

长白山地区新生代火山岩及其幔源包体的 矿物化学及矿物包裹体研究

吴才来 李兆薰 尚如相

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

关键词 矿物化学 包裹体 熔体结构 激光拉曼光谱 长白山

摘要 长白山地区新生代火山岩主要为玄武岩类、粗面岩类和碱性流纹岩类。其中奶头山期碱性玄武岩中含有幔源的尖晶石二辉橄榄岩包体和辉石岩包体。幔源包体及不同期次火山岩的主要矿物是橄榄石、单斜辉石、斜方辉石、尖晶石、斜长石、碱性长石。不同寄主岩石中的矿物组成及其化学成分具有一定的变化,反映了岩浆分异演化的特征;矿物及火山熔岩中的包裹体成分及玻璃熔体结构的激光拉曼光谱分析结果表明,地下深处的岩浆含有较多的挥发分,岩浆上升过程中发生了强烈的出溶作用;岩浆由起源经分异演化上升到地壳浅部直至喷发,幔源的挥发分减少,而浅成或壳源的挥发分增多,特别是在岩浆喷发过程中,地下水或大气成分起了重要作用。

长白山地区新生代火山活动十分强烈,先后喷发出了碱性玄武岩类、粗面岩类和碱性流纹岩类。在黄松浦和奶头山等地的奶头山期碱性玄武岩中发现大量的尖晶石二辉橄榄岩包体及辉石岩包体。包体及火山岩的矿物中存在许多熔融包裹体和气相包裹体。本文在前人工作的基础上^{〔1-5〕},结合作者博士后期间对该区火山岩岩石学的研究^①,利用电子探针和激光拉曼光谱对本区幔源包体和火山岩中主要造岩矿物及其中的包裹体进行了详细的研究,获得了岩浆形成时的物理化学条件及岩浆作用过程中挥发分的变化等成因信息。

1 新生代火山喷发简述

长白山地区位于华北板块东缘,日本海西缘。区域构造位置为松辽盆地与日本海弧后盆地之间的北北东向隆起带与桦甸镇—朝鲜金策北西向火山断裂带的交汇处(图1)^{〔1〕}。

新生代以来,区内地壳运动以垂直上升为主,经历长时间的风化剥蚀作用,区域地面被夷平化。到渐新世末,区内构造复活,形成了NNE向马鞍山—三道白河拗陷带和长白镇—奶头山—甑峰山拗陷带,火山活动强烈,马鞍山期喷出了大量玄武岩。中新世—上新世的甑峰山期、奶头山期和军舰山期,火山继续活动,喷出了大量的碱性玄武质熔岩,形成了广阔的玄武岩台地。更新世的白头山一、二、三、四期和气象站期,以天池为中心,火山喷发出大量的粗面质和碱性流纹质熔岩,覆盖在玄武岩台地之上,形成了巨大的底部直径为30km、相对

① 吴才来,吉林省长白山地区新生代火山岩岩石学及火山岩浆作用动力学研究,博士后出站研究报告。
本文于1997年4月收到,1997年6月改回。

高程为 1000m 的白头山火山锥体。全新世以来,火山活动再次进入高潮,在冰场期、白云峰期和八卦庙期喷出了大量的粗面质及碱性流纹质火山碎屑岩、火山灰。

2 矿物化学

④) 橄榄石 橄榄石是幔源包体——尖晶石二辉橄榄岩的主要矿物,常和斜方辉石、单斜辉石和尖晶石共生。部分包体中的橄榄石边部常出现破碎边缘,其组成为破碎的不规则状橄榄石和熔融的玻璃质,反映其为部分熔融残留的产物。玄武岩及粗面岩和部分碱性流纹岩中,橄榄石以斑晶的形式产出,且大多遭到熔蚀。橄榄石的电子探针分析结果见表 1。

由表 1 可见,从尖晶石二辉橄榄岩→玄武岩→粗面岩→碱性流纹岩,橄榄石的 SiO_2 和 MgO 含量由高到低,即 SiO_2 由 40.70% (40.16%—41.45%)→38.66% (37.12%—39.71%)→32.16%→29.16%; MgO 由 48.32% (47.70%—49.14%)→39.28% (32.48%—42.70%)→11.56%→0.705% (0.644%—0.765%); 而 FeO 的含量由低到高,即 9.61% (9.20%—9.98%)→20.51% (16.01%—28.00%)→52.64%→66.92% (66.11%—67.68%)。从 F_{O} 值看,包体中的橄榄石为镁橄榄石 (F_{O} : 89.61—90.48),玄武岩中的橄榄石为贵橄榄石—透铁橄榄石 (F_{O} : 67.20—82.28),粗面岩中的橄榄石为 Mg、Fe 橄榄石 (F_{O} : 27.30),而碱性流纹岩中的则为铁橄榄石 (F_{O} : 1.66—1.92)。

⑤) 单斜辉石 幔源包体及各类火山岩中均含有单斜辉石。在幔源包体中,单斜辉石与斜方辉石、橄榄石构成三联点结构,反映了高压下矿物的重结晶特点。奶头山碱性橄榄玄武岩中,辉石岩包体中的单斜辉石包含了圆形斜长石,而斜长石中又包含了更细小的单斜辉石(钙铁辉石),反映了矿物形成的多世代性,同时也说明这种类型包体系由玄武质岩浆早期结晶形成的。在玄武质及粗面质和碱性流纹质火山岩中,单斜辉石多呈斑晶状产出。电子探针分析结果表明,不同类型岩石中,单斜辉石的化学成分有一定的变化(表 2),即从幔源包体→玄武岩→粗面岩→碱性流纹岩, MgO 由高到低,即由 15.62% (14.5779%—16.6823%)→13.77% (12.9613%—14.2455%)→8.73% (8.1967%—9.26%)→1.32

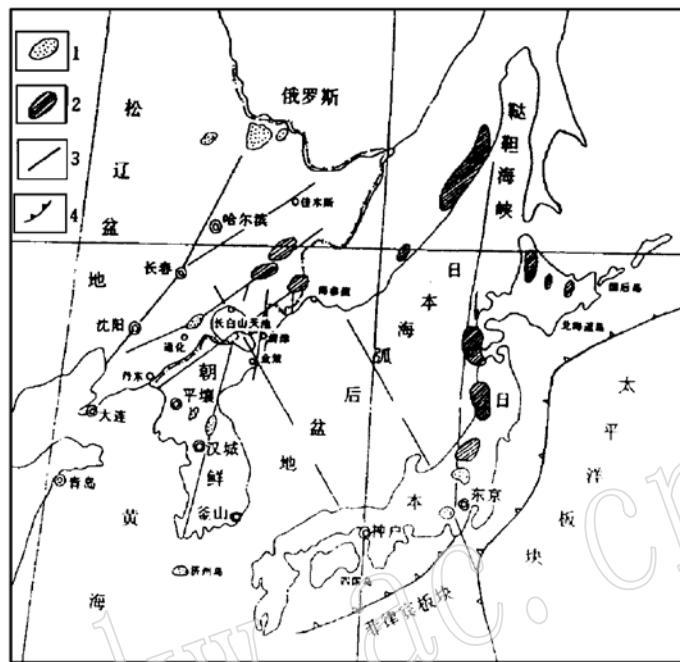


图 1 长白山区域构造及新生代火山岩分布示意图

Fig. 1 Regional tectonics of Changbai Mountain area and distribution of Cenozoic volcanic rocks

1—第四纪火山岩; 2—第三纪火山岩; 3—断裂; 4—海沟

表 1 橄榄石的电子探针分析结果及阳离子系数
Table 1 Electron microprobe analyses and cation coefficients of olivine

时代	奶 头 山 期										白头山期	气象站期	冰场期	
岩性	玄武岩		包体		包体		包体		玄武岩		玄武岩	碱性流纹岩		
成分	NTS14-2	2-1-OI	NTS14-2	2-4-OI	NTS14-2	1-4-OI	NTS14-7	1-3-OI	NTS14-3	1-2-OI	NTS13-2	3-2-OI	1-1-OI	1-2-OI
SiO ₂	39.7098	40.4961	41.4499	40.8504	40.4462	40.156	40.8504	40.156	40.4462	37.118	32.156	29.2482	39.0674	
TiO ₂	0.0051	0.0781	0	0.0168	0.0278	0.0437	0.0168	0.0437	0.0278	0.0218	0.0495	0.031	0	
Al ₂ O ₃	0.057	0	0.0083	0	0	0	0.0098	0	0	0.0605	0	0	0	
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0252	0	0.018	0	
MgO	42.7034	48.5058	48.3721	49.4353	47.9044	47.695	49.4353	47.695	47.9044	32.4849	11.5608	0.7651	0.6442	
CaO	0.25	0.0896	0.0217	0.1248	0.0354	0.0157	0.1248	0.0157	0.0354	0.2961	0.3126	0.186	0.4569	
MnO	0.2133	0.1491	0.2118	0.1703	0.1533	0.1496	0.1703	0.1496	0.1533	0.3141	2.6072	2.2916	2.5172	
FeO	17.4786	9.9807	9.5225	9.2004	9.6308	9.7251	9.2004	9.7251	9.6308	27.9972	52.6413	67.6811	66.1666	
NiO	0.1256	0.4133	0.4456	0.4153	0.3282	0.3652	0.4153	0.3652	0.3282	0.1174	0.0512	0.0013	0.1084	
Na ₂ O	0.0232	0.0248	0	0	0.0172	0.0118	0	0.0118	0.0172	0.0514	0.0236	0.0448	0.019	
K ₂ O	0.037	0.0037	0.009	0.0078	0.0018	0	0.0078	0	0.0018	0	0	0	0.0246	
total	100.6037	99.7413	100.0408	100.031	98.5452	98.173	100.031	98.173	98.5452	98.804	99.4022	100.267	99.0044	
Si	1.0028	0.9978	1.0138	1.0019	1.0058	1.0035	1.0019	1.0035	1.0058	1.0028	1.0029	0.9874	0.9923	
Ti	0.0001	0.0014	0	0.0003	0	0.0008	0.0003	0.0008	0	0.0008	0.0012	0.0008	0	
Al	0.0017	0	0.0002	0.0003	0.0008	0.0003	0.0003	0.0003	0.0008	0.0019	0	0	0	
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0005	0	0.0005	0	
Mg	1.6074	1.7815	1.7634	1.7918	1.7756	1.7765	1.7918	1.7765	1.7756	1.6285	0.5374	0.0385	0.0328	
Ca	0.0068	0.0024	0.0006	0.0033	0.0009	0.0004	0.0033	0.0004	0.0009	0.0086	0.0104	0.0067	0.0167	
Mn	0.0046	0.0031	0.0044	0.0035	0.0032	0.0032	0.0035	0.0032	0.0032	0.0145	0.0689	0.0655	0.0728	
Fe	0.3691	0.2057	0.1948	0.1882	0.2003	0.2032	0.1882	0.2032	0.2003	0.3442	1.3731	1.9107	1.889	
Ni	0.0026	0.0082	0.0088	0.0082	0.0066	0.0073	0.0082	0.0073	0.0066	0.0026	0.0013	0	0.003	
Na	0.0011	0.0012	0	0.0002	0.0008	0.0006	0.0002	0.0006	0.0008	0.0027	0.0014	0.0029	0.0013	
K	0.0012	0.0001	0.0003	0.0002	0.0001	0	0.0002	0	0.0001	0	0	0	0.0011	
total	2.9974	3.0014	2.9862	2.9978	2.9942	2.9959	2.9978	2.9959	2.9942	2.9913	0.9966	3.0131	3.0089	
Fo	81.41	89.62	89.88	90.48	89.76	89.61	89.48	89.61	89.76	82.58	27.30	1.92	1.66	
Fa	18.7	10.35	9.93	9.51	10.12	10.25	9.51	10.25	10.12	17.45	69.74	95.15	95.51	

表2 单斜辉石的电子探针分析结果及阳离子系数
Table 2 Electron microprobe analyses and cation coefficients of clinopyroxene

成分	样号	NTS14-2 /2-3-CPx	NTS14-2 /1-1-CPx	NTS14-2 /1-2-CPx	NTS14-4 /1-2-CPx	NTS13-2 /2-1-CPx	NTS13-2 /2-3-CPx	NTS13-2 /1-1-CPx	NTS13-2 /3-1-CPx	BC12 /21-CPx	BGM3 /2-1-CPx	QXZ9-2 /1-2-CPx	BTS10-2 /2-1-CPx
SiO ₂		48.4136	52.3977	53.2762	51.4382	52.224	51.6714	49.5531	50.2665	50.2787	50.1532	47.568	47.513
TiO ₂		2.5509	0.4389	0.2592	0.5393	0.361	0.5948	1.3632	1.2993	0.3544	0.5083	0.3592	0.9871
Al ₂ O ₃		4.7085	6.1508	3.2314	7.1418	3.5134	2.8961	3.9855	3.6991	0.498	0.9338	0.2238	0.5192
Cr ₂ O ₃		0.1012	0.6779	0.8377	0.5878	0.8787	0.9358	0.4572	0.4153	0.0352	0	0.0472	0.0646
Fe ₂ O ₃		2.2859	0.5467	0.5229	0.5663	0.157	0.8263	1.5242	1.4376	0.5819	1.6609	3.0724	2.2413
MgO		12.9813	14.7928	16.6823	14.5779	16.419	15.6154	14.0758	14.2455	9.26	8.1967	0.9118	1.7285
CaO		22.1476	21.1653	23.8804	19.5098	22.356	22.7826	22.2153	22.1975	15.5124	20.5189	19.0416	17.8356
MnO		0.1247	0.0824	0.0432	0.1772	0.0037	0.0387	0.1247	0.0733	1.549	0.6904	0.9798	1.2662
FeO		5.9129	2.1031	2.0202	2.7753	2.8232	3.2684	5.0362	5.4262	20.3318	17.0155	26.2055	25.9477
NiO		0	0.0499	0.0795	0.0212	0	0.0087	0	0	0.0033	0	0	0.0877
Na ₂ O		0.5449	1.5817	0.3149	1.7258	0.4397	0.4283	0.3781	0.4197	0.4387	0.3912	0.8694	0.9442
K ₂ O		0.0324	0	0.0035	0.0125	0	0	0.0051	0	0.0406	0.0009	0	0.0258
total		99.8131	99.9872	101.4512	99.0732	99.176	99.0665	98.7182	99.48	98.884	100.0698	99.2688	99.1608
Si		1.8113	1.8953	1.9166	1.8767	1.9149	1.9105	1.859	1.8714	1.9865	1.9541	1.9692	1.9594
Ti		0.0718	0.0119	0.007	0.0148	0.01	0.0165	0.0385	0.0364	0.0105	0.0149	0.0112	0.0306
Al		0.2076	0.2622	0.137	0.3071	0.1518	0.1262	0.1762	0.1623	0.0232	0.0429	0.0109	0.0252
Cr		0.003	0.0194	0.0238	0.017	0.0255	0.0274	0.0136	0.0122	0.0011	0	0.0015	0.0021
Fe		0.0644	0.0149	0.0142	0.0155	0.0043	0.023	0.043	0.0403	0.0173	0.0487	0.0957	0.0696
Mg		0.7239	0.7975	0.8945	0.7928	0.8973	0.8606	0.7871	0.7905	0.5453	0.476	0.0563	0.1062
Ca		0.8878	0.8202	0.9204	0.7627	0.8783	0.9025	0.8929	0.8854	0.6567	0.8566	0.8446	0.788
Mn		0.004	0.0025	0.0013	0.0055	0.0001	0.0012	0.004	0.0023	0.0518	0.0228	0.0344	0.0442
Fe		0.1853	0.0636	0.0608	0.0847	0.0866	0.1011	0.158	0.1689	0.6718	0.5544	0.9073	0.8949
Ni		0	0.0015	0.0023	0.0006	0	0.0003	0	0	0.0001	0	0	0.0029
Na		0.0395	0.1109	0.022	0.1221	0.0313	0.0307	0.0275	0.0303	0.0336	0.0296	0.069	0.0755
K		0.0015	0	0.0002	0.0006	0	0	0.0002	0	0.002	0	0	0.0014
total		+4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Wo		49.30	48.71	49.04	46.35	47.16	48.38	48.48	47.93	34.10	44.85	45.84	42.98
En		40.20	47.36	47.66	48.18	48.19	46.13	42.73	42.80	28.32	24.92	3.05	5.79
Fs		10.51	3.93	3.31	5.48	4.65	5.48	8.79	9.27	37.58	30.22	51.11	52.22

表4 长石的电子探针分析结果及阳离子系数

Table 4 Electron microprobe analyses and cation coefficients of feldspar

样号 成分	NTS14-2 /2-2-PI	NTS13-2 /2-2-PI	BTS6-1 /1-2-PI	BTS10-1 /2-1-PI	BTS10-2 /1-2-PI	BTS10-2 /2-2-PI	QXZ9-2 1-3-PI	QXZ8-1 2-1-PI(p)	QXZ8-1 1-2-PI	BC12 /1-PI(p)	BC12 1-2-PI(b)
SiO ₂	53.6404	53.0316	66.8127	67.1415	67.3805	66.397	66.5859	66.3437	66.1322	66.8553	63.6124
TiO ₂	0.2045	0.1608	0.0753	0.0658	0.0219	0.0468	0.0345	0.0125	0	0.0268	0.1295
Al ₂ O ₃	28.6053	29.3097	18.6019	18.5786	19.0828	18.813	18.4411	18.6896	18.2197	18.7476	21.507
Cr ₂ O ₃	0.0516	0	0.0281	0	0	0	0	0	0	0.0657	0.0328
MgO	0.0915	0.0648	0.0164	0.0303	0.0033	0.0125	0.0125	0.0092	0.0007	0.0124	0
CaO	11.1301	11.0813	0.0317	0.044	0.1253	0	0.0268	0	0	0.3692	3.0248
MnO	0.0181	0.013	0	0.0033	0.0712	0	0	0	0	0.0122	0.0085
FeO	0.5586	0.6316	0.6072	0.3984	0.2538	0.3724	0.4687	0.3908	0.6629	0.2255	0.4946
NiO	0	0	0	0.002	0	0.0108	0.0362	0	0	0.0562	0.0122
Na ₂ O	4.6488	4.7344	6.8917	7.3121	6.8057	6.8555	6.8094	6.8532	6.8048	6.0789	7.7386
K ₂ O	0.6076	0.4199	6.777	6.4375	6.6792	2.9971	6.9175	6.7251	6.4378	7.6071	2.9004
total	99.5564	98.4469	99.8421	100.0134	100.4236	0.0016	99.3326	99.0241	98.2581	100.0569	99.4607
Si	2.443	2.4422	2.999	3.0032	2.998	1.0009	3.0043	2.9982	3.0106	2.9984	2.8509
Ti	0.007	0.0056	0.0025	0.0022	0.0007	0	0.0012	0.0004	0	0.0009	0.0044
Al	1.5354	1.5365	0.9841	0.9794	1.0007	0.0008	0.9806	0.9955	0.9775	0.991	1.136
Cr	0.0019	0	0.001	0	0	0	0	0	0	0.0023	0.0012
Mg	0.0062	0.0044	0.0011	0.002	0.0002	0	0.0008	0.0006	0	0.0008	0
Ca	0.5431	0.5468	0.0015	0.0021	0.006	0.0141	0.0013	0	0	0.0177	0.1452
Mn	0.0007	0.0005	0	0.0001	0.0027	0.0004	0	0	0	0.0005	0.0003
Fe	0.0213	0.0243	0.0228	0.0149	0.0094	0.6	0.0177	0.0148	0.0252	0.0085	0.0185
Ni	0	0	0	0.0001	0	0.3721	0.0013	0	0	0.002	0.0004
Na	0.4105	0.4227	0.5998	0.6341	0.5871	4.987	0.5957	0.6006	0.5286	0.6724	0.1658
K	0.0353	0.0247	0.388	0.3673	0.3791	6.4629	0.3981	0.3877	0.3739	0.4352	4.9953
total	5.0043	5.0077	4.9998	5.0056	4.984	98.971	5.0011	4.9977	4.9879	4.9859	68.37
Ab	41.51	42.52	60.62	63.19	60.39	61.72	59.86	60.77	61.64	53.85	16.86
Or	3.57	2.48	39.22	36.60	38.99	38.28	40.01	39.23	38.36	44.34	
An	54.92	55	0.15	0.21	0.61	0	0.13	0	0	1.81	14.77

0.9118%—1.7285%); 而 FeO_T 由低到高, 即由 3.12% (2.6498%—4.0947%) → 7.21% (6.5604%—8.2078%) → 19.80% (18.6764%—20.9137%) → 28.73% (28.189%—29.2779%)。根据单斜辉石 W_o 、 En 、 Fs 值可知, 包体中的单斜辉石均属透辉石, 玄武岩中的为透辉石和次透辉石, 粗面岩中的属铁普通辉石, 碱性流纹岩中的属钙质辉石。

§) 斜方辉石 斜方辉石主要分布在幔源包体中, 其电子探针分析结果见表 3。由表可见, 斜方辉石主要富 Mg。与单斜辉石的化学成分相比, Si 高, Ca 低。根据斜方辉石的 W_o 、 En 、 Fs 值, 按 Deer 等 (1978) 斜方辉石分类方案^[6], 均属顽火辉石。

4) 长石 斜长石主要分布在玄武岩中, 多为拉长石, 其中玄武岩的单斜辉石中包含的斜长石牌号略高, 系早期结晶的产物。其它类型火山岩中的长石主要为碱性长石, 呈斑晶状产出。根据电子探针分析结果 (表 4), 在长石的分类图上投点落入歪长石区^[7]。

5) 尖晶石 尖晶石主要分布在幔源包体中, 呈他形不规则的长条形并具有圆滑的边缘, 产于橄榄石和斜方辉石颗粒之间, 显示出高温高压状态下的塑性变形特征。电子探针分析其化学成分 ($W_B\%$) 为: SiO_2 0.0766, TiO_2 0.1361, Al_2O_3 51.674, Cr_2O_3 15.19, Fe_2O_3 2.6498, MgO 19.82, CaO 0.0145, MnO 0.029, FeO 9.296, NiO 0.317, $Cr/(Cr+Al)$ 比值为 16.5, 应属低铬尖晶石^[8]。

3 矿物形成的温度压力

根据单斜辉石和斜方辉石的化学成分, 利用 Mercier (1980) 的温压计^[9], 求得包体及玄武岩结晶时的温度和压力 (表 5、6)。

表 5 单斜辉石温压计计算结果

Table 5 Geothermobarometer calculations of clinopyroxene

样号	NTS14-2 2-3-CPx	NTS14-2 1-1-CPx	NTS14-7 1-2-CPx	NTS14-4 1-2-CPx	NTS13-2 2-1-CPx	NTS13-2 2-3-CPx
岩性	玄武岩	包体	包体	包体	包体	包体
T (°C)	955.38	914.26	883.80	1040.25	986.54	944.93
P (0.1GPa)	16.52	11.86	10.60	19.20	16.97	14.77
T^* (°C)	1165.11	1180.78	1148.76	1190.94	1151.25	1144.85
样号	NTS13-2 1-1-CPx	NTS13-2 3-1-CPx	BC12 2-1-CPx	BGM-3 2-1-CPx	QXZ9-2 1-2-CPx	BTS10-2 2-1-CPx
岩性	玄武岩	玄武岩	粗面质	熔结凝灰岩	粗面岩	碱性流纹岩
T (°C)	968.93	991.68				
P (0.1GPa)	16.70	19.69				
T^* (°C)	1156.90	1153.55	1112.54	1117.42	1116.39	1117.21

注: T^* 系按马鸿文 (1994) 的单斜辉石温度计计算的温度。

表 6 斜方辉石温压计计算结果

Table 6 Geothermobarometer calculations of clinopyroxene

样号	NTS14- 2 1-2	NTS14- 2 1-3	NTS14- 7 1-1	NTS14- 7 1-4	NTS14- 3 1-4	NTS14- 3 1-1
岩性	尖晶石二辉橄榄岩包体					
T (°C)	949.23	907.31	949.06	935.92	1040.03	1100.86
P (0.1GPa)	20.64	17.85	16.84	18.04	20.91	24.93

根据包体形成的压力计算值,以1GPa等于0.33 km推算,则由表5可见,玄武质岩浆来源的深度相当于55—65km,温度为945—967℃,而幔源包体的来源深度相当于35—63km,温度为884—1040℃。以玄武岩的CP_x形成时的压力差作为岩浆房的厚度估计,岩浆房的厚度约为10km,因此包体既有在岩浆房形成过程中的残余体,也有岩浆房上部的地幔岩石碎块捕虏体,还有在岩浆房中结晶形成的堆积岩碎块(NTS13-2)——辉石岩包体(相当于II型)。由表6得出,幔源包体的来源深度为56—82km,温度为907.31—1100.86℃。可见,用OP_x温压计计算的温、压值高于CP_x的计算值,但结合火山地质学研究^①,可以确定包体的最大来源深度为82km,而原生的寄主玄武质岩浆来源深度大于82km。结合CP_x温压计计算结果,可以认为,本区原始玄武质岩浆起源深度为大于82km的上地幔,而原生岩浆上升聚集,在深度为65—55km范围内形成了深位岩浆房。

4 矿物包裹体

4.1 包裹体类型及其特征

本区幔源包体和不同时代火山岩的矿物中,含有丰富的包裹体,按包裹体的相组成可分为三类^[10],即①玻璃相+气相,②玻璃相+子晶+气相,③气相包裹体,它们的一般特征分叙如下:

1)玻璃相+气相包裹体 主要分布在幔源包体的橄榄石和粗面岩及碱性流纹岩的长石斑晶中。包裹体主要呈圆形、椭圆形或变形的椭圆形,一般为3—30 μ ,气泡常呈圆形分布在包裹体玻璃相中间。气体组成为CO₂、H₂S、SO₂、CH₄、H₂、CO、C₂H₄、C₂H₆、S₃H₆、N₂。不同寄主矿物中的包裹体气相成分及其含量不同,但CO₂、H₂S、SO₂是气相的主要成分。

2)玻璃相+子晶+气相包裹体 这类包体较少,主要见于白头山二期粗面岩长石斑晶中。包体呈近三角形的圆形,大小为6—14 μ ,气相呈圆形位于玻璃相中间。同时,玻璃相中还有长方形矿物子晶体。该类型包裹体中气相成分不同于其它类型包裹体中的气相,主要为碳氢化合物CH₄、C₂H₄、C₃H₆和N₂、H₂。

3)气相包裹体 这类包裹体主要分布在全新世各期火山岩玻璃中。包裹体均呈椭圆形,个体及成分变化较大。一般大小变化于3—35 μ 之间,气相成分主要为CO₂、CO、H₂O、SO₂、H₂S、CH₄、N₂和H₂。

4.2 火山岩浆作用过程中挥发分的变化

本区幔源包体及不同时代火山岩中矿物岩浆包裹体和气体包裹体的气体成分拉曼光谱分析结果见表7。由表7可见,幔源包体的橄榄石中,岩浆包裹体中气泡的组成为CO₂、CO、H₂S、SO₂,其中以CO₂为主;白头山二期粗面岩歪长石中的包裹体气相成分主要为有机化合物CH₄、C₂H₄、C₃H₆,同时含有N₂和H₂,可能反映了岩浆喷发时有大量大气成分或浅层的流体(水)参加;白头山三、四期粗面岩及碱性粗面岩的歪长石、气象站期碱性流纹岩透长石中的包裹体气相组成与幔源包体中的相似,以CO₂为主,其次为H₂S、SO₂,但白头山四期也含有机气体,如CH₄、C₂H₆、C₄H₆;气象站期碱性流纹质熔岩玻璃、冰场期粗面质熔岩凝灰岩

① 吴才来,吉林省长白山地区新生代火山岩岩石学及火山岩浆作用动力学,博士后出站研究报告。

的玻璃中气体包裹体成分除含有与幔源包体中的类似成分 CO_2 、 CO 、 H_2S 、 SO_2 外,还含有 CH_4 ;白云峰期碱性流纹质浮岩和八卦庙期熔结凝灰岩中的以 N_2 和 H_2 为主,其次,前者含 CH_4 ,后者含 H_2S ,反映这两期火山喷发时,有大量的大气水参加。

4.3 岩浆演化过程中成分的变化

从部分矿物包裹体中熔融玻璃相的电子探针分析结果看(表8),白头山期粗面岩长石斑晶所含的熔融包裹体玻璃成分比气象站期碱性流纹岩中的偏基性,如前者的 SiO_2 含量为 67.1965%—70.1347%,后者为 72.2333%—79.2886%,反映岩浆演化由早期到晚期,残余岩浆中富硅;同时,熔融包裹体玻璃成分与各自的寄主岩全岩化学成分相近似或略偏酸性^①,说明它们是演化的残余岩浆被寄主矿物所捕获。

5 玻璃熔体结构

利用激光拉曼光谱直接测定了幔源包体及火山岩中矿物的岩浆包裹体和部分熔岩中的玻璃熔体结构^[1](表9)。由表可见,幔源包体橄榄石中的熔融玻璃结构类型较复杂,有单体 $[\text{SiO}_4]$ 、二聚体 (Di)、链状 (Ch) 和架状 (Ne) 以及链状与架状混合类型,其 NBO 值为 1.97,断键百分数 (Br%) 为 49.2,说明熔体中非桥氧多,粘度低。白头山期粗面岩和气象站期碱性流纹岩长石斑晶中包裹体玻璃的熔体结构类型主要为架状,其次为链状和二聚体网络,NBO 平均值和断键百分数分别为 1.145、1.13 和 28.7、28.3,但每期由早到晚,NBO 值和 Br 由大变小,说明随着岩浆的演化,岩浆温度降低,岩浆成分偏酸性,岩浆粘度增大。

表8 矿物包裹体中熔融玻璃电子探针分析结果

Table 8 Electron microprobe analyses of melted glass in mineral inclusions

样号	BTS6- 1A-1	BTS10- 2A-1	QXZ9- 2A-6	QXZ9- 22-7	QXZ8- 12-1	
时代	白头山四期		气象站期			
岩石名称	粗面岩		碱性流纹岩			
寄主矿物	长石		单斜辉石	石英	长石	
氧化物含量	SiO_2	67.1965	70.1347	72.2333	79.2886	73.9385
	TiO_2	0.0301	0.3167	0.1532	0.3329	0.1842
	Al_2O_3	18.5337	13.6773	10.5184	8.3901	10.1132
	Cr_2O_3	0.0188	0	0.041	0.0046	0
	MgO	0	0.0427	0.0562	0.0104	0.0107
	CaO	0.034	0.6077	0.1472	0.0241	0.1949
	MnO	0	0.078	0.3011	0.16	0.103
	FeO	0.4978	4.7865	8.3954	4.0718	3.9618
	NiO	0	0	0.0327	0	0.0007
	Na_2O	6.882	4.3639	1.064	0.8663	4.5565
	K_2O	0	6.288	3.0735	2.988	4.788
	total	93.1928	100.2956	96.016	96.1368	97.8515

① 吴才来,吉林省长白山地区新生代火山岩岩石学及火山岩浆作用动力学,博士后出站研究报告。

表9 长白山新生代火山岩岩浆包裹体中玻璃相拉曼光谱结果

Table 9 Raman spectrum analyses of glass phase in magmatic inclusions of Cenozoic volcanic rocks in Changbai Mountains

样号	时代	岩石类型	主矿物	拉曼位移(cm^{-1})	振动类型	分子类型	结构基型	网络类型	Vi(mol%)	NBO/T	Br%
NTS14-1	奶头山 期碱性 橄榄玄武 岩	尖晶石二辉 橄榄石	橄榄石	840		$[\text{SiO}_4]$	单体(Mo)	Mo	15	1.97	49.2
				930		$[\text{Si}_2\text{O}_7]$	二聚体(Di)	Di	24		
				1010		$[\text{Si}_2\text{O}_6]$	链状(Ch)	ch	20		
				1100		$[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	架状(Ne)	Ne-ch	41		
BTS-5	白头山 二期	粗面岩	长石	755	Si(Al)-O ₄ -Si	$[\text{Si}_2\text{O}_7]$	二聚体玻璃相(Di)	Di	18	1.23	30.8
				971	Si(Al)-O ₆	$[\text{Si}_2\text{O}_7]$	二聚体玻璃相(Di)	sh-ch	40		
				1031	Si(Al)-O ₆	$[\text{Si}_2\text{O}_7]$ - $[\text{Si}_2\text{O}_6]$	层链状玻璃相(Sh-Ch)	Ne	42		
				1121	Si(Al)-O ₆	$[\text{Si}_4\text{AlO}_8]$	架状玻璃相(Ne)				
BTS6-1	白头山 四期	碱性粗面岩	长石	920	Si(Al)-O ₆	$[\text{Si}_2\text{O}_7]$	二聚体(Di)	Di	16	1.06	26.6
				996	Si(Al)-O ₆	$[\text{Si}_2\text{O}_6]$	链状网络(Ch)	ch-sh	29		
				1124	Si(Al)-O ₆	$[\text{Si}_3\text{O}_8]$	架状网络(Ne)	Ne	55		
QXZ8-1 (顶层2)	气象站 期	碱性流纹岩	长石	740		$[\text{Si}_2\text{O}_7]$	二聚体(Di)	Di	16	1.16	28.9
				880		$[\text{Si}_2\text{O}_6 - \text{Si}_2\text{O}_7]$	层链状(Ch-Sh)	ch-sh	33		
				988		$[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	架状网络(Ne)	Ne	51		
				1112							
QXZ9-1	气象站 期	碱性流纹岩	长石	772	Si(Al)-O ₆ -Si	$[\text{Si}_2\text{O}_7]$	二聚体(Di)	Di	17	1.10	27.7
				950	Si(Al)-O ₆	$[\text{Si}_2\text{O}_7]$	链层状网络	sh-ch	32		
				1016	Si(Al)-O ₆	$[\text{Si}_2\text{O}_7]$ - $[\text{Si}_2\text{O}_6]$	架状网络	Ne	51		
				1120	Si(Al)-O ₆	$[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$					

注: NBO/T 为岩浆熔体中非桥氧数与四面体配位的阳离子数之比。Br 为新键百分数。

表 10 不同时代火山岩中玻璃相电子探针分析结果及 NBO/T 参数

Table 10 Electron microprobe analyses and NBO/T parameters of glass phase in volcanic rocks of different epochs

成分	BGM-3		NTS14-2		NTS14-1		NTS14-8		NTS13-2		BTS6-1		QXZ9-2		QXZ8-1	
	/1-1-glass	/1-5-glass	/1-5-glass	/1-glass	/1-glass	/1-glass	/1-2-glass	/3-4-glass	/1-3-glass	/1-4-glass	/1-5-glass	/1-1-glass	/1-5-glass	/1-1-glass	/1-5-glass	/1-1-glass
SiO ₂	46.536	40.6435	47.3061	52.5264	51.8276	48.674	67.5867	72.5922	75.7349	73.3731	72.5589	73.3731	72.5589	73.3731	72.5589	73.3731
TiO ₂	2.4332	3.8361	2.688	1.4219	1.3063	0.0271	0.704	0.1257	0.1938	0.2137	0.064	0.2137	0.064	0.2137	0.064	0.2137
Al ₂ O ₃	12.5891	10.0738	17.2611	18.5139	17.9762	22.626	11.5755	12.7752	9.4312	10.0297	15.0779	10.0297	15.0779	10.0297	15.0779	10.0297
Cr ₂ O ₃	0	0	0.2746	0	0	0.0188	0.0732	0.0326	0.0046	0	0	0.0046	0	0	0	0
MgO	6.374	5.8131	2.9956	1.6245	1.7468	0.7703	0.0259	0.0153	0.0272	0.0347	0	0.0347	0	0.0347	0	0.0347
CaO	4.9591	5.1153	3.4991	3.2703	3.2194	8.38	0.156	0.1245	0.108	0.2025	0	0.2025	0	0.2025	0	0.2025
MnO	0.1029	0.0876	0.113	0.1603	0.1312	0	0.1344	0.0823	0.0233	0	0	0.0233	0	0	0	0.0233
FeO	9.5559	12.2786	6.4237	7.1888	6.8012	0.4013	7.2341	2.5844	3.407	3.9837	0.8895	3.9837	0.8895	3.9837	0.8895	3.9837
NiO	0.07	0.0896	0	0.0007	0.309	0.0078	0.0111	0.0328	0	0	0	0.0328	0	0	0	0.0328
Na ₂ O	0.3773	0.4403	0.4976	6.7369	5.7981	0.4045	4.9424	6.2621	4.6947	4.645	5.0266	4.6947	5.0266	4.645	5.0266	4.6947
K ₂ O	0.9618	0.8373	1.8847	6.3752	6.0332	0.2206	4.8139	4.5592	4.2932	4.3837	6.7627	4.3837	6.7627	4.3837	6.7627	4.3837
total	83.9594	79.215	82.9434	97.8189	94.8708	81.57	97.2571	99.1865	97.8879	96.866	100.3797	97.8879	100.3797	96.866	100.3797	97.8879
Si	2.605	2.4937	2.6125	2.5845	2.6119	2.6237	3.1615	3.2373	3.3898	3.3409	3.1929	3.3898	3.1929	3.3409	3.1929	3.3898
Ti	0.1024	0.177	0.1116	0.0526	0.0495	0.0011	0.0248	0.0042	0.0065	0.0073	0.0021	0.0065	0.0021	0.0073	0.0021	0.0065
Al	0.8305	0.7285	1.1235	1.0736	1.0677	1.4374	0.6382	0.6715	0.4975	0.5382	0.752	0.4975	0.752	0.5382	0.752	0.4975
Cr	0	0	0.012	0	0	0.0008	0.0027	0.0011	0.0002	0	0	0.0002	0	0.0002	0	0.0002
Mg	0.5318	0.5316	0.2466	0.1191	0.1312	0.0619	0.0018	0.0078	0.0059	0.0024	0	0.0018	0	0.0024	0	0.0018
Ca	0.2974	0.3363	0.207	0.1724	0.1738	0.484	0.0078	0.0059	0.0052	0.0099	0	0.0052	0	0.0099	0	0.0052
Mn	0.0049	0.0046	0.0053	0.0067	0.0056	0	0.0053	0.0031	0.0009	0	0	0.0009	0	0	0	0.0009
Fe	0.4473	0.63	0.2967	0.2958	0.2866	0.0181	0.283	0.0964	0.1275	0.1517	0.0327	0.1275	0.0327	0.1517	0.0327	0.1275
Ni	0.0032	0.0044	0	0	0.0013	0.0003	0.0004	0.0012	0	0	0	0	0	0	0	0
Na	0.0409	0.0524	0.0533	0.6427	0.5665	0.0423	0.4482	0.5415	0.4074	0.4101	0.4289	0.4074	0.4289	0.4101	0.4289	0.4074
K	0.0687	0.0655	0.1328	0.4001	0.3878	0.0152	0.2872	0.2594	0.2434	0.2546	0.3796	0.2434	0.3796	0.2546	0.3796	0.2434
total	4.9322	5.024	4.8012	5.3475	5.282	4.6848	4.861	4.8226	4.6802	4.715	4.8182	4.6802	4.8182	4.715	4.8182	4.6802
NBO/T ^①	1.53	2.23	1.11	0.46	0.58	1.80	0.31	0.11	0.19	0.24	0.33	0.19	0.33	0.24	0.33	0.19
MBO/T ^②	0.66	0.96	0.27	0.37	0.35	0.83	0.21	0.09	0.12	0.12	0.33	0.12	0.33	0.12	0.33	0.12

注:①含挥发分玻璃熔体的 NBO/T 值;②去掉挥发分玻璃熔体的 NBO/T 值。

若根据包裹体和熔岩中的玻璃相电子探针分析结果(表8),先将总量不足100%的部分以 H_2O 来代替,计算出玻璃熔体的NBO σ 值(表10)^[2-13]。结果表明,玄武岩中玻璃熔体的NBO σ 平均值为1.67(变化于2.23—1.11之间),与激光拉曼光谱测定的结果一致;相比之下,由于白头山期粗面岩、气象站期碱性流纹岩和八卦庙期粗面质熔结凝灰岩中的玻璃相所含的挥发分相对较少,所以计算的NBO σ 值较小,分别为:0.31,0.18(变化于0.11—0.24之间)和0.33,显然,低于激光拉曼光谱的测定值。这表明玄武质岩浆来源深,矿物包裹体中的熔体也是在较深的地方被寄主矿物所捕获。因为在较大的压力(深度)下,挥发分(尤其是水)在岩浆中溶解度剧增^[4],熔体中的非桥氧数增多。同时,也说明了玄武质岩浆上升速度较快,而粗面质和碱性流纹质岩浆上升速度相对较慢。若将玻璃相电子探针分析总量换算成100%后,再求出玄武质、粗面质和碱性流纹质玻璃的NBO σ 值(表10),可以看出,奶头山期碱性橄榄玄武岩的NBO σ 值为0.57(变化于0.96—0.27之间),白头山期粗面岩的为0.21,气象站期碱性流纹岩的为0.11(变化于0.09—0.12之间),八卦庙期粗面质熔结凝灰岩为0.33,很明显,这些结果与根据火山岩全岩化学分析结果求出的NBO σ 值相近似^①,而比岩浆包裹体和熔岩玻璃的拉曼光谱测定值低,这说明岩石中分析的挥发分含量是岩浆中挥发分最低饱和量,岩浆由深处向地壳浅处上升时,存在着挥发分的出溶现象。

6 结论

1)从玄武岩→粗面岩→碱性流纹岩,橄榄石由贵橄榄石—透铁橄榄石→Mg、Fe 橄榄石→铁橄榄石,单斜辉石由透辉石→次透辉石→铁普通辉石→钙质辉石,反映了岩浆分异演化的特征;矿物温压计计算表明,本区原始玄武岩浆来源深度大于82km,在65—55km范围内存在玄武质岩浆房。

2)从矿物的包裹体气相成分来看,由尖晶石二辉橄榄岩→玄武岩→粗面岩→熔结凝灰岩,包裹体中的深部幔源气相成分减少,而地壳浅部的气相成分增多,反映火山喷发过程中,地壳浅部流体(主要是大气水)起了重要作用。

3)包裹体中玻璃相成分比其寄主岩偏酸性,说明它们是矿物结晶过程中捕获的残余岩浆,在快速冷凝过程中淬火而形成。玻璃相成分探针分析不足100%的部分以 H_2O 补充之,计算的NBO σ 值与激光拉曼光谱对玻璃熔体结构的测试结果相似,表明地下深处的岩浆中含有大量的水和挥发份,岩浆上升过程中存在着挥发份的出溶现象。

参 考 文 献

- 1 金伯禄、张希友. 长白山火山地质. 东北朝鲜民族教育出版社, 1994.
- 2 刘若新. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 地震出版社, 1992.
- 3 刘嘉麒. 中国东北地区新生代火山岩的年代学研究, 岩石学报, 1987, 4: 21—31.
- 4 汤德平. 吉林省白头山火山岩的岩石学研究, 现代地质, 1990, 4(1): 64—77.

① 吴才来, 吉林省长白山地区新生代火山岩岩石学及火山岩浆作用动力学, 博士后出站研究报告。

- 5 Wu Cailai, Shang Ruxiang. The Active Regularities of Cenozoic Volcanos and Currently Volcanic Revival Evidence in Changbaishan Area, Northeast China. *Acta Geoscientia Sinica*, Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, Special Issue. 1996, 149 - 152.
- 6 Deer W A, Howice R A, Zussman J. *Rock-Forming Minerals*, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1978.
- 7 王德滋, 光性矿物学, 上海出版社, 1975.
- 8 鄂莫岚、赵大升. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体. 科学出版社, 1987, 58 - 59.
- 9 Mercier J C. Single - Pyroxene thermobarometry. *Tectonophysics*, 1980, 70: 1 - 37.
- 10 夏林圻, Clocchiatti R. 硅酸盐熔体包裹体的一种新分类. 科学通报, 1984, 9: 551 - 556.
- 11 徐培苍、李如璧等. 地学中的拉曼光谱. 陕西科学技术出版社, 1996.
- 12 莫宣学, 岩浆熔体结构, 地质科技情报, 1985, 2: 21 - 31.
- 13 袁万明. 岩浆熔体 NBO 值计算方法的改进. 岩石学报, 1990, 3: 72 - 77.
- 14 Nicholls J. A simple thermodynamic model for estimating the solubility of H₂O in magmas, *Control. Mineral. Petrol.* 1980, 74: 211 - 220.

Studies on Mineral Chemistry and Mineral Inclusion of Cenozoic Volcanic Rocks and Their Mantle Enclaves in Changbai Mountains, Northeast China

Wu Cailai Li Zhonai Shang Ruxiang
Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037

Key words: mineral chemistry; inclusion; melt structure; Laser Raman spectrum; Changbai Mountains

Abstract

The Cenozoic volcanic rocks in Changbai Mountains consist of basalts, trachytes and alkali rhyolites. A lot of enclaves named spinel lherzolite and pyroxenite derived from the mantle were found in alkali basalt of Miocene Naitoushan period. The main minerals in mantle enclaves and volcanic rocks of different periods are olivine, clinopyroxene, enstatite, spinel, plagioclase and alkali feldspar. The species and chemical compositions of minerals from different rocks are different, reflecting the trend of magmatic differentiation evolution. The geothermobarometer of minerals indicates that the basaltic magma derived from the mantle at the depth of more than 82 km formed the deep magma chamber in the upper mantle at the depth of 55 km to 65 km. Laser Raman spectrum analysis of inclusions in minerals from different volcanic rocks show that magma in great depth contained a lot of volatiles, and that strong exsolution occurred during the upward migration of magma. Besides, mantle volatiles decreased and crust volatiles increased in upward direction, and underground water might have played an important role in volcanic eruption.