

中国东部早第三纪玄武岩中幔源包体的变形特征及其上地幔流变学意义

林传勇 史兰斌 陈孝德 张小鸥

(国家地震局地质研究所, 北京 100029)

主题词 幔源包体 上地幔 流变学 中国东部 显微构造

提要 中国东部含幔源包体的早第三纪玄武岩已发现的有吉林双辽、河北阳原和山西繁峙。本文详细研究了这三个地点幔源包体的变形特征, 结果表明, 这些地点的幔源包体以尖晶石二辉橄辉岩为主, 其结构主要为残斑结构。包体中橄辉石显示明显的优选方位, 发育有反映高温位错蠕变机制的位错亚构造。包体的平衡温度在800—1100℃之间, 压力为0.7—1.7GPa, 来源深度为28—52km。采用显微构造应力计计算的差异应力在17—24MPa之间, 由橄辉岩高温流变律计算的应变速率为 10^{-15} — 10^{-13} s⁻¹, 等效粘滞度为 10^{21} — 10^{23} Pa·S之间。中国东部早第三纪与晚第三纪以后的幔源包体具有基本相同的特征, 表明晚第三纪以后的上地幔继承和发展了早第三纪时的特征。中国东部早第三纪以来的上地幔符合大陆拉张带和裂谷上地幔的流变特征。

中国东部广泛出露的新生代碱性玄武岩中大部分都含有幔源包体。近来, 对这些包体进行了大量的研究工作, 目的在于了解上地幔的物质组成、物理状态、地球化学过程以及流变学特征等。但是, 就其时代而言, 这些玄武岩既有早第三纪和晚第三纪的, 也有第四纪的。以往对幔源包体的研究, 未注意区分寄主玄武岩的时代, 而笼统地作为新生代玄武岩中的幔源包体进行研究。从已发表的文献来看, 所研究的包体大部分都来自新第三纪和第四纪的玄武岩, 对于早第三纪玄武岩中的幔源包体则尚未开展详细的研究工作。假如幔源包体所提供的是它们被玄武岩浆捕获时上地幔的有关信息, 那么, 过去所获得的资料所反映的应当是新第三纪和第四纪上地幔的情况。目前认为中国东部自新生代以来进入了新的演化阶段, 因此, 了解早第三纪上地幔的物理状态和流变特征便具有非常重要的意义。但是, 以往的研究工作对此未能给予足够的重视。目前中国东部已知的含有幔源包体的早第三纪玄武岩只有三个地点, 它们分别是吉林双辽七星山, 河北阳原和山西繁峙(图1)。刘嘉琪(1987)测定的吉林双辽七星山玄武岩的K-Ar年龄为39.9—61.0Ma⁽¹⁾, 刘若新等(1992)给出的山西繁峙玄武岩K-Ar年龄为25.8—35.2Ma⁽²⁾, 而王慧芬(1988)获得的河北阳原玄武岩K-Ar年龄为29.3Ma⁽³⁾。这次我们测定了采自阳原含橄辉岩包体的两个玄

本文为国家自然科学基金资助项目(49070132)的部分内容。
本文于1995年2月收到, 1995年6月改回。

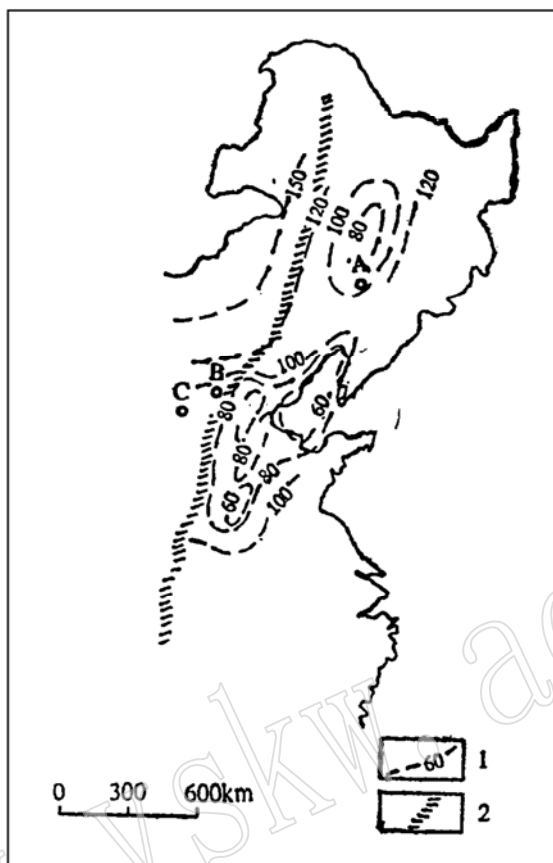


图 1 中国东部含幔源包体的早第三纪玄武岩位置图 (根据刘若新资料简化, 1992)

Fig. 1 Distribution of xenolith-bearing paleogene basalts in eastern China

1—上地幔高导层等厚线; 2—重力梯度带
A—吉林双辽; B—河北阳原; C—山西繁峙

玄武岩样品的K-Ar年龄, 结果为 23.92 ± 0.81 和 25.37 ± 0.65 Ma, 可以认为它们属于早第三纪的玄武岩。本文详细地研究了这三个地点的幔源包体的变形特征, 目的在于探讨早第三纪上地幔的物理状态及流变学特征, 并与新第三纪和第四纪玄武岩中的幔源包体的情况进行对比。

1 幔源包体的类型和产状

这三个地点的幔源包体产状基本相同。包体大小不一, 但大部分长轴均大于5cm, 最大者可达20cm左右。外形多呈椭球状, 少数为棱角状。

图2为三个地点幔源包体矿物成分在Ol-Opx-Cpx图解上的投影。由图可见, 研究区幔源包体以二辉橄榄岩为主, 此外还有少量的方辉橄榄岩、纯橄岩和二辉岩等。从含铝矿物来看, 它们全部属于尖晶石相, 未发现有石榴石相橄榄岩包体。本文研究的主要是尖晶石二辉橄榄岩包体。

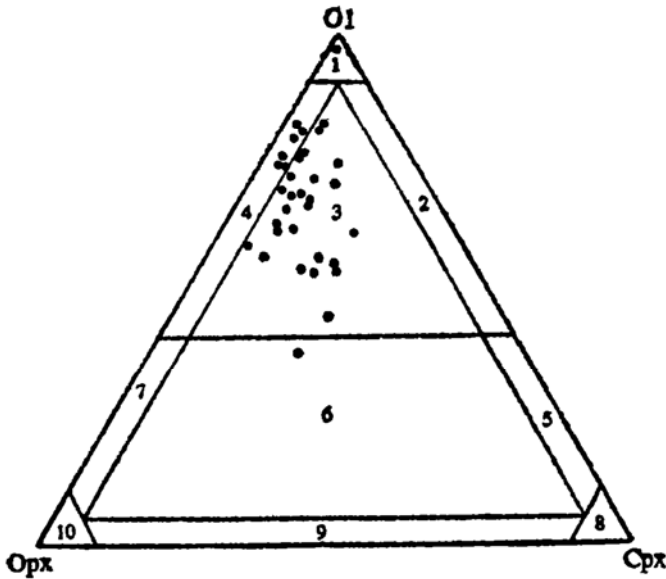


图2 研究区幔源包体的岩石类型。

Fig. 2 Types of mantle xenoliths in the study area

- 1—纯橄岩；2—单斜辉石橄岩；3—二辉橄岩；4—方辉橄岩；5—橄岩单辉岩；
6—橄岩二辉岩；7—橄岩方辉岩；8—单斜辉石岩；8—二辉岩；10—斜方辉石岩

2 幔源包体的变形特征

2.1 幔源包体的结构和组构

研究区包体的结构均以残斑结构为主，未见典型的原生粒状结构和粒状变晶结构。岩石由残斑和动态重结晶颗粒组成，总的说来叶理不发育。橄榄石残斑多呈不规则粒状，有时显稍许拉长，亚晶界（有人称之为扭折带）发育。辉石残斑中常见有出溶页理。一般认为，残斑结构反映包体在上地幔条件下经受过高温流变^[4]。

测定了四个样品中橄榄石的结晶学方位（图3），结果发现，这些具有残斑结构的样品中，橄榄石都显示有明显的优选方位，再次表明这些样品经受过上地幔条件下的高温流变。总的看来，橄榄石的〔100〕、〔001〕和〔010〕轴都具有形成大圆环带的趋势，但其中出现明显的极密部。各轴的极密部与叶理面的关系有所不同，例如，JS-4样品中，橄榄石的〔100〕轴形成与叶理面走向平行的点极密，〔001〕轴形成与叶理面倾向线一致的极密部，而〔010〕轴则形成与叶理面近垂直的极密部；大致反映活动滑移系为(010)〔100〕。但是，优选方位的型式取决于包括应力、温度、压力和应变速率等在内的复杂环境因素，仅仅用优选方位型式来推断活动滑移系往往会出现一些矛盾。较为可靠的是利用扭折带的分析，以及位错亚构造的详细研究。总的说来，早第三纪玄武岩中的幔源包体具有与晚第三纪及第四纪玄武岩中的包体类似的结构和组构特征^[5]。

2.2 橄榄石的位错亚构造特征

采用氧化缀饰法揭示包体中橄榄石的位错亚构造，在光学显微镜下观测。观测结果表

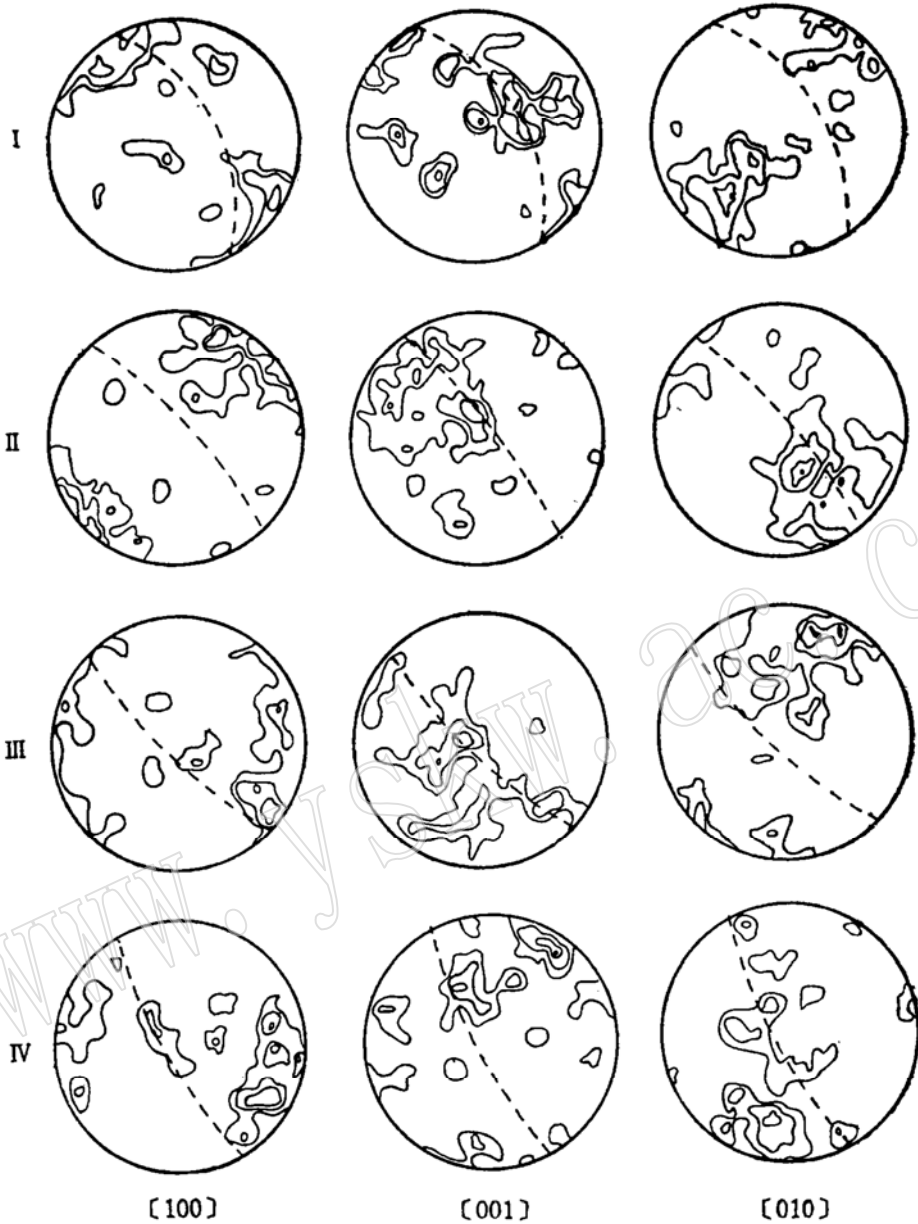


图3 包体中橄榄石的优选方位型式

Fig. 3 Preferred orientation patterns of olivine in xenoliths

I—JS-4样品, 120个颗粒, 等密线间距: [100]轴为1.5, 4, 6.5和9%; [001]轴和 [010]轴均为: 1.5, 3.5, 5.5, 7.5%; II—JS-9样品, 112个颗粒, 等密线间距: [100]轴和 [001]轴均为: 1.5, 3.5, 5.5, 7.5%; [010]轴为: 2, 4, 6和8%; III—FG-7样品, 110个颗粒, 等密线间距: [100]和 [010]为: 2, 4, 6和8%; [001]为1.5, 3, 4.5和6%; IV—FG-11样品, 120个颗粒, 等密线间距: [100]轴为2, 4, 6和8%; [001]轴为: 2, 3.5, 5和6.5%, [010]轴为: 1.5, 4.5, 7.5和10.5%。下半球等积投影, 虚线为叶理面的投影

明, 所研究的样品中的橄榄石具有与新第三纪及第四纪玄武岩的包体中橄榄石类似的位错亚构造⁶⁵。它们主要有以下几种类型:

自由位错: 橄榄石中发育有不同方位的自由位错, 位错密度也有稍许差别(照1)。除了较平直的自由位错以外, 还有弯曲的自由位错线(照2)。

位错列: 由位错线的平行排列构成(照3)。

位错壁: 位错倾斜壁以(100)倾斜壁最为发育, (001)壁不甚发育(照4)。位错扭转壁(位错网格)也时有发现(照5)。

位错弓弯和位错环: 在样品中广泛发育, 常常成群出现(照6, 7)。位错环以(010)滑动位错环为主, 表明橄榄石变形时以(010)为滑移面(照8)。

幔源包体中橄榄石的位错亚构造是上地幔流变的记录。上述位错亚构造反映了这些样品在上地幔条件下, 经受过高温流变。此外, 所研究的样品具有与新第三纪及第四纪玄武岩中的包体类似的位错亚构造, 这表明早第三纪的上地幔的流变特征与晚第三纪以后的没有什么本质的区别。

3 上地幔物理状态参数的推导

3.1 幔源包体平衡温度、压力的计算

幔源包体的平衡温度和压力数据是认识上地幔物理状态和热结构的基础资料。目前可应用于尖晶石相橄榄岩包体的地质温度计不下20种, 但遗憾的是目前还没有适用的地质压力计。过去广泛应用于我国的Mercier的地质温压计^{66,77}, 目前已被认为不准确。本文采用Bertrand & Mercier⁶⁹和Brey & Kohler⁶⁹的二辉石温度计, 以及徐义刚修正的单斜辉石温度计¹⁰²来计算包体的平衡温度和压力。为了和以往的资料进行对比起见, 本文也采用Mercier的二辉石地质温压计^{66,77}。所获结果表示在表1中, 应当指出, 为了获得可靠的温度、压力数据, 一是需要精度较高的电子探针分析数据, 二是要充分考虑矿物的平衡, 以及是否存在有化学成分的分带性。由于篇幅有限, 本文所研究的三十几个样品的电子探针分析结果未表示在文中。

由表1可见, 不同方法计算的平衡温度有所不同。其中, 前三种方法得到的结果较为接近, 尤其是第二和第三种方法差别只有10—15℃左右。Mercier的方法得到的结果一般都要高50℃左右。因此, 本文主要采用第二种方法得到的结果。前面已经提到, Mercier的压力计目前认为不准确, 由表中也可看到两种辉石得到的压力数据差异较大, 而且与温度的对应关系也不是十分合理。作者曾经应用Kohler和Brey (1990) 提出的压力计计算中国东部尖晶石相包体的平衡压力, 并且推导出中国东部上地幔的新生代时期的地温线(徐义刚等, 1995)^①。如果将我们得到的平衡温度数据投影到该地温线上, 可以得到压力数据(表1中的P3)。这一压力数据明显的低于Mercier压力计算的结果。

由所获结果来看, 所研究的包体的平衡温度一般都在800—1050℃之间, 只有阳原的样品有低于800℃的。总的说来, 繁峙样品的温度要高于其他两个地点的温度。根据地温

① 徐义刚、林传勇等, 1995年, 中国东部上地幔地温线及其地质意义, 中国科学, [待刊]。

线得到的压力推导, 所研究的包体的来源深度为28—52km。

表1 幔源包体的平衡温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 、压力 $P(\text{GPa})$ 计算结果

Table 1 Calculations of equilibrium temperature $T(^{\circ}\text{C})$ and pressure $P(\text{GPa})$ of mantle xenoliths

标本号	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	P_1	P_2	P_3
FG-1	843	891	872	1047	966	1.53	1.28	0.96
FG-2	991	1039	1042	1000	992	1.72	1.47	1.46
FG-5	922	978	973	1036	918	1.94	1.05	1.22
FG-6	1048	1089	1062	1031	1042	1.74	1.49	1.68
FG-7	988	1031	1012	1013	1061	1.62	1.68	1.42
FG-11	965	1007	989	1038	978	1.89	1.31	1.32
FG-12	944	989	972	1035	1058	2.14	1.93	1.25
JS-2	877	935	938	988	955	1.83	1.15	1.00
JS-3	934	988	987	1005	857	1.78	0.42	1.25
JS-4	909	960	966	1004	835	1.86	0.31	1.16
JS-5	934	965	957	990	891	1.91	0.71	1.18
JS-9	963	1020	1018	1009	897	1.82	0.60	1.37
JS-7	875	920	917	1005	985	1.92	1.23	1.05
JS-14	881	924	921	987	969	1.83	1.37	1.06
JS-18	877	930	938	944	919	1.25	0.80	1.07
JS-19	835	889	894	957	/	1.59	/	0.96
JS-20	828	872	874	943	/	1.55	/	0.80
HYB-13	726	745	735	752	896	1.31	1.45	0.63*
HYB-7	685	695	677	702	971	3.25	0.91	0.52
HYB-6	1018	1068	1058	1078	1021	1.69	1.63	1.59
YB-11	961	1017	1002	1026	966	1.72	1.22	1.37
YB-9	965	989	978	998	1021	2.20	1.98	1.25
YB-8	931	977	964	986	880	1.93	0.66	1.22
YB-7	989	825	809	833	946	1.96	1.02	0.81
YB-6	892	930	917	938	982	1.38	1.29	1.07

T_1 : Bertrand & Mercier(1985); T_2 : Brey & Kohler(1990); T_3 : 徐义刚(1993); T_4 : Mercier (1980) 斜方辉石; T_5 : Mercier(1980) 单斜辉石; P_1 : Mercier(1980) 斜方辉石; P_2 : Mercier(1980) 单斜辉石; P_3 : 由中国东部上地幔地温线(徐义刚等, 1995)推导的压力。

3.2 差异应力的计算

本文采用Ross⁽¹¹⁾和Karato⁽¹²⁾的动态重结晶颗粒粒度应力计, 以及Toriumi⁽¹³⁾的位错壁间距应力计来计算这些包体样品所反映的差异应力, 所获结果表示在表2中。由表中可见, Ross (1980) 的应力计所获差异应力最高, Toriumi (1979) 的次之, 而Karato (1980) 的最低。由两种动态重结晶颗粒粒度应力计得到的数据的平均值则与由位错壁间距应力计得到的数值较接近。因此, 本文采用这些数据的平均值。总的说来, 差异应力变化在17—24MPa之间, 而且三个地点差异不大。

3.3 应变速率和等效粘滞度的计算

温度、压力和差异应力确定之后, 便可根据橄榄岩的高温流变来确定上地幔的应变速

表 2 由幔源包体计算的上地幔差异应力

Table 2 Differential stress of upper mantle calculated from mantle xenoliths

标本号	D(μm)	动态重结晶粒度应力计			位错壁间距应力计	
		$\sigma_1(\text{MPa})$	$\sigma_2(\text{MPa})$	$\sigma_3(\text{MPa})$	d(mm)	$\sigma(\text{MPa})$
FG-1	503	35	11	23	0.097	15
C-2	483	36	11	24	0.088	17
FG-3	492	36	11	24	0.090	16
FG-4	543	33	10	22	0.081	18
FG-5	665	28	8	18	0.080	18
FG-6	724	26	7	17	0.074	20
FG-7	714	27	8	18	0.078	19
FG-11	701	27	8	18	0.089	16
FG-12	704	27	8	18	0.058	25
JS-1	608	30	9	20	0.172	9
JS-2	642	29	9	19	0.102	14
JS-3	845	29	9	19	0.225	7
JS-4	622	30	9	20	0.178	8
JS-7	714	27	8	18	0.164	9
JS-9	700	28	8	18	0.200	7
JS-13	596	31	9	20	0.142	10
JS-18	606	30	9	20	0.123	12
JS-19	616	30	9	20	0.139	11
JS-20	622	30	9	20	0.167	9
JS-21	610	30	9	20	0.111	13
YB-2	479	37	11	24	0.078	19
YB-4	659	29	9	19	0.041	36
YB-6	503	35	11	23	0.073	20
YB-7	675	28	8	18	0.090	16
YB-8	538	33	10	22	0.087	17
YB-9	631	30	9	20	0.101	15
YB-11	602	31	9	20	0.108	14
HYB-6	592	31	9	20	0.096	15
HYB-7	654	29	8	19	0.086	17
HYB-14	527	34	10	22	0.100	15
HYB-31	660	28	8	18	0.083	18

动态重结晶颗粒度应力计:

1. $\sigma_1 - \sigma_3 = 4900D^{-0.79}$ (Ross, 1980);

2. $\sigma_1 - \sigma_3 = 2100D^{-0.85}$ (Karato, 1980).

3. 两种计算结果的平均值。

位错壁间距应力计:

$\sigma_1 - \sigma_3 = 1.462d^{-1}$ (Toriumi, 1979).

率。本文所采用的是Ave Lallemand等人的公式⁽¹⁴⁾:

$$\dot{\epsilon} = 2.69 \times 10^{12} \exp \left[- (63000 + 1610P) / T \right] \sigma^{3.2}$$

根据应变速率与等效粘滞度的关系: $\eta = \sigma / 3\dot{\epsilon}$, 可以计算等效粘滞度的数值。所获结果表示在表3中。应当说明的是, 表3中我们列出了两组压力数据, 一组是根据二辉石压力

计算的应力数据,另一组是由我们推导的中国东部上地幔地温线推算出来的。因此,相应地得到两组应变速率和等效粘滞度数据。

表 3 由早第三纪玄武岩中幔源包体推导的中国东部上地幔流变参数

Table 3 Rheological parameters of upper mantle in eastern China inferred from mantle xenoliths in Paleogene basalts

标本号	T ($^{\circ}\text{C}$)	$P(1)$ (GPa)	$P(2)$ (GPa)	σ (MPa)	$\epsilon(1)$ (S^{-1})	$\eta(1)$ (Pa.S)	$\epsilon(2)$ (S^{-1})	$\eta(2)$ (Pa.S)
FG-1	890	1.40	0.96	19	3.760×10^{-15}	1.684×10^{24}	6.910×10^{-16}	9.166×10^{23}
FG-2	1040	1.70	1.46	21	2.077×10^{-15}	3.370×10^{21}	2.781×10^{-15}	2.512×10^{21}
G-5	978	1.50	1.22	18	1.372×10^{-16}	4.373×10^{22}	1.967×10^{-16}	3.050×10^{22}
FG-6	1090	1.70	1.68	19	9.460×10^{-15}	6.695×10^{22}	9.686×10^{-15}	6.538×10^{20}
FG-7	1030	1.60	1.42	19	1.162×10^{-15}	5.450×10^{21}	1.452×10^{-15}	4.365×10^{21}
FG-11	1007	1.60	1.32	17	3.294×10^{-16}	1.248×10^{22}	4.635×10^{-16}	1.210×10^{22}
FG-12	989	2.00	1.25	22	2.173×10^{-16}	3.375×10^{22}	5.658×10^{-16}	1.296×10^{22}
JS-2	935	1.50	1.09	15	1.190×10^{-17}	4.202×10^{22}	2.055×10^{-17}	2.432×10^{22}
JS-3	988	1.60	1.25	16	1.254×10^{-16}	4.253×10^{22}	1.960×10^{-16}	2.721×10^{22}
JS-4	960	1.60	1.16	14	2.510×10^{-17}	1.859×10^{22}	4.460×10^{-17}	1.046×10^{22}
JS-7	920	1.50	1.18	13	3.810×10^{-18}	1.137×10^{24}	5.869×10^{-18}	7.384×10^{22}
JS-9	1020	1.80	1.37	12	1.460×10^{-16}	2.837×10^{22}	2.408×10^{-16}	1.661×10^{22}
JS-18	930	1.30	1.05	16	1.527×10^{-17}	3.493×10^{22}	2.133×10^{-17}	2.500×10^{22}
JS-19	890	1.60	0.96	15	1.274×10^{-16}	3.925×10^{24}	3.092×10^{-16}	1.617×10^{24}
JS-20	872	1.50	0.80	14	4.849×10^{-16}	9.824×10^{24}	1.298×10^{-16}	3.596×10^{24}
YB-2	727	1.00	0.63	21	1.003×10^{-21}	6.979×10^{27}	1.819×10^{-21}	3.849×10^{27}
YB-4	938	1.30	1.10	25	9.103×10^{-17}	9.155×10^{22}	1.188×10^{-16}	7.017×10^{22}
YR-6	930	1.30	1.07	22	4.230×10^{-17}	1.734×10^{23}	5.754×10^{-17}	1.274×10^{22}
YB-7	825	1.10	0.81	17	1.427×10^{-16}	4.027×10^{22}	2.152×10^{-16}	2.633×10^{22}
YB-8	977	1.40	1.22	17	1.246×10^{-16}	4.548×10^{22}	1.571×10^{-16}	3.606×10^{22}
YB-9	989	2.00	1.25	18	7.520×10^{-17}	7.979×10^{22}	1.973×10^{-16}	3.042×10^{22}
YB-11	1017	1.70	1.37	17	4.343×10^{-16}	1.310×10^{22}	6.530×10^{-16}	8.679×10^{21}
HYB-6	1068	1.70	1.59	18	3.607×10^{-15}	1.663×10^{21}	4.116×10^{-15}	1.458×10^{21}
HYB-7	695	0.90	0.52	18	8.540×10^{-22}	7.026×10^{28}	1.607×10^{-22}	3.734×10^{28}

注: $P(1)$ 为运用 Mercier (1980) 二辉石压力计计算的应力数据, $P(2)$ 为根据中国东部地温线推导的应力数据。 $\epsilon(1)$ 、 $\epsilon(2)$ 、 $\eta(1)$ 和 $\eta(2)$ 分别为由两种应力数据计算得到的应变速率和等效粘滞度数据。

由表3可见,根据两组应力数据计算得到的应变速率和等效粘滞度数据基本上相同。这表明应力在应变速率的计算中影响不大。因此,我们认为这两组数据都是可取的,基本上反映了中国东部早第三纪时期上地幔的物理状态。

4 讨论与结论

根据上面得到的流变状态参数数据,可以讨论中国东部上地幔在早第三纪的流变特征。

4.1 热结构特征

如上所述,由于未能获得包体平衡应力的可靠数据,因此本文不能提供中国东部早第

三纪上地幔的地温线。但是，根据包体平衡温度分布直方图，仍然可以看出研究区上地幔的热结构特征。图4是中国东部早第三纪(A)、晚第三纪以后(B)⁽¹⁵⁾和中欧Pannonian盆地(C)⁽¹⁵⁾包体平衡温度分布的直方图。由图可见，中国东部早第三纪包体平衡温度范围为700—1100℃，其中高峰出现在900—1050℃。晚第三纪以后则为700—1150℃，但其高峰仍出现在900—1050℃。总的说来，两者特征基本一致，只是后者最高温度范围比前者要稍高一些，而且大部分平衡温度集中在900—1050℃。中欧Pannonian盆地温度范围则为850—1150℃，其高峰为1000—1100℃，与中国东部早、晚第三纪的情况稍有不同。

此外，从图中还可看出，中国东部早第三纪和晚第三纪以后幔源包体的平衡温度最低的有700—800℃之间，而Pannonian盆地则为850℃。应当指出的是，中国东部早第三纪的包体只有阳原的两个样品获得低的平衡温度（分别为695和727℃）。晚第三纪以后的样品中，平衡温度低于800℃的均为糜棱岩型幔源包体，它们是上地幔剪切带的产物⁽¹⁶⁾。

总的说来，中国东部早第三纪与晚第三纪以后上地幔流变学的热结构基本上是一样的，表明它们具有继承性关系。它们与Grachev等人⁽¹⁵⁾的Pannonian盆地数据的差别可能是由于所采用的地质温度计不同造成的（本文采用的是目前认为比较可靠的地质温度计）它们实际上可能是一样的，都属于温度偏高的情况，Grachev称之为异常的地幔⁽¹⁵⁾。

4.2 上地幔流变参数剖面

根据所获数据可以作出中国东部早第三纪上地幔各项流变参数随深度而变化的剖面图，如图5所示，差异应力随深度而变化的趋势不十分明显，大部分集中在10—20MPa

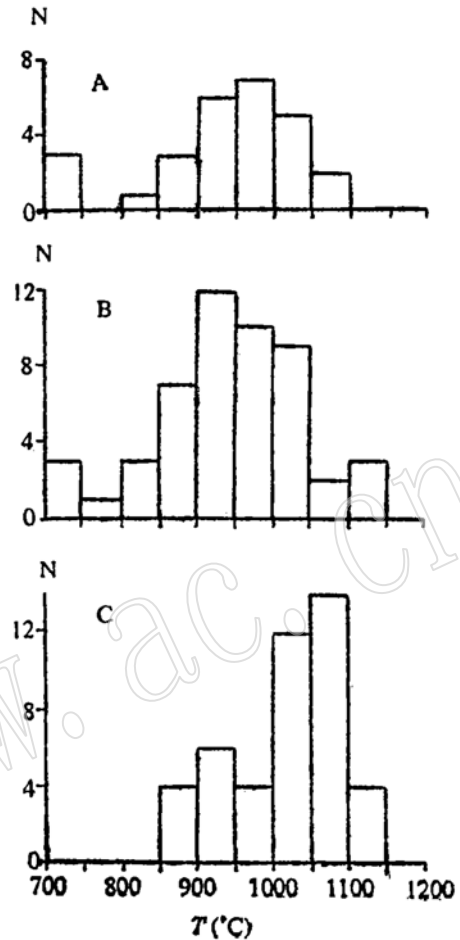


图4 中国东部早第三纪(A)、晚第三纪以后(B)和中欧Pannonian盆地(C)尖晶石二辉橄榄岩包体平衡温度直方图

Fig. 4 Histogram showing equilibrium temperatures of spinel hercynite xenoliths in Paleogene (A) and after Neogene (B) of eastern China as well as in Pannonian basin of Central Europe

图中C根据 [5]

● 张小鸥，1995，依通地区上地幔剪切带及其地震地质意义。地震地质，第2期（待刊）。

之间,稍稍可以看出随深度变大的趋势。但是,应变速率和等效粘滞度却有随深度变化的明显线性关系。由此图中还可看出,上面提到的阳原两个样品其反映的深度不足20km(图中的最下面两个点),显然是不合理的,因此应该舍弃。与中国东部晚第三纪以来的情况^[5]对比,它们具有许多相似之处。不同的是,早第三纪幔源包体得到的应变速率和等效粘滞度剖面具有比晚第三纪和第四纪包体更为明显的线性关系,这可能与本文采用的温度计更为可靠有关。此外,所研究的早第三纪包体样品的流变参数均未见到有达到软流圈数值的,而晚第三纪以来的样品在60—70km左右有的已达到软流圈的数值。由此看来,中国东部晚第三纪以后的上地幔继承和发展了早第三纪上地幔的流变学特征。

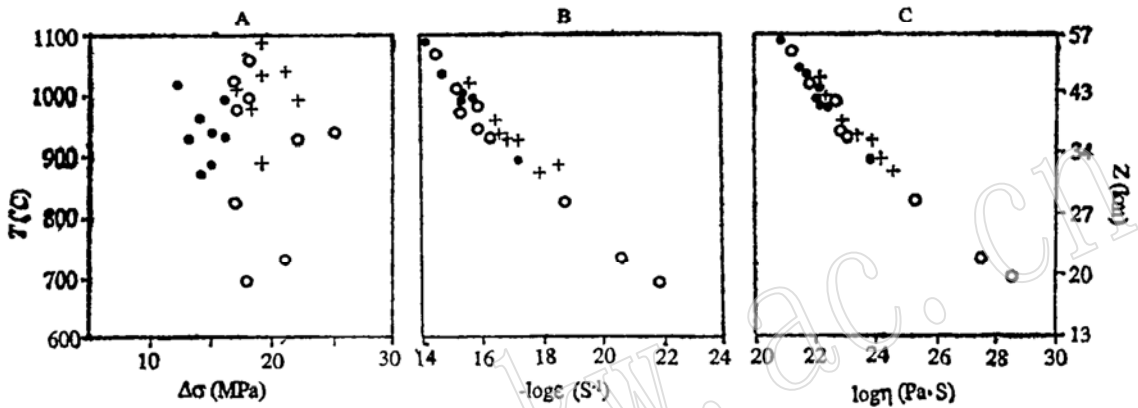


图5 中国东部早第三纪上地幔流变参数随深度的变化剖面

Fig. 5 Variation in rheological parameters of Paleogene upper mantle in eastern China with depth

A—差异应力剖面; B—应变速率剖面; C—等效粘滞度剖面

●—吉林双辽七星山; +—山西繁峙高升寨; ○—河北阳原八楞山。

4.3 结论

综上所述,我们可以得出如下的结论:

(1) 中国东部早第三纪玄武岩中的幔源包体以二辉橄榄岩为主,从含铝矿物相来看,都属于尖晶石相,未发现石榴石相的橄榄岩包体。

(2) 包体的结构以残斑结构为主,未见典型的原生粒状结构和粒状变晶结构。包体中橄榄石均显示一定程度的优选方位,其优选方位型式随包体的平衡温度和压力的不同而变化。

(3) 包体中的橄榄石发育有反映高温位错蠕变机制的位错亚构造,表明为上地幔条件下的流变。

(4) 这些包体的平衡温度为800—1100°C,其来源深度为28—52km。其差异应力为12—25MPa,应变速率为 10^{-15} — 10^{-18} s⁻¹,等效粘滞度为 10^{21} — 10^{25} Pa·S。应变速率和等效粘滞度与深度的变化有很好的线性关系。

(5) 总的说来,中国东部早第三纪玄武岩中的幔源包体在成分、结构、组构、位错构造上,具有与晚第三纪以后的玄武岩中的幔源包体类似的特征,所推导的流变参数也基

本上相似。

上述结果反映了中国东部早第三纪时期的上地幔与晚第三纪以后的上地幔具有相同的流变学特征。这表明晚第三纪以后, 中国东部的上地幔继承和发展了早第三纪时的流变学特征。过去我们曾经提出, 中国东部的上地幔的流变特征与裂谷和大陆拉张带的上地幔一致, 同时, 还发现中国东部上地幔存在有底辟作用^[9]。看来, 这些性质在早第三纪即已存在, 中国东部的上地幔在晚第三纪和第四纪时继续和发展了这一特征。

参 考 文 献

- 1 刘嘉麒. 中国东北地区新生代火山岩年代学研究. 岩石学报, 1987, 4(4): 21—31.
- 2 刘若新, 陈文寄, 孙建中, 李大明. 中国新生代火山岩的K-Ar年代与构造环境. 刘若新主编. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 1992, 地震出版社, 1—43.
- 3 王慧芬, 杨学昌, 朱炳泉, 范嗣昆, 戴瀛谟. 中国东部新生代火山岩K-Ar年代学及其演化. 地球化学, 1988, (1): 1—11.
- 4 Nicolas A. Structure and petrology of peridotites: clues to their geodynamic environment, *Rev geophys.* 1986, 24 (4): 875—895.
- 5 林传勇, 史兰斌, 陈孝德, 何永年. 中国东部幔源包体的变形特征及其上地幔流变学意义. 伸展构造研究. 1993, 地质出版社, 87—98.
- 6 Mercier J-C C. Single pyroxene geothermometry and geobarometry. *Amer. Minerol.* 1976, 61: 603—615.
- 7 Mercier J-C C. Single pyroxene thermobarometry. *Tectonophysics.* 1980, 70: 1—37.
- 8 Bertrand P, Mercier J-C C. The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: toward an absolute geothermometer for the natural system? *Earth planet. Sci. Lett.* 1985, 77: 109—122.
- 9 Brey G P, Kohler T. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometer and practical assessment of existing thermobarometers *Jour. Petrol.* 1990, 31: 1353—1378.
- 10 徐义刚. 适用于幔源包体的地质温度计. 岩石学报, 1993, 9 (2): 167—179.
- 11 Ross J V, Ave Lallemand H G, Carter N L. Stress dependence of recrystallized grain and subgrain size in olivine. *Tectonophysics.* 1980, 70: 39—61.
- 12 Karato S, Toriumi M, Fujii T. Dynamic recrystallization of olivine single crystal during high temperature creep. *Geophys. Res. Lett.* 1980, 7: 649—652.
- 13 Toriumi M, Relation between dislocation density and sub-grain size of naturally deformed olivine in peridotites. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1979, 68: 181—186.
- 14 Ave Lallemand H G, Mercier J-C C, Carter N L, Ross J V. Rheology of upper mantle: inferences from peridotite xenoliths, *Tectonophysics.* 1980, 70: 85—113.
- 15 Grachev A F, Magnitskiy V A, Kalashnikova Z V. Recent crustal movements, neotectonics, and physical fields of the Carpathian-Baikal Region: composition and constitution of the upper mantle and the origin of modern and recent tectonic activity, *Itvestiya. Earth physics.* 1987, 23 (9): 697—706.
- 16 林传勇, 史兰斌, 何永年. 糜棱岩型幔源橄榄岩包体及其地质意义. 大陆岩石圈动力学与演化国际讨论会论文集. 1990, 科学出版社, 165—172.

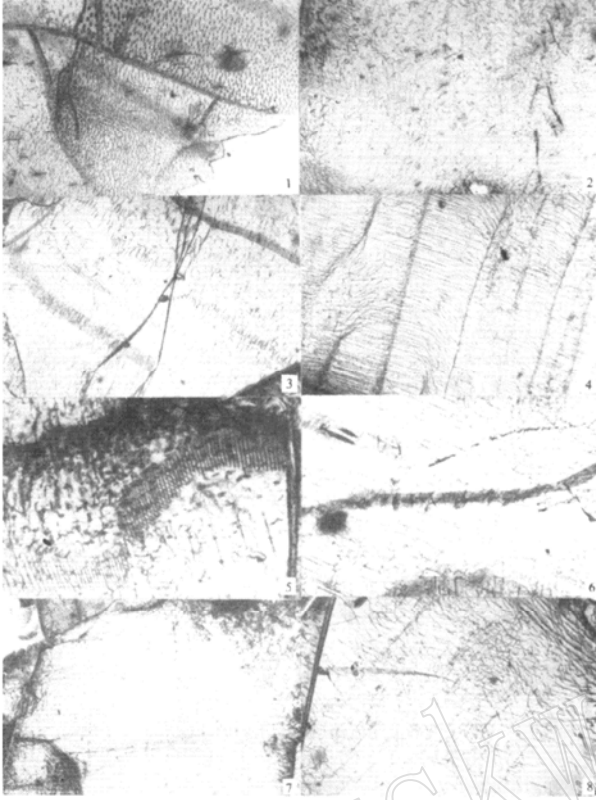
Deformation Features of Mantle Xenoliths from Paleogene Basalts in Eastern China and Their Implication of Upper Mantle Rheology

Lin Chuanyong, Shi Lanbin, Chen Xiaode, Zhang Xiaou
(Institute of Geology, State Seismological Bureau, Beijing 100029)

Key words: mantle xenolith; upper mantle; rheology; eastern China; microstructures

Abstract

The presently known xenolith-bearing Paleogene basalts in the eastern China are located in Shuangliao of Jilin Province, Yangyuan of Hebei province, and Fanshi of Shanxi Province. The mantle xenoliths collected from these three localities have been described in this paper. The xenoliths are dominated by spinel lherzolite, having mainly porphyroclastic texture. The olivine from the xenoliths exhibits obvious preferred orientation and dislocation substructures indicative of high temperature creep mechanism. The equilibrium temperature and pressure of the xenoliths have been calculated as 800—1100°C and 0.7—1.6 GPa respectively. The xenoliths are deduced to have been derived from a depth of 28—52 km. The differential stress estimated by microstructural piezometry is 12—25 MPa, while the strain rate and equivalent viscosity derived from the high temperature flow law of peridotites are 10^{-15} — 10^{-18} s⁻¹ and 10^{21} — 10^{25} Pa·s respectively. The mantle xenoliths from the Paleogene basalts have principally the same characteristics as the xenoliths from the Neogene and Quaternary basalts, indicating that the upper mantle of Neogene and Quaternary inherited and developed the rheological characteristics of Paleogene. The characteristics of the upper mantle in the eastern China have been coincident with those of the upper mantle in the continental extensional zone or rift since Tertiary.



照片1 自由位错, 16×8 (氧化钨饰法, 单偏光, 下同); 照片2 弯曲的自由位错线, 25×8 ;
照片3 位错列, 25×8 ; 照片4 (100) 位错倾斜壁, 16×8 ; 照片5 位错扭转壁(位错网
格) 63×8 ; 照片6 位错弓弯, 25×8 ; 照片7 位错弓弯, 25×8 ; 照片8 滑动位错环群,
 25×8

www.jyckw.ac.cn