

下地壳及壳幔过渡带化学不均一性

——河北汉诺坝地区深源捕虏体元素地球化学证据*

张国辉^① 周新华^① 孙 敏^② 陈绍海^① 冯家麟^③

(^①中国科学院地质研究所 北京 100029)

(^②香港大学地球科学系 香港)

(^③河北地质学院 石家庄 050031)

摘 要 河北汉诺坝玄武岩中长英质麻粒岩、镁铁质麻粒岩和辉石岩捕虏体的主量元素和微量元素特征,反映了下地壳及壳幔过渡带组成具有高度化学不均一性。不相容元素原始地幔标准化曲线特征的差异表明捕虏体成因复杂。MgO 与不相容元素无或仅有很弱的相关性,与相容元素的相关性则相对较明显。这些特征反映了下地壳及壳幔过渡带存在较强和多元的混合作用。捕虏体的加权平均值比基于麻粒岩地体资料估算的下地壳平均组成偏基性,揭示了二者可能的成因差异。

关键词 麻粒岩捕虏体 辉石岩捕虏体 化学不均一性 大陆下地壳 汉诺坝

分类号 P595

1 引 言

被玄武岩浆携带上来的深源捕虏体在上升过程中所经历的变化相对简单,能反映当时下地壳的状况,因而成为探索现今大陆下地壳物质组成和演化的最直接研究对象。汉诺坝玄武岩为晚第三纪喷发产物,其中的麻粒岩相捕虏体应为研究当前该区下地壳性质和组成的合适对象。

汉诺坝产出的新生代玄武岩及其所携带的橄榄岩捕虏体、麻粒岩相捕虏体和辉石岩捕虏体及出露于地表的古老麻粒岩地体,给人们研究软流圈、岩石圈地幔、下地壳及壳幔过渡带的纵向变化及不同时代下地壳的演化提供了理想地区。前人对汉诺坝玄武岩的研究系统而全面^[1-3],对于其中的橄榄岩捕虏体取得了较为一致的结论^[3-5]。麻粒岩和辉石岩的系统研究则是最近才获得重视的^[6-10]。作者采集了汉诺坝玄武岩中大量长英质麻粒岩、镁铁质麻粒岩和辉石岩捕虏体样品,对其进行了系统的主量元素、微量元素和 Sr、Nd、Pb 同位素分析,旨在初步探讨该区下地壳及壳幔过渡带的性质和组成,并对其不均

第一作者简介:张国辉 男 28岁 博士研究生 岩石地球化学

*国家自然科学基金资助项目(编号:49272097)

收稿日期 1997-02-24, 改回日期 1997-07-08

一性提供地球化学证据。

2 地质背景及样品简介

广义的汉诺坝玄武岩系泛指分布在内蒙古高原东南缘的晚第三纪火山岩, 主要分布

表1 样品岩性及矿物组合

Table 1 Lithology and mineral assemblage

样品号	岩 性	矿物组合	$t(^{\circ}\text{C})$	$p(\text{GPa})$
长英质麻粒岩				
91ZH1	长英质麻粒岩	Pl+Af+Q+Sph		
91ZH2	长英质麻粒岩	Pl+Af+Q		
91ZH3	长英质麻粒岩	Pl+Af+Q		
91ZH4	长英质麻粒岩	Pl+Af+Q		
91ZH5	长英质麻粒岩	Pl+Af+Q+Gt		
91ZH6	长英质麻粒岩	Pl+Af+Q		
91ZH7	长英质麻粒岩	Pl+Af+Q+Gt		
91ZH8	长英质麻粒岩	Pl+Af+Q		
91SAN2	二辉斜长麻粒岩	Pl+Opx+Cpx		
镁铁质麻粒岩				
90DA4	二辉麻粒岩	Cpx+Opx+Pl	874	
91DA1	二辉斜长麻粒岩	Pl+Opx+Cpx		
91DA4	二辉麻粒岩	Opx+Cpx+Pl	887	
95DA6	二辉麻粒岩	Opx+Cpx+Pl	895	
95DA15	二辉麻粒岩	Opx+Cpx+Pl	887	
95DA16	二辉麻粒岩	Opx+Cpx+Pl	880	
95DA17	二辉麻粒岩	Opx+Cpx+Pl		
95SQ1	二辉麻粒岩	Opx+Cpx+Pl	886	
95DA30	二辉碱长麻粒岩	Af+Cpx+Opx+Pl	883	
95DA40	二辉麻粒岩	Pl+Af+Cpx		
辉石岩				
90DA11	石榴石辉石岩	Gt+Opx+Cpx+Pl	1089	1.75
90DA12	石榴石辉石岩	Gt+Opx+Cpx+Pl		
91DA7	尖晶石辉石岩	Sp+Opx+Cpx+Pl	828	
95DA4	二辉岩	Opx+Cpx		
95DA28	尖晶石二辉岩	Opx+Cpx+Sp	947	
95DA36	单斜辉石岩	Opx+Cpx		
95JSB1	尖晶石二辉岩	Opx+Cpx+Sp	988	
95JSB2	二辉岩	Opx+Cpx	841	

注: Pl, 斜长石; Af, 碱性长石; Q, 石英; Sph, 楣石; Gt, 石榴子石; Cpx, 单斜辉石; Opx, 斜方辉石; Sp, 尖晶石。

温度估算采用文献[11]的二辉石温度计, 压力估算采用文献[12]的石榴子石-斜方辉石压力计。

于大同—张家口和围场—赤城以北的广大地区。它们沿呈东西向的岩石圈断裂(阴山山前断裂和赤峰—开源断裂)分布,属于典型的裂隙式玄武岩,形成广阔的熔岩台地^[3]。汉诺坝玄武岩主要为拉斑玄武岩、碱性玄武岩及二者的过渡类型。玄武岩中的镁铁质岩捕虏体可分为两类,即绿色型和黑色型。前者以尖晶石二辉橄榄岩为主,后者主要为二辉岩和镁铁质麻粒岩。在数量上二辉岩捕虏体比尖晶石二辉橄榄岩要少得多。另外,笔者在野外找到了一些长英质麻粒岩捕虏体,但其数量比镁铁质麻粒岩和辉石岩捕虏体少得多。不同产地各类捕虏体的相对含量有较大差别。二辉橄榄岩占绝大多数。其中下地壳及壳幔过渡带来源的捕虏体以镁铁质麻粒岩为主,少量辉石岩、长英质麻粒岩微量。本文所研究的麻粒岩和辉石岩捕虏体采自以大麻坪为主的几个富含捕虏体的产地。捕虏体多呈椭球状,直径由几厘米到几十厘米,重量由几十克到几十千克不等,新鲜程度好,提供了大量的地壳深部信息。本文共研究长英质麻粒岩、镁铁质麻粒岩和辉石岩 27 个。岩性及矿物组合详见表 1。

3 分析方法

样品号以 90 和 91 开始的样品的主量元素和微量元素在澳大利亚新南威尔士大学用 X 荧光光谱法测定。样品号以 95 开始的样品在中国科学院地质研究所测定。尽量选取新鲜程度好的样品,去除表皮后粗碎,再用玛瑙研钵细磨至 200 目以下。主量元素用 X 荧光光谱法分析,微量元素采用 ICP-MS 技术分析。微量元素分析的化学处理在超净实验室进行。称取样品约 0.1g,加浓 HF 和 HNO₃ 密封加热直至样品全溶(3—4d)后开盖蒸干,加 HClO₄ 高温蒸干去除氟化物,以 115In 为内标,稀释成 50ml 溶液(2% HNO₃ 体系)后用 VG PQ-2 型 ICP-MS 测试。该仪器能进行多元素同时测定,具有速度快、精度高、检测极限低等优点。经重复样品及标准参考样品检查,一般元素分析误差小于 5%,个别元素如 Zr、Nb、Ta、V、Cr、Th 为 5%—10%,系统本底可忽略。

4 分析结果

4.1 主量元素

主量元素分析结果列于表 2。镁铁质麻粒岩和辉石岩的 SiO₂ 含量及 Mg[#][Mg[#] = 100Mg / (Mg + 全 Fe)] 都落入世界范围的麻粒岩相捕虏体的主体变化区域内^[13],而长英质麻粒岩则处于最富 SiO₂,低 Mg[#] 的区域。长英质麻粒岩 MgO 含量都小于 5%,镁铁质麻粒岩和辉石岩 MgO 含量则有较大的变化范围(分别为 1.26%—17.88% 和 11.93%—25.30%)。95DA30 和 95DA40 碱性长石占较大比例,但其岩石学特征与镁铁质麻粒岩相似,故归入此类。在主量元素协变图上(图 1),三类岩石的变化趋势有差别。同一类岩石不同氧化物对 MgO 的变化趋势亦不同,可能反映了它们的成因及演化过程的差异。长英质麻粒岩 MgO 与其他氧化物的相关关系一般不明显。镁铁质麻粒岩和辉石岩捕虏体一般表现出较分散的相关关系,MgO 与 Al₂O₃、CaO 的关系可能反映出单斜辉石结晶对该体系的影响。

表2 主量元素分析结果(%)

Table 2 Major element concentration (%)

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	烧失	总量	Mg*
长英质麻粒岩														
91ZH1	72.06	1.09	13.11	0.42	0.08	0.01	1.45	0.21	7.87	1.83	0.13	0.32	98.58	45.9
91ZH2	60.78	0.34	18.91	3.11	0.61	0.06	4.28	0.87	3.62	4.84	0.20	0.72	98.34	31.6
91ZH3	64.34	0.76	14.91	4.61	0.91	0.02	2.33	2.40	3.04	1.61	0.03	3.04	97.98	46.3
91ZH4	62.00	0.81	18.32	2.48	0.49	0.05	1.71	0.44	6.27	5.09	0.24	0.53	98.42	22.6
91ZH5	70.10	0.20	14.67	1.62	0.32	0.02	2.14	1.19	4.91	2.43	0.04	1.36	99.00	54.8
91ZH6	64.29	0.73	15.71	4.07	0.80	0.02	3.29	2.29	3.27	1.63	0.03	3.21	99.32	48.2
91ZH7	60.83	0.72	17.00	5.12	1.01	0.06	3.42	3.43	2.78	2.02	0.04	2.63	99.05	52.6
91ZH8	68.74	0.61	14.30	3.93	0.77	0.02	1.27	1.70	5.09	1.33	0.03	1.64	99.43	41.7
91SAN2	58.09	0.31	19.17	2.16	0.42	0.05	0.50	1.95	7.43	5.68	0.11	3.10	98.97	59.9
镁铁质麻粒岩														
90DA4	50.18	0.32	13.13	7.09	1.39	0.14	7.39	15.26	0.30	1.64	0.02	1.97	98.83	78.1
91DA1	50.90	0.25	15.90	7.94	1.56	0.13	4.25	11.14	0.84	2.96	0.03	3.82	99.71	69.9
91DA4	50.91	0.44	8.43	9.10	1.60	0.17	11.68	15.14	0.28	1.51	0.03	0.87	100.16	73.5
95DA6	48.00	1.04	6.77	9.39	2.27	0.30	10.08	17.88	0.75	0.87	0.33	2.01	99.69	75.6
95DA15	47.88	0.73	6.43	8.63	2.50	0.38	12.48	16.81	0.32	1.21	0.07	2.15	99.59	75.6
95DA16	47.57	0.96	5.06	8.28	3.45	0.32	14.17	17.15	0.02	1.31	0.04	1.23	99.56	75.8
95DA17	46.64	0.53	10.65	5.47	2.89	0.26	12.29	14.00	0.48	2.83	0.06	3.83	99.93	78.8
95SQ1	48.63	0.35	19.35	4.55	1.29	0.21	11.91	8.40	0.70	1.92	0.02	2.04	99.37	74.7
95DA30	54.17	0.10	20.41	0.77	0.68	0.01	6.30	1.26	5.32	2.66	0.01	7.84	99.53	67.8
95DA40	48.89	1.24	17.61	3.68	2.06	0.12	6.67	2.66	5.64	1.94	0.30	8.69	99.50	51.0
辉石岩														
90DA11	47.88	0.37	12.46	10.76	2.12	0.24	9.94	14.40	0.03	1.07	0.00	0.00	99.27	68.9
90DA12	44.90	0.29	16.49	8.59	1.69	0.19	11.62	13.90	0.03	0.72	0.01	0.07	98.50	72.8
91DA7	43.52	1.49	14.56	10.85	2.13	0.13	10.79	11.93	0.15	1.31	0.04	1.32	98.22	64.5
95DA4	48.13	0.72	7.71	6.77	2.71	0.27	14.05	14.92	0.51	1.41	0.00	2.62	99.82	77.1
95DA28	45.03	0.58	8.53	6.21	2.20	0.39	7.19	25.30	0.49	0.78	0.13	2.75	99.58	86.3
95DA36	47.70	0.28	8.63	2.69	2.18	0.23	22.11	13.29	0.08	1.46	0.00	1.64	100.29	86.7
95JSB1	47.86	0.82	9.30	4.82	1.19	0.32	12.85	19.79	0.41	0.47	0.05	1.99	99.87	86.9
95JSB2	49.00	0.60	3.57	8.57	2.41	0.17	11.08	22.41	0.02	0.45	0.04	1.19	99.51	80.7

4.2 微量元素

微量元素分析结果列于表3。

4.2.1 稀土元素

三类捕虏体的稀土元素含量及球粒陨石标准化曲线型式(图2)不同。长英质麻粒岩的总稀土元素(Σ REE)含量大部分为100—200 μ g/g, 91ZH1则为472 μ g/g。该类捕虏体LREE/HRLEF比值大, 显示了轻重稀土的强烈分馏。除91ZH1为明显的铕负异常和

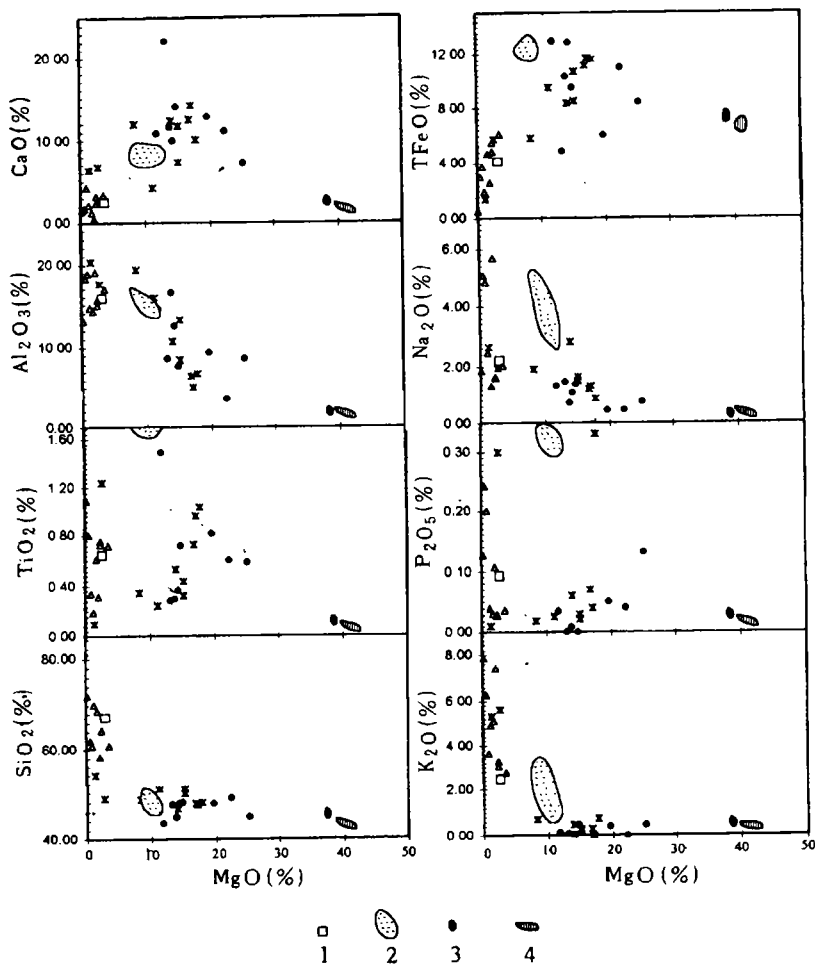


图 1 主量元素协变图

Fig.1 Correlationship between MgO and other major elements
 空心三角形为长英质麻粒岩, 星号为镁铁质麻粒岩, 实心圆为辉石岩。

1. 汉诺坝玄武岩附近长英质麻粒岩地体(一个样品, 作者);
2. 玄武岩^[2]; 3. 原始地幔; 4. 汉诺坝玄武岩中橄辉岩捕虏体。

91ZH4 的弱铕负异常外, 其余样品皆为明显的铕正异常。随着 ΣREE 总量增加, 铕的正异常减弱, 至 91ZH1 的 ΣREE 最大时出现强烈的铕负异常(图 3), 反映了随着 ΣREE 的增高, 斜长石中的稀土含量在全岩总稀土含量中所占比例下降。值得指出的是样品 91ZH1, 薄片观察发现含较多榍石。因此, 该样品中的高 ΣREE 含量及强铕负异常主要是副矿物榍石的贡献。

镁铁质麻粒岩的 ΣREE 含量大部分为 20—40 $\mu\text{g/g}$, LREE/HREE 比值较长英质麻粒岩小, 铕异常的规律同长英质麻粒岩相似, 即随着 ΣREE 的增高铕正异常减弱, 同样反映了斜长石中 ΣREE 的贡献在样品 ΣREE 增大时减弱。

表3 微量元素分析结果 ($\mu\text{g/g}$)
Table 3 Trace element concentration ($\mu\text{g/g}$)

样品号	长英质麻粒岩								
	91ZH1	91ZH2	91ZH3	91ZH4	91ZH5	91ZH6	91ZH7	91ZH8	91SAN2
V	37	50	105	40	63	80	98	93	35
Cr	26	79	120	26	70	98	105	105	9
Co	2.8	15	6.5	4.6	50	10	19	8.1	19
Ni	5.5	32	30	7.9	27	39	30	24	6.5
Cu	38	85	50	52	25	64	87	69	53
Zn	25	100	120	111	60	130	125	145	60
Rb	185	23	68	72	70	65	36	75	120
Sr	345	1500	440	410	350	940	540	280	230
Y	35	8.8	21	30	20	1.46	24	15	1.8
Zr	2147	236	297	540	135	241	280	203	90
Nb	35	5	17	42	9	16	16	16	2
Sn	4	4.5	1.2	4.6	2	2.1	5.5	2.6	4.06
Cs	0.15	0.01	0.23	0.11	0.3	0.05	0.05	0.031	0.037
Ba	2000	2300	1400	1700	790	1300	1300	990	1650
La	85	38	40	70	30	40	47	31	10
Ce	250	57	65	155	42	60	76	42	15
Pr	30	5.8	7.5	16	4.3	5.86	7.9	4	1.8
Nd	101	20	25	50	13	16	25	13	5.8
Sm	15.1	3.2	5.2	9	2.2	1.56	4.2	2.2	0.93
Eu	2.5	1.6	2.2	2.2	1.65	2.1	2.2	1.4	0.9
Gd	12.5	3.4	5	7.5	2.3	1.1	4.2	2.3	0.64
Tb	1.6	0.38	0.8	1.1	0.45	0.1	0.74	0.4	0.09
Dy	6.7	1.8	4.8	6.1	2.7	0.37	4.6	2.6	0.37
Ho	1.25	0.33	0.88	1.2	0.55	0.08	1	0.55	0.07
Er	3.5	1	2.5	3.4	1.6	0.2	2.8	1.5	0.19
Tm	0.52	0.14	0.4	0.5	0.25	0.03	0.44	0.22	0.025
Yb	3.1	0.81	2.6	3.3	1.6	0.23	2.5	1.4	0.16
Lu	0.41	0.13	0.45	0.5	0.25	0.03	0.41	0.21	0.025
Hf	2.1	0.5	1.8	0.8	0.8	1.5	1.78	1.4	0.22
Ta	3.2	0.2	1	1.8	0.8	0.5	1.3	0.6	0.23
Pb	27	25	12	20	24	16	13	13	20
Th	20	0.2	4.5	3.5	0.46	0.6	1.9	0.58	0.25
U	2	0.35	0.35	0.35	0.1	0.12	0.14	0.3	0.18
ΣREE	513.2	133.6	162.3	325.8	102.9	127.7	179	120.8	36
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	18.5	31.6	10.4	14.3	12.6	117.3	12.7	14.9	42.1
Eu/Eu^*	0.54	1.47	1.3	0.8	2.2	4.7	1.59	1.9	3.4

续表3

镁铁质麻粒岩										
样品号	90DA4	91DA1	91DA4	95DA6	95DA15	95DA16	95DA17	95SQ1	95DA30	95DA40
V	136	95	250	175	203	135	160	77	16	128
Cr	300	120	1000	567	577	328	900	262	9.2	19
Co	55	45	73	87	68	40	60	38	6.2	18
Ni	150	190	230	260	190	165	300	70	13	11.5
Cu	120	150	100	137	55	75	58	15	50	55
Zn	161	110	100	90	75	103	60	85	100	115
Rb	8.9	22	6	14	10.4	9.1	15	25	120	142
Sr	920	960	400	258	127	83	800	1300	1820	630
Y	5	2.02	10	20	10	13.2	5.8	3.8	1.3	12.5
Zr	58	62	36	110	19	30	60	17	16	30
Nb	2.4	1.33	2.4	3.5	0.36	0.1	5	0.55	3.4	7.2
Sn	4.6	2.1	2.6	2.5	1.7	1.8	1.3	1.24	4.2	5
Cs	0.16	0.7	0.028	0.08	13	0.033	0.1	0.03	0.04	0.05
Ba	500	660	123	1300	32	130	443	1530	2100	1700
La	2.9	3.65	2.8	17	2	2.55	5.1	6.5	3.26	28
Ce	6.5	5.5	8.2	41	7.2	9	9.2	11.2	6	50
Pr	1	0.73	1.45	6.4	1.5	1.7	1.1	1.25	0.75	6.5
Nd	4	2.5	8	27	7.5	9.9	6.21	5.25	2.5	2.5
Sm	1	0.42	2.1	5.9	2.38	3.1	1.56	1.8	0.45	4.5
Eu	0.55	0.53	0.77	1.5	0.86	0.89	0.75	0.8	1.2	1.92
Gd	0.95	0.4	1.96	5.5	2.54	2.8	1.85	1.3	1.2	4.1
Tb	0.15	0.06	0.31	0.8	0.4	0.49	0.25	0.13	0.08	0.48
Dy	0.9	0.42	1.9	4.5	2	2.61	1.31	0.8	0.35	2.4
Ho	0.2	0.085	0.4	0.85	0.5	0.52	0.26	0.17	0.07	0.48
Er	0.51	0.28	1	2.2	1.35	1.61	0.7	0.46	0.25	1.25
Tm	0.07	0.04	0.14	0.4	0.16	0.22	0.092	0.07	0.045	0.16
Yb	0.42	0.27	0.8	1.7	0.9	1.25	0.51	0.4	0.3	0.92
Lu	0.07	0.05	0.11	0.3	0.18	0.2	0.07	0.07	0.045	0.14
Hf	0.4	0.38	0.8	3.28	0.73	1.2	0.64	0.9	0.45	0.99
Ta	0.15	0.16	0.24	0.25	0.09	0.07	0.23	0.3	0.3	0.75
Pb	1.5	2.74	3	3	0.4	11.2	0.93	3.84	11	13
Th	0.17	0.1	0.2	0.67	0.05	0.15	0.35	0.16	0.16	0.2
U	0.05	0.15	0.06	0.17	0.02	0.03	0.085	0.07	0.1	0.1
ΣREE	19.2	14.9	29.9	115.1	29.5	36.8	29	30.2	16.5	125.9
(La/Yb) _N	4.7	9.1	2.4	6.7	1.5	1.4	6.7	10.9	7.3	20.5
Eu/Eu*	1.7	3.9	1.1	0.8	1.1	0.9	1.3	1.5	4.7	1.3

续表3

样品号	辉石岩							
	90DA11	90DA12	91DA7	95DA4	95DA28	95DA36	95JSB1	95JSB2
V	390	141	47.55	212	91	53	25.4	87
Cr	442	100	52	344	1000	31	1413	864
Co	57	50	30	57	63	19	48	35
Ni	268	290	35	181	664	44	457	300
Cu	121	80	106	37.4	41	14	45	75
Zn	109	70	138	58	120	100	32	80
Rb	2.4	1.4	3.26	8.81	12	6.22	11.4	0.87
Sr	14.3	58	569	267	113	164	189	63
Y	27	12	8.93	8.82	9.2	11	12.5	4.24
Zr	7.7	8	20	23	24	150	31	14
Nb	2	2	3.62	0.59	2.3	1.7	3.5	0.8
Sn	4.46	4.6	6.05	1.51	1.9	2.4	1.9	0.52
Cs	0.155	0.084	0.016	0.04	0.022	0.012	0.04	0.01
Ba	473	730	592	640	216	135	1024	20
La	0.45	0.65	2.8	4	3	9.5	2.5	1.05
Ce	0.91	1.57	8.02	8.5	6.55	30	5.43	3.9
Pr	0.15	0.29	1.38	1.6	1.05	5	0.85	0.9
Nd	0.68	1.38	7.24	8.7	3.68	19.55	4.3	5.13
Sm	0.46	0.7	1.9	2.4	0.97	3.7	1.6	1.6
Eu	0.2	0.5	0.8	0.88	0.57	1.2	0.8	0.54
Gd	1.28	1.5	1.92	3.03	1.61	3.4	2.5	1.6
Tb	0.47	0.35	0.35	0.4	0.26	0.42	0.47	0.19
Dy	3.7	2.12	2	2.2	1.77	2	3	1.2
Ho	1.1	0.53	0.39	0.47	0.42	0.4	0.61	0.22
Er	3.8	1.5	1.08	1.03	1	1.2	1.6	0.46
Tm	0.68	0.21	0.16	0.15	0.15	0.12	0.22	0.06
Yb	4	1.45	0.86	0.77	0.92	0.9	1.55	0.35
Lu	0.7	0.13	0.13	0.11	0.15	0.14	0.24	0.05
Hf	0.7	0.4	1.16	1.03	0.8	3.7	1.2	0.5
Ta	1.15	0.12	0.28	0.13	0.23	0.3	0.35	0.3
Pb	0.4	2	7	0.6	2.7	2.1	3.06	5
Th	0.1	0.4	0.16	0.09	0.8	0.5	0.48	0.14
U	0.02	0.07	0.1	0.04	0.1	0.1	0.157	0.1
ΣREE	18.6	12.9	29	34.2	22.1	77.5	25.67	17.3
(La/Yb) _N	0.08	0.3	2.2	3.5	2.2	7.1	1.1	2
Eu/Eu*	0.75	1.5	1.3	1	1.4	1	1.2	1

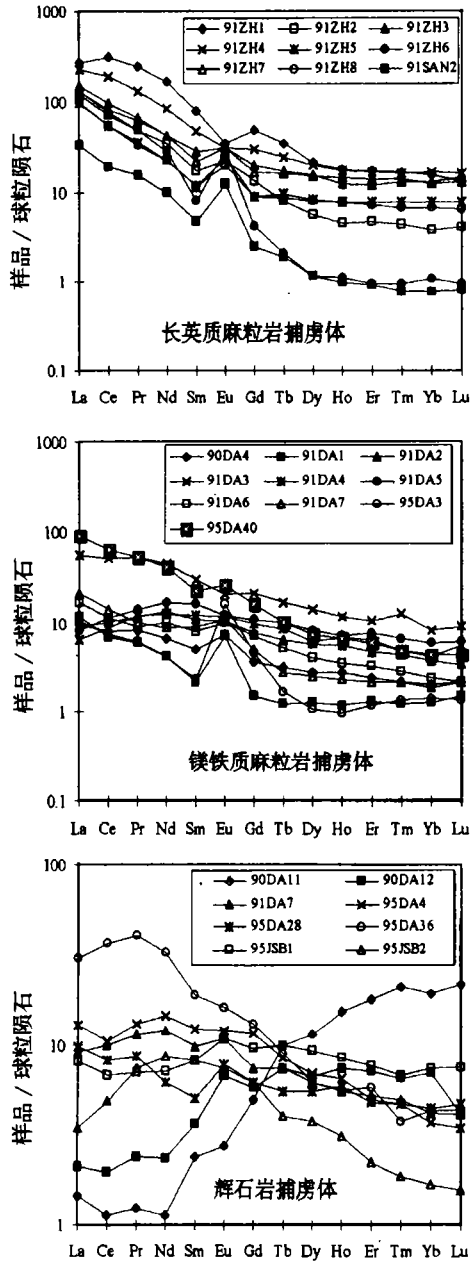


图2 样品球粒陨石标准化图解

Fig.2 Chondrite-normalized REE distribution patterns

富集至较强的富集(91ZH1)。镁铁质麻粒岩一般出现较明显的钪负异常和铈的正异常, Nb、Ta、P 弱亏损至较强亏损。辉石岩不相容元素含量一般比前两类岩石低, 样品之间的差别较大, 标准化曲线之间的交叉较多, 可能反映了样品之间成因或所经历过程的差异。钡大多出现弱至较强的正异常, 钪为弱正异常或无异常, 铈为弱负异常至明显异常都

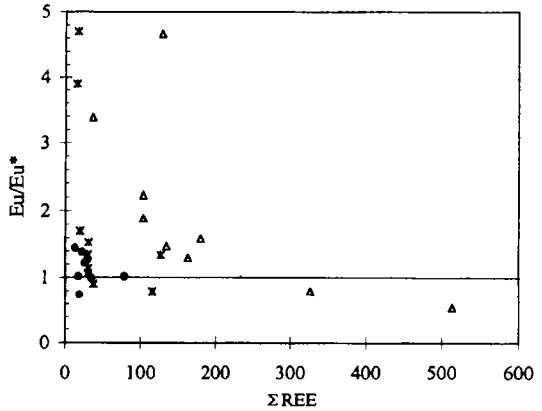


图3 总稀土含量与铕异常的关系

Fig.3 Relationship between Σ REE and Eu anomaly. Eu 为实测数据的球粒陨石标准化值; Eu^* 为 Sm 和 Gd 实测值球粒陨石标准化后的平均值(图例同图 1)。

辉石岩捕虏体常含石榴子石, Σ REE 含量由几 $\mu\text{g/g}$ 至几十 $\mu\text{g/g}$, 轻重稀土比值更小, 铕异常很弱, 反映了该类岩石斜长石中稀土元素贡献相对前两类少。稀土分布曲线型式有轻稀土富集型、平缓型、轻稀土亏损型。曲线形式与矿物组合密切相关。轻稀土亏损的样品含石榴子石, 尖晶石二辉岩和单斜辉石岩表现轻稀土富集的特点, 二辉岩未见明显轻重稀土分馏。辉石岩的稀土分布曲线型式的差异可能反映了其母岩浆的多源性, 也可能反映了岩浆演化的差异。

4.2.2 不相容元素

三类捕虏体不相容元素含量差别很大。在原始地幔标准化图中(图 4), 长英质麻粒岩和镁铁质麻粒岩曲线显示了样品之间相对较为一致的随不相容性的降低不相容元素均一化值降低的趋势, 而辉石岩则显示了样品之间较大的曲线型式差异。长英质麻粒岩多数出现 Th、Nb、Ta、P 的亏损, Zr 由弱

有。大部分样品不相容元素随其不相容性的降低无明显分异。

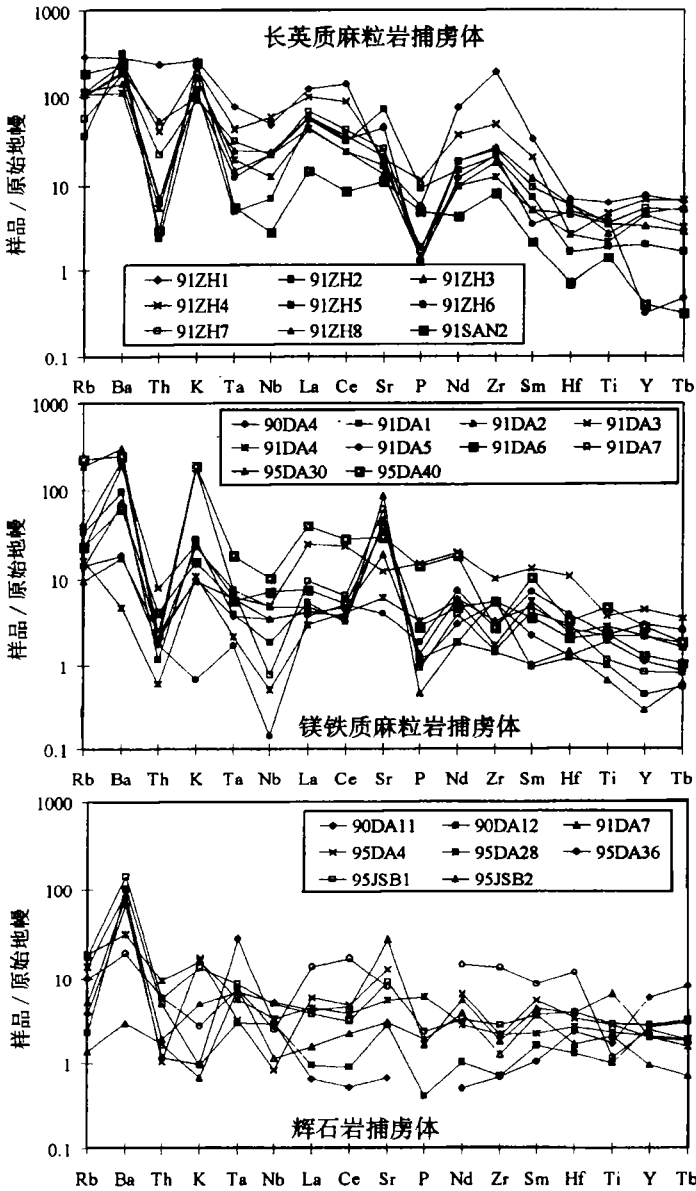


图4 样品原始地幔标准化图解

Fig.4 Primary mantle-normalized incompatible element patterns

5 讨论

5.1 下地壳及壳幔过渡带的认识

地球的圈层结构已得到公认,但作为壳幔分界的莫霍面的性质却一直是人们的争论

焦点。有人认为是岩石相变界面,也有人认为是构造界面。根据现有的地球物理、岩石学及地球化学资料,莫霍面是一个复杂的具有一定深度的带,它可能是清晰的,也可能是模糊不清^[12]。

陈绍海^[10]获得了大量的本区捕虏体岩石学温压资料。本文样品只是其中的一部分。根据陈绍海^[10]的资料,汉诺坝地区的下地壳主要由二辉麻粒岩组成,长英质和苏长质麻粒岩也可能是下地壳的组成岩石,下地壳内也会含尖晶石二辉橄榄岩层,主要位于 32—35km 之间。壳幔边界约位于 42km 处。辉石岩(包括含 / 不含尖晶石、石榴子石的辉石岩)的分布范围很宽,既可以位于下地壳(二辉石岩、尖晶石二辉岩),也可以位于上地幔上部(尖晶石二辉岩、石榴石二辉岩)。但大部分辉石岩位于上地幔,主体分布范围比麻粒岩深。不同矿物组合的辉石岩的空间分布也存在差别。从总体上看,石榴石辉石岩最深,尖晶石辉石岩次之,二辉石岩相对前两者最浅。可见,从下地壳至上地幔上部,岩石类型的变化不是截然的,而是一种复杂的渐变关系。简单地将位于壳幔边界附近的样品归于下地壳或上地幔不利于全面了解壳幔的相互关系。因此,本文将这些在下地壳下部和上地幔上部都可能存在的样品归于壳幔过渡带。另外,根据二辉橄榄岩、二辉麻粒岩及辉石岩包体的温压估算结果,参考在构造背景上相似的澳大利亚东南部的古地温线,推荐 950℃ 作为壳幔样品的分界线^[10]。与此温度相近的样品可能属于壳幔过渡带(如 91DA7、95DA28、95JSB2),明显大于此温度者可能属于上地幔上部(辉石岩 90DA11、95JSB1?)。需要指出的是,本文所研究样品有的因为矿物组合限制(如长英质麻粒岩)无法给出温压资料,有的未进行温压估算,故温压资料不全。但许多同类型岩石的温压资料统计结果^[10]显示出较大的分布范围。另外需指出的是,本文所研究的辉石岩与麻粒岩样品数目的相对数量以及各类不同矿物组合的辉石岩的样品数目的相对比例不代表作者认为的下地壳岩石相对组成。

陈道公等^[14]所研究的同一地区的辉石岩也有一些可能来自下地壳。

另外,捕虏体的 Nd、Sr 同位素组成及 Sr、Nd、Pb 同位素五维拓扑分析结果表明二辉麻粒岩(主要为镁铁质麻粒岩)和二辉石岩、尖晶石辉石岩、石榴石辉石岩的较大变化范围,显示了其与深度的关系^[15]。二辉石岩 Sr、Nd 同位素组成与二辉麻粒岩变化范围相近,尖晶石辉石岩、二辉麻粒岩、二辉石岩形成一具一定重合部分的由高 Nd 低 Sr 至低 Nd 高 Sr 的较好变化趋势,且它们与石榴石辉石岩存在一共同端,即二辉麻粒岩。共同端的存在表明了它们的源区或演化过程的成因联系。较大的分布范围以及一定部分的重合可能是其不同来源和不同混合作用过程的反映。详细讨论将在另文进行。

5.2 捕虏体成因关系讨论

长英质麻粒岩、镁铁质麻粒岩和辉石岩和稀土元素及不相容元素显示了较明显的规律,即总体上这些元素的含量逐渐减小,轻重稀土元素比值降低,不相容元素随不相容性的降低,其原始地幔比值的减小程度减弱,反映地壳物质加入的一些元素的亏损程度降低。结合捕虏体的空间分布看,这可能反映了深度越大,混合作用越弱。另外,如前所述,同位素数据也表明了这一趋势^[15]。

底垫作用常用来解释下地壳的成因。MgO 含量和变化对岩浆演化很敏感。图 5 中长

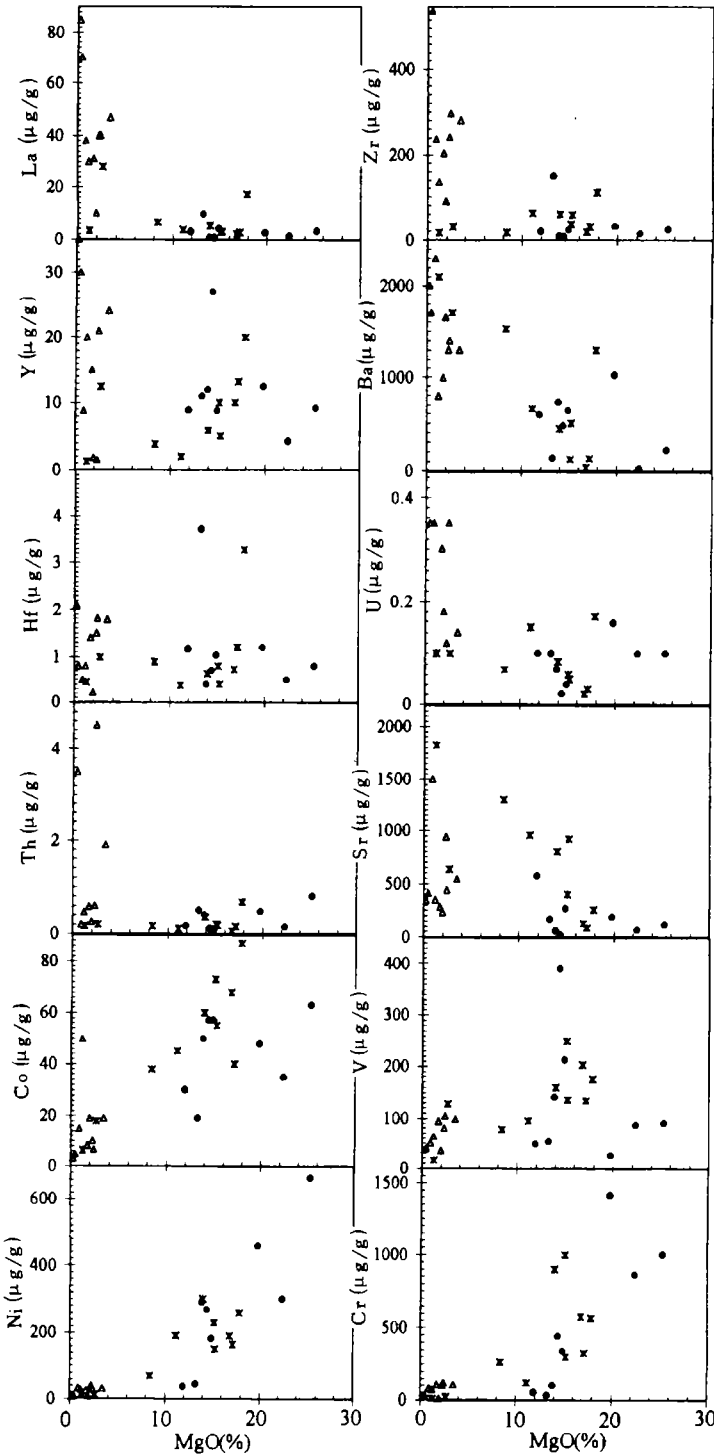


图5 微量元素与MgO的协变关系

Fig.5 Relationships between MgO and trace elements

部分样品某些元素含量特高，未在图的范围內；图例同图1。

英质麻粒岩和辉石岩的MgO与不相容元素未见相关性。在不考虑个别样品时，镁铁质麻粒岩的MgO与La、Y、Ba、Sr之间存在一定的相关性，而与Zr、Hf、Ba、Th之间则未见相关性。然而，镁铁质麻粒岩与辉石岩的MgO与相容元素之间的相关性则明显得多(辉石岩的MgO与V之间无相关性)，长英质麻粒岩MgO与Ni、V、Cr也具有一定的相关性。

MgO与不相容元素的关系提示了捕虏体可能为不同成因。但MgO与相容元素之间较好的相关性却又暗示捕虏体存在成因上的联系。笔者认为，这些捕虏体的成因是复杂的。同一类型捕虏体也有不同的成因。部分捕虏体可能为不同成因，部分捕虏体可能由相同的母岩浆演化而成。MgO与相容元素和不相容元素关系的对比可能反映了底垫岩浆演化过程中受到了组成不均匀的外界物质混染。这种混染对不相容元素与MgO关系的影响比对相容元素大。

另外，同位素组成特征从另一角度证明了混合作用的存在。镁铁质

麻粒岩至少存在三个混染端员。麻粒岩和辉石岩同位素组成的关系证明了层离作用 (delamination) 的存在。

5.3 下地壳及壳幔过渡带组成的讨论

主量元素和微量元素结果表明下地壳组成具有高度不均一性。有关下地壳平均组成

表4 汉诺坝玄武岩中捕虏体加权平均值及前人估算结果对比
 Table 4 Estimated average lower crust composition from different studies

编号 来源	1	2	3	4	5	6	
	文献[16]	文献[17]	文献[18]	文献[19]	文献[20]	汉诺坝捕虏体(本文) (加权平均)	方差
SiO ₂	59.2	54.4	50.3	49.6	54.96	49.34	9.81
TiO ₂	0.9	1	1.3	1.1	0.89	0.59	0.13
Al ₂ O ₃	17.2	16.1	16.6	16.4	14.75	12.33	28.29
FeO	6.1	10.6	12.1	9.4	10.33	8.42	10
MnO	0.12	0.2	0.22	0.16	0.16	0.2	0.01
MgO	3.4	6.3	8	8.5	5.6	12.17	35.06
CaO	5.9	8.5	9	10	7.29	9.76	12.01
Na ₂ O	4	2.8	1.6	2.3	3.06	1.89	0.58
K ₂ O	2.4	0.34	0.45	0.69	1.3	1.48	4.12
P ₂ O ₅	0.27			0.23	0.24	0.09	0.01
冀西北麻粒岩地体							
Cr	45	235	276	315	125	411	118781
Ni	27	135	141	157	75.6	165	12492
Rb	66	5.3	11.8	17.4	30.5	36	2181
Sr	601	230	196	464	460	682	273497
Y	15	19	28	20	11	8.8	36
Zr	181	70	127	98	150	51	11691
Nb	10	6	13	8	8.35	2.9	11.7
Ba	605	150	212	414	360	835	480144
La	29	11	12.3	14.7	17.4	7.75	95
Ce	61	23	28	31.2	32.6	16.2	410
Nd	23	12.7	16	15.7	21.8	9.9	91
Sm	4.9	3.17	4.1	3.8	4.2	2.32	3.1
Eu	1.29	1.17	1.36	1.33	1.2	0.97	0.19
Tb	0.65	0.59	0.79	0.62		0.33	0.05
Yb	1.5	2.2	3.19	2.14	0.96	0.82	0.33
Lu	0.24	0.29		0.32	0.15	0.13	0.01
Hf	5.8	2.1	3.32	3.5		1	0.68
Th	6	1.06	0.54	1.8		0.3	0.97
U	1.25	0.28	0.21	0.7		0.1	0.01
Pb	12	4	3.3	6.8		5.2	23.37

注：1、5为据麻粒岩相地体资料估算；2为据理论地壳增长模式估算；3、4为据捕虏体资料估算(前人资料引自参考文献[16—20])。常量元素单位为mg/g，微量元素单位为μg/g。

的模型已经提出了许多。这些模型或者是基于麻粒岩相地体的资料^[16],或者是基于理论地壳增长模型^[17],或麻粒岩相捕虏体资料^[18,19]。表4列出部分研究者的估算值。一并列入的还有中国北方麻粒岩地体346个主量元素平均值^[20]和冀西北部分基性麻粒岩、中性麻粒岩和酸性麻粒岩微量元素平均值(作者根据文献[18]的资料计算)。同时将本文研究的捕虏体的数据进行加权平均值列入。根据野外观察、岩石学特征和温压估算资料,估计下地壳由90%的镁铁质麻粒岩、8%辉石岩(不包括温度大于950℃的辉石岩)和2%酸性麻粒岩组成,其他岩类属微量。由于镁铁质麻粒岩占权重的90%,因此,这一加权平均值反映的基本是镁铁质麻粒岩的特征。

从主量元素看,基于地体估算的成分明显比基于捕虏体的偏酸性,MgO、FeO、CaO低而K₂O、Na₂O高。中国部分麻粒岩地体平均值大部分介于前人基于捕虏体和麻粒岩相地体的结果之间,与理论计算模式接近,比本文捕虏体偏酸性。中国北方麻粒岩地体平均值中中酸性麻粒岩占较大比重,这是导致其偏酸性的原因。

基于地体的估算结果比基于捕虏体的偏酸性。相应地,其相容元素Cr、Ni的含量也偏低,轻稀土元素和大部分不相容元素偏高,Y、Nb及重稀土元素接近。冀西北麻粒岩相地体微量元素平均值大部分介于四种国外研究结果之间,重稀土元素及钇偏低。本文捕虏体相容元素铬的平均值很高。镍与基于捕虏体的估算结果相近,Rb、Sr和Ba明显偏高。除铅外其余不相容元素明显偏低。在不相容元素原始地幔标准化图中(图6),本文捕虏体出现明显的Th、U、Nb和Hf的负异常和Ba、Sr的正异常。中国北方麻粒岩地体^[20]的结果普遍表现了强烈的钕负异常。这可能是中国北方下地壳的普遍特征。这些特征支持下地壳有强混合作用的观点。

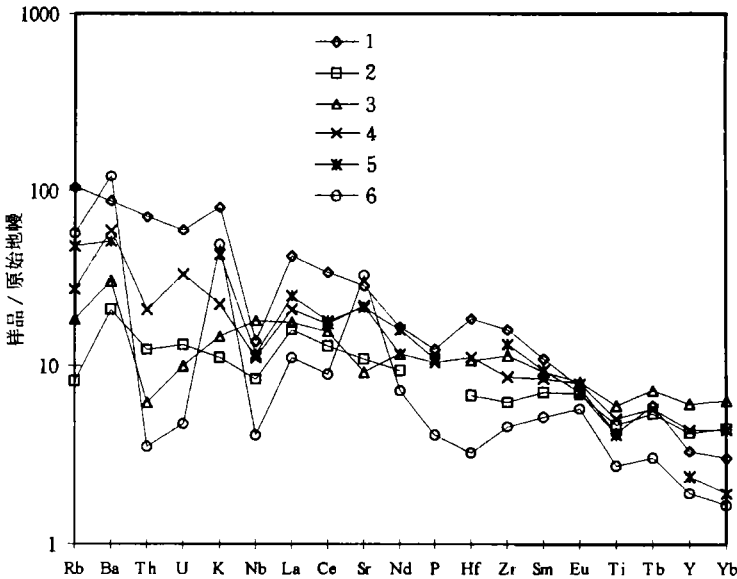


图6 下地壳平均组成及与汉诺坝捕虏体组成对比

Fig.6 Comparison between the estimated average lower crust composition and that of the xenolith in this study

图中1—6见表4。

本文捕虏体的 MgO 高, 而 FeO 未相应增高以及本文某些元素加权平均值的方差很大(如 Cr、Ni、Rb、Sr、Zr、Ba)。后者反映了下地壳组成的高度不均一性, 前者可能反映了本文所设各岩类及各岩类内部样品权重不恰当及样品数量有限。地表所见捕虏体的权重难以准确估计及出露于地表的各岩类的相对比例不一定能代表下地壳的真实组成, 这些都是影响下地壳组成平均值估算的因素。因此, 在弄清下地壳中各岩类组成的相对比例以及下地壳组成是否随时间变化之前, 评价是基于捕虏体还是基于麻粒岩相地体的估算结果更准确是很困难的。

6 结 论

(1) 本区下地壳及壳幔过渡带组成具有高度不均一性。在主量元素、微量元素变化范围及比值、标准化曲线等方面均有很大差别, 反映了捕虏体成因的复杂性。

(2) MgO 与不相容元素无或仅有很弱的相关性。除少数样品外, MgO 与相容元素的相关性较好。笔者认为可用混合作用对不相容元素的影响较大, 而对不相容元素影响较小来解释。

(3) 捕虏体加权平均值反映了由其所代表的下地壳及壳幔过渡带比基于地体资料估算的下地壳组成偏基性。但由于样品数量有限, 各岩类的权重难以估计, 这种估算尚有待进一步研究。

(4) 部分样品的元素之间虽表现了相关性, 但相关性不很好。捕虏体常具的 Nb、Ta、Hf 强亏损和中国北方麻粒岩地体普遍存在的铌亏损, 可能反映了下地壳强烈的混合作用。

工作过程中得到刘若新研究员多方指导, 谢漫泽教授参加部分野外及岩矿工作。谨致谢意。

参 考 文 献

- 1 Song Y, Frey F A, Zhi X. Isotopic characteristics of Hannuoba basalts, eastern China: Implications for their petrogenesis and the composition of subcontinental mantle. *Chem Geol*, 1990, 88: 35—52.
- 2 Zhi X, Song Y, Frey F A *et al.* Geochemistry of Hannuoba basalts, eastern China: Constraints on the origin of continental alkalic and tholeiitic basalt. *Chem Geol*, 1990, 88: 1—33.
- 3 解广袁, 王俊文. 汉诺坝玄武岩及其超镁铁岩捕虏体的地球化学. 见: 刘若新主编. 中国新生代火山岩年代学和地球化学. 北京: 地震出版社, 1992. 149—170.
- 4 从柏林, 张儒瑗. 汉诺坝玄武岩及其超镁铁质岩捕虏体的成因岩石学研究. *中国科学 B 辑*, 1982, (12): 1109—1121.
- 5 Song Y, Frey F A. Geochemistry of peridotite xenoliths in basalts from Hannuoba, Eastern China: Implications for subcontinental mantle heterogeneity. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53: 97—113.
- 6 谢漫泽, 冯家麟, 张改兰等. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩捕虏体的发现. *河北地质学院学报*, 1993, 16(6): 587—593.
- 7 樊祺诚, 刘若新. 汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕虏体. *科学通报*, 1996, 41(3): 235—238.
- 8 Chen S, Sun M, Zhou X *et al.* Pyroxenitic and granulite xenoliths in Tertiary Hannuoba basalts, Hebei

- Province: Petrology and P-T estimation. 30th IGC Abst., 1996, 1: 122.
- 9 Zhou X, Sun M, Chen S *et al.* Granulite xenoliths vs. terrains in an craton: A case study of lower crust beneath North China. Abstract of V. M. Goldsmidt Conference, 1996, 1: 697.
 - 10 陈绍海. 华北克拉通北缘下地壳-上地幔的组成与结构及壳幔相互作用——汉诺坝玄武岩中深源岩石捕虏体成因岩石学研究: [学位论文]. 北京: 中国科学院地质研究所, 1996.
 - 11 Wells P R A. Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contrib Mineral Petrol*, 1977, 62: 129—139.
 - 12 Harley S L. An experimental study of the partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene. *Contrib Mineral Petrol*, 1984, 86: 359—373.
 - 13 Rudnick R L. Xenoliths—samples of lower continental crust. In: Fountain D M *et al.* eds. *The Continental Lower Crust*. [s.l.]: Elsevier, 1992. 269—316.
 - 14 陈道公, 支霞臣, 李彬贤等. 汉诺坝玄武岩中辉石岩类包体的 Nd、Sr、Pb 同位素及其成因信息. *地球化学*, 1997, 26(1): 1—11.
 - 15 张国辉. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩类和辉石岩类捕虏体地球化学——兼论壳幔相互作用: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院地质研究所, 1997.
 - 16 Weaver B L, Tarney J. Empirical approach to estimating the composition of the continental crust. *Nature*, 1984, 310: 575—577.
 - 17 Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. London: Blackwell, 1985. 1—312.
 - 18 Rudnick R, Taylor S R. The composition and petrogenesis of the lower crust: A xenolith study. *J Geophys Research*, 1987, 92: 13981—14005.
 - 19 Kempton P D, Harmon R S, Hawkesworth C J *et al.* Petrology and geochemistry of lower crustal granulites from the Geronimo volcanic Field, southeastern Arizona. *Geochim Cosmochim Acta*, 1990, 54: 3401—3426.
 - 20 沈其韩, 徐惠芬, 张宗清等. 中国早前寒武纪麻粒岩. 北京: 地质出版社, 1992. 32—68.

HIGHLY CHEMICAL HETEROGENEITY IN THE LOWER CRUST AND CRUST-MANTLE TRANSITIONAL ZONE: GEOCHEMICAL EVIDENCES FROM XENOLITHS IN HANNUOBA BASALT, HEBEI PROVINCE

Zhang Guohui^① Zhou Xinhua^① Sun Min^② Chen Shaohai^① Feng Jialin^③

(^① *Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

(^② *Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, Hong Kong*)

(^③ *Hebei College of Geology, Shijiazhuang 050031*)

Abstract

The major and trace element data of granulite and pyroxenite xenoliths, which are entrained in Hannuoba basalt, Hebei Province, North China, suggest the highly chemical heterogeneity in the lower crust and crust-mantle transitional zone. There is no or only poor linear correlation between MgO and incompatible elements. Whereas a bit remarked correlations are observed between MgO and most compatible elements. The geochemical characteristics suggest that the strong and multiple mixing processes may have occurred universally both in the lower crust and crust-mantle transitional zone. The weighed average composition of xenoliths shows a more mafic composition of the lower crust than that estimated from granulite data, which may imply the difference in the genesis.

Key words: granulite xenolith, pyroxenite xenolith, chemical heterogeneity, lower continental crust, Hannuoba