

文章编号: 1000- 6524 (2002) 01- 0011- 13

# 中国东部几个地区新生代玄武岩中 单斜辉石- 熔体平衡温压 ——兼论幔源包体的成因

李天福<sup>1,2</sup>, 马鸿文<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学 材料科学与工程  
学院, 北京 100083)

**摘要:** 以中国东部宽甸、汉诺坝和明溪含有幔源包体的新生代玄武岩中的单斜辉石斑(巨)晶为研究对象, 采用最新的单斜辉石- 熔体平衡温压计对单斜辉石斑(巨)晶- 熔体进行了平衡温压计算。结果表明, 碱性玄武岩中的单斜辉石斑晶结晶温度和压力高于共生的亚碱性玄武岩中的单斜辉石斑晶, 单斜辉石巨晶的结晶温度和压力高于单斜辉石斑晶。这说明碱性玄武岩的形成深度大于亚碱性玄武岩, 单斜辉石巨晶是更高压力下的结晶产物, 单斜辉石斑晶在岩浆上升的不同深度均有晶出。回归分析表明, 尽管携带幔源包体的玄武岩浆上升速度较快, 但并不是绝热上升。单斜辉石斑(巨)晶的结晶温压条件与同一地点幔源包体平衡温压条件的对比表明, 单斜辉石巨晶和碱性玄武岩中的部分单斜辉石斑(巨)晶的结晶温压大于幔源包体的平衡温压, 表明了包体寄主岩浆的来源深度大于包体的深度。因此, 幔源包体是寄主岩浆上升途中捕虏的上地幔碎块, 而非寄主岩浆形成源区的残留体。

**关键词:** 中国东部; 新生代; 玄武岩; 单斜辉石斑晶; 幔源包体; 单斜辉石- 熔体平衡; 温压计  
**中图分类号:** P588. 14<sup>+</sup> 5      **文献标识码:** A

## Clinopyroxene- melt equilibrium temperature and pressure of Cenozoic basalts with special reference to the genesis of mantle xenoliths in some areas of eastern China

LI Tian\_fu<sup>1,2</sup> and MA Hong\_wen<sup>2</sup>

(1. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 2. School of Materials Science and Engineering,  
China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** On the basis of the newly published clinopyroxene- melt equilibrium thermobarometer, the authors calculated the clinopyroxene- melt equilibrium temperature and pressure of mantle xenoliths-bearing basalts at Kuandian, Hannuoba and Mingxi in eastern China. The res\_

收稿日期: 2000- 12- 15; 修订日期: 2001- 07- 08

基金项目: 国家教委“跨世纪优秀人才计划”基金资助项目; 国家自然科学基金资助项目(49733110)

作者简介: 李天福(1962- ), 博士, 副研究员, 岩浆岩石学专业, 现主要从事火山岩与深部地质的研究。

ults show that the crystallization temperature and pressure of cpx porphyritic crystals in alkali basalts are generally higher than those in subalkali basalts, and the crystallization temperature and pressure of cpx megacrysts are higher than those of phenocrysts, which further proves that the cpx megacrysts crystallize at higher pressure than cpx porphyritic crystals. The existence of cpx phenocrysts at various pressures indicates that the cpx can crystallize continually along the way through which the magma moves upward. Regression analysis shows that although the basalts which bear mantle xenoliths move up so fast, they are not adiabatic but have heat diffusion. The comparison of temperatures and pressures between the crystallization of cpx phenocrysts (or megacrysts) and that of xenolith in alkali basalts indicates that host magma exists originally deeper than the mantle xenoliths in terms of pressure and so the xenoliths are fragments of the upper mantle captured by magma along the ascending way instead of being the source residues of host magma as considered previously.

**Key words:** eastern China; Cenozoic; basalt; clinopyroxene phenocryst; mantle xenolith; cpx - melt equilibrium; thermobarometer

对于中国东部玄武岩浆的形成深度及携带的幔源包体的成因,基本上有两种意见:一种意见认为岩浆起源于上地幔,幔源包体与岩浆同源,是上地幔部分熔融后形成寄主岩浆的残余(从柏林等,1982;刘若新等,1985;邱家骧等,1986;鄂莫岚等,1987;池际尚等,1988;邓晋福等,1988),辉石岩和辉长岩类包体是寄主玄武岩浆早期分离结晶的堆积岩(邱家骧等,1986;鄂莫岚等,1987;池际尚等,1988);另一种意见认为岩浆起源于上地幔,幔源包体是岩浆上升途中捕获的地幔碎块(Tatsumoto *et al.*, 1992;刘丛强等,1996;朱炳泉等,1998)。但是持前一种观点的学者在确定岩浆起源深度和包体形成深度时,所用方法在逻辑上存在矛盾,既假定包体与岩浆平衡来计算岩浆形成时的温压条件,又假定包体各矿物相之间平衡来计算包体的平衡温压条件,对比后得出岩浆与包体两者同源的结论。笔者认为,要求得岩浆和包体的温压条件,应当有一套在热力学上可靠的、精度较高的温压计来独立获得各自的温压条件,然后进行对比得出结论。对于含石榴石的幔源包体已有许多温压计可用;而对于岩浆熔体,过去虽然也有一些温压计,如橄榄石-熔体平衡(Reeder *et al.*, 1970; Ulmer, 1989; Beatti *et al.*, 1991)、斜长石-熔体平衡(Drake, 1976; Housh *et al.*, 1991)、辉石-熔体平衡(Nielsen *et al.*, 1979; Beatti *et al.*, 1991)等,但它们除了可靠性和精度较差外,还存在某些使用条件往往不易满足等缺点,如要求估算  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  等。本文应用最近发表的单斜辉石-熔体平衡温压计(Putirka *et al.*, 1996)来计算岩浆的温压条件,并与幔源包体的温压计算结果对比,进而对中国东部新生代玄武岩浆的温压条件、包体与岩浆成因关系进行讨论。

## 1 地质概况

宽甸玄武岩分布于中朝地台东北部的宽甸盆地内(路凤香等,1981)。黄椅山、青椅山、大孤山等 20 座火山锥与区域性断裂平行,呈北东和北西向分布,受郯庐断裂的控制(Basu *et al.*, 1991),覆盖面积为  $15\text{ km} \times 35\text{ km}$ (路凤香等,1981)。熔岩可分为 5 层,各次活动均以火山碎屑物开始到溢流熔岩结束(解广轰等,1989),自底至顶总的趋势为碧玄岩→碱性橄榄

玄武岩 → 橄榄拉斑玄武岩, 熔岩的结晶程度低, 均含有尖晶石二辉橄榄岩和方辉橄榄岩、石榴石尖晶石二辉辉石岩等幔源包体及石榴石、富铝普通辉石、歪长石、金云母等高压巨晶(路凤香等, 1981, 1983)。这些包体和巨晶主要产在第 1、2、4 层中(Liu *et al.*, 1994)。黄椅山玄武岩的 K-Ar 同位素年龄为 0.274 Ma, 属更新世的产物(解广轰等, 1989)。

汉诺坝玄武岩为位于河北万全、尚义、张北和崇礼县之间的基性火山岩, 面积约为 1700 km<sup>2</sup>, 时代上分属早第三纪(渐新世隐伏玄武岩)、晚第三纪中新世和上新世(冯家麟等, 1982)。中新世玄武岩以裂隙式溢流型喷发为主, 形成厚 400 余米、微向北倾的广阔熔岩台地; 上新世玄武岩分布面积较小, 集中于本区西北部, 除裂隙式溢流火山活动外, 晚期尚有大量火山爆发活动, 一般厚约数十米。汉诺坝玄武岩浆的活动表现为以碧玄岩为先导、多韵次喷发的特点(邓晋福等, 1987; Zhi *et al.*, 1990)。其 K-Ar 同位素年龄主要介于 25~ 10 Ma 之间(刘若新等, 1992)。汉诺坝玄武岩的南缘出露有大约 40 个富包体地点, 且包体类型丰富。包体直径一般为 10~ 50 cm, 主要赋存于靠底部的碱性玄武岩系列的岩石中, 较上部的碱性玄武岩中包体越来越少, 包体也很小。碧玄岩中赋存有幔源橄榄岩和辉石岩类包体, 而碱性橄榄玄武岩只赋存有辉石岩类包体(Song *et al.*, 1989)。包体主要为尖晶石二辉橄榄岩, 其次为方辉橄榄岩、纯橄榄岩、石榴石辉石岩和少见的含石榴石二辉橄榄岩。

明溪大洋窝玄武岩是出露面积较大的一个, 长约 3700 m, 宽约 1100 m, 面积近 4 km<sup>2</sup>, 呈岩被状展布于盖洋—石珩和翠竹洋—大洋窝两组隐伏断裂的交汇处。火山活动具明显的韵律性、间歇性喷发特点。喷发产物以溢流相橄榄霞石岩和苦橄岩为主, 其出露面积占全部火山岩的 80% 以上。火山碎屑物以苦橄质为主。火山岩内含有丰富的石榴石二辉橄榄岩等包体。火山岩的 K-Ar 同位素年龄数据为 4.96~ 0.72 Ma(大洋窝)(张剑波等, 1992), 由沉积夹层中的生物化石层确定其为上新世到更新世产物(张德全, 1982)。

本文的汉诺坝玄武岩单斜辉石斑晶和石榴石辉石岩样品采自大麻坪, 其他均为文献发表的资料。汉诺坝的单斜辉石斑晶主要见于石英拉斑玄武岩, 其次为橄榄拉斑玄武岩, 碱性橄榄玄武岩和碧玄岩中很少见单斜辉石斑晶, 只在—层碧玄岩中偶见。

石英拉斑玄武岩中的单斜辉石斑晶常被粒玄结构基质中的板条状微晶斜长石穿插成不规则晶体, 但保持原来晶体的外形, 成为含长结构, 偶见单斜辉石斑晶的十字穿插双晶, 粒度为 1.25 mm × 0.5 mm ~ 0.5 mm × 0.4 mm, 与基质之间呈过渡状态, 含量约 2% ~ 3%。橄榄拉斑玄武岩中有的单斜辉石呈长柱状, 具淡褐色—褐色多色性和含长结构, 并发育裂纹, 粒度为 1.0 mm × 0.25 mm ~ 0.3 mm × 0.3 mm, 含量约 3%。碧玄岩中的单斜辉石斑晶呈粒状, 大小 0.25 mm × 0.37 mm ~ 0.25 mm × 1.0 mm, 薄片偶见。

## 2 单斜辉石种属及矿物化学

汉诺坝、宽甸和明溪地区单斜辉石斑晶的电子探针分析数据和计算的晶体化学式见表 1。由于篇幅所限, 与斑晶配套的寄主岩浆(熔体)的成分未予列出。橄榄拉斑玄武岩中的单斜辉石斑晶的 TiO<sub>2</sub> 含量很高(1.93% ~ 3.31%), 为钛普通辉石, 其褐色—淡褐色多色性可能与之有关; 但橄榄拉斑玄武岩中的褐色单斜辉石的 TiO<sub>2</sub> 含量却不高。

### 2.1 种属

表 1 代表性单斜辉石斑晶(巨晶)电子探针分析数据( $w_B/\%$ )、阳离子系数和平衡结晶温压  
Table 1 Electron microprobe analyses ( $w_B/\%$ ), cation number and equilibrium crystallization  $p-t$  of representative clinopyroxenes

地点	宽甸			双塔坝			明溪														
	Cpx3	Cpx2	Cpx1-1	K009	K030-1	K009-5-A	K009-7-A	DM-6*	DM-8	DM-10	Ch153	Ch206	F-6*	F-3	F-5	F-228	F-4*	S-48			
寄主岩	碱性橄辉玄武岩			碧玄岩			橄辉拉斑玄武岩			碧玄岩			碱性橄辉玄武岩			石英拉斑玄武岩			碱性苦橄玄武岩		
斑晶/巨晶				巨晶			斑晶			巨晶			斑晶			斑晶			斑晶		
种属	普通辉石			普通辉石			透辉石			透辉石			透辉石			透辉石			普通辉石		
SiO <sub>2</sub>	50.50	51.85	51.45	51.22	49.04	49.37	50.34	49.89	32.16	49.15	50.14	50.21	50.56	50.09	49.89	51.35	45.05	53.27			
TiO <sub>2</sub>	1.03	0.83	0.87	0.97	0.97	0.00	1.71	1.97	1.00	0.45	0.40	0.43	1.84	1.60	1.32	1.06	3.66	0.42			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.49	8.40	8.51	8.50	7.85	8.46	9.55	3.01	2.48	3.93	8.67	8.34	3.81	4.51	3.85	2.60	7.27	6.79			
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	0.03	0.01	0.02	0.28	0.00	0.00	0.13	0.35	0.00	0.00	0.00	0.26	0.31	0.66	0.22	0.24	0.19			
FeO	6.43	5.92	6.71	6.09	8.77	7.53	7.94	8.12	6.62	8.06	7.83	7.72	6.49	6.50	6.36	9.04	7.40	6.18			
MnO	0.13	0.11	0.06	0.10	0.00	0.00	0.12	0.20	0.14	0.30	0.20	0.18	0.21	0.38	0.29	0.25	0.01	0.00			
NiO	0.04	0.05	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.21	0.05	0.02	0.00	0.19			
MgO	15.20	15.47	15.58	15.38	15.33	16.74	13.02	13.91	16.29	14.67	14.25	14.61	13.56	14.48	14.48	15.91	11.62	16.42			
CaO	15.78	15.12	15.46	15.95	15.33	15.49	16.01	22.13	20.79	22.40	17.20	16.73	22.98	21.74	21.65	18.58	23.78	15.45			
Na <sub>2</sub> O	1.45	1.02	1.07	1.04	1.70	1.53	2.09	0.49	0.37	0.74	1.69	1.59	0.37	0.32	0.45	0.38	0.55	1.41			
K <sub>2</sub> O	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.10	0.00	0.30	0.06	0.03	0.03	0.00	0.02	0.05			
总和	99.50	99.80	99.76	99.32	99.27	99.12	100.78	99.89	100.20	99.80	100.38	100.26	100.73	100.17	99.15	99.68	99.84	100.76			
$x_{Wo}$	0.377	0.366	0.372	0.379	0.352	0.347	0.397	0.463	0.429	0.456	0.410	0.398	0.490	0.463	0.463	0.389	0.520	0.358			
$x_{En}$	0.505	0.522	0.521	0.508	0.490	0.522	0.449	0.405	0.465	0.416	0.473	0.484	0.403	0.429	0.431	0.463	0.353	0.530			
$x_{Fs}$	0.118	0.112	0.107	0.113	0.157	0.132	0.154	0.133	0.107	0.128	0.117	0.118	0.108	0.108	0.106	0.148	0.126	0.112			
Si	1.837	1.856	1.858	1.846	1.816	1.817	1.825	1.869	1.920	1.848	1.813	1.823	1.864	1.854	1.866	1.908	1.703	1.903			
Ti	0.029	0.023	0.024	0.027	0.000	0.000	0.047	0.055	0.028	0.013	0.011	0.012	0.051	0.045	0.037	0.030	0.104	0.011			
Al	0.368	0.369	0.369	0.368	0.343	0.367	0.408	0.133	0.108	0.174	0.369	0.357	0.166	0.197	0.170	0.114	0.324	0.286			
Cr	0.001	0.001	0.000	0.001	0.008	0.000	0.000	0.004	0.010	0.000	0.000	0.000	0.008	0.009	0.020	0.006	0.007	0.005			
Fe <sup>2+</sup>	0.198	0.184	0.176	0.187	0.272	0.232	0.241	0.255	0.204	0.253	0.248	0.235	0.201	0.201	0.199	0.281	0.234	0.185			
Mn	0.004	0.003	0.002	0.003	0.000	0.000	0.004	0.006	0.004	0.010	0.006	0.006	0.007	0.012	0.009	0.008	0.000	0.000			
Ni	0.001	0.001	0.001	0.001	—	—	—	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.006	0.002	0.001	0.000	0.005			
Mg	0.834	0.859	0.855	0.843	0.846	0.918	0.704	0.777	0.888	0.822	0.768	0.791	0.745	0.799	0.807	0.881	0.654	0.875			
Ca	0.623	0.603	0.610	0.628	0.608	0.611	0.622	0.889	0.819	0.902	0.666	0.651	0.908	0.862	0.867	0.740	0.963	0.591			
Na	0.104	0.074	0.076	0.074	0.122	0.109	0.147	0.036	0.026	0.054	0.118	0.112	0.026	0.023	0.033	0.027	0.040	0.098			
K	—	—	—	—	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.005	0.000	0.014	0.003	0.001	0.001	0.000	0.001	0.002			
$t/^\circ\text{C}$	1349.3	1309.9	1322.9	1318.1	1367.8	1353.5	1389.0	1238.2	1217.5	1192.5	1337.7	1334.3	1187.4	1233.8	1272.4	1231.2	1460.2	1495.0			
$p/\text{GPa}$	2.02	1.65	1.81	1.77	2.25	2.12	2.48	0.96	0.75	0.63	2.18	2.08	0.37	0.86	1.28	0.70	2.90	3.08			
深度/km	66.8	54.6	59.8	58.4	74.1	70.1	81.8	31.5	24.7	20.7	71.9	68.6	12.2	28.4	42.2	23.1	95.6	101.7			
资料	Liu et al., 1992			郭莫岚等, 1987			本文			邓晋福等, 1987			赵海玲, 1990								

分析者: 中国科学院地质研究所岩石圈研究中心电子探针室韩秀玲、徐平; 仪器工作电压 15 kV, 电流 20 nA; \* 表示该样品分析点数为 2, 其余样品分析点数为 1。

表 1 中所列单斜辉石斑晶和少量巨晶的  $x_{Fs}$  均小于 0.5, 为普通辉石和透辉石 (Morimoto, 1988), 单斜辉石斑晶与寄主岩的类型有一定的对应关系(图 1)。

霞石岩、碱性苦橄玄武岩、碧玄岩、石榴碧玄岩和石榴玄武岩中的单斜辉石斑晶绝大多数为透辉石, 少数为普通辉石。霞石岩中的透辉石的  $x_{Wo}$  一般大于 0.5 而位于透辉石的上限之上; 碱性苦橄玄武岩中透辉石的  $x_{Wo}$  一般在 0.5 左右。

在各个地区, 石英拉斑玄武岩中的单斜辉石斑晶均为普通辉石。所收集到的单斜辉石巨晶产于汉诺坝碧玄岩和宽甸碧玄岩中, 巨晶为普通辉石, 其  $x_{Wo}$  依次由 0.45 降低到 0.36。

### 2.2 矿物化学

宽甸的单斜辉石巨晶均为贫钛和铬的普通辉石, 其  $Cr_2O_3$  含量低于 0.5%,  $TiO_2$  含量低于 2.0%。

汉诺坝石英拉斑玄武岩的单斜辉石斑晶相对贫  $Wo$  端员分子, 多为普通辉石, 有的较富含铬和钛。橄榄拉斑玄武岩和碧玄岩中的单斜辉石斑晶为透辉石, 为含钛普通辉石和钛透辉石。碧玄岩中的巨晶为贫铬和钛的普通辉石。明溪地区的基性和碱性超基性熔岩中, 单斜辉石斑晶的  $x_{Wo}$  较高, 大多数高于 0.45, 为透辉石, 个别为普通辉石。透辉石的钛含量较高, 为含钛透辉石和钛透辉石。 $Cr_2O_3$  含量一般很低, 个别斑晶达到 0.5%。

碱性玄武岩中的巨晶多为普通辉石, 且与斑晶普通辉石相比, 其  $Wo$  端员含量较低。单斜辉石巨晶的特点是较富  $Al_2O_3$ 。宽甸地区 8 个巨晶样品的  $Al_2O_3$  含量范围为 7.55% ~ 9.85%, 汉诺坝单斜辉石巨晶的  $Al_2O_3$  含量为 8.30% ~ 8.67%。与单斜辉石斑晶相比, 巨晶的  $Al_2O_3$  含量明显较高, 具高压条件下结晶的特点。

个别地区单斜辉石斑晶的  $Al_2O_3$  含量也很高, 如明溪霞石岩、碧玄岩中单斜辉石斑晶的  $Al_2O_3$  含量多数高于 5%, 反映了它们结晶时的压力较高。

## 3 单斜辉石- 熔体平衡条件

### 3.1 单斜辉石斑(巨)晶与寄主岩浆平衡的判别

Thompson(1974) 根据实验认为, 单斜辉石与玄武质熔体平衡时的  $K^{Px}(Fe-Mg)$  值为

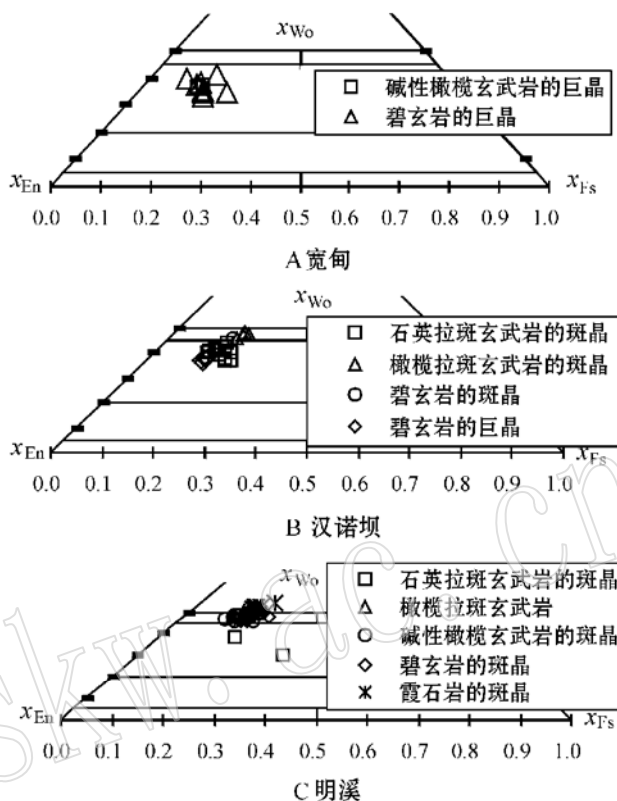


图 1 各地点单斜辉石分类命名图

Fig. 1 Clinopyroxene nomenclature

0.29。Irving 等(1984)和 Liotard 等(1988)根据实验结果认为,当该值在 0.2~0.4 时,单斜辉石与熔体都是平衡的。最近的实验(Kinzler, 1997; Hunter, 1997)进一步证实了该范围的合理性。

宽甸黄椅山的碱性玄武岩中,单斜辉石巨晶与熔体之间的  $K_{\text{Fe-Mg}}^{\text{px}}$  值变化范围均符合平衡的界限,为 0.234~0.386。根据分配系数  $K_d = C_{\text{矿物}}/C_{\text{熔体}}$  (Johnson, 1998) 的关系式求得与矿物平衡的熔体的稀土元素丰度和配分型式,将其与寄主玄武岩的稀土元素丰度和配分型式进行对比,两者的配分曲线完全一致,表明巨晶与熔体之间达到了平衡。

汉诺坝地区大麻坪剖面的 12 件样品中,玄武岩单斜辉石斑晶很少,只有 5 件标本中见到单斜辉石斑晶,且多为很小的过渡斑晶,其  $K_{\text{Fe-Mg}}^{\text{px}}$  值为 0.25~0.45,少数斑晶符合平衡要求。碧玄岩中的两个单斜辉石巨晶(邓晋福等, 1987)与寄主岩的  $K_{\text{Fe-Mg}}^{\text{px}}$  值分别为 0.297 和 0.321,与熔体达到平衡。

明溪地区 20 个斑晶探针分析资料,  $K_{\text{Fe-Mg}}^{\text{px}}$  值的范围为 0.29~0.75,符合平衡条件的有 8 个。

上述单斜辉石与熔体之间的  $K_{\text{Fe-Mg}}^{\text{px}}$  值多向大于 0.4 的方向偏移,是因为这些单斜辉石样品相对富 FeO 或其寄主岩浆相对贫 MgO 而使  $K_{\text{Fe-Mg}}^{\text{px}}$  值偏高。

### 3.2 单斜辉石-熔体平衡的温压条件

采用 Putirka 等(1996)推荐的温度计和压力计组合,计算了所有符合平衡判据的单斜辉石-熔体平衡温度和压力。该温压计的优点和方便之处是不需估算熔体和斑晶中不同价态铁离子的比例。表 1 仅列出代表性样品和同一样品多次分析结果的温压计算值的平均值,表 2 为这些单斜辉石结晶时的平衡温压及范围。

表 2 单斜辉石-熔体平衡温度和压力计算值

Table 2 Calculated equilibrium  $p-t$  values of clinopyroxene-melt

地点	斑晶/巨晶-寄主岩	$t/^\circ\text{C}$	$p/\text{GPa}$
宽甸	巨晶-碱性橄榄玄武岩	1310~1350	1.65~2.02
	巨晶-碧玄岩	1318~1389	1.77~2.48
汉诺坝	斑晶-石英拉斑玄武岩	1217	0.75
	斑晶-橄榄拉斑玄武岩	1238	0.96
	斑晶-碧玄岩	1192	0.63
	巨晶-碧玄岩	1334~1337	2.08~2.18
明溪	斑晶-石英拉斑玄武岩	1231	0.70
	斑晶-碱性橄榄玄武岩	1187~1233	0.37~0.86
	斑晶-碱性苦橄玄武岩	1495	3.08
	斑晶-霞石岩	1460	2.90

图 2 是各研究区玄武岩所有符合平衡判据的斑晶结晶时的投点。结果表明,一般地,单斜辉石斑晶在碱性玄武岩和超基性岩浆中的结晶温度和压力比共生的亚碱性玄武岩中的温度和压力高;单斜辉石巨晶结晶时的温度和压力明显高于单斜辉石斑晶的温度和压力,表明碱性和超基性熔岩的来源深度大于亚碱性玄武岩,巨晶是深部岩浆房高压下的结晶产物。

大麻坪橄榄拉斑玄武岩样品 DM-6 的单斜辉石斑晶在镜下具褐色多色性,  $\text{TiO}_2$  含量最高,为 2.89% 的钛透辉石,其  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量是此处最高的,为 5.55%, 所得压力值为 0.96 GPa。其他样品的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较低( $< 4.0\%$ ), 所得压力都比较低。

宽甸黄椅山石榴石高压巨晶常量元素和稀土元素均符合与寄主岩浆平衡的判别条件,根据石榴石巨晶-熔体资料(样品号 Gnt2) (Liu *et al.*, 1992), 用石榴石-熔体平衡反应方法(Putirka, 1998) 计算的平衡压力为 3.3 GPa, 温度为 1390  $^\circ\text{C}$ , 证明宽甸单斜辉石巨晶-熔

体平衡温压的计算结果是可信的。

以上结果表明, 一般情况下, 同一地区碱性玄武岩中的单斜辉石斑晶结晶时的温度和压力高于亚碱性玄武岩中的单斜辉石斑晶结晶时的温度和压力, 单斜辉石巨晶结晶时的温度和压力高于斑晶结晶时的温度和压力。尽管单斜辉石斑晶或巨晶的结晶深度不能反映寄主岩浆的起源深度, 但是起码说明碱性玄武岩中单斜辉石最初结晶的深度大于亚碱性玄武岩, 单斜辉石巨晶是更高压力下的结晶产物。单斜辉石斑晶结晶深度变化于较大范围, 说明这些斑晶并不是在某一深度的岩浆房内一次结晶形成的, 而是在岩浆上升过程中持续不断地结晶而成。

## 4 讨论

### 4.1 岩浆上升时的温压梯度

Kress 等 (1991) 认为, 洋中脊玄武岩一般呈绝热式上升。但是根据单斜辉石- 熔体平衡温压回归方程, 各地区岩浆上升时的温度对压力变化的速率稍有不同。宽甸地区巨晶所代表的温压范围较小, 近似为 102 °C/GPa, 汉诺坝地区为 90 °C/GPa, 明溪地区为 110 °C/GPa。当把温度梯度与火山岩喷发的时间跨度一并考虑时, 发现火山岩喷发的时间跨度越大, 其温度梯度越小, 反映了这些地区的地幔深处有较长时间热的持续供给。

将研究区单斜辉石- 熔体平衡压力与温度的关系变换为深度与温度关系后, 可得线性回归方程  $t = 2.9889 h + 1154.5$  ( $r = 0.9731$ )。由此可知, 中国东部这几个地区新生代玄武质岩浆上升时的平均温度梯度约为 3 °C/km, 大于绝热温度梯度(典型的约为 0.5 °C/km), 但远远小于传导热地温梯度(约为 20 °C/km), 表明岩浆上升的速度很快。Putirka 等 (1996) 用单斜辉石- 熔体平衡温压计算方法对于夏威夷洋岛现代火山岩的研究表明, 岩浆上升时的温度梯度为 4.25 °C/km。由此可见, 尽管大陆和洋岛玄武岩浆上升时的速度较快, 但温度梯度并不是完全的绝热梯度, 均有一定的热散失。可能受岩浆运移过程的扰动和搅

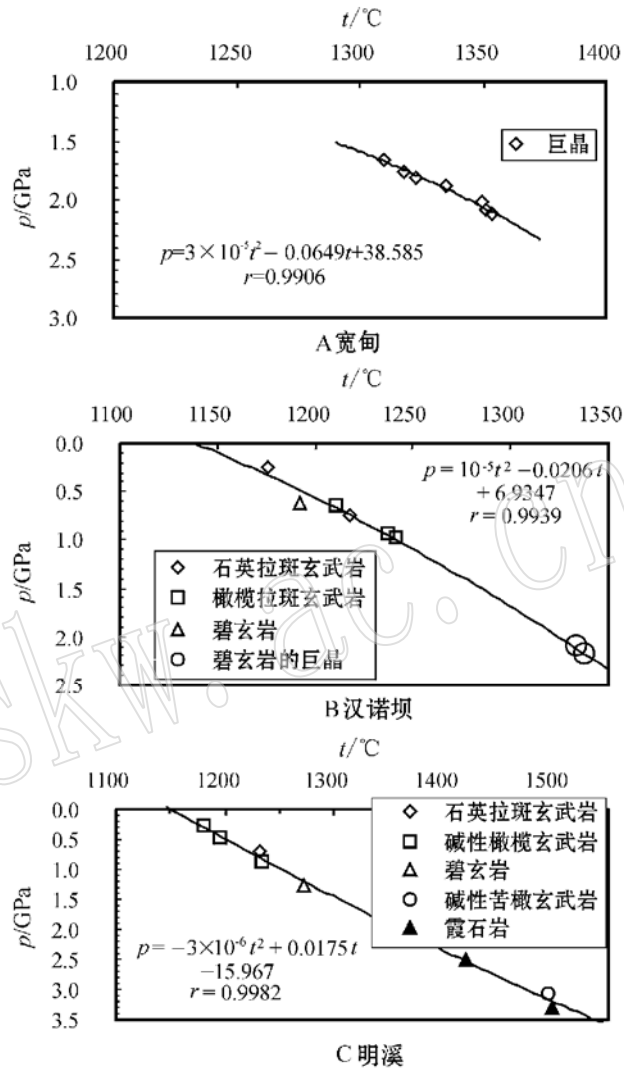


图 2 各地单斜辉石- 熔体平衡温度- 压力投点图  
Fig. 2 Plot of temperature versus pressure on clinopyroxene- melt equilibria

拌作用,一些单斜辉石斑晶离开了它们当时结晶时的熔体而进入了新的熔体,形成了与寄主熔体未达到平衡的单斜辉石斑晶。

## 4.2 寄主岩浆与幔源包体的成因关系

### 4.2.1 包体矿物平衡的温压条件

本文采用化学计量法校正铁的计算方法对汉诺坝地区尖晶石石榴石辉石岩和尖晶石石榴石橄榄岩用各种温压计组合进行温压计算。对于少数尖晶石相橄榄岩,则采用给定压力为 1.5 GPa 条件下的温度来计算,结果见表 3。

根据矿物组合,宽甸和汉诺坝的样品绝大多数为尖晶石-石榴石过渡带的幔源包体,明溪则主要为石榴石相区的幔源包体,包体矿物平衡温压计算结果与此一致。宽甸地区一个石榴石二辉辉石岩样品(96Kd03),计算获得了 2.12 GPa 的压力值,而其他含尖晶石的石榴石辉石岩的压力值均低于 2.0 GPa,说明本文选用的温压计组合是合理的。

### 4.2.2 寄主岩浆与幔源包体的关系

已有的模拟和理论计算研究表明,在地幔中即使形成的熔体比例很低,也可以向上运移 (McKenzie, 1989), 并在此过程中不断地与沿途形成的熔体混合,然后聚集增多 (Bedard, 1989)。可以推测这些比例很低的熔体几乎不可能携带较大的固体碎块,所以寄主岩浆所携带的幔源包体不可能是岩浆源区的残留体。

由图 3 可见,幔源包体的平衡温度和压力与寄主岩浆中单斜辉石巨晶和斑晶形成时的温度和压力明显不同,说明包体与寄主玄武岩浆没有达到平衡。即使是单斜辉石斑晶(或巨晶)最初结晶时的压力和温度也高于幔源包体的,显然寄主玄武岩浆的起源深度更大于包体的深度,这些幔源包体可能不是上地幔熔出寄主玄武岩浆后的残余物,否则包体的平衡温压应大于或近似等于单斜辉石斑晶或巨晶的平衡温压。由于包体矿物平衡温度大大低于寄主玄武岩浆的单斜辉石的结晶温度,说明在其被寄主岩浆捕获之前,曾存在一个相当

表 3 玄武岩中幔源包体的平衡温度和压力计算结果

Table 3 Calculated equilibrium  $p-t$  values of mantle xenoliths in basalts

地区	样号	岩性	$t/^\circ\text{C}$	$p/\text{GPa}$	资料来源
宽甸	95Kd03		1048.7	1.69	
	95Kd11		1010.1	1.50	
	95Kd24		1016.1	1.53	
	96Kd03	尖晶石石榴石	1059.3	2.12	方同辉,
	96Kd11	二辉辉石岩	999.6	1.54	1997
	96Kd12		995.6	1.64	
	96Kd15		999.3	1.50	
	96Kd17		1000.3	1.50	
	DM_32		966.4	1.60	
	DM_36_1	尖晶石石榴石	929.0	1.42	
汉诺坝	DM_36_2	二辉辉石岩	955.0	1.45	李天福等,
	DM_39		978.2	1.65	1997
	DM_41	尖晶石二辉	921.4 <sup>*</sup>		李天福等,
	DM_42	橄榄岩	832.7 <sup>*</sup>		1997
	HC_30	尖晶石石榴石	970.2	1.52	樊祺诚等,
	HC_25	二辉橄榄岩	991.3	1.59	1990
	HT_28	尖晶石石榴石 二辉橄榄岩	1053.3	1.67	刘若新等, 1985
	M157	尖晶石石榴石 二辉橄榄岩	1110.2	2.16	周永璋, 1982
	MD_4	石榴石 二辉橄榄岩	1085.2	2.19	刘若新等, 1985
	明溪	d02		1236.0	3.21
d05		石榴石二辉	1065.9	1.81	张儒媛,
d06		橄榄岩	1068.6	1.82	1985
d07			1150.2	2.94	

\* 设  $p = 1.5 \text{ GPa}$ 。



长的退火降温过程。刘从强等 (1996) 获得的汉诺坝幔源包体 Sm- Nd 同位素年龄约为 300 Ma, 远远老于寄主岩浆的时代。

再从稀土元素配分型式的对比进行分析。首先采用岩石学混合法计算获得尖晶石二辉橄榄岩的矿物含量(李天福等, 1999)。在已知包体全岩稀土元素丰度的前提下, 根据总分配系数  $D = C_{\text{固相}} / C_{\text{熔体}}$  的关系式, 求得与包体平衡的熔体的稀土元素丰度(分配系数数据 Johnson, 1998) 和配分型式, 与寄主玄武岩的稀土元素配分型式进行对比, 两者的配分型式曲线不同, 与包体平衡的熔体稀土配分曲线较平缓, 比寄主玄武岩贫轻稀土元素而富重稀土元素, 反映了包体与寄主玄武岩浆之间不存在平衡关系, 但揭示了尖晶石二辉橄榄岩包体为比其寄主玄武岩浆熔融程度更高的熔体平衡的残余物。

判别幔源包体矿物相与寄主岩浆之间平衡与否的方法之一为包体橄榄石与寄主岩浆之间的  $\text{Fe}^{2+} - \text{Mg}$  分配系数  $K_d^{\text{Olv}}(\text{Fe} - \text{Mg})$  值。本文计算值为: 宽甸 0.11~ 0.17 (9 个样平均为 0.14); 汉诺坝 0.09~ 0.19 (20 个样品平均为 0.13); 明溪 0.17~ 0.27 (10 个样品平均为 0.22)。这些计算值均没有达到平衡时应当具有的  $0.30 \pm 0.03$ , 表明包体与寄主岩浆之间不存在平衡关系。

综上所述, 无论是包体与

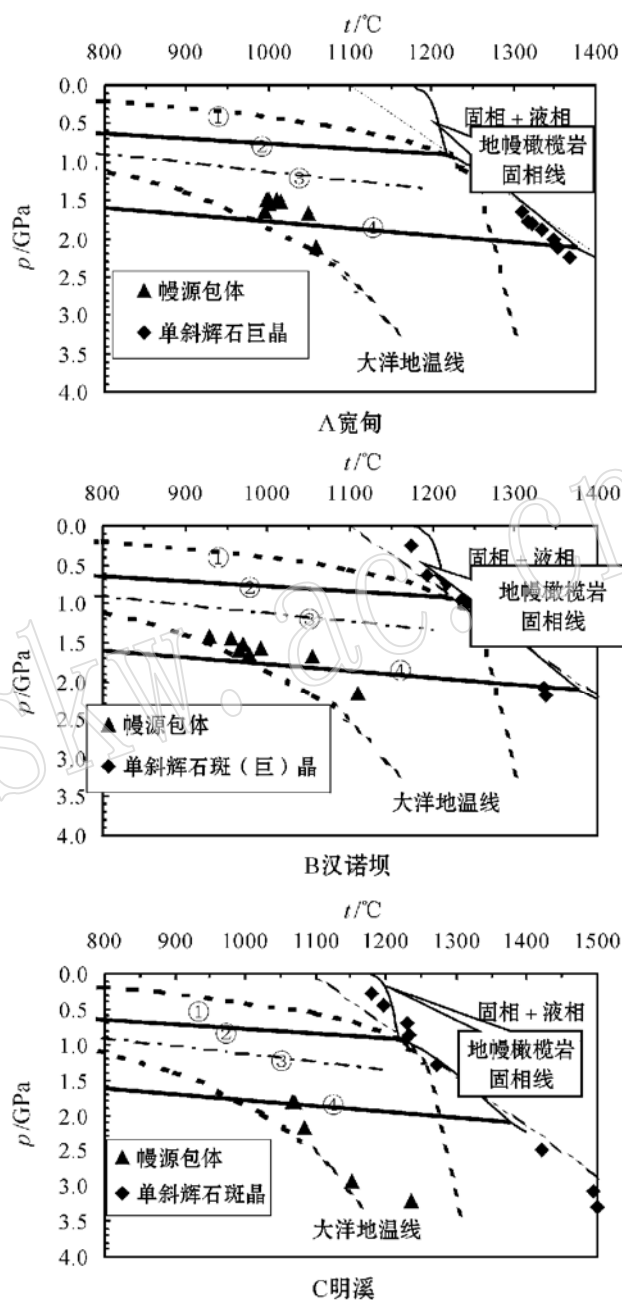


图 3 各地区玄武岩单斜辉石- 熔体平衡温压与幔源包体平衡温压的对比

Fig. 3 Pressure- temperature comparison between cpx- melt and mantle xenolith equilibria

二辉橄榄岩相图 大洋地温线、洋脊- 裂谷地温线 ①据 Morse(1980); 斜长石- 尖晶石橄榄岩相转变线 ②和尖晶石- 石榴石二辉橄榄岩相转变线 ④据 O' Neill(1981); 尖晶石- 石榴石辉石岩相转变线 ③据 Herzberg(1978)

寄主岩浆之间的温度、压力和时代, 还是稀土元素配分型式关系和热力学平衡关系, 均表明幔源包体是寄主岩浆在上升途中更浅处捕获的地幔碎块, 而非岩浆源区的残留体。

## 5 结 论

(1) 碱性玄武岩中的单斜辉石斑晶结晶的温压高于亚碱性玄武岩中的单斜辉石斑晶, 巨晶是更高压力下的结晶产物。在岩浆上升过程的不同深度均有单斜辉石斑晶的晶出。

(2) 单斜辉石斑晶结晶的温压条件反映出玄武岩浆的上升过程不是绝热的, 具有热的散失。

(3) 单斜辉石斑(巨)晶与幔源包体温压条件的对比表明, 幔源包体不是寄主岩浆源区的残留体, 而是岩浆上升途中捕获的上地幔碎块。

## References

- Basu A R, Wang J W, Huang W K, *et al.* 1991. Major element, REE and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of eastern China: implications for their origin from suboceanic type mantle reservoir[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 105: 149~ 169.
- Beattie P, Ford C, Russell D. 1991. Partition coefficients for olivine\_melt and orthopyroxene\_melt systems[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109: 212~ 224.
- Bedard J H. 1989. Disequilibrium mantle melting[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 91: 359~ 366.
- Carswell D A, Gibb T L. 1987. Evaluation of mineral thermometers and barometers applicable to garnet lherzolite assemblages [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 499~ 511.
- Chi Jishang, *et al.* 1988. Study on Cenozoic basalt and upper mantle in eastern China (with special concern to kimberlite) [M]. Beijing: Publishing House of China University of Geosciences (in Chinese).
- Cong Boilin, Zhang Ruyuan. 1982. Genetic petrology study on Hannuoba basalt and its ultramafic xenoliths[J]. *Science in China*, B(12): 1 109~ 1 122 (in Chinese).
- Deng Jinfu, Lu Fengxiang, E Molan. 1987. The origin of Hannuoba basalt magma and the ascending  $p-t$  path[J]. *Geological Review*, 33(4): 317~ 323 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, *et al.* 1988. Ultramafic xenoliths in Hannuoba basalt and mantle property that is deduced from xenoliths[A]. *Mineralogy and Petrology Paper Collections* (No. 4) [C]. Beijing: Geological Publishing House, 23~ 35 (in Chinese).
- Drake M L. 1976. Plagioclase\_melt equilibria[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40: 457~ 465.
- E Molan, Zhao Dasheng. 1987. Cenozoic basalt and xenoliths from depth in eastern China[M]. Beijing: Scientific Publishing House(in Chinese).
- Fan Q C, Hooper P R. 1989. The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of eastern China: Implications for upper mantle composition and the paleogeotherms[J]. *J. Petrol.*, 30: 1 117~ 1 158.
- Fan Qicheng, Liu Ruoxin. 1990. A study on upper mantle spinel-garnet composite peridotite and phase transformation[A]. Professional Committee for Mantle Mineralogy, Petrology and Geochemistry under China Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Collected Papers on Upper Mantle Characteristics and Dynamics of China[C]. Beijing: Seismological Publishing House, 67~ 91(in Chinese).
- Fang Tonghui. 1997. A study on constitution, thermal structure and oxidation status of continental lithosphere in eastern China [D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Feng Jialin, Xie Manze, Zhang Hong, *et al.* 1982. Hannuoba basalt and deep xenoliths in it[J]. *Transaction of Hebei Geological College* (1~ 2): 45~ 63 (in Chinese).
- Finnerty A A, Boyd F R. 1983. Evaluation of thermobarometers for garnet peridotites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,

- 48: 15~ 27.
- Herzberg C. 1978. Pyroxene geothermometry and geobarometry: experimental and thermodynamic evaluation of some subsolidus phase involving clinopyroxenes in the system CaO- MgO- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- SiO<sub>2</sub>[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42: 945~ 957.
- Housh T B, Luhr J F. 1991. Plagioclase\_melt equilibria in hydrous systems[J]. *American mineralogists*, 76: 477~ 492.
- Hunter A G. 1997. Intracrustal controls on the coexistence of tholeiitic and calc\_alkaline magma series at Aso Volcano, SW Japan[J]. *Journal of petrology*, 39: 1 255~ 1 284.
- Irving A J, Frey F A. 1984. Trace element abundances in megacrysts and in their host basalts: Constraints on partition coefficients and megacryst genesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42: 771~ 787.
- Johnson K T M. 1998. Experimental determination of partition coefficients for rare earth and high\_field\_strength elements between clinopyroxene, garnet, and basaltic melt at high pressures[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 133: 60~ 68.
- Kinzler R J. 1997. Melting of mantle peridotite at pressures approaching the spinel to garnet transition: Application to mid\_ocean ridge basalt petrogenesis[J]. *Journal of Geophysical Research*, 102(B1): 853~ 874.
- Kress V C, Carmichael I S E. 1991. The compressibility of silicate liquids containing Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and the effect of composition, temperature, oxygen fugacity and pressure on their redox states[J]. *Contributions to mineralogy and petrology*, 108: 82~ 92.
- Li Tianfu. 1999. Petrogenesis of Cenozoic basalts and the related deep processes in eastern China[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Li Tianfu, Ma Hongwen, Bai Zhiming. 1997. Temperature and pressure states of spinel-garnet transition zone beneath Hannuoba area[J]. *Geosciences*, 1999, 3(1): 66~ 72 (in Chinese with English abstract).
- Liotard J M, Briot D, Boivin P. 1988. Petrological and geochemical relationships between pyroxene megacrysts and associated alkali basalts from Massif Central(France)[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98: 81~ 90.
- Liu Congqiang, Xie Guanghong, Masuda A R. 1996. REE and SR, Nd isotopic geochemistry of mantle xenoliths in Hannuoba basalt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3): 382~ 389 (in Chinese with English abstract).
- Liu C Q, Masuda A, Xie G H. 1992. Isotope and trace element geochemistry of alkali basalts and associated megacrysts from the Huangyishan volcano, Kuandian, Liaoning, NE China[J]. *Chemical geology*, 97: 219~ 231.
- Liu C Q, Masuda A, Xie G H. 1994. Major\_and trace\_element compositions of Cenozoic basalts in eastern China: petrogenesis and mantle source[J]. *Chemical geology*, 114: 19~ 42.
- Liu Ruoxin, Chen Wenji, Sun Jianzhong, *et al.* 1992. K- Ar ages and tectonic settings of Cenozoic volcanic rocks in China [A]. Liu Ruoxin. *Chronology and geochemistry of Cenozoic volcanic rocks in China*[C]. Beijing: Seismological Publishing House, 1~ 43 (in Chinese).
- Liu Ruoxin, Fan Qicheng, Sun Jianzhong. 1985. Study on garnet lherzolite xenoliths from several places in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1(4): 24~ 33 (in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang, E Molan, Deng Jinfu. 1983. Ultramafic xenoliths and megacrysts assemblage in alkali basalt at Huangyishan of Kuandian, Liaoning Province[A]. *Petrological Study (No. 3)*[C]. Beijing: Geological Publishing House: 77~ 88(in Chinese).
- Lu Fengxiang, Deng Jinfu, E Molan. 1981. Discussion on the origin of alkaline basalt magma at Huangyishan of Kuandian, Liaoning Province[J]. *Earth Sciences*, (1): 183~ 196 (in Chinese).
- McKenzie D P. 1989. Some remarks on the movement of small melt fraction in the mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 95: 53~ 72.
- Morimoto N. 1988. Nomenclature of pyroxene[J]. *Acta Mineralogica*, 8(4): 289~ 305.
- Morse S A. 1980. *Basalts and phase diagrams*[M]. New York: Springer- Verlag.
- Nielsen R L, Drake M J. 1979. Pyroxene\_melt equilibria[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43: 1 259~ 1 272.
- O' Neill H C. 1981. The transition between spinel lherzolite and garnet lherzolite and its use As a geobarometer[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 77: 185~ 194.
- Perkins III D, Newton R C. 1980. The compositions of coexisting pyroxenes and garnets in system CaO- MgO- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- SiO<sub>2</sub>

- at 900~ 1 100 °C and high pressures[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 75: 291~ 300.
- Putirka K. 1998. Garnet+ liquid equilibrium[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 131: 273~ 288
- Putirka K, Johnson M, Kinzler R, *et al.* 1996. Thermobarometry of mafic igneous rocks based on clinopyroxene- liquid equilibrium, 0~ 30 kbar[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123: 92~ 108.
- Qiu Jiaxiang, Li Changnian, Ma Changqian. 1986. Study on tectonic settings and magma genetic mechanism of Hannuoba basalt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2(3): 1~ 11 (in Chinese with English abstract).
- Reeder P L, Emslie R F. 1970. Olivine- liquid equilibrium[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 29: 275~ 289.
- Song Y, Frey F A. 1989. Geochemistry of peridotite xenoliths in basalt from Hannuoba, eastern China: implications for subcontinental mantle heterogeneity[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53: 97~ 113.
- Tatsumoto M, Basu A, Huang W K, *et al.* 1992. Sr, Nd and Pb isotopes of ultramafic xenoliths in volcanic rocks of eastern China: enriched components EMI and EM II in subcontinental lithosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 113: 107~ 128.
- Thompson R N. 1974. Some high-pressure pyroxenes[J]. *Mineralogical Magazine*, 39: 768~ 787.
- Ulmer P. 1989. The dependence of the Fe<sup>2+</sup>-Mg cation- partitioning between olivine and basaltic liquid on pressure, temperature and composition, an experimental study to 30 kbars[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 101: 261~ 273.
- Xie Guanghong, Huang Wankang, Wang Junwen, *et al.* 1989. Study on REE content and components of isotopes Sr, Nd, Pb in Huangyishan basalt of Kuandian, Liaoning Province[J]. *Science in China*, B(7): 752~ 758 (in Chinese with English abstract).
- Xu X, O' Reilly S Y, Zhou X, *et al.* 1996. A xenolith-derived geotherm and the crust- mantle boundary at Qilin, southeastern China[J]. *Lithos*, 38: 41~ 62.
- Zhang Dequan. 1982. Cenozoic volcanic rocks and upper mantle xenoliths at Dayangwo of Mingxi County in Fujian Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese).
- Zhang Jianbo, Chen Daogong. 1992. Geochemistry of basalts at Longhai and Mingxi in Fujian Province[A]. Liu Ruoxin. Chronology and geochemistry of Cenozoic volcanic rocks in China[C]. Beijing: Seismological Publishing House, 298~ 319 (in Chinese).
- Zhang Ruyuan, Cong Bolin. 1985. Derivative geotherm and upper mantle constitution based on xenoliths in southeastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1(4): 295~ 316 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Hailing. 1990. Tertiary- Quaternary continental rift volcanism and related deep process[M]. Beijing: Publishing House of China University of Geosciences (in Chinese).
- Zhi X C, Song Y, Frey F A, *et al.* 1990. Geochemistry of Hannuoba basalts, eastern China: constraints on the origin of continental alkalic and tholeiitic basalt[J]. *Chemical Geology*, 88: 1~ 33.
- Zhou Yongzhang. 1982. A study on genesis of Miocene basalt and petrology of upper mantle at damaping of Wanquan county in Hebei Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese).
- Zhu Bingquan, Li Xianhua, Dai Mo, *et al.* 1998. Isotope system theory and application in earth science with regard to evolution of China continental mantle[M]. Beijing: Scientific Publishing House (in Chinese).

### 附中文参考文献

- Morimoto N. 1988. 辉石命名法[J]. 黄婉康译. *矿物学报*, 8(4): 289~ 305.
- 池际尚, 等. 1988. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究(附金伯利岩)[M]. 北京: 中国地质大学出版社.
- 从柏林, 张儒媛. 1982. 汉诺坝玄武岩及其超镁铁质岩包体的成因岩石学研究[J]. *中国科学*, B(12): 1 109~ 1 122.
- 邓晋福, 路凤香, 鄂莫岚. 1987. 汉诺坝玄武岩岩浆起源及上升的  $p-t$  路线[J]. *地质论评*, 33(4): 317~ 323.
- 邓晋福, 等. 1988. 汉诺坝玄武岩中超镁铁岩包体及其推导的地幔性质[A]. *矿物学岩石学论丛(第4辑)*[C]. 北京: 地质出版社, 23~ 35.
- 鄂莫岚, 赵大升. 1987. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体[M]. 北京: 科学出版社.
- 樊祺诚, 刘若新. 1990. 上地幔尖晶石-石榴石复合橄榄岩与相转变研究[A]. 中国矿物岩石地球化学学会地幔矿物岩石地球化学专业委员会. 中国上地幔特征与动力学论文集[C]. 北京: 地震出版社, 67~ 91.

- 方同辉. 1997. 中国东部大陆岩石圈成分、热结构与氧化状态研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 冯家麟, 谢漫泽, 张 红, 等. 1982. 汉诺坝玄武岩及其深源包体[J]. 河北地质学院学报, (1~ 2): 45~ 63.
- 李天福. 1999. 中国东部新生代玄武岩成因与深部作用过程[D]. 北京: 中国地质大学.
- 李天福, 马鸿文, 白志民. 1997. 汉诺坝地区上地幔尖晶石- 石榴石相转变带温压条件[J]. 现代地质, 1999, 13(1): 66~ 72.
- 刘丛强, 谢广轰, 增田彰正. 1996. 汉诺坝玄武岩中地幔捕虏体 REE 和 Sr、Nd 同位素地球化学[J]. 岩石学报, 12(3): 382~ 389.
- 刘若新, 陈文奇, 孙建中, 等. 1992. 中国新生代火山岩的 K-Ar 年代与构造环境[A]. 刘若新. 中国新生代火山岩年代学与地球化学[C]. 地震出版社, 1~ 43.
- 刘若新, 樊祺诚, 孙建中. 1985. 中国几个地方的石榴石- 二辉橄榄岩捕虏体研究[J]. 岩石学报, 1(4): 24~ 33.
- 路凤香, 鄂莫岚, 邓晋福. 1983. 辽宁宽甸黄椅山碱性玄武岩中的超镁铁岩包体及巨晶组合[A]. 岩石学研究(第 3 辑)[C]. 地质出版社: 77~ 88.
- 路凤香, 邓晋福, 鄂莫岚. 1981. 辽宁宽甸黄椅山碱性玄武岩岩浆起源问题的讨论[J]. 地球科学, (1): 183~ 196.
- 邱家骧, 李昌年, 马昌前. 1986. 汉诺坝玄武岩板块构造环境及岩浆成因机理的分析[J]. 岩石学报, 2(3): 1~ 11.
- 解广轰, 黄婉康, 王俊文, 等. 1989. 辽宁宽甸黄椅山玄武岩 REE 及 Sr、Nd、Pb 同位素组成研究[J]. 中国科学, B(7): 752~ 758.
- 张德全. 1982. 福建明溪县大洋窝新生代火山岩及上地幔包体的研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 张剑波, 陈道公. 1992. 福建省龙海和明溪地区玄武岩地球化学[A]. 刘若新. 中国新生代火山岩年代学与地球化学[C]. 北京: 地震出版社, 298~ 319.
- 张儒媛, 从柏林. 1985. 中国东南部从捕虏体推导的地温和上地幔组成[J]. 岩石学报, 1(4): 295~ 316.
- 赵海玲. 1990. 东南沿海地区第三纪-第四纪大陆裂谷型火山作用及深部作用过程[M]. 北京: 中国地质大学出版社.
- 周永璋. 1982. 河北省万全大麻坪中新世玄武岩成因及上地幔岩石学研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 朱炳泉, 李献华, 戴 谟, 等. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社.