

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

金伯利岩微量元素地球化学特征与 含金刚石程度的判别

种 瑞 元

(辽宁省地质局中心实验室)

鉴于金伯利岩普遍经受强烈的热液蚀变作用,新鲜的金伯利岩比较少见,这就给研究金伯利岩的矿物成分和岩石化学成分带来一定困难。因此,研究金伯利岩中比较稳定的微量元素分布特征,查明含金刚石程度不同的金伯利岩中微量元素含量差别,探讨根据微量元素判别和预测金伯利岩含金刚石程度的可能性,具有比较普遍的实际意义。

几年来,在我国沟区金刚石原生矿普查评价和勘探工作中,先后对7个岩体260余个选矿样品,系统地进行了14种微量元素光谱定量分析,其中有富金刚石金伯利岩79个样品(50号岩管48个,51号岩管31个);贫(中)金刚石金伯利岩162个样品(42号岩管152个,30号岩管10个)和无(极贫)金刚石金伯利岩20个样品(1—2号岩管13个,65号岩管7个)。分析工作是由辽宁省地质局中心实验室光谱组完成的。全部计算工作都是在台式电子计算机上进行的。在计算过程中保留了小数点后8位数字,并随时进行复查和检验,保证计算结果准确可靠。

一、金伯利岩与石榴二辉橄榄岩等岩石中微量元素丰度的对比

金伯利岩是一种硅酸强烈不饱和的偏硷性超基性岩,含有丰富的微量元素,不仅含有与石榴二辉橄榄岩等地幔岩石中含量相近的元素,如Ni、Cr、Co和Mn等,而且也含有比石榴二辉橄榄岩中高得多的元素,如V、Ti、Zr、Nb、TR、Sr、Ba等,同时,这些元素的含量还显著高于除硷性超基性岩建造以外的其他超基性岩(纯橄岩)、基性岩(玄武岩、辉长岩)、中性岩(安山岩、闪长岩)以及酸性岩(花岗岩、花岗闪长岩)等,即高于地壳的平均成分,而与硷性超基性岩建造的苦橄玢岩和玻基辉橄岩等岩石相近(表1)。金伯利岩及其他各类火成岩与石榴二辉橄榄岩中微量元素平均含量的比值,所表示的元素丰度系数(图1),可以比较明显地反映出金伯利岩的这一独特地球化学特征。

二、含金刚石程度不同的金伯利岩中微量元素含量差别

我国沟区和马区含金刚石程度不同的金伯利岩中微量元素平均含量和标准差列于表2。从表2可以看出,在金刚石含量不同的金伯利岩中,微量元素的含量是有差异的,并且显示出比较明显的规律性:从富金刚石金伯利岩—贫(中)金刚石金伯利岩—无(极贫)金刚石金伯利岩,Ni、Cr、Co等元素的含量逐渐降低;相反,V、Zr、Nb、La、Sr、Ba、Pb、Sn等元素含量显著增高。Ti在贫(中)金刚石金伯利岩中含量较高,在无(极贫)和富金刚石金伯利岩中含量较低。而Mn在无(极贫)和富金刚石金伯利岩中含量较高,在贫(中)金刚石金伯利岩中含量较低。

表 1 金伯利岩及各类火成岩中微量元素平均含量 (重量%)

№	岩 石 名 称	Ni	Cr	Co	Mn	V	Ti	Zr	Nb	La	Sr	Ba	Cu	Pb	Sn
1	我国矿区金刚石金伯利岩(80)	0.102	0.158	0.0077	0.136	0.0129	0.937	0.0290	0.032	0.0250	0.068	0.124	0.0126	0.0074	0.0025
2	我国马区金刚石金伯利岩(6)	0.131	0.199	0.0076	0.127	0.0083	1.053	0.0338	0.0351	0.0301	0.064	0.133	0.0034	0.0011	0.0019
3	我国黔区金伯利岩(36)	0.081	0.100	0.0018	0.031	0.0047	1.167	0.1161	0.0168		0.045	0.073	0.0074	0.0114	0.0009
4	阿扎尼亚金伯利岩	0.100	0.150	0.0070	0.05	0.0140	1.400	0.0375	0.020	0.035	0.070	0.100	0.0100		
5	莱索托金伯利岩(12)	0.117	0.147	0.0073	0.198	0.0133	1.382	0.041	0.0208	0.0316	0.049	0.075		0.0009	
6	苏联雅库特金刚石金伯利岩	0.097	0.104	0.0073	0.094	0.0057	0.85	0.0127	0.0098	0.003	0.046	0.038	0.0041	0.0004	0.0001
7	石榴二辉橄榄岩	0.300	0.250	0.0112	0.100	0.0090	0.13	0.005	0.00067	0.00025	0.0043	0.0033			
8	球粒陨石	1.68	0.30	0.10	0.20	0.0065	0.08	0.0033	0.00004	0.00003	0.0011	0.00034			
9	超基性岩 (纯橄榄岩)	0.20	0.20	0.02	0.15	0.004	0.03	0.003	0.0001		0.001	0.0001	0.002	0.00001	0.0005
10	苦橄玢岩 (与碳酸盐共生)	0.042	0.064	0.009	0.16	0.012	1.28	0.038	0.018		0.140	0.12			
11	玻基辉橄岩 (广西双田)	0.054	0.048	0.0036	0.16	0.013	1.10	0.054	0.031	<0.01	0.120	0.29	0.0103	<0.003	
12	基性岩 (玄武岩, 辉长岩)	0.016	0.02	0.0045	0.20	0.02	0.90	0.01	0.002	0.0027	0.044	0.03	0.01	0.0008	0.00015
13	中性岩 (闪长岩, 安山岩)	0.0055	0.005	0.001	0.12	0.01	0.80	0.026	0.002		0.08	0.065	0.0035	0.0015	
14	酸性岩 (花岗岩, 花岗闪长岩)	0.0008	0.0025	0.0005	0.06	0.004	0.23	0.02	0.002	0.006	0.03	0.083	0.002	0.002	0.0003
15	地壳	0.0089	0.011	0.0025	0.13	0.014	0.64	0.013	0.0019	0.0039	0.048	0.039	0.0063	0.0012	0.00017
16	上地幔	0.150	0.160	0.0160	0.16	0.008	0.25	0.005	0.0006	0.00007	0.012	0.0076	0.004	0.00021	0.00008

说明: 1、2和11—为本文分析数据, 3—据黔区所在地质局101地质队, 4—据文献[1], 5—据文献[2], 6—据文献[3], 7、8—据文献[4], 10—据文献[5], 9和12—据文献[6], 15、16—据文献[7]。岩石名称后括号内数字为分析样品数。

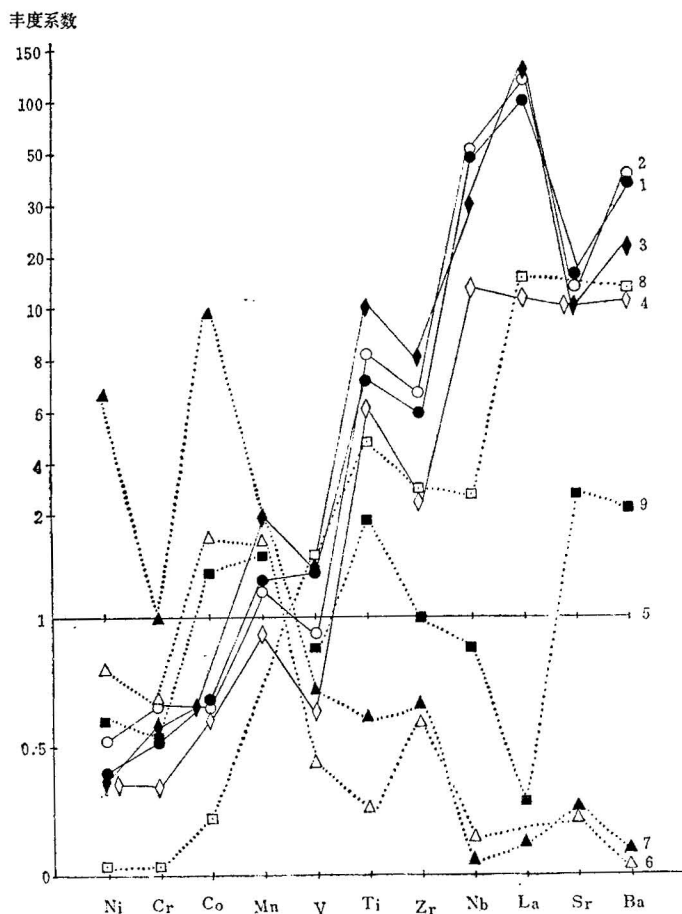


图 1 金伯利岩中微量元素丰度

1—我国沟区金刚石金伯利岩 (表 1, 1); 2—我国马区金刚石金伯利岩 (表 1, 2); 3—索托金伯利岩 (表 1, 5); 4—苏联雅库特金刚石金伯利岩 (表 1, 6); 5—石榴二辉橄榄岩 (表 1, 7); 6—超基性岩 (纯橄岩) (表 1, 9); 7—球粒陨石 (表 1, 8); 8—地壳平均成分 (表 1, 15); 9—上地幔平均成分 (表 1, 16)。

$$\text{元素丰度系数} = \frac{\text{金伯利岩等岩石中元素含量}}{\text{石榴二辉橄榄岩中元素含量}}$$

金属合成金刚石所需的最低温度和压力条件如表 3。为了与自然界中金伯利岩进行对比, 表 3 中还列入了我国沟区 42 号岩管金伯利岩中这些触媒金属元素及其组合的含量与金刚石含量之间的相关系数。

由此可以认为, 金伯利岩中丰富的微量元素, 尤其是 Ni、Cr、Co、Mn 等, 在地幔高压高温条件下的金刚石生成过程中, 可以起触媒金属的作用, 从而扩大金刚石生成的压力和温度范围, 是促使金刚石生成的一个重要因素。

金伯利岩是一种混染岩, 它是由地幔成因的深源岩石包体与金伯利岩基质组成的。上述金伯利岩中两类微量元素的存在, 明显地反映出了这一成因特征。目前, 金伯利岩工作者比较普遍地认为, 金伯利岩岩浆是在高压条件下, 沿着深断裂系统高速流动侵入的。因为只有高速上升, 才能将密度较大的深源岩石包体带到上面来, 也才能防止深部生成的金刚石全部熔融和转化。金伯利岩中两类微量元素的含量变化是金伯利岩岩浆发展和演化的结果, 在一定程度上反映了金伯利

三、金伯利岩中微量元素与金刚石含量之间的关系

为进一步查明含矿岩体内, 金伯利岩中微量元素与金刚石含量之间的关系, 专门对我国沟区 51 号岩管金伯利岩进行了 R 型群分析, 其结果如图 2。

从图 2 可以看出, 金伯利岩中微量元素明显地分为两群, 其中 Cr、Co、Mn、Ni 等与金刚石关系较为密切。

值得注意的是, 这些微量元素与金刚石含量之间的关系, 可以从人工合成金刚石中触媒金属的作用得到说明。目前, 静压法合成金刚石 (5—10 万大气压, 1000—2000℃), 是在触媒金属的协助作用下获得成功的。而常用的触媒金属正是 Ni、Cr、Co、Mn 等元素、这些触媒金属及其合金, 可以降低合成温度和压力^[8]。同时, 实践还表明, 两种本来不起触媒作用的金属组合起来, 在共存的熔融状态下, 也可以起触媒作用。如 Cu 与 V、Ti、Zr、Nb 等元素中任一种组合起来, 都可以起到触媒作用^[8]。因此, 金伯利岩中的某些第二类元素, 在一定条件下, 也有可能起到触媒金属的作用。各种触媒

表 2 含金刚石程度不同的金伯利岩中微量元素平均含量

	富金刚石金伯利岩			贫（中）金刚石金伯利岩			无（极贫）金刚石金伯利岩		
	沟 区		马 区	沟 区		马 区	沟 区		马 区
	平均值	σ		平均值	σ		平均值	σ	
Ni	0.103	0.035	0.133	0.101	0.028	0.130	0.077	0.020	0.016
Cr	0.151	0.038	0.173	0.165	0.033	0.225	0.140	0.0422	0.077
Co	0.0080	0.0035	0.0084	0.0074	0.0031	0.0068	0.0072	0.0017	0.001
Mn	0.142	0.081	0.137	0.132	0.053	0.117	0.150	0.0635	0.032
V	0.0124	0.0058	0.0119	0.0134	0.0044	0.0048	0.0148	0.0072	0.0078
Ti	0.640	0.182	0.582	1.234	0.334	1.523	0.958	0.1971	0.695
Zr	0.0272	0.0056	0.0200	0.0327	0.0103	0.047	0.0366	0.0074	0.0255
Nb	0.0271	0.0066	0.0300	0.0371	0.0102	0.040	0.0503	0.0089	0.0275
La	0.0232	0.0057	0.0293	0.0250	0.0095	0.031	0.0396	0.0173	0.0235
Sr	0.066	0.024	0.058	0.071	0.033	0.071	0.151	0.0739	0.023
Ba	0.122	0.072	0.131	0.127	0.083	0.136	0.410	0.227	0.021
Cu	0.0065	0.0043	0.0043	0.0186	0.0195	0.0025	0.0094	0.0070	<0.001
Pb	0.0024	0.0032	<0.001	0.0123	0.0153	0.0012	0.0250	0.0420	0.0095
Sn	0.0014	0.0007	0.0023	0.0035	0.0037	0.0015	0.0027	0.0023	<0.001

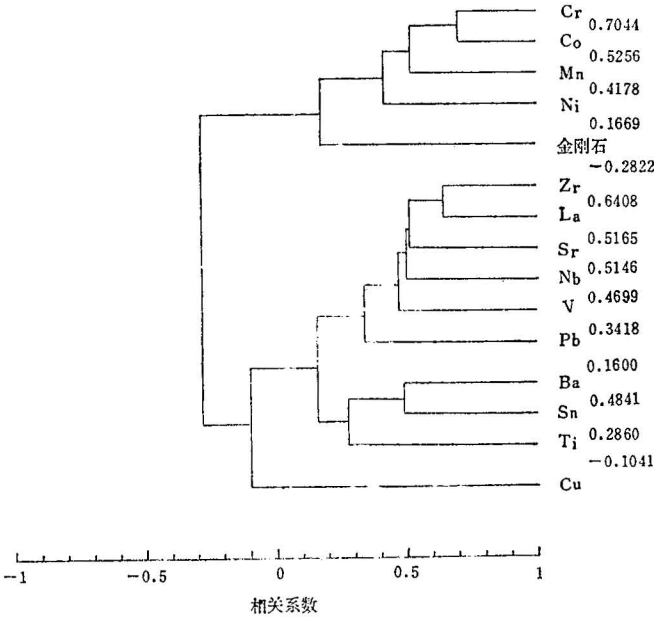


图 2 富金刚石金伯利岩中微量元素和金刚石 R 型群分析谱系图（据沟区 51 号岩管，样品数 $n = 18$ ，正规化数据）

岩的侵位情况。金伯利岩岩浆上升得越迅速，第一类元素的含量越接近石榴二辉橄榄岩等地幔岩石中的含量，第二类元素含量较相对越低，金刚石熔融和转化得也越少；反之，上升不够迅速，金伯利岩岩浆的结晶分异作用和同化混染作用进一步进行，第一类元素含量逐渐减低，第二类元素含量明显增高，金刚石熔融和转化损耗增大，甚至全部消失，而形成无金刚石金伯利岩。

因此，金伯利岩中两类不同成因的微量元素含量变化，可以作为判别含金刚石程度的一个重要标志。

表 3 各种触媒金属合成金刚石的最低温度与压力条件⁽⁸⁾

触 媒 种 类	压力 (千巴)	温 度 (℃)	相关系数(r)*
Mn-Cu (92; 8%)	48	1400	0.3672
Mn-Co (92; 8%)	50	1450	0.5148
Ni-Cr	51	1450	0.4815
Mn-Ni (92; 8%)	53	1475	0.8424
Co	50	1450	0.2776
Ni	55	1400	0.4938
Mn	57	1500	0.6049
Cr	70	2100	0.4141

* 我国沟区42号岩管金伯利岩中微量元素和元素组合的含量与金刚石含量之间的相关系数(统计样品数, $n = 30$, 相关系数查表值 $r = 0.361$)。

四、判别金伯利岩含金刚石程度的微量元素地球化学标志

含金刚石程度不同的金伯利岩之间,所具有的微量元素地球化学差别和规律性,使我们可以把Ni、Cr、Co、Mn及V、Ti、Zr、Nb、La、Sr、Ba等元素,作为判别金伯利岩含金刚石程度的指示元素。根据我国沟区含金刚石程度不同的7个岩体260余个金伯利岩样品中微量元素的含量,在Cr+Ni-0.1Ti+V-Zr+Nb+Sr成分图(图3)上,可以圈定出富金刚石金伯利岩区(I)、贫(中)金刚石金伯利岩区(II)和无(极贫)金刚石金伯利岩区(III)。这三个区域的分布是有规律的,富金刚石(I)和贫(中)金刚石(II)金伯利岩区,分布在靠近Cr+Ni顶角的左下部,二者右性之间有一定的重叠;无(极贫)金刚石金伯利岩区(III)分布在靠近Zr+Nb+Sr-0.1Ti+V边的上方,与贫(中)金刚石金伯利岩区(II)也有一定的重叠。

因为Cr、Ni与V、Ti、Zr、Nb、Sr等元素之间呈互为消长关系,所以(Cr+Ni)/(0.1Ti+V)和(Zr+Nb+Sr)/(Cr+Ni)值表现出来的差异性更为明显。这两个元素组合比值,在一定程度上反映了岩石的超基性和偏硷性程度。在(Cr+Ni)/(0.1Ti+V)-(Zr+Nb+Sr)/(Cr+Ni)坐标图(图4)上,同样可以圈定出三个区域,富金刚石金伯利岩区(I)分布在偏硷性程度较低和超基性程度较高的右下方;无(极贫)金刚石金伯利岩区(III),则分布在偏硷性程度较高和超基性程度较低的左上方;贫(中)金刚石金伯利岩区(II)分布在超基性和偏硷性程度都相对较低的左下方,分别与富金刚石和无(极贫)金刚石金伯利岩分布区有一定范围的重叠。

图3和图4中含金刚石程度不同的金伯利岩分布区,用我国和国外某些已知含矿性的金伯利岩微量元素资料(表4)进行验证结果,除属贫(中)金刚石金伯利岩的沟区30号岩管投影点落入富金刚石金伯利岩区以外,我国马区、沟区、铁岭、黔区和高台诸地区以及国外某些金伯利岩的投影点,均落入了与其实含矿性相应的区域。

上述情况表明,指示元素组合及其比值等地球化学参数,可以作为金伯利岩含金刚石程度的判别标志,基本上可以把含金刚石程度不同的金伯利岩区分开来。

五、含金刚石程度不同的金伯利岩微量元素多元判别分析

(一) 金刚石金伯利岩与无(极贫)金刚石金伯利岩的判别

根据我国沟区有工业价值的金刚石金伯利岩(包括贫(中)和富金刚石金伯利岩,80个样品)和无工业价值的无(极贫)金刚石金伯利岩(20个样品)的微量元素分析资料,分别以Ni、Cr、Co、Mn、V、Ti、Zr、Nb、Sr、Ba等元素;Cr+Ni、0.1Ti+V、Zr+Nb+Sr;(Cr+Ni)/(0.1

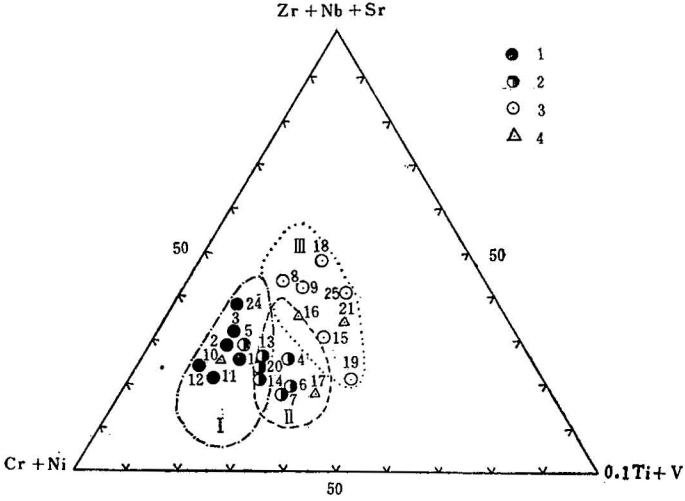


图 3 含金刚石程度不同的金伯利岩在 $\text{Cr} + \text{Ni}$ - $0.1\text{Ti} + \text{V}$ - $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Sr}$ 成分图上的分布区
I-富金刚石金伯利岩分布区；II-贫（中）金刚石金伯利岩分布区；III-无（极贫）金刚石金伯利岩分布区。
1-富金刚石金伯利岩；2-贫（中）金刚石金伯利岩；3-无（极贫）金刚石金伯利岩；4-未知含矿性的金伯利岩
（编号同表 4）

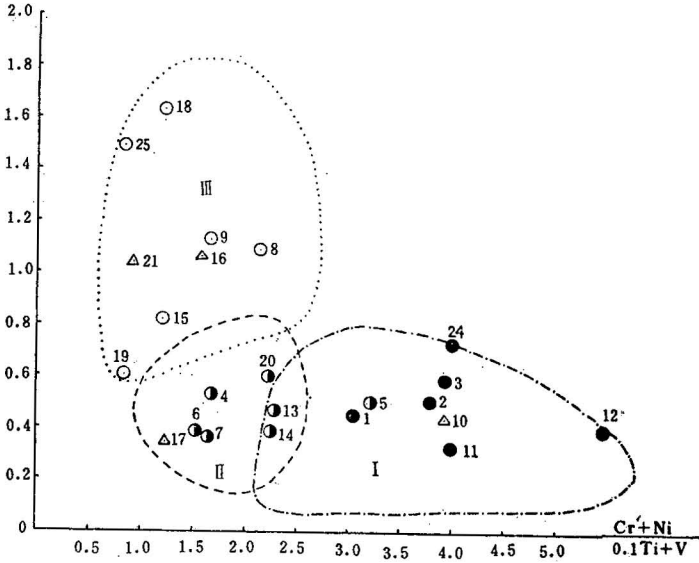


图 4 含金刚石程度不同的金伯利岩在 $(\text{Cr} + \text{Ni}) / (0.1\text{Ti} + \text{V}) - (\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Sr}) / (\text{Cr} + \text{Ni})$
座标图上的分布区
（图例同图 3，编号同表 4）

$\text{Ti} + \text{V}$ 和 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Sr}) / (\text{Cr} + \text{Ni})$ 等元素组合及其比值为预测因子（变量），进行两组判别分析，求得各变量的判别系数及其相应的权，每组金伯利岩的平均判别值（ $\bar{R}_k$ 和 $\bar{R}_x$ ）和判别值分界值（ R_{10} ），以及显著性检验结果，均列于表 5。

判别函数 R_{110} 中，按各变量（元素）权的绝对值大小，排列顺序为 Ba、Nb、Sr、Ni、Zr、Cr、V、Ti、Mn、Co等。其中Ba、Nb、Sr起主要作用，Ni、Cr等次之，其余作用很小。选择性

表 4 含 金 刚 石 程 度 不 同 的 金 伯 利 岩

№	产地, 岩体名称	Ni	Cr	Co	Mn	V	Ti	Zr	Nb
1	沟区50(23)	0.094	0.150	0.0079	0.130	0.0130	0.674	0.0283	0.0275
2	沟区51(17)	0.115	0.153	0.0082	0.157	0.0117	0.595	0.0256	0.0264
3	沟区68(1)	0.157	0.238	0.0116	0.131	0.0270	0.791	0.040	0.028
4	沟区42(30)	0.098	0.159	0.0082	0.122	0.0151	1.366	0.0328	0.0358
5	沟区30(10)	0.113	0.182	0.0051	0.160	0.0083	0.840	0.0322	0.0369
6	沟区56(1)	0.082	0.140	0.0157	0.077	0.0181	1.258	0.0265	0.019
7	沟区57(1)	0.089	0.138	0.0068	0.069	0.0125	1.264	0.0197	0.024
8	沟区1—2((B)	0.079	0.160	0.0069	0.175	0.0119	1.007	0.0376	0.0515
9	沟区65(7)	0.074	0.102	0.0079	0.105	0.0201	0.866	0.0346	0.0482
10	沟区64(1)	0.115	0.300	0.0079	0.057	0.0158	0.85	0.046	0.046
11	马区C1(2)	0.133	0.184	0.0073	0.0079	0.0104	0.692	0.0185	0.020
12	马区H1(1)	0.132	0.150	0.0107	0.253	0.0150	0.364	0.0230	0.050
13	马区H ₂ (2)	0.129	0.216	0.0056	0.128	0.0052	1.465	0.0545	0.0375
14	马区H ₂ (1)	0.133	0.245	0.0094	0.097	0.0039	1.64	0.034	0.046
15	马区3矿带(2)	0.016	0.077	0.001	0.032	0.0078	0.695	0.0255	0.0275
16	黔区D ₁ (31)	0.092	0.096	0.002	0.035	0.0048	1.178	0.0132	0.0178
17	黔区D ₂ (5)	0.0126	0.128	0.001	0.009	0.0044	1.10	0.018	0.0108
18	铁岭岩脉(3)	0.058	0.091	0.0086	0.162	0.0297	0.93	0.055	0.032
19	高台区岩脉(2)	0.097	0.115	0.0130	0.172	0.039	2.15	0.036	0.056
20	莱索托卡奥岩筒	0.120	0.170	0.0060	0.232	0.0075	1.21	0.040	0.017
21	莱索托鲁贝特岩墙	0.065	0.095	0.0065	0.178	0.0150	1.636	0.045	0.020
22	莱索托玛拉卡贝岩墙	0.050	0.100	0.0095		0.0160		0.060	0.040
23	苏联和平岩筒	0.107	0.071	0.0059	0.072	0.0045	0.790	0.0122	0.006
24	苏联成功岩筒	0.099	0.081	0.0075	0.083	0.0043	0.405	0.0081	0.007
25	苏联卢恰坎	0.066	0.081	0.0082	0.144	0.0130	1.73	0.020	0.020

说明: 1—15和18、19为本文分析数据; 16、17据黔区所在地质局101地质队; 20—22据[2]; 23—25据[3]。岩体编号后括

质不同, 作用较大, 而且波动性较小的 Ni、Cr、Nb、Sr 等 4 个变量, 重新计算得判别函数 R_{104} (表 5)。

判别函数 R_{103} 中, $(Zr + Nb + Sr)$ 起主要作用, $(Cr + Ni)$ 次之, $(0.1Ti + V)$ 作用很小; 同样, 在判别函数 R_{102} 中, $(Zr + Nb + Sr)/(Cr + Ni)$ 起主要作用, $(Cr + Ni)/(0.1Ti + V)$ 作用很小。

上述判别函数的 F 检验结果为, F 计算值都明显大于相应自由度下的查表值 $F_{0.10}$ 或 $(F_{0.05})$, 表明这些判别函数在 10% (或 5%) 信度水平上, 效果都是显著的。

将金伯利岩中微量元素的含量 (重量%), 代入上述判别函数中, 即可求得判别值 R 。如果 R (计算) $> R_{10}$, 靠近 $\bar{R}_{\text{金}}$ 一边, 则为金刚石金伯利岩; 反之, 如果 R (计算) $< R_{10}$, 靠近 $\bar{R}_{\text{无}}$ 一边, 则为无 (极贫) 金刚石金伯利岩。将参与计算判别函数的 100 个样品的微量元素含量 (重量%), 分别代入上述判别函数, 结果 R_{110} 、 R_{103} 和 R_{102} 的错判率均低于 5%, R_{104} 错判率略高为 7% (表 5), 与 F 检验结果一致。

根据 R_{110} 计算的判别值 R , 所作的 R 分布直方图如图 5。图 5 右侧金刚石金伯利岩 R 值有两个明显的峰值, -2 至 -4 之间的峰值, 相当于 50 号和 51 号岩管金伯利岩样品; -8 至 -12 之间的峰值为 42 号和 30 号岩管样品。左侧无 (极贫) 金刚石金伯利岩判别值 R 也有两个峰值, 分别相当于 65 号岩管 (-24 左右) 和 1—2 号岩管 (-32 左右) 金伯利岩样品。

中 微 量 元 素 平 均 含 量 (重量%)

La	Sr	Ba	Cu	Pb	Sn	Cr + Ni	Zr + Nb + Sr	判 别 值		含矿性
						0.1Ti + V	Cr + Ni	R 110	R 210	
0.0219	0.055	0.095	0.0081	0.0022	0.0016	3.04	0.45	-3.49	-4.77	富
0.0250	0.081	0.158	0.0044	0.0028	0.0012	3.78	0.50	-6.01	-5.34	富
0.0568	0.162	0.400	<0.0032	0.0029	0.0022	3.91	0.58	-13.69	-5.74	富
0.0273	0.068	0.104	0.0145	0.0141	0.0036	1.69	0.53	-5.55	-16.98	贫 (中)
	0.079	0.206	0.0309	0.0068	0.0034	3.20	0.50	-8.21	-12.97	贫 (中)
0.024	0.041	0.140	0.0169	<0.001	<0.001	1.53	0.39	-2.05	-13.48	贫 (中)
0.0225	0.041	0.188	<0.0032	<0.001	<0.001	1.63	0.37	-4.68	-17.56	贫 (中)
0.0368	0.171	0.486	0.0086	0.0375	0.0034	2.13	1.08	-31.22		极贫
0.0447	0.116	0.269	0.0110	0.0018	0.0013	1.65	1.13	-23.96		无
0.038	0.089	0.120	0.0067	<0.001	0.002	3.91	0.44	-3.64	-6.11	?
0.027	0.066	0.177	0.0040	<0.001	<0.001	3.98	0.32	-1.14	-6.03	富
0.034	0.042	0.039	0.0049	<0.001	0.0049	5.48	0.40	-10.05	-3.19	富
0.044	0.073	0.158	0.0033	0.0013	0.0017	2.27	0.47	0.79	-16.18	贫 (中)
0.005	0.067	0.093	<0.001	<0.001	<0.001	2.25	0.39	-1.48	-22.45	贫 (中)
0.0235	0.023	0.021	<0.001	0.0095	<0.001	1.20	0.82	-5.02*	-10.22	无
	0.05	0.081	0.007	0.0109	0.0006	1.53	1.06	-0.62	-18.55	贫 (中)
	0.021	0.0237	0.0101	0.0148	0.0032	1.22	0.35	3.91	-14.40	贫 (中)
0.038	0.157	0.40	0.0105	0.0032	0.0016	1.21	1.63	-24.00		无
0.0235	0.035	0.85	0.0059	<0.003		0.83	0.60	-38.86		无
0.030	0.075	0.095		<0.0003		2.25	0.45	5.16	-10.24	贫 (中)
0.025	<0.100	0.260		0.001		0.89	1.03	-8.32	-18.36	?
0.065	0.040	0.065		0.001			0.93			?
0.002	0.060	0.032	0.0026	0.00032	0.00004	2.13	0.43	3.35	-7.06	富
0.001	0.120	0.007	0.0045	0.0008	0.0002	4.01	0.75	-1.70	-2.55	富
0.010	0.180	0.060	0.0110	0.0007	0.0001	0.79	1.50	-11.10	-27.91	贫

号内数字为分析样品数。

表 5 金刚石金伯利岩与无金刚石金伯利岩判别函数的系数和权及其显著性检验结果

		R 110		R 104		R 104		R 102	
		系 数	权	系 数	权	系 数	权	系 数	权
变	Ni	51.6739	5.07	15.5311	3.66				
	Cr	42.7462	3*10	40.9120	7.13				
	Co	-91.4363	-0.07						
	Mn	-1.8879	0.10						
	V	-138.7932	1.05						
	Ti	2.0566	-0.17						
	Zr	148.9496	-3.98						
	Nb	-398.4676	28.93	-234.0847	40.78				
	Sr	-65.6271	21.76	-60.8772	48.43				
	Ba	-31.8085	36.24						
量	Cr + Ni					23.4377	14.51		
	0.1Ti + V					10.3232	-0.57		
	Zr + Nb + Sr					-55.8163	86.06		

续表

		R ₁₁₀		F ₁₀₄		R ₁₀₄		R ₁₀₂	
		系 数	权	系 数	权	系 数	权	系 数	权
变 量	$\frac{Cr + Ni}{0.1Ti + V}$							-0.1904	-1.54
	$\frac{Zr + Nb + Sr}{Cr + Ni}$							-16.2702	101.54
$\overline{R}_{金}$		-5.56		-3.62		0.01		-8.76	
$\overline{R}_{无}$		-28.64		-14.06		-7.06		-18.47	
R_{10}		-17.10		-8.84		-3.53		-13.61	
D^2		25.06		10.44		7.07		9.71	
F (计算)		36.42		40.48		36.96		76.88	
$F_{0.10}$ (查表)		1.7		2.0		2.1		2.3	
样品数		100		100		100		100	
错判样品数		1		7		4		2	
错判率%		1		7		4		2	

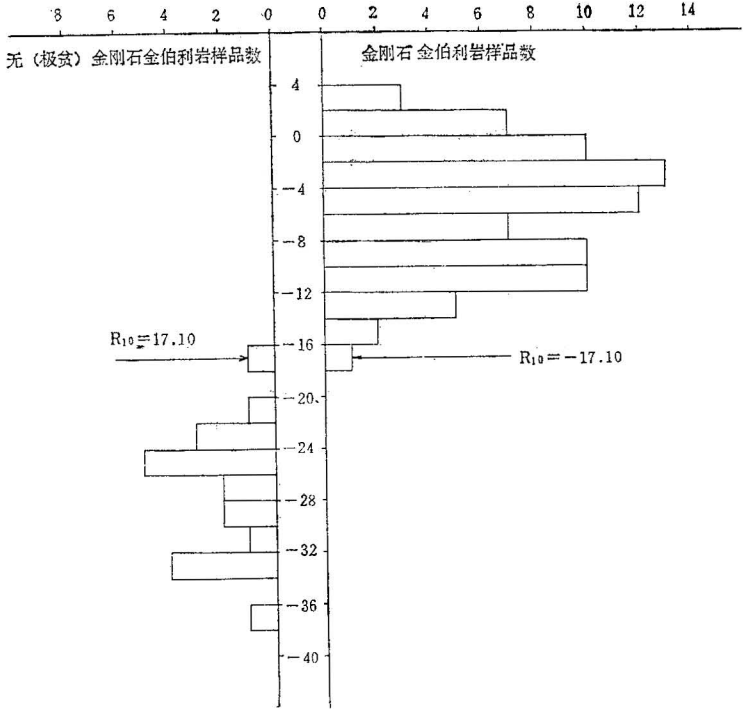


图 5 金刚石金伯利岩和无 (极贫) 金刚石金伯利岩判别值 R 直方图
(据判别函数 R_{110} , $n = 100$)

(二) 富金刚石金伯利岩与贫 (中) 金刚石金伯利岩的判别
将我国沟区有工业价值的金刚石金伯利岩, 进一步划分为富金刚石金伯利岩 (40个样品) 和

贫(中)金刚石金伯利岩(40个样品)两组¹⁾, 同样以微量元素、微量元素组合及其比值等为预测因子(变量), 分别进行两组判别分析, 求得各变量的判别系数及其相应的权、每组金伯利岩的平均判别值($\bar{R}_{富}$ 和 $\bar{R}_{贫}$)和判别值分界值(R_{20})以及显著性检验结果均列于表6。

表6 富金刚石金伯利岩与贫(中)金刚石金伯利岩判别函数的系数和权及其显著性检验结果

		R ₂₁₀		R ₂₀₅		R ₂₀₃		R ₂₀₂	
		系 数	权	系 数	权	系 数	权	系 数	权
变	Ni	23.1988	0.40	13.6258	0.44				
	Cr	12.8853	-1.61	9.7631	-2.33				
	Co	529.0894	2.85						
	Mn	-5.4538	-0.51						
	V	144.9035	-1.30						
	Ti	-16.5321	88.17	-8.3298	85.14				
	Zr	245.2061	-12.10						
	Nb	-247.5848	22.22	-88.3494	15.20				
	Sr	-28.9142	1.04	-22.5444	1.55				
	Ba	-17.2652	0.84						
量	Cr + Ni					2.5840	-0.94		
	0.1Ti + V					-69.5762	99.05		
	Zr + Nb + Sr					-4.1078	1.89		
	$\frac{Cr + Ni}{0.1Ti + V}$							1.9104	103.06
	$\frac{Zr + Nb + Sr}{Cr + Ni}$							2.1852	-3.06
	$\bar{R}_{富}$	-5.05		-6.34		-5.15		7.66	
	$\bar{R}_{贫}$	-16.20		-12.15		-9.40		5.16	
	R_{20}	-10.64		-9.25		-7.28		6.41	
	D ²	11.14		5.81		4.24		2.49	
	F (计算)	19.17		22.06		27.54		24.67	
	F _{0.10} (查表)	1.7		1.9		2.1		2.3	
	样品数	80(70)*		80(70)		80(70)		80(70)	
	错判样品数	6(3)		11(5)		16(7)		21(13)	
	错判率%	7.5(4.2)		13.7(7.1)		20.0(10.9)		26.2(16.2)	

* 括号内数字为去掉30号岩管样品后(表5、1—70)的样品数, 错判样品数和错判率。

判别函数 R_{210} 中, 按各变量(元素)权的绝对值大小, 排列顺序为 Ti、Nb、Zr、Co、Cr、V、Sr、Ba、Mn、Ni 等, 其中 Ti、Nb、Zr、Co、Cr 等起主要作用, 最主要的是 Ti。剔除一些作用小的变量之后, 以 Ni、Cr、Ti、Nb、Sr 等 5 个元素为变量, 重新求得判别函数 R_{205} 。判别函数 R_{203} 和 R_{202} 中, 分别为 $(0.1Ti + V)$ 和 $(Cr + Ni)/(0.1Ti + V)$ 起主要作用, 而 $(Cr + Ni)$ 、 $(Zr + Nb + Sr)$ 及 $(Zr + Nb + Sr)/(Cr + Ni)$ 作用不大。

上述判别函数的 F 检验结果(表6), F 计算值都明显大于相应自由度下的查表值 $F_{0.10}$ (或 $F_{0.05}$)。表明这两组金伯利岩是有显著差异的。

根据参与计算判别函数的 80 个金刚石金伯利岩样品的微量元素含量, 检验上述判别函数, 结

¹⁾ 本文原附有沟区该两组金伯利岩共 80 个样品的微量元素含量分析表, 为篇幅所限, 予以删去——编者注。

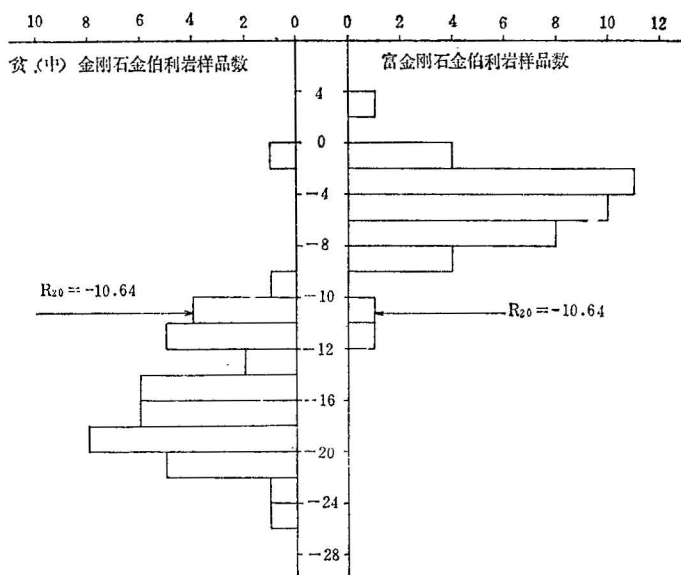


图 6 富金刚石金伯利岩和贫(中)金刚石金伯利岩判别值 R_{210} 直方图
(据判别函数 R_{210} , $n = 80$)

果如表 6 和图 6。除 R_{210} 的错判率低于 10% 以外, R_{205} 、 R_{203} 和 R_{202} 的错判率均较高。值得注意的是, 错判的样品主要是 30 号岩管的金伯利岩。如果去掉 30 号岩管的 10 个样品, 用 70 个样品进行检验, 则上述判别函数的错判率都显著降低, 除 R_{202} 以外, 均低于 10%, 与 F 检验结果基本一致。

根据我国和国外某些已知含矿性的金伯利岩微量元素平均含量(表 4), 对上述金刚石金伯利岩与无(极贫)金刚石金伯利岩判别函数 (R_{110} 等) 及富金刚石金伯利岩与贫(中)金刚石金伯利岩的判别函数 (R_{210} 等) 进行检验结果, 除把我国马区无(极贫)金刚石金伯利岩错判为金刚石金伯利岩以外, 其他判别结果均与实际含金刚石程度一致(表 4)。我国马区无(极贫)金刚石金伯利岩中的微量元素, 是根据两个地表强烈风化样品测定的, 含量显著偏低, 缺乏代表性。

综上所述, 金伯利岩是一种偏硷性超基性岩, 具有明显的混染性质, 表现在微量元素地球化学特征上, 含有两类不同性质的微量元素: 第一类为 Ni、Cr、Co、Mn 等, 第二类为 V、Ti、Zr、Nb、TR、Sr、Ba 等。这两类元素的含量变化, 可以作为金伯利岩含金刚石程度的判别标志。在金刚石金伯利岩与无(极贫)金刚石金伯利岩的判别函数 (R_{110} 等) 中, Ba、Sr、Nb、Zr 和 Cr、N 等元素起主要作用, 而 Ti、V 等元素作用很小; 在富金刚石与贫(中)金刚石金伯利岩判别函数 (R_{210} 等) 中, Ti、Nb、Zr 和 Cr、Co 等元素起比较主要的作用, 而 Sr、Ba 等元素作用不大。应用上述判别函数, 可以判别金伯利岩的含金刚石程度, 错判率一般在 10% 以下。

参 考 文 献

- [1] Harris, P. G. and Midlemost, E. A., 1970, Evolution of Kimberlites Lithos. Vol. 3, No. 3.
- [2] Dawson, J. B., 1962, Basutoland Kimberlites. The Geological Society of America Bulletin, Vol. 73, No. 5.
- [3] Илупи, И. П., Соблев, С. Ф., Золоталев, Б. П. И Лебедев-Зиновьев, А. А., 1974, Геохимическая Специализация Кимберлитов Различных Полей Якутии. Геохимия, No. 4
- [4] Лутц, Б. Г., 1975, Химический Состав Континентальной Коры И Верхней Мантии Земли. «Наука».
- [5] Бородин, Л. С., Лапин, А. В. И Пятенко, И. К., 1976, Петрология и Геохимия Даяк Щело-

чно-ультраосновных Порода и Кимберлитов. «Наука».

[6] Виноградов, А. В., 1962, Средния Содержания Химических Горных Порода Земной Коря. Геохимия, No. 7.

[7] 黎彤, 1976, 化学元素的地球丰度. 地球化学, 第三期.

[8] 吉林大学固体物理教研室高压合成组, 人造金刚石, 1975, 科学出版社.

THE TRACE-ELEMENT GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND DISCRIMINATION OF DIAMOND CONTENT IN KIMBERLITES

Zhong Ruiyuan

(Central Laboratory of Liaoning Bureau of Geology)

Abstract

Kimberlite, a meta-alkaline ultra-basic rock, which is clearly contaminated. Geochemically it contains two different types of trace-elements: the first type marked by Ni, Cr, Co, Mn, while the second type by V, Ti, Zr, Nb, TR, Sr, Ba.

In the kimberlites of varying of diamond contents, the trace-elements of these two types appear to have a regular variation. The contents of elements of the first type decrease gradually from the diamond-rich kimberlite to diamond-poor (medium) kimberlite and to diamond-deficient (very poor) kimberlite. The elements of the second type vary greatly in content and are even more complicated. From the diamond-rich kimberlite to diamond-poor (medium) kimberlite such elements as Ti, Nb, Zr, V increase clearly in their contents while elements Sr, Ba increase a little, and from diamond-poor (medium) kimberlite to diamond-deficient (very poor) kimberlite, element Ba, Sr, Nb, Zr increase apparently in content while elements Ti, V do not vary so much or even reduce inversely. Therefore, the content variation of elements of these two types could be used as the criterion for discriminating the diamond content in kimberlite.

Considering the role played by the two types of trace-elements and using multi-variate discrimination analysis, one could discriminate the degree of diamond content in kimberlite. In general, the percentage error or discrimination is less than 10%.