}$ 、 $K_{\text{Eu}/\text{Eu}^*}$ 也明显减小, $K_{\text{Ce}/\text{Ce}^*}$ 变化不大或趋向减小。

④ 酸度相近时, 随主岩铝过饱和度的增高, W、Sn、Ta、Zn、Pb 等元素的分配系数相应减小, REE 分配系数明显增大, 同时, $K_{\text{LREE}/\text{HREE}}$ 、 $K_{\text{Eu}/\text{Eu}^*}$ 明显减小。

⑤ 前人曾指出某些高价元素分配系数随主岩酸度增高而趋向增大。本文通过更充分、全面的资料对比, 发现随主岩酸度的增高, 1 价及部分 2 价元素的分配系数变化不大或稍有减小, 而高价元素 (≥ 3 价) 和绝大部分 2 价元素的分配系数明显增大。而且, 随 K_{REE} 的增大, $K_{\text{LREE}/\text{HREE}}$ 和 $K_{\text{Eu}/\text{Eu}^*}$ 明显增大, $K_{\text{Ce}/\text{Ce}^*}$ 也趋向增大。

这些元素分配系数的变化规律与笔者所总结的矿物-溶液、熔体-溶液以及不混溶熔体体系中元素分配系数与矿物、熔体的成分和结构之间的关系相一致^[5-8]。它们也可作为预测未知元素分配系数的基本准则。

4 该研究领域的存在问题及研究方向

目前来看, 矿物-熔体间元素分配系数研究存在的主要问题为:

① 目前, 仍然空缺许多元素的分配系数资料, 过铝中性火成岩中的元素分配系数在国内外尚属空白。就前人所作的元素分配系数研究的多少而言, 为: 基性岩 > 中性岩 > 酸性岩; 偏铝质火成岩 > 过碱性火成岩 > 过铝火成岩; 主要造岩矿物 > 副矿物; 造岩元素和稀土

元素>成矿元素和挥发分元素>惰性气体元素。

② 综合研究和定量研究还远远不够。绝大多数研究仅仅研究某一类主岩中一种或几种矿物的某几个元素的分配系数,而没有利用目前国内外已积累大量分配系数资料的优势和计算机技术进行综合、定量研究。

因此,笔者认为,在矿物-熔体间元素分配系数研究方面,今后应当加强的研究方向是:

① 填补目前所空缺的元素分配系数资料,充分发挥元素分配系数在成岩成矿机理研究和找矿中的作用。这不仅要求加强(过铝)中酸性火成岩中元素(尤其是成矿元素和挥发分元素)分配系数的研究,而且还要求在模拟成岩成矿作用过程时采用适当于所研究主岩、矿物成分的多种元素(而不仅仅是稀土元素)的分配系数资料,并充分注意副矿物所起的作用。此外,还应当加强元素分配系数变化规律的研究,建立火成岩含矿性判别准则,帮助找矿。

② 加强矿物-熔体间元素分配系数的综合研究和定量研究。争取尽早建立元素分配系数数据库,并建立元素分配系数多元定量模型。

③ 补充完善矿物-熔体间元素分配系数预测准则。

④ 加强研究矿物-熔体间元素分配系数与矿物-溶液、熔体-溶液体系以及不混溶熔体体系中元素分配系数的关系。

参 考 文 献

- 1 干国樑.元素分配系数与矿物、熔体成分(结构)的关系及其地球化学意义.地质科技情报,1986,5(4):66—80页.
- 2 Arth J G. Behaviour of trace elements during magmatic processes:a summary of theoretical models and their applications. J. Res. USGS, 1976, 4(1): 41—47.
- 3 Hanson G N. The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition. Earth & Planet. Sci. Lett., 1978, 38 (1): 26—43.
- 4 Henderson P. Inorganic Geochemistry. Pergamon Press, 1982.353.
- 5 干国樑.矿物-溶液间REE分配系数及其影响因素和地质地球化学意义.地质科技情报,1988,7(3):35—40页.
- 6 干国樑.熔体-溶液体系中元素分配系数的影响因素及其意义.湖南地质,1988,7(3):69—84页.
- 7 干国樑.元素性质和熔体成分对分配系数的影响及其意义.湖南地质,1989,8(2):70—76页.
- 8 干国樑.不混溶熔体体系的元素分配系数及其影响因素和岩石学、矿床学意义.中国地质科学院院报,1993,第26号.111—127.

(受篇幅所限,此处未列出统计本文中分配系数资料所采用的243篇中外文文献以及每种矿物的元素分配系数资料来源。这243篇文献包括中文文献9篇,英文和德文文献203篇,俄文文献31篇)。

Mineral-Melt Element Partition Coefficients: Data and Major Variation Regularities

Gan Guoliang

(Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences)

Key words: mineral-melt; element partition coefficients; data; variation regularities

Abstract

This paper presents partition coefficients of 69 chemical elements (Li, Rb, Cs, K, Na, Ca, Ba, Sr, Mn, Fe, Mg, Cu, Pb, Zn, Co, Ni, Be, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y, Sc, Cr, In, Ga, Al, B, Cd, Sb, Bi, U, Th, Zr, Hf, Si, Ti, Ge, Sn, Mo, Nb, Ta, W, V, P, F, Cl, S, N, O, C, As, Pu, Re, Os, He, Ne, Ar, Kr and Xe) and the univalent radical (OH) in 28 minerals (olivine, clinopyroxene, orthopyroxene, amphibole, biotite, phlogopite, plagioclase, K-feldspar, quartz, magnetite, ilmenite, garnet, zircon, apatite, allanite, topaz, sphene, cordierite, hauyne, leucite, nepheline, whitlockite, brookite, perovskite, melilite, armalcolite, spinel and rutile) from 8 types of rocks, namely metaluminous (ultra) basic rock, peralkaline (ultra) basic rock, metaluminous intermediate rock, peralkaline intermediate rock, metaluminous acid rock, peralkaline acid rock, peraluminous acid rock and ultra-acid rock. It is found through an integrated analysis and comparison that the composition and structure of minerals and melts seem to be the most important factors controlling mineral-melt element partitioning. Importance should be attached to mineral structure and Al-supersaturation of melt which have not been discussed by research workers. Finally, the present state and the problems to be solved in the study of mineral-melt element partition coefficients are analysed, and the future trends of this research field are predicted.