

中国东北地区上地幔组成、 结构及热状态

邓晋福

(武汉地质学院研究生部)

鄂莫岚

(中国科学院地质研究所)

路凤香

(武汉地质学院)

关键词: 尖晶石二辉橄榄岩; 尖晶石方辉橄榄岩; 地温计; 地压计; 上地幔

要 提: 本文通过对中国东北地区新生代玄武岩中超镁铁质包体的研究, 根据地质压力计所估算的包体形成深度、玄武岩浆及辉石岩浆起源的深度等, 建立了中国东北地区上地幔组成模式: 1. 壳幔过渡带; 2. 尖晶石二辉橄榄岩层; 3. 含有痕量硅酸盐熔体的低速层; 4. 尖晶石方辉橄榄岩层; 5. 石榴石二辉橄榄岩层。与此同时, 根据地质温度计与地质压力计推算资料, 作者认为中国东北地区上地幔属大洋地温。与典型克拉通地温相比, 低速层位置较浅, 上地幔处于过热状态, 这与大陆裂谷的发育有关。

一、前 言

长期以来, 对于上地幔的各种性质的了解主要依靠地球物理学的研究。近年来, 由于上地幔岩石学研究的飞速进展, 大大地提高了对上地幔性质的了解。岩石学模型与地球物理学模型的结合对上地幔的物质组成、结构和热状态可提出更好的约束条件。东北地区新生代碱性玄武岩中含有大量的上地幔超镁铁岩包体, 它是我们能直接观察到的上地幔岩石标本, 为我们研究本区上地幔性质提供了极大的方便。就目前所知, 东北地区从长白山到大兴安岭, 含有超镁铁岩包体的玄武岩至少有20多处, 40—50个点。含超镁铁岩包体的玄武岩类主要是碧玄岩, 其次是碱性橄榄玄武岩, 还有极少量的橄榄拉斑玄武岩和霞石岩。超镁铁岩包体在熔岩和火山碎屑岩中均有广泛分布, 火山碎屑岩中的包体往往含量多而大, 不少火山弹的核心亦是超镁铁岩。本文将基于对这些超镁铁岩包体的岩石学、物理化学和热力学的研究来讨论本区上地幔组成、结构和热状态, 以提供中国东部新生代大陆裂谷形成的上地幔条件, 讨论中力图把岩石学研究的成果与已公布的地球物理研究成果结合起来。

二、上地幔岩石及塑性流动

本区上地幔超镁铁岩有两大成因系列^{[1][2]}: 1. 纯橄榄岩-二辉橄榄岩系列, 或简称橄榄岩系列, 占包体总量95%以上, 为上地幔的主要岩石类型, 属于熔出玄武质岩浆后的残余上地幔岩石; 2. 单辉橄榄岩-橄榄辉石岩-辉石岩系列, 或简称辉石岩系列, 占包体总量5%以下, 属于上地幔岩石熔融程度较大的苦橄岩-橄榄拉斑玄武岩岩浆在上地幔条件下结晶作用的产物。在极少情况下, 可见后一成因系列的辉石岩呈脉状切穿前一成因系列的橄榄岩叶

理构造的复合包体 (Composite inclusions), 它是辉石岩系列属于岩浆成因的最好证据。

上地幔橄榄岩中以二辉橄榄岩为主, 其次是方辉橄榄岩, 纯橄榄岩极少量, 它们主要由橄榄石, 斜方辉石, 单斜辉石和尖晶石组成, 有时有少量韭闪石, 金云母, 后两者是上地幔交代作用的产物。方辉橄榄岩中单斜辉石小于5%, 纯橄榄岩中斜方辉石和单斜辉石均小于10%。它们的矿物组成见表1。由表1可知, 从二辉橄榄岩→方辉橄榄岩→纯橄榄岩, 矿物中难熔组分MgO, Cr₂O₃含量增高, 它代表了亏损程度的增高。岩石学研究表明, 二辉橄榄岩是熔出玄武岩岩浆后的难熔残余, 方辉橄榄岩和纯橄榄岩是熔出辉石岩岩浆后的上地幔残余。根据二辉橄榄岩与玄武岩在化学组成上的互补性以及局部熔融程度, 估算的本区熔出新生代玄武岩岩浆前上地幔原岩的组成见表2, 它与模型上地幔岩 (pyrolite) 十分吻合。

辉石岩系列中以辉石岩为主, 其次为橄榄辉石岩, 极少量单辉橄榄岩。主要矿物是斜方辉石, 单斜辉石, 橄榄石, 有时含有少量石榴石, 其矿物组成见表3。由表3可以看出, 在主要矿物的组成以及全岩MgO/ΣFeO方面, 辉石岩系列与橄榄岩系列是完全不同的, 说明了它们是在不同条件下形成的二个独立的成因系列。

表1 橄榄岩主要矿物的组成

Table 1 The main mineral compositions of the peridotite series

名称	橄榄石	斜方辉石			单斜辉石				尖晶石	
	Fo (镁橄榄石)	Wo (硅灰石)	En (顽火辉石)	Fs (斜铁辉石)	Wo (硅灰石)	En (顽火辉石)	Fs (斜铁辉石)	Cr ₂ O ₃	Cr/Cr + Al	Cr ₂ O ₃
二辉橄榄岩	89.5— 90.5	1.1—2.6	87.9— 89.7	8.6— 10.8	40.3— 46.1	46.2— 54.8	2.4— 11.8	0.29— 0.86	0.091— 0.179	6.86— 16.37
方辉橄榄岩	90.5— 92.7	0.5—1.4	90.0— 92.0	7.5—8.6	34.0— 43.0	43.0— 59.0	3.0—7.0	0.42— 0.77	0.307— 0.323	26.2— 27.8
纯橄榄岩	91.5— 93.0									
矿物种属	Fo (镁橄榄石)	En (顽火辉石)			Cr—Di及Cr—En—Di 铬透辉石及铬顽—透辉石				Cr—Sp 铬尖晶石	

上地幔橄榄岩广泛发育各种变质-变形结构。橄榄岩叶理构造及条带状构造发育, 条带往往由铬透辉石或顽火辉石相对集中形成, 条带中橄榄石, 铬透辉石, 顽火辉石, 铬尖晶石的化学组成均与周围的橄榄岩相同, 且条带平行于叶理, 这表明条带构造是上地幔变质分异作用造成。橄榄岩广泛发育碎斑结构, 碎斑主要是橄榄石, 斜方辉石, 极少情况下是单斜辉石。碎斑橄榄石经常发育扭折带, 有时可见二组扭折带, 有时斜方辉石亦有扭折带, 碎斑斜方辉石和单斜辉石经常发育单斜辉石与斜方辉石出溶页片, 说明变形作用是在温度下降的条件下进行的, 代表了上地幔中的冷却条件。基质由橄榄石, 斜方辉石, 单斜辉石和尖晶石组成, 发育粒状变晶及板状变晶结构, 尖晶石常呈散裂状, 有时基质矿物拉长方向有二个, 相交约30°-45°, 后者与橄榄石中二组扭折带暗示了某些橄榄岩可能遭受到两次塑性变形作用。少数橄榄岩被强烈破碎形成糜棱结构, 叶理十分明显, 且可见粗细不同的二组条带呈锐角相交, 这亦暗示了可能经历过二次塑性变形作用。粒状变晶的基质常有较好的重结晶结构, 三

连点发育。与板状变晶结构的橄榄岩一样，粒状变晶结构的橄榄石具优选方位，说明重结晶作用是动态的（同构造的），而不是静态的。上地幔橄榄岩的结构及优选方位表明，橄榄石的滑动系统是 $[100](010)$ 或 $[100](okl)^{[1]}$ ，根据高温高压塑性流动实验(Carter等, 1970)表明，它们是在 $T > 1000^\circ\text{C}$ 的上地幔压力下发生的。根据橄榄石新变晶粒度，亚晶粒大小，自由位错密度等估算的本区上地幔橄榄岩在塑性流动时差异应力值 $\sigma = 36 - 63\text{MPa}^{[3]}$ 或 $31.8 - 59.2\text{MPa}^{[4]}$ 或 $26.0 - 75.2\text{MPa}$ ，这表明，本区上地幔塑性流动具高温、低应变速率的特征。本区新生代寄主玄武岩携带到地表的上地幔橄榄岩包体代表了软流圈顶部及其上的岩石圈中上地幔碎块，这些橄榄岩的变形-变质结构、构造表明，软流圈和岩石圈确实发生过对流运动。它与地球物理资料推断的中国东部地区存在地幔对流^[5]是一致的。另外，某些橄榄岩包体来自140-200km，推测这些较深部的上地幔碎块在玄武岩岩浆发生之前已通过底劈上升或地幔对流上升达50-80km的地方，后来被玄武岩岩浆带至地表，这表明在上地幔中曾发生过上升的地幔塑性流动，辉石碎斑中出溶页片所指示的变形作用同时伴随有降温的事件支持了这种推测。

表 2 估算的原始上地幔组成
Table 2 The estimated composition of original upper mantle

	宽甸	大鞍山	汪清	东北地区	模型地幔岩
SiO ₂	44.30	44.56	45.00	44.62	45.16
TiO ₂	0.80	0.25	0.20	0.42	0.71
Al ₂ O ₃	3.22	2.70	3.29	3.07	3.54
Fe ₂ O ₃	2.40	1.43	1.75	1.86	0.46
Cr ₂ O ₃	—	0.34	0.38	0.36	0.43
FeO	6.80	7.24	7.20	7.08	8.04
MnO	0.21	0.14	0.19	0.18	0.14
MgO	38.22	40.15	34.50	37.62	37.47
CaO	2.66	2.11	5.50	3.42	3.08
Na ₂ O	0.40	0.33	0.45	0.39	0.57
K ₂ O	0.40	0.12	0.15	0.22	0.13
P ₂ O ₅	0.35	0.10	—	0.23	0.06
	路凤香等 1983	罗照华 1982	鄂莫岚等 1983	邓晋福等 1986	Ringwood 1966

表 3 辉石岩系列主要矿物的组成

Table 3 The main mineral compositions of the pyroxenite series

名称	橄榄石		斜方辉石		单斜辉石				尖晶石		全岩 MgO/ΣFeO (Wt%)	
	Fo 镁橄榄石	Wo 硅灰石	En 顽火辉石	Fs 斜铁辉石	Wo 硅灰石	En 顽火辉石	Fs 斜铁辉石	Cr ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Cr/Cr + Al		
单辉橄榄岩	81-84				38.0-40.0	51.0-52.0	9.5-10.7	0.20				
橄榄辉石岩	82-84				39.6-40.5	48.8-50.2	10.2-10.7				2.14-2.57	
二辉石岩	79	4.6	80.8	14.6	36.4	53.7	9.9	0.27	1.8-3.3	0.031-0.036		
单斜辉石岩	79-81				38.8-42.3	47.1-50.1	10.6-11.1				1.83	
矿物种属	贵橄榄石		古铜辉石		普通辉石					贫Cr尖晶石		

辉石岩保留了较好的岩浆结构特征，如辉石发育生长双晶，有组成上的环带，单斜辉石包裹自形或圆形橄榄石，或单斜辉石呈较细的集合体沿橄榄石粒间分布等。除此以外，亦发育变形变质结构（如碎斑，橄榄石的扭折带），重结晶结构（如完好的三连点）。辉石的出溶结构特别发育，出溶页片的数量又多，这暗示了辉石岩曾经历了较大幅度的降温事件，辉石岩的固相线温度远比上地幔地温高得多，它与辉石岩是岩浆作用产物的推测符合。橄榄石有

时呈现两组扭折带, 根据扭折带边界确定的早期滑动方向 $t=[100]$, 后期的 $t=[001]$, 说明辉石岩形成之后亦参加了上地幔的塑性流动事件。

在上地幔浅部 ($<80\text{km}$), 差异应力值的大幅度变化 ($26-75\text{MPa}$) 是大陆裂谷伸展构造带的特征。

除变质变形结构以外, 橄榄岩和辉石岩均发育局部熔融结构, 如单斜辉石的海绵边, 局部熔融小囊体等, 暗示了上地幔确实发生过熔出岩浆的局部熔融事件, 以及可能存在有低速层和软流圈。

三、上地幔结构

根据地质压力计估算的上地幔超镁铁岩包体形成的压力和相应深度, 并考虑到玄武岩岩浆、辉石岩岩浆起源的深度, 以及地球物理资料等, 我们提出一个本区上地幔结构的初步模型 (图1)。上地幔超镁铁岩包体形成的深度 $30-160\text{km}$, 所以该模型仅仅涉及到上地幔上部的深度范围。如果包括莫霍面 ($\approx 35\text{km}$) 上面的壳幔过渡带在内, 可分出5层, ①壳幔过渡带 ($28-35\text{km}$), ②尖晶石二辉橄榄岩层 ($35-60\text{km}$), ③低速层 ($60-120\text{km}$), ④尖晶石方辉橄榄岩层 ($120-200\text{km}$), ⑤石榴石橄榄岩层 ($>200\text{km}$)。

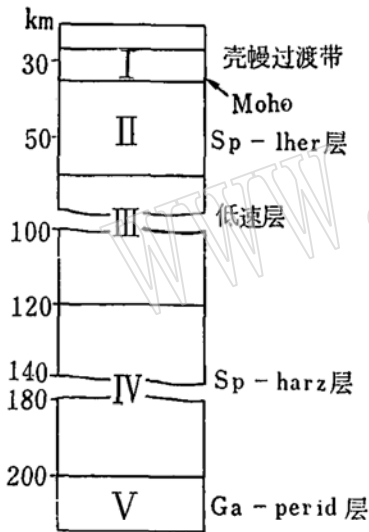


图1 东北地区上地幔结构模型
Fig.1 Model for the structure of upper-mantle beneath North-east China

根据地球物理资料, 莫霍面深度范围 $30-40\text{km}$ ^[6]或平均深度 $35-36\text{km}$ ^[7], 上地幔超镁铁岩包体的深度最浅为 $30-36\text{km}$, 我们取本区莫霍面平均深度为 35km 。莫霍面以上厚约 $7-8\text{km}$ 范围内为壳幔过渡带, 地震纵波速度 V_p 为 $7.56-7.78$ 或 $7.1-7.6\text{km/s}$ ^{[7][8]}, 它可能是由于以榴辉岩为主的下地壳引起, 亦可能是由于地幔运移到下地壳的增添物引起。新生代玄武岩中有下地壳岩石的包体, 但未发现有榴辉岩包体, 这排除了前者的可能。从上地幔超镁铁岩包体的最浅深度可达 30km 来看, 这一过渡带的物质组成主要由下地壳物质及由于重力不稳定性而贯入下地壳的上地幔或软流圈物质的混合产物, 它与 V_p 具有下地壳—上地幔过渡的性质相适应。它是上地幔上隆, 底劈上升, 上地幔对流的表现和结果。

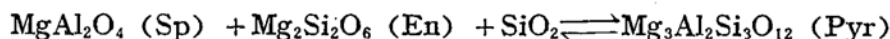
尖晶石二辉橄榄岩层, 含有少量辉石岩。根据地球物理资料, 该层内有 $V_p=7.6-7.8\text{km/s}$ 的地段, 暗示了除二辉橄榄岩外还应有别的物质存在。少量辉石岩不可能引起 V_p 有那么大的降低。岩石学研究表明, 岩浆起源于低速层, 玄武岩中巨晶矿物于莫霍面附近形成, 有理由推测在该层内可能存在局部的次级岩浆房, 随后结晶成玄武质岩石, 它与二辉橄榄岩的混合可能导致较低的 V_p 。

低速层的 $V_p=7.2-7.4\text{km/s}$ ^[8], 其埋深范围在 $60-120\text{km}$ ^[9], 不同方法推定的顶界深度有些差异, 滕吉文等 (1982) 提出为 83km , 陈伯舫 (1974) 提出为 60km , 厚 80km , 兰州地震地质大队 (1976) 提出 $70-80\text{km}$ 。新生代幔源原生玄武岩岩浆起源的深度集中在 $50-80\text{km}$ 范围内, 正好符合由地震资料推算出的低速层的顶部, 这种相符性表明, 低速层是由

达固相线的上地幔橄榄岩组成, 它含有少量的隙间局部熔浆, 同时亦可能暗示了新生代时期低速层的位置可能大致与现代低速层位置相当, 只有一点差异是, 新生代时期由于软流圈顶面的上升, 局部地区可能达更浅的位置。这表明新生代玄武岩岩浆的发生与软流圈及其顶面位置直接相关, 岩浆库是由低速层内少量的局部熔浆向顶部分凝集中而形成, 岩浆的源区不是象有人认为是^{[10][11]}是壳幔混合层或异常地幔。关于软流圈中局部熔浆的数量, Логачев^[12]提出, 肯尼亚裂谷下为10%, 贝加尔裂谷下为5%, 相应的 V_p 为7.5和<7.7。根据橄榄岩包体与玄武岩化学组成上的互补性, 按照物质平衡原理估算的玄武岩岩浆形成时上地幔橄榄岩的局部熔融程度为7—12%^{[13][14]}, 含有这样数量的局部熔浆的低速层与 $V_p=7.2-7.4\text{km/s}$ 相适应。在低速层内主要是尖晶石二辉橄榄岩, 在顶部含有角闪石尖晶石二辉橄榄岩, 各种辉石岩广泛分布于61—108km范围内, 局部地段有少量尖晶石方辉橄榄岩和含金云母的尖晶石二辉橄榄岩。宋仲和等研究表明, 日本岛弧下上地幔上部无低速层, 日本海沟以外的大洋下上地幔低速层的深度较大。东北地区低速层顶界的深度浅, 看来这种“过热”的上地幔是新生代时期该区发育大陆裂谷构造的根本原因。

尖晶石方辉橄榄岩层的地球物理资料很少, 低速层的下界可作为该层的顶界。辉石岩岩浆起源的深度为140—210km^[2], 它们是上地幔橄榄岩中等程度局部熔融(20—30%)产生的熔浆, 留下的难熔残余是强亏损的方辉橄榄岩。少量尖晶石方辉橄榄岩包体的深度正好符合这一深度范围。低速层内较大的辉石岩和尖晶石二辉橄榄岩层内少量的辉石岩是来自这一层熔出的岩浆经结晶而形成。东北地区, 除前寒武纪以外, 华力西时期有大量、强烈的相当于辉石岩岩浆的喷出一侵入活动事件, 因此推测这层主要由尖晶石方辉橄榄岩组成。此层内还有少量的尖晶石二辉橄榄岩和斜方辉石岩。在华力西或前寒武纪时期, 这一层可能相当于低速层, 是产生辉石岩岩浆的源区。实验和相平衡的知识告诉我们, 新生代时期当上覆的二辉橄榄岩发生低程度局部熔融时(形成低速层), 已经强烈亏损的方辉橄榄岩是不会发生局部熔融的, 因为难熔残余性质的尖晶石方辉橄榄岩在熔融作用中是一个“热坝”。由此推测, 低速层的底界可能符合于尖晶石方辉橄榄岩层的顶界($\approx 120\text{km}$)。

石榴石橄榄岩层, 确切范围不清, 辽宁金伯利岩中含有大量镁铝榴石、橄榄石等上地幔矿物捕虏晶, 推测在 $\geq 200\text{km}$ 上地幔组成可能为石榴石橄榄岩。人工合成的 $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系统和模型上地幔岩的高温高压实验表明, 尖晶石二辉橄榄岩与石榴石二辉橄榄岩的相区分界当 $T=1000-1300^\circ\text{C}$ 时, $P=2.0-2.3\text{GPa}$ 。自然界复杂系统的研究表明, 尖晶石二辉橄榄岩在大于上述分界线的压力条件下常是稳定的。MacGregor等(1976)把尖晶石相往更高压力下扩展归因于尖晶石中 Cr_2O_3 含量的增高。吉林老庙碧玄岩中尖晶石二辉橄榄岩包体的平衡压力可达5.2MPa, 表明本区尖晶石二辉橄榄岩可延伸到160km深度, 这已进入了人工实验所确定的石榴石二辉橄榄岩相区范围了。关于在这样大的深度没有出现石榴石橄榄岩的问题, 我们已作过一些讨论。现在认识到的主要有三个因素引起。①二辉橄榄岩中尖晶石 Cr_2O_3 含量高, 一般为7—16%, 方辉橄榄岩中 Cr_2O_3 含量更高, 可达26—27%(表1)。②上地幔橄榄岩系统中 SiO_2 活度降低对于尖晶石相在更高压力下稳定有重要影响^[15], 我们曾引入一个尖晶石转变为石榴石的反应:



从反应式可判断, 当系统中 SiO_2 活度降低时, 反应向左进行, 利于尖晶石在更高压高温下稳

定；尖晶石中 Cr_2O_3 含量增高使 MgAl_2O_4 活度降低，同样有利于尖晶石在更高压高温下稳定。计算表明^[15]，东北地区尖晶石二辉橄榄岩的 SiO_2 活度偏低，尤其是方辉橄榄岩的 SiO_2 活度更低。③全岩中 $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值增大将对尖晶石相转变为石榴石相所要求的压力显著增大。东北地区二辉橄榄岩 $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值主要集中在0.16—0.30，方辉橄榄岩和纯橄榄岩中0.40—0.70，比模型上地幔岩（pyrolite）的该比值0.12高得多，这有利于本区尖晶石相区往更深部扩展。

近年来，不少研究者强调壳幔过渡带是大陆裂谷构造区的深部特征及其形成的深部条件。从上面的分析，我们觉得，在上地幔结构中，除了壳幔过渡带这一重要性质和因素外，低速层或软流圈的埋深浅在大陆裂谷构造区是另一个重要的深部特征。从东北地区来看，壳幔过渡层与低速层二者密切联系，但又不是一回事。看来，与壳幔过渡层相比，低速层的埋深浅可能是大陆裂谷构造形成的更重要的原因。

四、上地幔热状态

根据地质温压计所获得的上地幔的辉石地温曲线^[15]大致与大洋地温曲线一致(图2)。辉石地温可代表本区固体上地幔的地温分布。Ringwood (1975)指出，碱性玄武岩往往更频繁地产生在不稳定地区，包括以高于正常热流值为特征的裂谷地区。看来，大陆裂谷地区高于正常热流值的特征可能直接与上地幔热状态有关。传统的地槽-地台学说认为，碱性玄武岩的喷溢是该地区在构造上趋于稳定的标志，标志着一个构造旋回的结束，这个传统观念是与本区

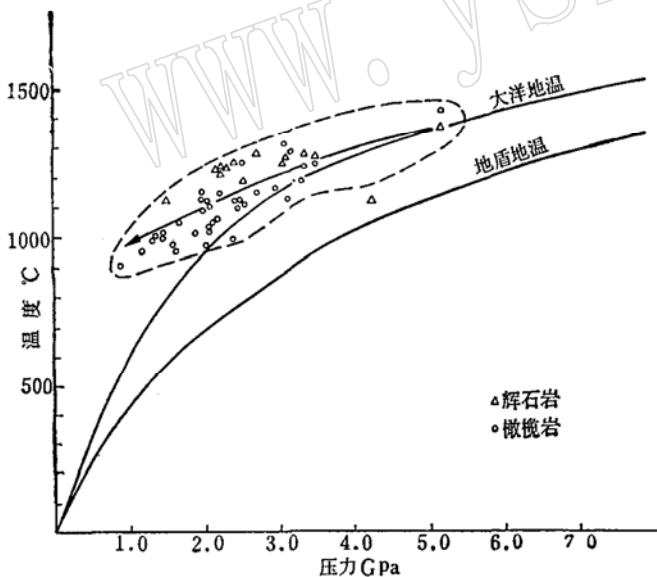


图2 东北地区上地幔地温分布

Fig. 2 Geotherm distribution of upper-mantle beneath Northeast China

上地幔的热状态不相符合的。大洋下的上地幔比大陆下的上地幔的热状态要高(图2)。非洲克拉通地区和西伯利亚陆台下面的上地幔通过对金伯利岩中超镁铁岩包体的研究表明，它们的热状态相当于地盾地温。对夏威夷地区大洋下面及美国盆岭省大陆裂谷区的上地幔，通过对碱性玄武岩中超镁铁岩包体的研究表明，它们的热状态相当于Ringwood提出的大洋下面的地温。对中国东部新生代玄武岩中广泛分布的超镁铁岩包体研究^{[15][4][2][1]}表明，中国东部(包括东北地区)上地幔的热状态为大洋地温，与克拉通相比，这种“过热”状态可能是本区岩石圈在构造上活动的主要原因，与新生

代时期发育大陆裂谷构造相符合。

由图2可看出，本区上地幔橄榄岩地温分布的一个显著特征是在上地幔浅部远离大洋地温曲线，在相应深度上比典型的大洋地温的温度要高，这是什么原因呢？我们曾提出一个上

地幔底劈上升模型来解释这一现象。上面已指出,从上地幔橄榄岩的变质变形结构以及辉石的出溶均暗示本区上地幔曾经历过底劈上升。本区辉石地温在上地幔浅部偏离典型大洋地温曲线的特征可能从另一个侧面反映了上地幔底劈上升的信息。图 2 上的箭头表示了大致沿绝热梯度曲线底劈上升的方向。这种上地幔的底劈上升必然的结果是岩石圈的抬升,上覆地壳的拉伸变薄,形成岩石圈深断裂。

由图 2,辉石岩的地温分布比橄榄岩的大约高出 100—150℃,它可能反映了辉石岩类是由岩浆形成的一点信息,压力的范围代表了辉石岩岩浆侵位并固结于 50—100km 的上地幔上部。上面已指出,辉石岩固结之后曾经历过较大幅度的降温事件,尽管如此,相对于上地幔橄榄岩来说,辉石岩岩浆的“过热”状态的某些信息仍然被保存下来了。由于上地幔底劈上升,岩浆分凝物质(例如,辉石岩)的存在等,不但使上地幔在物质组成上产生不均一性,同时,热状态亦存在不均一性。

虽然,大洋型的辉石地温以及上地幔底劈上升事件使得本区上地幔达“高热”状态,但是它仍然不能引起上地幔橄榄岩的局部熔融事件发生,因为它仍低于橄榄岩固相线温度。通过热力学计算获得的岩浆起源的温压条件可得到岩浆形成时的地温分布,如图 3 所示。可以看出,岩浆形成时位于固相线附近,表明它们是上地幔橄榄岩局部熔融的产物,辉石岩岩浆的局部熔融程度大于玄武岩岩浆。岩浆发生时上地幔热状态相当于大洋中脊地温,它比原有的固体上地幔的大洋地温高出约 200℃,但相应的深度几乎相同,这表明岩浆的发生主要地是由于上升的高温热流所引起,或者说软流圈顶面上升所引起,而不是地幔体单元底劈上升的降压诱发的局部熔融^[14]。新生代中国东部大陆裂谷构造发育时期,上升的高温热流导致在上地幔浅部低速层的形成,它是玄武岩岩浆的发源地。华力西大洋盆扩张时期,形成的相当于苦橄岩或苦橄拉斑玄武岩组成的辉石岩岩浆,其低速层源区现在已是尖晶石方辉橄榄岩层了。

五、大陆裂谷形成的深部条件及上地幔演化

地壳浅部的构造变动孕于深部构造的演化,中国东部新生代时期大陆裂谷构造的形成和驱动力来自上地幔,它直接与上地幔的热状态、物质状态、结构、重力不稳定性、不均一性、对流和运动等密切相关。上面已指出,近年来关于大陆裂谷的深部条件的讨论主要强调了壳幔过渡带的存在,根据上面的分析,我们认为,其深部条件至少可以提出如下几点

1. 上地幔经历高温低应变速率的塑性流动,与克拉通相比,大陆裂谷区上地幔浅部(<80km)的差异应力大,且变化范围宽(26—75MPa)。
2. 固体上地幔具大洋型地温分布。

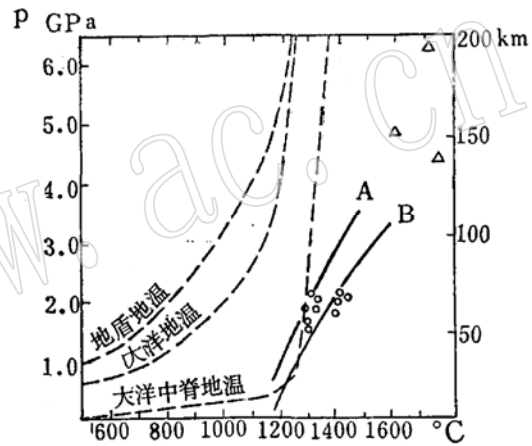


图 3 岩浆起源时上地幔地温分布
Fig. 3 Geotherm distribution of upper mantle during generation of magma
图中圆圈代表玄武岩岩浆,三角代表辉石岩岩浆; A、B 为橄榄岩固相线

3. 低速层或软流圈及莫霍面埋深浅。
4. 在莫霍面之上存在一个壳幔过渡带。
5. 在莫霍面之下的上地幔顶部橄榄岩中混合有较多量的玄武岩物质。
6. 上地幔在纵向或横向上, 物质组成和热状态不均一, 反映了上地幔的强烈分异和不稳定性。

上地幔的上述性质反映了它的过热状态、重力不稳定性、上地幔物质的对流和底劈上升, 这些性质导致了上地幔在构造上的活化和不稳定, 物质的膨胀和大规模的上隆的必然结果是使上覆的地壳和岩石圈发生升温抬升、伸展变薄, 产生岩石圈深断裂和扩张, 诱发岩浆的大量喷溢, 形成大陆裂谷构造。

基于以上分析, 我们可以提出一个粗略的本区上地幔演化模式, 见图4。

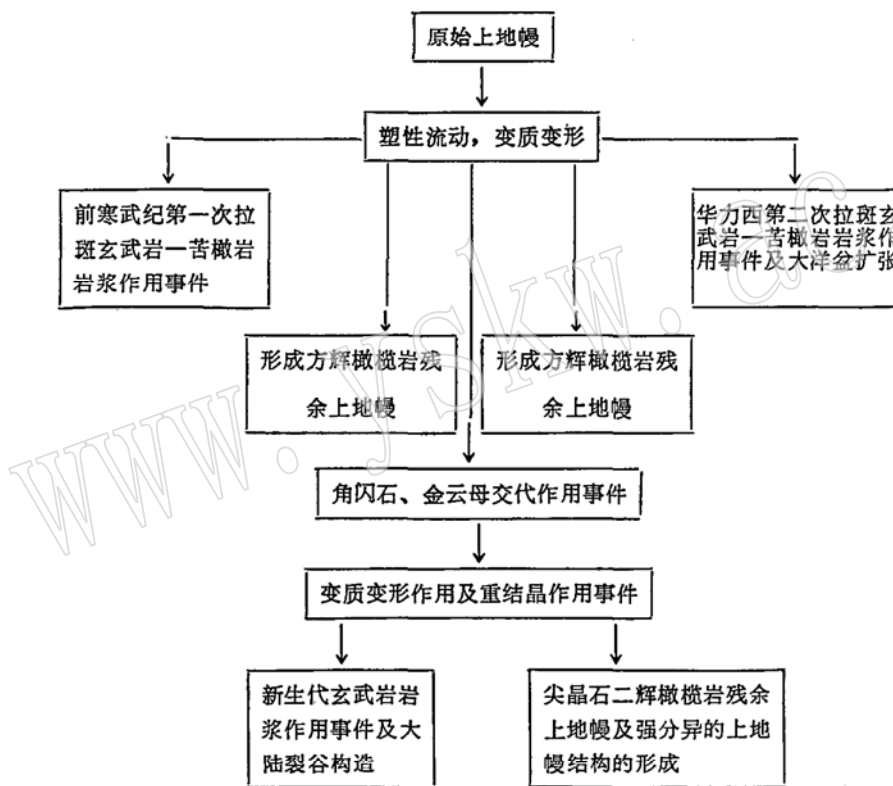


图4 东北地区上地幔演化模式图

Fig. 4 A preliminary upper mantle evolution model beneath Northeast China.

参 考 文 献

- 〔1〕 路凤香、鄂莫岚、邓晋福, 1983, 辽宁宽甸黄椅山玄武岩中超镁铁岩包体及巨晶组合。《岩石学研究》, 第3期, 77—88页。
- 〔2〕 鄂莫岚, 路凤香、邓晋福, 1982, 吉林江清超镁铁岩包体的岩石学特征及辉石岩成因问题的讨论。《地质科学》, 第1期, 39—56页。
- 〔3〕 何永年, 1980, 我国东部若干二辉橄榄岩团块的流动构造及流动应力估算。《中国科学》, 第6期, 569—575页。
- 〔4〕 刘若新等, 1981, 华北地区新生代碱性玄武岩中超镁铁质捕虏体的初步研究。《地震地质》, 第3卷, 第3

期, 1—48页。

〔5〕 黄培华等, 1983, 中国岩石层底面地幔对流状态的探讨。《地球物理学报》, 第26卷, 第1期, 39—47页。

〔6〕 芦造勋, 1983, 东北地区深部构造与地震。《长春地质学院学报》, 第1期, 113—121页。

〔7〕 滕吉文等, 1974, 华北平原中部地区深部构造背景及邢台地震(一)。《地球物理学报》, 第17卷, 第4期, 255—271页。

〔8〕 滕吉文等, 1982, 华北平原邢台地震活动地区的上地幔结构和地幔低速层。《地球物理学报》, 第25卷, 第1期, 58—64页。

〔9〕 宋仲和等, 1981, 北京—隆哈林剖面的地幔纵向速度结构。《地球物理学报》, 第24卷, 第3期, 310—317页。

〔10〕 Грачев, А. Ф., 1977, Рифтовые зоны Земли.

〔11〕 Киселев, А. И. и Др., 1979, Вулканизм Байкальской рифтовой зоны и проблемы глубинного магмаобразования

〔12〕 Логачев, Н. А. и Др., 1983, Кайнозойский континентальный рифтогенез и геологические формации (на примере Кевийской и Байкальской рифтовых зон) 《Геотектоника》, 2, 3—15

〔13〕 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。《地球科学》, 第1期, 183—196页。

〔14〕 鄂莫岚、邓晋福、路凤香, 1983, 吉林汪清碧玄岩岩浆起源及辉石岩形成问题的讨论。《岩石学研究》, 第2期, 1—13页。

〔15〕 邓晋福、鄂莫岚、路凤香, 1980, 中国东部某些地区碱性玄武岩中包体的温度、压力计算。《地质论评》, 第26卷, 第2期, 112—120页。

The Composition, Structure and Thermal Condition of the Upper Mantle Beneath Northeast China

Deng Jinfu

(Beijing Graduate School, Wuhan College of Geology)

E Molan

(Institute of Geology, Academia Sinica)

Lu Fengxiang

(Wuhan College of Geology)

Key words: spinel lherzolite; spinel harzburgite; geotherm; geobarometry; upper mantle

Abstract

Cenozoic alkaline basalts in Northeast China contain abundant upper mantle-derived ultramafic nodules. According to the pressure and depth of the formation of the ultramafic nodules estimated by geobarometric method, the depth of generation of the basaltic and pyroxenitic magmas and geophysical data, a preliminary compositional model of the upper mantle beneath Northeast China has been established. If the overlying crust-mantle transition zone above the Moho is included, five layers have been recognized as follows: 1) the crust-mantle transition zone (28—35km); 2) the spinel lherzolite layer (35—120 km); 3) the

low-velocity zone containing trace amount of silicate melt from 60 to 120km; 4) the spinel harzburgite layer (120—200 km); 5) the garnet peridotite layer (>200km). An oceanic geotherm for the upper mantle beneath Northeast China has been deduced from the calculated result by geothermometry. Compared with the typical craton geotherm, the low-velocity zone is at higher level and the oceanic geotherm nature indicate a condition for the upper mantle beneath Northeast China is "overheat". We suggest this is an interior cause of the continental rift generation in Cenozoic Era. Understanding the composition, structure and thermal condition much better constrain the geophysical and petrological model of the upper mantle.