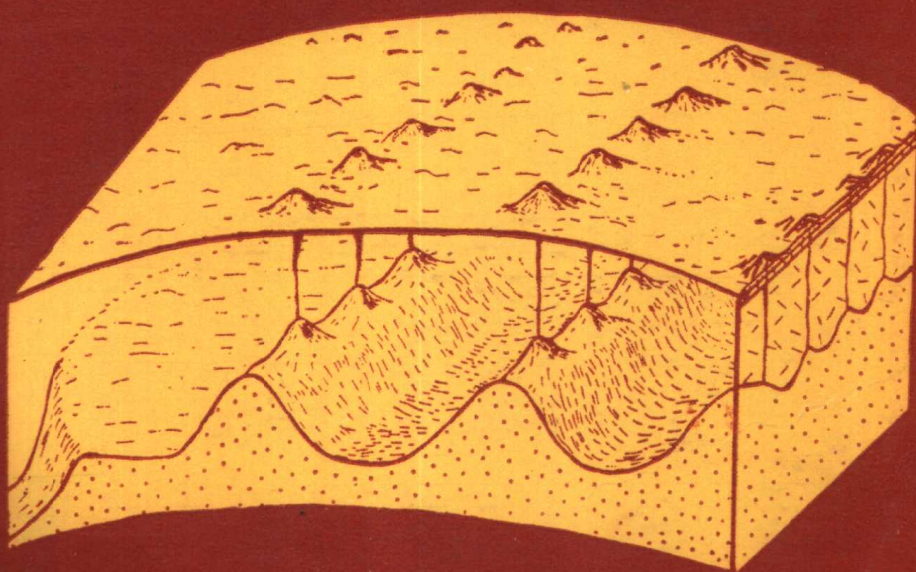


中国上地幔特征 与动力学论文集

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



地震出版社



中国上地幔特征与动力学论文集

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

地震出版社

1990

内 容 提 要

本文集由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第一次学术会议上交流的优秀论文汇编而成,包括深源包体及玄武岩的矿物岩石学、地球化学,上地幔流变学和流体-岩浆包裹体等方面的内容,讨论了中国上地幔成分、结构与演化问题,反映了本学科近几年取得的新成果和新进展。文集资料丰富,观点新颖,对研究我国上地幔特征及动力学问题有重要参考价值。

中国上地幔特征与动力学论文集

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

责任编辑:朱向军

责任校对:李 珏

*

地质出版社 出版

北京民族学院南路9号

中国科学技术情报研究所印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 12 印张 4 插页 304 千字

1990年12月第一版 1990年12月第一次印刷

印数 0001—1200

ISBN 7-5028-0412-9/P.263

(800) 定价: 8.00 元

序 言

近10年来,通过对新生代玄武岩和产于其中的地幔岩包体,以及产于金伯利岩中的地幔岩包体的研究,获得了大量有关我国大陆特别是我国东部大陆上地幔的宝贵信息。其中主要是关于上地幔的成分和结构;化学和物理性质上的非均质性;上地幔中的部分熔融和交代作用;上地幔的流变学参数;以及古温度、古应力和古构造环境等方面的信息。在同一时期,我国的地球物理探测也取得了一些有关上地幔的速度、电性和密度等方面的资料。这就使我们有可能利用上述两个方面的研究成果来讨论有关我国上地幔的某些基本特性和动力学问题,这就是1989年10月于合肥召开的“岩石圈物质组成——中国上地幔特征与地球动力学讨论会”的出发点。这次会议是由地幔矿物岩石地球化学专业委员会与中国地球物理学会及中国岩石圈委员会的“大陆岩石圈的热力学、化学和岩浆演化”小组联合召开的,这也为地球物理学家和岩石学、地球化学等不同学科学者之间相互交流和讨论,提供了良好机会。事实证明,这种交流讨论,对所有参加者都是富有启发性的。

本文集是这次会议论文的选编,其中收集了我国近年来在上地幔研究中取得明显进展的某些代表性论文。主要涉及到关于中国东部新生代软流圈性质及变迁历史的讨论(邓晋福等);关于地幔交代作用(曹荣龙等,路凤香等)和根据流体包裹体成分讨论地幔岩部分熔融、交代作用、热底辟及它们之间的关系(曹荣龙等);关于幔源橄榄岩的变形实验及矿物位错——亚颗粒构造与上地幔流变学特征(林传勇等、金振民等、彭松柏等);关于幔源橄榄岩包体的稀土元素地球化学(刘若新等,赵海玲等);关于高压电镜研究地幔橄榄岩辉石出溶特征的新成果(杨凤英等);关于某些地区新生代玄武岩的Sr-Nd-Ce和Sr-Nd-Pb同位素体系研究的新成果(解广轰等,陈道公等)等等。近年来我国对新生代玄武岩中橄榄岩类包体研究的另一进展是在我国东部一些地方相继发现了Sp/Gt二辉橄榄岩和Gt二辉橄榄岩,并观察到Sp和Gt之间相转变反应(樊祺诚等,赵海玲等)。这就为利用Sp二辉橄榄岩与Gt二辉橄榄岩之间相转变的 P - T 条件,标定一些地区上地幔岩石组成剖面提供了较为可靠的证据。本文集中提出的中国华北地区新生代时期上地幔的岩石分层模型(刘若新等),与现有的有关该区上地幔岩石、地震波速度、电性和流变学参数的研究资料有很好的 consistency。本文集中关于新生代时期古地温的研究资料(何永年等,支霞臣等),以及以前已发表的有关新生代玄武岩中橄榄岩类包体 P - T 估计所给出的古地温,都一致地表明它们属于大洋地温或裂谷地温。这与华北古生代金伯利岩及其橄榄岩类包体所给出的地盾地温形成明显对照。

虽然我们已取得许多有关中国大陆上地幔研究的新资料和新的进展,但仍有许多有待深入研究的重要领域。首先,目前有关上地幔岩石、矿物、地球化学研究,多集中在中国东部而中国西部的资料十分缺乏。对金伯利岩中橄榄岩类包体的研究资料也很少。关于地幔岩的Sr-Nd-Pb同位素体系的研究也是一个薄弱环节。而关于地幔岩的实验研究,如关于地幔岩

的变形和物理力学性质的实验研究，部分熔融条件下波速、电导率和密度的测定，以及地幔岩部分熔融、交代作用和相转变实验等，在我国仍基本上处于空白状态。地幔矿物中流体包裹体已有的少量研究，已显示出这是一个研究地幔演化过程和玄武岩浆起源、地幔流体-熔体的迁移及交代作用、以及地幔在化学上和物理性质上非均质的一个重要领域。所有上述各个方面，都要求我们在地幔岩研究的深度和广度上，进行更富创造性的劳动。

本文集的出版，不只是展示已取得的某些进展，更为重要的是希望能对我国上地幔的研究起催化和推动作用。

樊祺诚、吴裕文同志为本文集稿件的整理、审校付出了大量劳动，张淑年、赵东芝、赵芹、董兆匀同志清绘了本文集的全部图件，在此谨致谢意。

刘若新

1990年6月30日

目 录

华北地区地幔最上部岩石-物性分层	刘若新等 (1)
中国东部新生代上部软流圈性质及变迁历史	邓晋福等 (8)
浙江西堍地幔岩包体中流体及熔体包裹体的成因和意义	曹荣龙等 (14)
浙江西堍上地幔包体中矿物的再平衡及其意义	路凤香等 (23)
浙江西堍石榴石二辉橄榄岩包体中发现的透长石-橄榄石-透辉石地幔交代组合	曹荣龙等 (34)
中国东部超镁铁质捕虏体的主要元素和微量元素地球化学	刘若新等 (45)
中国东南沿海地区上地幔深部作用特征	赵海玲等 (62)
上地幔尖晶石-石榴石复合橄榄岩与相转变研究	樊祺诚等 (72)
中国东部地区岩石圈古地温特征初探	何永年等 (83)
华北地区上地幔流变学特征初探	林传勇等 (93)
尖晶石二辉橄榄岩高温高压变形实验及其上地幔动力学的意义	金振民等 (102)
中国东南沿海地区新生代玄武岩中幔源包体显微构造特征及其上地幔流变学意义	彭松柏等 (112)
鲁皖苏新生代火山岩成因及地幔源特征的同位素证据	陈道公等 (124)
新疆于田县康苏拉克新生代火山岩的岩石学和地球化学研究	解广鑫等 (132)
我国东部上地幔的物质成分和温压特征	支霞臣等 (142)
蛇绿岩中上地幔“构造橄榄岩”成因——岩浆包裹体证据	彭礼贵 (151)
藏南阿尔卑斯型橄榄岩中辉石的出溶特征及有关问题的讨论	杨凤英等 (157)
汉诺坝玄武岩深源包体中的铝尖晶石	谢漫泽等 (163)
高温高压下岩石相变及物理性质综合研究实验系统	高平等 (170)
华北地区角闪岩的脱水实验与壳内高导层	顾芷娟等 (178)

Contents

The sequence of rocks and physical properties in uppermost mantle beneath North China.....	Liu Ruoxin et al. (1)
The nature and change of the Cenozoic upper asthenosphere in Eastern China.....	Deng Jinfu et al. (8)
Origin and role of fluid (and glass) inclusions in a metasomatised mantle xenolith from Xilong, Zhejiang Province.....	Cao Ronglong et al. (14)
The mineral reequilibration in mantle xenoliths and the light in Xilong area, Zhejiang Province.....	Lu Fengxiang et al. (23)
Sanidine-olivine-diopside mantle metasomatic association found in a garnet lherzolite xenolith from Xilong, Zhejiang Province	Cao Ronglong et al. (34)
Major and trace element geochemistry of ultramafic xenolith in Eastern China.....	Liu Ruoxin et al. (45)
The characteristics of the deep process of the upper mantle in the southeast coast of China.....	Zhao Hailing (62)
Study on phase transition of multiple spinelgarnet peridotite in upper mantle beneath Eastern China.....	Fan Qicheng et al. (72)
Characteristics of geotherm of palaeolithosphere in eastern part of China	He Yongnian et al. (83)
Rheological features of the upper mantle beneath North China	Lin Chuangyong et al. (93)
Experimental deformation on spinel lherzolite at high pressure and temperature; Geodynamical significance of the upper mantle in the Eastern China.....	Jin Zhenming et al. (102)
Study on the microstructural features of deep-seated xenoliths and their rheological significances of the upper mantle in Cenozoic basaltic rocks from southeastern coastal region of China.....	Peng Songbai et al. (112)
Isotopic evidence for petrogenesis of Cenozoic volcanic rocks and characteristics of mantle source from Shandong, Anhui and Jiangsu	Chen Daogong et al. (124)
Petrology and geochemistry of Cenozoic volcanic rocks, Kangsulake, Yutian County, Xinjiang.....	Xie Guanhong et al. (132)
Composition and temperature state of upper mantle beneath Eastern China as derived from spinel lherzolite xenolith.....	Zhi Xiachen et al. (142)
The origin of upper mantle "tectonic peridotite" from ophiolite—evidence of magma inclusion.....	Pen Ligui (151)

- A discussion about exsolution of pyroxene in Alpine-type peridotite from
 South Tibet.....Yang Fengying et al. (157)
- Alumospinel in myphonic inclusions from Hannuoba basalts
Xie Manzhe et al. (163)
- A system for experimental study on phase transition and physical properties
 of rocks and minerals at high temperature and pressure
Gao Ping et al. (170)
- Dehydration experiment of amphibolite in the North China area and crustal
 high conductivity layer..... Gu Zhijuan et al. (178)

华北地区地幔最上部岩石-物性分层*

刘若新 马宝林

(国家地震局地质研究所)

一、引言

虽然大陆地壳和上地幔中普遍存在不同尺度的非均匀性,但是已有的地表露头观察、地球物理探测资料和由深变质地体及深源包体所提供的大量信息仍然表明,不论是地震波速度、密度、电性结构及其它物理参数,还是其矿物岩石组成和结构,都表现出明显的层状结构。这种层状结构具有全球的相似性,但是区域性差异和特殊性也是明显的。克拉通稳定地区与构造活动区的地壳-上地幔结构明显不同。在板块边界和大的构造边界下面,以及那些深部物质活动强烈地带,层状构造受到破坏。各种深部的变质变形、深部熔融和岩浆作用以及构造混合作用等,也将使这种层状构造复杂化。因此,建立区域性的地壳-上地幔岩石、物性分层模型是必要的。这不仅为岩石圈动力学研究提供一个基础,而且还将大大改善在地球物理测深资料解释上的非唯一性。本文主要讨论华北地幔最上部的岩石、物性分层,并根据岩石、物性参数,讨论软流圈的性质。

迄今华北地区上地幔的信息主要来自两个方面。一方面是由地球物理方法所获得的地震波速度结构、电性结构、密度等^[1-8],但由此所获得的莫霍面以下的信息远较地壳部分的信息为少;另一方面来自地质-岩石学方面,这包括金伯利岩和新生代玄武岩中的超镁铁质包体,以及由于构造原因而进入地壳并已出露于地表的超镁铁质构造岩块。在华北地区,已经积累了许多上述各类上地幔岩石-地球化学研究资料。由上述两个方面的资料,目前已有可能建立华北地区上地幔的岩石-物性分层模型。

二、华北地区上地幔岩石分层及Sp-Gt二辉橄榄岩相转变带

赵大升等^[9]根据对华北地区的19个尖晶石二辉橄榄岩和方辉橄榄岩的 P - T 估计范围(采用1976年Mercier的辉石温压计, $T = 1032-1237^{\circ}\text{C}$, $P = 1700-2800\text{MPa}$,约相当于55—90km深度),将100km深度作为尖晶石二辉橄榄岩与石榴石二辉橄榄岩的相转变带。路凤香^[10]提出的华北上地幔岩石分层为:莫霍面以下至50—60km深度为一薄的尖晶石二辉橄榄岩带,其下虽仍为尖晶石二辉橄榄岩,但含有尖晶石辉石岩及二辉岩,并广泛发育交代作用。在120km以下为石榴石二辉橄榄岩并有方辉橄榄岩夹层。根据地球物理资料,将50—60km深度作为软流圈顶面的深度。路凤香对包体平衡 P - T 估计,也是采用Mercier^[11]的辉石温压计。Fan and Hooper^[12]根据他们自己的50余个超镁铁质包体及相应的矿物资料,特别是一些Sp-Gt二辉橄榄岩和石榴石二辉橄榄岩的资料,提出一个包括华北在内的中国东

* 地震科学联合基金会资助项目。

部上地幔的岩石成分分层：在大约60—80km深度为一个厚度由数 km 至20km的 Sp-Gt 二辉橄榄岩的相转变带，其上为一个厚约20—35km的尖晶石二辉橄榄岩层，其下为石榴石二辉橄榄岩。他们用以估计地幔橄榄岩的温压条件的方法分别为 Wells^[13]的二辉石温度计和 Nickel & Green^[14]的 Opx-Gt 压力计。董振信¹⁾根据华北地台区金伯利岩中超镁铁质包体的研究资料，也提出一个自莫霍面至200km深度的华北地区上地幔的岩石分层。他在约120—130km深度上分出一个薄的 Sp-Gt 二辉橄榄岩的相转变带，其上为尖晶石二辉橄榄岩，其下为石榴石二辉橄榄岩。应当指出，董振信主要是根据二辉橄榄岩尖晶石中的 Cr 组分 (Cr/(Cr + Al)) 所估计的压力值达3500MPa。然而，O'Neill 等^[15]和 Carroll Webb 等^[16]的工作表明，在 CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ 系中，Cr₂O₃ 的加入将扩大尖晶石的稳定区，那些含高铬尖晶石的二辉橄榄岩和方辉橄榄岩，将可以在相当大的压力或深度范围内保持稳定。这暗示即使在石榴石二辉橄榄岩的相稳定区，仍可以出现那些具有高 Cr 组分的尖晶石橄榄岩类。而董振信的 7 个尖晶石的 Cr/(Cr + Al) 范围为 0.40—0.64，应属于高 Cr/(Cr + Al) 比值的尖晶石。因此不应根据这种尖晶石二辉橄榄岩所估计的深度来限定 Sp-Gt 的相转变深度。

刘若新等^[17]根据对苏北-胶南构造混杂岩带中超镁铁质岩（包括 Sp 相、Sp-Gt 相、Gt 相的橄榄岩类、辉石岩类及榴辉岩）的研究资料，也提出一个地幔最上部的岩石分层。其中一个 Sp-Gt 二辉橄榄岩的 5 种矿物成分（电子探针分析，重量%）见表 1。按 Nickel 和

表 1 尖晶石/石榴石二辉橄榄岩中的矿物成分（重量%）

样品号	矿物名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	总量
168-5-1	顽火辉石	57.04	0.00	0.27	0.06	6.52	0.20	35.65	0.16	0.05	0.01	99.96
168-5-2	镁铝榴石	40.85	0.09	22.48	1.25	10.32	0.52	19.40	4.37	0.02	0.01	99.31
168-5-3	橄榄石	40.17	0.02	0.00	0.00	9.40	0.16	49.34	0.03	0.03	0.00	99.15
168-5-4	透辉石	54.28	0.05	0.05	0.50	1.71	0.03	17.24	23.22	0.67	0.01	97.76
168-5-5	尖晶石	0.04	0.34	25.19	34.54	25.49	0.33	9.70	0.01	0.07	0.02	95.73

Green^[14]的 Opx-Gt 压力计，其深度达110km。然而不论是按 Wells^[13]的二辉石温度计（759℃），还是按 Mercier^[18]的辉石温度计（866℃），均远低于华北地区产于新生代玄武岩中二辉橄榄岩的平衡温度范围。采用同样的方法该区三个石榴石二辉橄榄岩的 $P = 3050 - 5130 \text{ MPa}$ ，而温度也同样是低的（760—840℃）。虽然表 1 中的尖晶石具较高的 Cr/(Cr + Al) 比值（0.48），可以在较大的深度内保持稳定。但是上述 Sp/Gt 二辉橄榄岩及石榴石二辉橄榄岩低的温度估计，需要结合其产状和构造环境加以讨论。这些超镁铁岩体以深源构造块的形式产于华北地块与扬子地块碰撞带的构造混杂岩带中。不仅这些岩体的围岩多为深层次的糜棱岩，而且在岩体中也见有剪切糜棱岩（图 1），这种糜棱岩没有进入围岩因而推测是在地幔条件下的剪切糜棱岩。此外，在日照胡家林岩体中还见有小型褶曲及“A”线理，也指示逆冲剪切性质。上述事实表明，这些超镁铁质深源构造岩块，在其上升过程中经多次逆冲剪切，中间至少经历过一次 700—900℃ 的低温平衡过程。岩石普遍遭受蛇纹石化，还反映它们在进入地壳之后的构造混杂过程中所发生的水热变质作用。因此用这些岩石所估计的温度值不具代表性。但是在露头尺度上 Sp-Gt 相橄榄岩类的存在，仍可表明在华北

1) 董振信，1989，我国金伯利岩岩石学、矿物学研究，中国地质科学院地质所，博士论文。

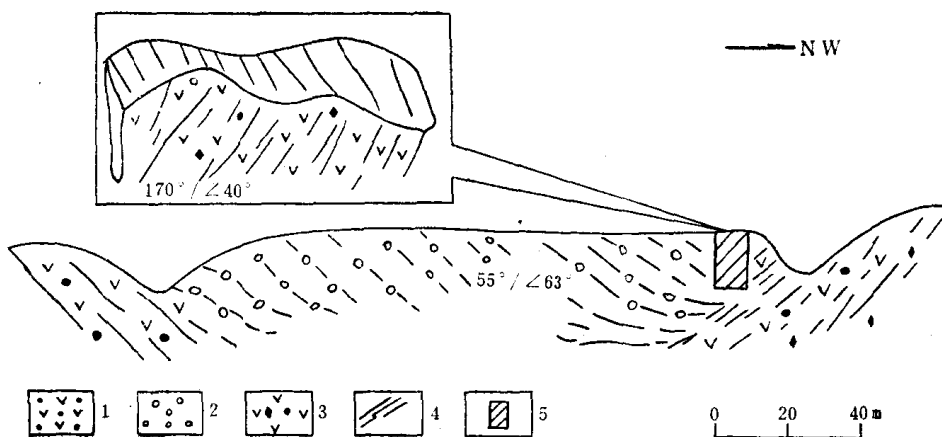


图1 胡家林区段地质剖面图

1.石榴石二辉橄榄岩; 2.石榴辉石岩; 3.尖晶石/石榴石橄榄岩; 4.剪切叶理; 5.探井

的上地幔中存在着由尖晶石向石榴石转变的过渡带。

在华北地区的新生代玄武岩中,除了刘若新等^[19]、Fan等^[12]所报道的产于汉诺坝玄武岩中的Sp/Gt二辉橄榄岩包体(按Wells 1977的二辉石温度计和Nickel-Green 1985年的Opx-Gt压力计估计的 $P = 1890\text{MPa}$, $T = 1074^\circ\text{C}$)外,金振民等^[20]还报道产于安徽女山第四纪火山渣锥中的石榴石尖晶石二辉橄榄岩,其 P - T 条件为 $T = 1110^\circ\text{C}$, $P = 1900\text{MPa}$ (Nickel-Green的压力计)。此外,还有曹荣龙等(本文集)提供的浙江西塞的Sp-Gt二辉橄榄岩($T = 1099^\circ\text{C}$, $P = 1930\text{MPa}$);赵海玲等(本文集)给出的福建明溪一个Sp-Gt二辉橄榄岩的 $P = 2300\text{MPa}$, $T = 1100^\circ\text{C}$; Fan等^[12]给出的10个明溪Sp/Gt相二辉橄榄岩的 $T = 1049$ — 1195°C , $P = 2060$ — 2430MPa 。上述中国东部四个地区所见到的Sp-Gt二辉橄榄岩的 P - T 范围为 $T = 1049$ — 1195°C , $P = 1890$ — 2430MPa ,约相当于60—80km深度。其中华北地区的为 $T = 1074$ — 1110°C , $P = 2060$ — 2430MPa ,约相当于60—63km深度。将上述各岩石的压力估计值和尖晶石(与石榴石呈共生或互为反应关系)的 $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$ 比值投于O'Neill^[15]或Carroll Webb等^[16]的在 1100°C 时尖晶石二辉橄榄岩与石榴石二辉橄榄岩之间相转变图中(图2),大都进入Sp + Gt两相区,而那些尖晶石二辉橄榄岩、产于浙江新昌和福建闽清新代玄武岩中的石榴石二辉橄榄岩则分别进入尖晶石和石榴石相区。这样,我们就可以确定,在华北以至中国东部的地幔最上部,存在一个尖晶石二辉橄榄岩与石榴石二辉橄榄岩之间的相转变带,其深度在60—80km范围内,其厚度可能在数公里至十余公里之间。澳大利亚东南部上地幔中尖晶石二辉橄榄岩向石榴石二辉橄榄岩转变深度为55—62km^[21,22],与我们所给出的华北地区以及我国东部地区的类似相转变的深度相近。

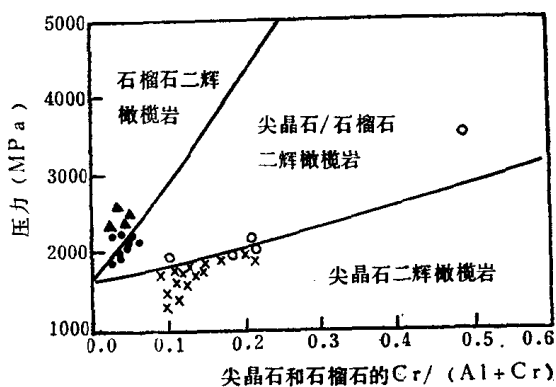


图2 尖晶石和石榴石的 $\text{Cr}/(\text{Al} + \text{Cr})$ 与压力的关系(据Carroll Webb and Wood, 1986)

▲为石榴石二辉橄榄岩; x为尖晶石二辉橄榄岩;
●为尖晶石/石榴石二辉橄榄岩(按 $X_{\text{Cr}}^{\text{Gt}}$), ○为尖晶石/石榴石二辉橄榄岩(按 $X_{\text{Cr}}^{\text{Sp}}$)

三、华北地区软流圈深度与某些物理参数

邓晋福等(本文集)根据含水岩浆体系计算的华北新生代玄武岩浆起源的深度,主要集中在55—85km范围内。他将玄武岩浆起源区作为软流圈的最上部。这个深度范围与我们给出的Sp-Gt二辉橄榄岩相转变的深度范围相当。

宋仲和等^[1]对北京至萨哈林剖面地幔纵向速度结构的研究表明,在60km深度,出现 V_p 为7.6km/s的低速层。滕吉文等^[2]对元-济地震测深剖面的资料解释表明,在邢台地区下面50—93km深度间, V_p 由8.1km/s下降至平均约7.7—7.8km/s。赵珠^[3]选用了北京台网来自不同方向并通过华北的140个地震的P波初至和续至走时资料,分析得到的速度结构,三个方向分别在55、60、66km深度出现低速层($V_p = 7.8—7.9$ km/s)。刘国栋等^[4]和顾群等^[23]得到的华北地区上地幔高导层埋深变化于50—100km范围,在拗陷区埋深较浅,电阻率为1到几个 $\Omega \cdot m$,而其上的地幔为 $10^4—10^5 \Omega \cdot m$ 。吴乾蕃等^[24]根据华北地区热流资料和典型大陆区的地热曲线,推算出冀中和渤海拗陷区、临清拗陷及其东邻地区的岩石圈厚度为64—65km岩石圈底面的温度值为1110—1118°C。

林传勇等(本文集)对华北地区多处上地幔橄榄岩中橄榄石的位错显微构造的研究结果也进一步支持上述结论。他们发现,在60—90km深度上下,应变率和等效粘滞度有明显变化。应变率由其上的 10^{-14} s至其下的 $10^{-15}—10^{-17}$ s;等效粘滞度由 $10^{21}—10^{25}$ Pa·s下降至小于 10^{20} Pa·s。他们也得出结论:可以将60—90km深度作为华北地下软流圈顶面的深度。上述由不同作者用不同方法所给出的软流圈顶部或低速层、高导层顶面、或者岩石圈厚度的深度值,都相当接近。并且与本文提出在华北地区地下60—63km附近存在一个尖晶石二辉橄榄岩与石榴石二辉橄榄岩之间的相转变带的深度相当一致。因此,这些由岩石学研究、地震折射剖面探测和地震波研究、电性探测以及热流研究一致地显示于60km附近的变化,决不是偶然的。将这个深度作为华东地区地幔软流圈顶面的深度是可以接受的。自然,这个深度在华北整个地区可能是变化的,例如在华北西部及鲁西隆起区可能高于这个深度。

四、关于软流圈的性质

地球物理学家根据地震波速度在上地幔中的变化而划分出低速带,这个低速带在大陆下约60—150km深度。随后地质学家们将这个低速带称之为软流圈。其上为岩石圈。一般认为:低速带的形成是由于其温度已接近某些矿物(例如单斜辉石)的熔点,因而产生部分熔融从而使波速和电阻率降低,并使岩石发生塑性流动,为岩石圈板块的流动提供力源。因此人们将这种具有强烈塑性流动、含有一定比例的流体-熔体的低速层称之为软流圈。这要求软流圈中的岩石具有较岩石圈地幔岩石为小的等效粘滞系数,还要求较普遍出现部分熔融或熔体-流体的交代作用。Nicolas^[25]认为,根据地幔橄榄岩的显微构造特征有可能区分哪些是软流圈的流动,哪些是岩石圈的流动。他还指出,软流圈变形的特点是在变形橄榄岩内存在玄武质熔体。这意味着玄武质岩浆主要来自软流圈,同时软流圈岩石中的玄武质岩石的分凝体将较岩石圈地幔中为多。我们在苏北胶南构造混杂岩带的石榴石橄榄岩及尖晶石-石榴石橄榄岩体中,见有众多的多种辉石岩和榴辉岩的分凝体,似乎可证明这一点。本文列举的林传勇等(本文集)关于岩石圈地幔与软流圈地幔在应变速率和等效粘滞度上的差别;邓晋

福等（本文集）关于华北新生代玄武岩浆来自软流圈上部，并认为软流圈岩石有7—10%的粒间熔体等，完全可以满足上述对软流圈性质的基本要求。

虽然像单斜辉石、斜方辉石等矿物成分、含量以及组合在尖晶石二辉橄榄岩-Sp/Gt二辉橄榄岩-石榴石橄榄岩中可以出现某些变化，但是他们的全岩化学成分并不显示明显的变化（刘若新和樊祺诚，本文集）。这表明岩石圈与软流圈之间不是一个化学界面。但是，本文的资料表明，至少在华北地区，Sp-Gt二辉橄榄岩相转变带与软流圈上部是一致或者偶然地重合在一起。因此，一般可以将石榴石/尖晶石二辉橄榄岩或石榴石橄榄岩的出现作为软流圈的岩石学标志。但正如前面所指出的，那些具高Cr/(Cr + Al)比值尖晶石的尖晶石相橄榄岩，可以稳定存在于软流圈中；那些不具备软流圈岩石特征石榴石相橄榄岩，也同样可以出现于岩石圈地幔中，这取决于区域的或局部的地温梯度，以及软流圈的运动和动力体制。

五、地幔最上部岩石-物性分层

在上述各节中所讨论的问题和所列举资料的基础上，我们可以建立一个华北地区地幔最

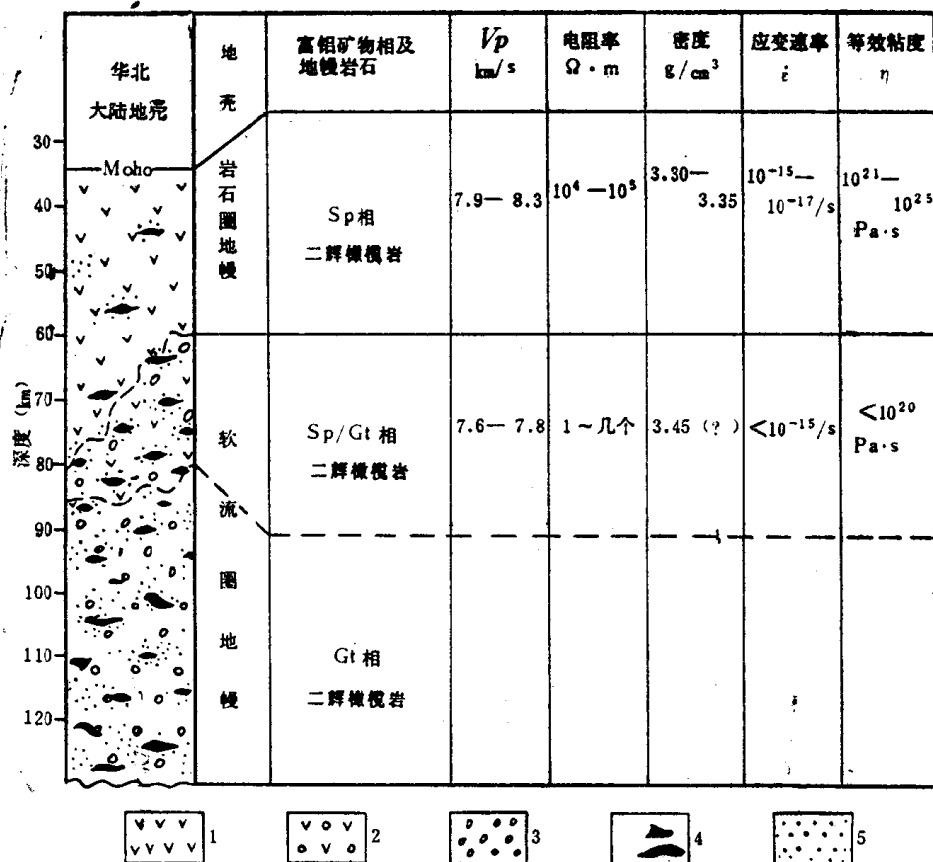


图3 华北地区地幔最上部岩石-物性分层

Sp相 尖晶石二辉橄榄岩及辉石岩、榴辉岩分凝体，局部有玄武质熔体及交代区，顶部有麻粒岩夹层。

Sp/Gt相 尖晶石/石榴石二辉橄榄岩及方辉橄榄岩、辉石岩、榴辉岩分凝体增加普遍含7—10%的玄武质熔体和流体，交代作用较普遍。

Gt相 石榴石二辉橄榄岩，高Cr组分的尖晶石二辉橄榄岩、方辉橄榄岩、石榴石辉石岩、榴辉岩分凝体，玄武质熔体和交代流体。

1. 尖晶石橄榄岩类；
2. 尖晶石/石榴石相橄榄岩类；
3. 石榴石相橄榄岩类；
4. 各种辉石岩及橄榄岩分凝体；
5. 玄武质熔体和地幔流体交代区

上部的岩石-物性分层模型(图3)。图中各项内容、地球物理和岩石的物理参数及其资料来源,在前面都已作了讨论和介绍。这里需要对图3中的密度值再作一些讨论。图中的密度值是根据冯锐等¹⁾的资料。其中软流圈的密度值明显高于岩石圈地幔。不论是按波速-密度关系推算,还是按软流圈可能含有一定比例的玄武质熔体考虑,其密度似应低于岩石圈地幔。按本文的资料,华北及中国东部下面的软流圈已进入石榴石橄榄岩相区,而石榴石的出现将增加地幔橄榄岩的密度。在这种情况下,如果岩石的矿物粒间不含玄武质熔体的话,并且岩石中石榴石的含量较高,则冯锐等提供的软流圈密度 3.45g/cm^3 是可能的。但如果软流圈含有5—10%的玄武质熔体,那么软流圈的密度值高于岩石圈地幔将是不能接受的。从软流圈多种性质的综合考虑,冯锐等的软流圈密度值似需再作研究。

小 结

我国华北以至整个中国东部地区的上地幔中,存在一个由尖晶石二辉橄榄岩向石榴石二辉橄榄岩的相转变带。其岩石-矿物学标志是尖晶石与石榴石在二辉橄榄岩中互为反应关系或者稳定共存。这个相转变带约在地下50—80km深度。由现有Sp-Gt二辉橄榄岩P-T估计所限定的这个转变带的厚度由数公里至十数公里间。此带之上为约25—50km厚的尖晶石二辉橄榄岩层,此带之下为石榴石二辉橄榄岩及高Cr组分尖晶石的方辉橄榄岩和二辉橄榄岩。上述三个地幔最上部的岩性层中,均可出现数量不等的各种辉石岩和榴辉岩分凝体,但在Sp/Gt二辉橄榄岩及石榴石二辉橄榄岩中更为常见,并较普遍含有玄武质熔流及交代流体。

华北地区尖晶石二辉橄榄岩与石榴石二辉橄榄岩之间相转变带出现的深度,与由地球物理探测所得到的该区低速带、低电阻率带出现的深度相当,也与推测的玄武岩浆起源深度和由地热研究推测的岩石圈底面埋深相当。应变速率及等效粘滞度也在此深度开始产生明显变化。因此一般可以将60—80km作为华北乃至整个中国东部某些地区地下软流圈出现的深度。本文提出的华北地幔最上部岩石、物性分层是有代表性的。

参 考 文 献

- [1] 宋仲和等, 1981, 北京-萨哈林剖面的地幔纵向速度结构, 地球物理学报, 24, 310—318。
- [2] 滕吉文等, 1982, 华北平原邢台地震活动区上地幔结构和地幔低速层, 地球物理学报, 25, 57—64。
- [3] 赵珠, 1983, 华北地区地幔速度结构, 地球物理学报, 26, 341—354。
- [4] 刘国栋、顾群、史书林、佘、石璋松、刘金汉, 1983, 京津唐渤和周围地区地壳上地幔电性结构及其与地震活动关系, 地球物理学报, 26, 2。
- [6] 刘国栋, 1988, 大地电磁测深法在岩石圈研究中的应用以及中国地壳上地幔电性结构的基本特征, 岩石圈论文集, 冶金工业出版社。
- [7] 孙武成, 1986, 华北地区深地震测深, 中国地壳上地幔地球物理学探测成果, 地震出版社。
- [8] 冯锐, 1985, 中国地壳厚度及上地幔密度分布(三维重力反演结果), 地震学报, 7(2), 143—157。
- [9] 赵大升、郑学正, 1987, 华北地区新生代玄武质火山岩及超镁铁岩包体, 中国东部新生代玄武岩及深层岩石包体, 科学出版社。
- [10] 路凤香, 1988, 中国东部新生代的上地幔特征, 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究, 中国地质大学出版社。
- [11] Mercier, J.C., 1976, Single-pyroxene geothermometry and geobarometry, Am.

1) 冯锐、殷秀华、陈递波、刘占波、刘铁胜, 响水-满都拉地学断面及邻区重力研究, 待发表。

Miner., 61, 7—8, 603—615.

- [12] Fan, Q. C. and Hooper, P. R. , 1989, The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of Eastern China: Implications for upper mantle composition and the paleo-geotherms, *J. Petrol.*, 30, 1117—1158.
- [13] Wells, P. R. A., 1977, Pyroxene thermometry in simple and complex systems, *Contrib. Miner. Petrol.*, 62, 129—139.
- [14] Nickel, K. G., Green, D. H., 1985, Empirical geothermobarometry for garnet peridotites and implications for the nature of the lithosphere, kimberlite and diamonds, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 73, 158—170.
- [15] O'Neill, H. St. C., 1981, The transition between spinel lherzolite and garnet lherzolite, and its use as a geobarometer, *Contrib. Miner. petrol.*, 77, 185—194.
- [16] Carrol Webb, S. A. , Wood, B. J. , 1986, Spinel-pyroxene-garnet relationships and their dependence on Cr/Al ratio, *Contrib. Miner. Petrol.*, 92, 471—480.
- [17] 刘若新、马宝林等, 1989, 苏北-胶南构造混杂岩带的地质特征和岩性地层柱, *地震地质*, 11 (1), 47—54。
- [18] Mercier, J. C. C. , 1980, Single-pyroxene thermobarometry, *Tectonophysics*, 70, 1—37.
- [19] 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, *岩石学报*, 4期, 24—33。
- [20] 金振民, H. W. Green II, R. S. Borch, 1989, 橄榄石显微构造和中国东部上地幔流动应力, *地球科学——中国地质大学学报*, 14, 69—80。
- [21] Griffin, W. L. , Wess and Hollis, S. Y. , 1984, Ultramafic xenoliths from Bullenmerri and Gnotuk maars, Victoria, Australia: Petrology of a subcontinental crust-mantle transition, *Journal of Petrology*, 45, 53—87.
- [22] O'Reilly, S. Y. and Griffin, W. L., 1985, A xenolith-derived geotherm for Southeastern Australia and its geophysical implications, *Tectonophysics* 111, 41—63.
- [23] 顾群、孙洁、史书林、石璋松, 1980, 华北、西北一些地区地壳和上地幔内高导层, *地震地质*, 2, 2。
- [24] 吴乾蕃、谢毅真、金祖华、王都, 1988, 华北地热场研究, *中国地震*, 4 (1), 41—47。
- [25] Nicolas, A. , 1986, Asthenosphere structure and anisotropy beneath rifts: Geophysics and petrology of the deep crust and upper mantle. U. S. Geological survey and Stanford Workshop, Abstract Volume, Stanford University.

中国东部新生代上部软流圈性质及变迁历史

邓晋福 赵海玲

(中国地质大学 北京)

一、引言

软流圈在板块构造中具有重要意义,它提供了一个低粘度区,使位于其上面的岩石圈以很小的摩擦而滑动。软流圈的性质和热状态直接控制着上覆岩石圈动力学进程。软流圈一般从岩石圈底部开始向下延伸到约700km,是一个容易蠕变变形的薄弱层^[1]。软流圈可分为上、下两部分,上部软流圈大致与地震低速层相吻合^[1,2]。低速层以低的地震波速度、低Q值和高电导率为特征。Condie^[1]认为,在几种可能的原因中,只有初始熔融才能满足解释低速层的三个主要特征。同时,低速层突变的边界以及低速层位于浅部时所出现的高地表热流也支持了初始熔融这一观点。中国东部新生代玄武岩火山作用直接与软流圈的不稳定性有关^[3]。本文仅涉及上部软流圈,着重讨论玄武岩火山作用对低速层性状的约束及上部软流圈的岩石学模型。

二、软流圈的埋深及上部性质

中国东部新生代大陆裂谷区,由不同的地球物理方法推定的上地幔低速层顶界埋深主要为60—80km。根据地震波速推定的软流圈顶界埋深,华北及东北约为60km^[4],或华北为40—50km至100km^[5],邢台地区为83km^[6],华南沿海为80km^[5]。由大地电磁测深推定的软流圈顶界埋深,华北平原裂谷系小于80km,最浅可达50—60km^[7],华南地区,由沿海的60km,向西逐渐变深,到闽西南达100km。

本文讨论将采用原生玄武岩岩浆,由于它在上升达地表过程中很少或没有发生化学变异,可以更好地推演约束软流圈的性质及埋深。采用无水的干岩浆体系模型,获得的新生代幔源原生玄武岩岩浆起源的深度范围为50—100km^[8],主要集中在50—80km范围内^[9]。东北与华北为50—100km,主要为60—80km^[8],汉诺坝地区为43—56km^[10],苏北为55—72km,华南55—100km^[8]。东南沿海地区,从沿海的50km,到新昌—闽清一线的65km,达西部巨县—明溪一线为100km^[1]。当岩浆中含水时,其温度与SiO₂活度均降低,因而,与干岩浆体系相比,含水岩浆的起源深度加大。根据王人镜^[11]的统计,中国东部早第三纪玄武岩的H₂O⁺与H₂O⁻含量分别为1.08%及1.20%,晚第三纪玄武岩ΣH₂O(未分H₂O⁺与H₂O⁻)为2.65%,第四纪玄武岩H₂O⁺及H₂O⁻分别为0.77%及0.24%,亦即岩浆中所含的原生水含量的范围为0.77—1.08%。根据DePaolo^[12]的资料,如果取平均含水量为1%,则由于SiO₂活度的相应降低,导致含水玄武岩岩浆的起源深度将比干岩浆模型获得的深度大

1) 赵海玲, 1988, 中国东南沿海地区新生代玄武岩及上地幔包体的研究, 博士论文, 中国地质大学(北京)。

5—6km。这样,采用含水岩浆模型,新生代玄武岩岩浆的起源深度集中于55—85km范围内。

不管无水或含水岩浆模型,岩浆起源的深度正好符合由地球物理资料推算出的低速层的顶界埋深。这种一致性表明,上部软流圈是达固相线的上地幔橄榄岩,含有少量隙间玄武岩岩浆。关于上部软流圈中局部熔浆的数量,Logachev^[13]提出,肯尼亚裂谷下为10%,贝加尔裂谷下为5%,相应的 V_p 为7.5km/s与<7.7km/s。根据橄榄岩包体与玄武岩化学组成上的互补性,按物质平衡原理估算的新生代玄武岩岩浆形成时,中国东部上地幔橄榄岩的局部熔融程度为7—15%^[3,9]。按照Logachev的模型,可以推测,中国东部上地幔软流圈的平均 $V_p \leq 7.5-7.6$ km/s。有关中国东部上地幔低速层的 V_p 资料极少,滕吉文等^[6]和宋仲和等^[4]的报导,华北平原和中国北方大陆下面地幔低速层的 V_p 分别为7.2—7.4km/s和7.6km/s。这一波速与我们推测的上部软流圈的局部熔融程度为7—15%是大致相适应的。这种相适应性支持了低速层是达固相线的上地幔橄榄岩的推测。这样,可以认为,由玄武岩火山作用推定的中国东部新生代大陆裂谷下面,软流圈顶面的埋深主要变化于55—85km,上部软流圈是达固相线的上地幔橄榄岩,含有约7—15%的隙间玄武岩岩浆。

根据岩石圈拉伸的布丁(香肠)化模型推算的中国东部大陆裂谷区岩石圈平均厚度为60km^[3]支持了上述推论。

三、软流圈的轮廓

玄武岩火山作用是地幔对流的直接表现。中国东部新生代玄武岩带及火山群的等间距性是软流圈底辟体不稳定性在地表的表现^[3]。如果我们把包括苏联贝加尔地区及蒙古在内的新生代玄武岩的范围圈出,则可看出,新生代时期东亚大陆地区软流圈上隆的轮廓(图1)。早第三纪时期,软流圈呈现近南北向延伸的椭圆形穹状隆起,晚第三纪—第四纪时期软流圈呈现北西方向延伸的椭圆形穹状隆起,前者的范围比后者小,它们可能代表了新生代时期东亚大陆下面两个巨型的软流圈底辟体。

与典型的东非大陆裂谷系的穹状隆起比较,东亚大陆的软流圈穹状隆起表现有二个不同的特征。①穹状隆起在平面上呈现似椭圆形,而不是圆形;②火山岩带呈斜列式展布,东非大陆裂谷系的火山岩呈Y形展布。这种差异可能与软流圈底辟作用发生时,东亚裂谷系特殊的边界条件有关,见图2、3。早第三纪时,青藏大陆块体向北东方向的移动以及太平洋板块的俯冲作用,迫使软流圈底辟体沿近南北方向拉伸,呈现椭圆形状。

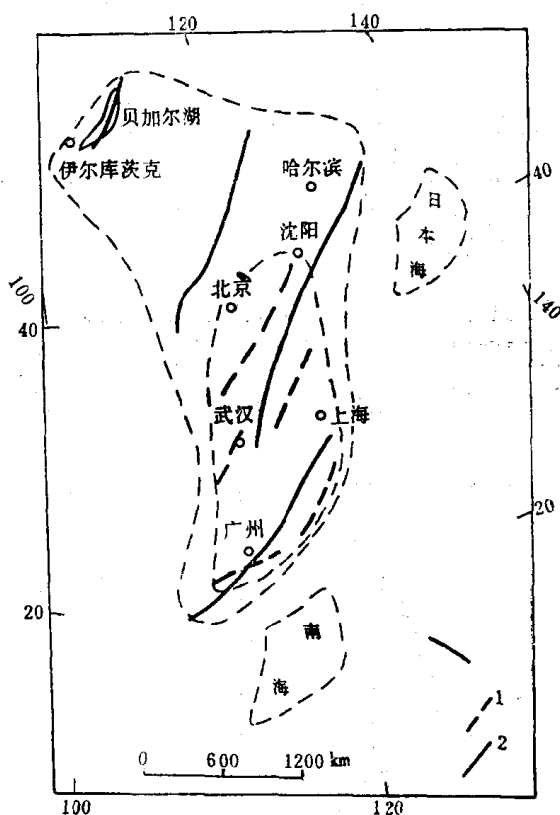


图1 东亚地区新生代玄武岩分布与软流圈上隆轮廓图

1.早第三纪火山岩带; 2.晚第三纪—第四纪火山岩带