

广东麒麟新生代玄武质角砾岩筒中 岩石包体的研究

The Xenoliths From Qilin Cenozoic Basaltic Pipe, Guangdong

徐夕生 周新民

Xu Xisheng and Zhou Xinmin

(南京大学地球科学系 南京 210093)

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093)

提 要 本文以广东麒麟玄武质角砾岩筒中的各种岩石包体为研究对象, 通过详细的岩石学研究, 按岩石类型将包体划分为四类: 即橄榄岩、辉石岩、辉长岩质麻粒岩、花岗岩和火山-沉积岩, 并依据包体的岩石地球化学特征, 讨论了它们的成因; 其中辉长岩质麻粒岩是来自本区下地壳的样品, 是由上地幔部分熔融产生的熔体“底侵”于地壳底部结晶, 又经变质作用的产物。同时, 本文结合实测的和计算的地球物理参数, 讨论了该区的岩石圈分层。

Abstract The various xenoliths from Qilin basaltic pipe, Guangdong are studied in this paper. On the basis of rock types and detailed petrological studies, these xenoliths can be divided into four classes: peridotites, pyroxenites, gabbroic granulites, granite and volcanic-sedimentary rocks. The genesis of the xenoliths are discussed by studying of their geochemical characteristics. It is believed that the gabbroic granulites are the samples from lower crust of this region, which were formed by crystallization of "underplating" magmatic melt from upper mantle, and underwent metamorphism. In addition, by integrating with measured and calculated geophysical data, the division of the lithosphere in this area is also discussed.

主题词 捕虏体 下地壳 底侵作用

Key words: Xenoliths; Lower crust; Underplating

分类号: P588.14

Classific. code: P588.14

-
- 本文于1993年12月5日收到, 1994年 改回。
本文为国家自然科学基金和国家教委博士点基金资助项目研究成果。
作者简介: 徐夕生 1962年出生 博士 岩石学专业

1 引言

在中国东南部,唯一能获得的大陆的下地壳-上地幔岩石样品是玄武质岩石中的捕虏体。这就使人们近年来为认识深部地质过程对浅部地质的制约,开始再次注意(邓晋福,赵海玲 1990; Fan and Hooper 1991; 刘若新等 1992)这一地区玄武岩及其岩石包体的研究。在该区玄武岩中,研究较为详细的地点有浙江新昌-嵊县、福建龙海-明溪、广东雷州半岛-汕头麒麟以及海南岛等(王人镜,杨淑荣 1987; 黄婉康等 1992; 张明等 1992)。

麒麟玄武质角砾岩筒位于广东汕头普宁市麒麟镇,地理座标为 $116^{\circ}16'$ 、 $23^{\circ}23'N$ 。岩筒直径约 50m,围岩为晚中生代花岗岩,含十分丰富的地壳和地幔岩岩石包体。在七十年代末至八十年代初,胡长霄(1977)、周新民等(1982)、曹荣龙和朱寿华(1983)、赵海玲(1985)以及张儒媛和柏林(1985)等对该岩筒及其岩石包体作了详细的岩石学研究,获得了现今难以再得的一批宝贵资料(岩石已被强烈风化,地质探槽已塌填,在野外难以辨认地质产状和取到适合研究的理想样品)。但从近几年玄武质岩石及其包体研究的发展看,麒麟玄武质角砾岩筒及其包体研究的深度和广度仍需加强,如以往对辉长岩质麻粒岩包体尚未认识;对各种包体的成因缺乏系统的研究;中国东部绝大多数地区的新生代玄武岩均已有的同位素资料,而对麒麟,仅有包体中三个单斜辉石和一个角闪石单矿物的 Sr、Nd 同位素资料(鄂莫岚,赵大升 1987),研究程度相对薄弱。在本文中,笔者对该角砾岩筒中各种包体进行了岩相学和地球化学研究,讨论了它们的分类和成因,并试图利用平衡矿物温压计计算资料和地球物理资料,探讨辉长岩质麻粒岩包体的成因和本区岩石圈分层问题。

2 麒麟玄武质角砾岩筒概况及其岩石包体类型

2.1 玄武质角砾岩筒概况

麒麟玄武质角砾岩筒,侵出于燕山晚期黑云母花岗岩中。七十年代初,广东汕头地区地质队为了探矿,在玄武质角砾岩筒南部打了深 493m 的钻孔,并挖了探槽。赵海玲(1984)^①通过各种包体和碎屑的成分和大小统计,曾将玄武质角砾岩筒划分为四个相带,即中心相(I)、中心-过渡相(II)、过渡相(III)和边缘相(IV)。经笔者进一步工作,各岩相带中包体的特征可归纳如表 1。总体上说,从边缘相到中心相,超镁铁质岩石包体数量依次增多,个体增大,圆度增加;花岗岩包体则迅速减少,且多具棱角状、次棱角状。反映岩浆携带包体上升过程中,中心速度快,边缘速度慢。

2.2 包体类型

近四年来,笔者先后三次去野外工作,尽可能多地收集各种包体样品。据其岩石类型,麒麟玄武质角砾岩筒中的包体可粗略地划分为四类,即橄榄岩、辉石岩、辉长岩质麻粒岩以及花岗岩和火山-沉积岩岩石包体。

^① 赵海玲, 1984. 广东普宁麒麟岩体地质(未刊资料).

表1 麒麟玄武质角砾岩筒中各类包体相对比例和大小

Table 1 The proportions and sizes of the xenoliths from Qilin pipe

玄武质角砾岩筒各相	包体大小百分比			包体含量百分比		
	橄榄岩	辉石岩和辉长岩质麻粒岩	花岗岩	大	中	小
中心相 (I)	95	4	1	30	50	20
中心-过渡相 (II)	86	4	10	10	79	11
过渡相 (III)	70	9	21	8	60	32
边缘相 (IV)	53	6	41	3	37	60

表中数据根据赵海玲(1984)资料并补充, 包体含量按包体个数统计; 包体大小: 大指 $\geq 20 \times 15 \text{cm}^2$, 中指 $10 \times 5 \text{cm}^2 \sim 20 \times 15 \text{cm}^2$, 小指 $\leq 10 \times 5 \text{cm}^2$.

(1) 橄榄岩包体呈黄绿色, 主要为尖晶石二辉橄榄岩和少量方辉橄榄岩, 大多呈次棱角状。有粗粒和细粒两种: 粗粒者呈块状构造; 细粒者有时具页理构造。它们长径一般10cm左右, 少数较大, 可达50cm。这些橄榄岩包体主要由橄榄石、斜方辉石、透辉石和尖晶石组成, 有时含少量角闪石。在显微镜下, 岩石呈残碎斑状结构或板状变晶结构, 碎斑为橄榄石和斜方辉石, 宽而直的扭折带和波状消光现象十分发育。橄榄石扁平拉长, 其拉长方向与扭折带方向近于垂直。基质为细粒橄榄石、顽火辉石、顽火透辉石和尖晶石, 偶见扭折带和波状消光现象, 普遍发育由重结晶作用形成的“三连点”式平衡结构, 有时在透辉石边缘呈筛状海绵边结构, 上述特征表明, 它们是来自上地幔顶部的样品, 曾经历过高温塑性流变作用、地幔交代作用和受到了寄主玄武岩浆的作用。

(2) 辉石岩包体以尖晶石石榴石二辉岩为主, 有少量不含石榴石的尖晶石二辉岩。其中前者由单斜辉石(40%)、斜方辉石(20%)、铁尖晶石(17%)、石榴石(18%)和少量角闪石(5%)组成, 副矿物为硫化物和磷灰石等。详细的矿物化学(表2)研究表明, 单斜辉石为顽火透辉石, 不含硬玉分子, 斜方辉石为古铜辉石, 角闪石为韭闪石, 尖晶石为镁铁尖晶石, 石榴石为镁铝榴石。这些辉石岩, 普遍具粒状变晶结构, 有时具碎斑结构、交代结构和局部熔融结构。粒状变晶结构主要是指矿物的重结晶; 碎斑结构表现为单斜辉石或斜方辉石的网状碎裂; 交代结构是指单斜辉石碎斑中具不规则的角闪石交代叶片, 有时交代叶片状角闪石可重结晶形成填隙状角闪石颗粒, 矿物化学成分一致; 局部熔融结构是指矿物之间隙间玻璃的发育。此外, 这种岩石中的石榴子石普遍具褐色次变边, 有时次变边中有结晶较粗的尖晶石和单斜辉石后成合晶, 它们是减压作用下(Rudnick, 1992)相平衡过程的记录。

(3) 辉长岩质麻粒岩包体, 在本文中的含义如同 Pearson et al. (1991)通过研究玄武岩中的麻粒岩捕虏体所定义的那样, 是指“具变质结构的辉石和斜长石, 有时可含石榴石矿物组合的岩石”。麒麟玄武质角砾岩筒中的辉长岩质麻粒岩, 矿物组合简单, 主要由单斜辉石($\text{Wo}_{0.0}$, $\text{En}_{41.2}\text{Fs}_{17.9}$)和斜方辉石($\text{Wo}_{1.5}\text{En}_{57.5}\text{Fs}_{41.0}$)及中-基性斜长石组成(表2), 有时可含石榴石矿物, 与澳大利亚东部一些玄武质角砾岩筒中的二辉麻粒岩(Lovering 1969; Griffin and O'Reilly 1986)相似。普遍发育粒状变晶结构, 其中辉石呈豆粒状或次浑圆状; 斜长石呈等粒相嵌状或以“三连点”式接触的重结晶结构。此外, 部分辉长岩质麻粒岩受到了强烈的糜棱岩化作用, 表现为斜长石双晶有弯曲拖曳, 矿物颗粒波状消光、亚颗粒化等岩相学特点。随着

糜棱岩化作用的增强,辉长岩质麻粒岩中斜长石 An 由 65 降为 45。这类岩石在地表围岩中没有出露,结合上述特征,说明它是岩石圈深部的组份,并且经历过变质作用。

表 2 麒麟玄武质角砾岩筒中岩石包体的矿物化学成分

Table 2 The mineralogical chemical composition of the xenoliths from Qilin pipe

岩石类型	辉长岩质麻粒岩			辉石岩					尖晶石二辉橄榄岩				
矿物	Cpx	Opx	Pl	Grt	Cpx	Opx	Amp	Sp	Cpx	Opx	Ol	Amp	Sp
分析数目	7	10	15	10	13	7	4	3	8	7	7	4	7
SiO ₂	50.08	50.37	55.83	40.73	49.33	52.54	41.16	0.08	51.37	54.81	40.51	42.70	0.04
TiO ₂	0.31	0.07	0.01	0.14	0.86	0.19	2.48	0.22	0.52	0.11	0.01	1.86	0.10
Al ₂ O ₃	3.48	2.24	27.29	22.86	6.99	4.93	15.09	60.58	6.36	4.48	0.01	15.00	58.39
Cr ₂ O ₃	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.58	0.27	0.01	0.77	7.58
FeO	11.38	26.14	0.19	13.87	5.81	12.04	8.11	20.96	2.95	6.61	10.33	4.28	11.03
NiO	0.00	0.01	0.00	0.04	0.01	0.03	0.04	0.15	0.04	0.10	0.39	0.14	0.40
MnO	0.30	0.71	0.01	0.56	0.12	0.21	0.09	0.14	0.09	0.11	0.13	0.10	0.01
MgO	11.76	19.17	0.00	16.03	13.98	28.60	15.43	17.05	15.04	32.69	48.70	17.43	20.83
CaO	21.21	0.68	9.96	5.84	21.35	0.81	10.99	0.01	20.99	0.62	0.04	10.80	0.01
Na ₂ O	0.56	0.02	5.37	0.01	0.83	0.05	3.30	0.00	1.36	0.07	0.01	3.71	0.01
K ₂ O	0.01	0.01	0.71	0.01	0.00	0.01	0.16	0.01	0.00	0.01	0.00	0.05	0.00
总和	99.12	99.44	99.38	100.11	99.29	99.42	96.87	99.22	99.30	99.88	100.14	96.84	98.40
100Mg#	64.8	56.7		67.3	81.1	80.9	77.2	59.2	90.1	89.8	89.4	87.9	77.1
Wo,Gr,An	40.9	1.5	48.5	15.0	38.4	1.7			37.7	1.2			
En,Py,Ab,Fo	41.2	57.5	47.4	57.2	54.1	81.5			58.5	89.5	89.4		
Fs,Alm,Or,Fa	17.9	41.0	4.1	27.8	7.5	16.8			3.8	9.3	10.6		

表中数据在澳大利亚 Macquarie 大学用 Cameca SX50 电子探针仪测试,测试条件为加速电压 15kV, 电流 20nA, WDS 2~3 μ m. 100Mg# = Mg/(Mg+Fe)×100 (原子数), 矿物代号: Grt 为石榴石, Cpx 为单斜辉石, Opx 为斜方辉石, Amp 为角闪石, Sp 为尖晶石, Ol 为橄榄石。

(4)花岗岩和火山-沉积岩包体包括中酸性角砾状细粒花岗闪长岩、片麻状堇青石花岗岩、斑状黑云母花岗岩以及下三叠统至下白垩统的火山-沉积岩系的岩石。除前两种岩石类型外,在麒麟玄武质角砾岩筒周围岩层中均能见到相应的岩石类型,表明它们是中-浅部地壳物质的俘虏体。

3 麒麟玄武质角砾岩筒中岩石包体的成因

产于麒麟玄武质角砾岩筒中的包体的岩石类型是多种多样的,它们的成因显然也是很复杂的。除了属中-上地壳的花岗岩类和火山-沉积岩俘虏体外,其它包体的成因及其相互关系是值得探讨的问题。

橄榄岩包体是玄武质岩浆上升时从源区夹带的, 是上地幔原始物质经局部熔融形成的亏损地幔超镁铁质岩石碎块。首先, 这种岩石的矿物组合为橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、尖晶石, 与全球尖晶石二辉橄榄岩相包体的矿物组合和含量一致; 其板状变晶结构显示本区上地幔经历了塑性流变作用; 用 Wood and Banno (1973)、Wells (1977)、Mercier (1980)、Sachtleben and Seck (1982) 等多种温压计计算并相互印证, 参考本区的地温梯度曲线(张儒媛, 从柏林 1985; 1987), 可知它们形成于约 T 为 $800^{\circ}\text{C}\sim 1250^{\circ}\text{C}$, P 为 $0.7\sim 2.7\text{GPa}$ 的条件下, 表明尖晶石二辉橄榄岩存在的最小深度约达 25km , 较由地球物理资料确定的 Moho 面位置浅(见后文)。其次, 这种岩石经历了部分熔融作用, 其岩相学证据是粒间充填状玻璃的存在; 其岩石地球化学依据是与 Ringwood 模拟的上地幔岩相似, 稍亏损了易熔组分, Sr-Nd-Pb 多元同位素体系的研究也表明, 本区(华南亏损地幔区)是我国大陆地幔综合指标最亏损的一个地区(周新华, 朱炳泉 1992)。

辉石岩包体是上地幔橄榄岩部分熔融产生的成分相当于苦橄拉斑玄武岩的岩浆, 在高压下就地结晶的产物(赵海玲 1985)。参照张儒媛、从柏林(1985; 1987)的研究资料, 结合笔者新近进行的矿物成分分析(表 2), 根据 Wood(1974)和 Ellis-Green(1979)温压计计算, 可知这些辉石岩的形成条件 T 为 $900^{\circ}\text{C}\sim 1150^{\circ}\text{C}$, P 为 $1.0\sim 1.6\text{GPa}$ 。

辉长岩质麻粒岩包体是玄武质岩浆上升过程中, 捕获的下地壳岩石碎块。它代表了由上地幔部分熔融产生的基性岩浆底侵(underplating)于地壳的底部, 经结晶和变质作用, 形成的基性麻粒岩相的下地壳岩石组分。依据平衡共生的单斜辉石、斜方辉石矿物化学成分, 利用 Wells(1977)二辉石矿物温度计计算, 可知辉长岩质麻粒岩的平衡温度为 $800^{\circ}\text{C}\sim 850^{\circ}\text{C}$ 。在全岩化学成分方面, 它与橄榄岩、辉石岩相比, 富易熔组分 Na_2O 、 K_2O 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 CaO , 而贫难熔组分 MgO , 全铁含量相近, Cr_2O_3 的含量从辉长岩质麻粒岩 \rightarrow 辉石岩 \rightarrow 橄榄岩依次增加; 全岩稀土元素分析表明(表 3, 图 1), 从方辉橄榄岩、二辉橄榄岩 \rightarrow 辉石岩 \rightarrow 辉长岩质麻粒岩, 稀土总量依次增加, Eu 从中等亏损至不亏损, 表明它们有成因联系, 是地幔岩石经不同程度部分熔融作用形成的各种岩石类型。关于辉长岩质麻粒岩的底侵特征还可通过地球物理资料佐证, 据涉及本区的福州-泉州-汕头地区人工爆炸地震测深资料(廖其林等 1988), 本区下地壳下部有一 $4\sim 7\text{km}$ 厚的高速致密的壳-幔混合物质层, $V_p=7.02\text{km/sec}$ 。根据 Anderson and Simmons(1970)的计算公式, 笔者对尖晶石二辉橄榄岩、辉石岩和辉长岩质麻粒岩进行了 V_p 值的计算(表 4)。由于温度和压力是 V_p 计算值的函数, 为与实测的 V_p 值比较, 并考虑该区现代地表热流值(70mW/m^2)(汪屹华, 汪集旻 1992)和地温梯度, 在计算中, 对辉长岩质麻粒岩, 温度取 500°C , 压力取 0.7GPa ; 对辉石岩和尖晶石二辉橄榄岩, 温度取 600°C , 压力取 1GPa 。如以尖晶石二辉橄榄岩(20%)(前已述及, 25km 左右深度可出现此类岩石)、辉石岩(10%)和辉长岩质麻粒岩(70%)混合, 可得到 $V_p=7.08\text{km/sec}$, 与该物性层相当。

4 麒麟地区岩石圈分层的讨论

人工地震测深资料及三维重力反演等地球物理资料(廖其林等 1988; 冯锐 1985; 朱介

表3 麒麟玄武质角砾岩筒中包体的稀土元素成分

Table 3 The REE composition of the xenoliths from Qilin pipe

序号	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb	Lu	ΣREE	δEu
1	0.16	0.67	0.32	0.22	0.05	0.18	0.15	0.14	0.13		2.02	0.82
2	0.52	1.00	0.75	0.38	0.10	0.46	0.30	0.37	0.38		4.26	0.81
3	2.92	7.88	5.47	2.07	0.71	2.40	2.36	1.31	1.10	0.17	26.39	1.08
4	12.00	24.00	14.00	3.50	1.20	3.50	2.80	1.60	1.10	0.18	63.88	1.14

注: (1)序号1,2,3,4分别为方辉橄橄岩、尖晶石二辉橄橄岩、辉石岩(7个样品平均值)、辉长岩质麻粒岩;
(2)序号1~2据赵海玲(未刊)和赵海玲(1987)。

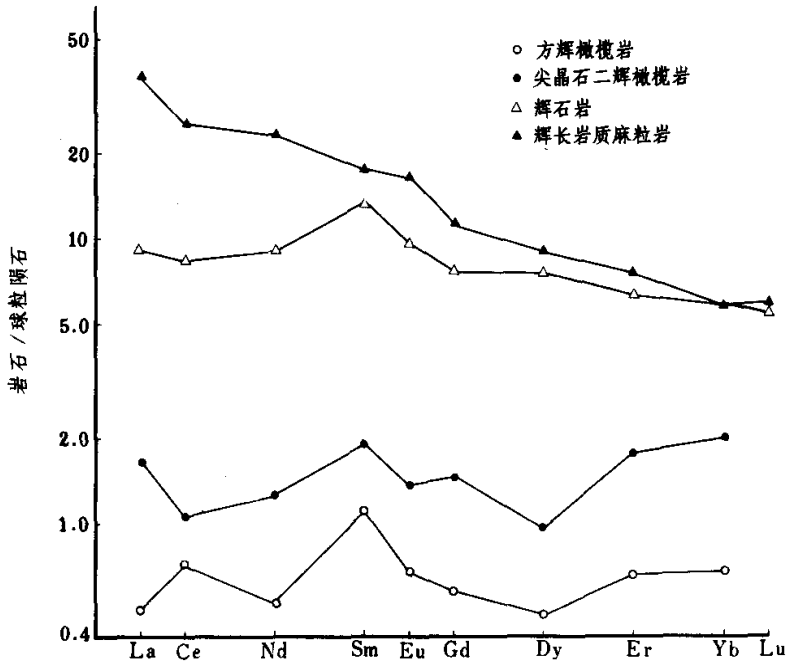


图1 麒麟玄武质角砾岩筒中包体的稀土元素配分曲线

Fig. 1 Chondrite-normalized REE patterns of the xenoliths from Qilin, southeast China

寿 1986)表明,本区壳/幔界面位于深约 32km 处,地震速度与深度的关系表明,本区地壳可分为三层。通过麒麟玄武质角砾岩筒中各种包体的研究,结合这些地球物理资料,可以粗略地了解本区岩石圈的分层。

上地幔岩石圈主要由尖晶石二辉橄橄岩组成,有少量辉石岩和方辉橄橄岩,实测地震波速 V_p 值为 7.90km/s。需要指出的是,在麒麟玄武质角砾岩筒中以及邻近的福建牛头山玄武岩中从未发现石榴石二辉橄橄岩包体,而在向内陆的福建明溪玄武岩中则见到大量的石榴石

二辉橄榄岩包体, 并且有尖晶石与石榴石共存的现象(刘若新等 1985)。由于石榴石二辉橄榄岩的形成深度比尖晶石二辉橄榄岩大, 这就可能意味着从沿海向内陆, 玄武岩起源深度有增大的趋势, 而这种深度变化可能与太平洋板块向中国东南大陆俯冲的深度有关。

表 4 麒麟玄武质角砾岩筒中包体的 V_p 计算值Table 4 The calculated V_p for xenoliths from Qilin

岩石类型	密度(g/cm^3)	平均原子量(M)	(CaO)	$V_p(km/sec)$
辉长岩质麻粒岩	3.015	21.80	0.08	6.85
尖晶石石榴石辉石岩	3.359	21.98	0.14	7.77
尖晶石二辉橄榄岩	3.303	21.12	0.025	7.52

下地壳主要由辉长岩质麻粒岩组成。厚约 6.7km, 地震波速 V_p 值为 7.02 km/s。是底侵作用形成的基性岩浆底侵于下地壳, 并混染下地壳物质经变质作用的产物, 其形成方式, 十分类似于意大利北部 Ivrea Zone (Voshage 1990) 和澳大利亚东部地区的底侵作用(Griffin and O'Reilly 1987), 是重要的壳/幔演化过程。此外, 由于中国东南大陆边缘具一致的地球物理参数(冯锐 1985; 朱介寿 1986)及同位素地球化学体系(周新华, 朱炳泉 1992), 因此, 本区底侵作用这一特点是否可推广到整个中国东南大陆边缘, 即底侵作用是华南大陆边缘陆壳演化的重要过程, 有待进一步研究。

中-上地壳依据麒麟玄武质角砾岩筒中的细粒花岗闪长岩和堇青石花岗岩捕虏体及地表出露的岩石类型可知, 本区中-上地壳由花岗质岩石和上三叠统一下侏罗统陆屑碎屑岩建造(广东省地质矿产局 1982)及地表出露的燕山期中酸性火山-侵入岩组成。其中在 15km 深处有一约 2.6km 厚的低速层, V_p 为 5.88km/s, 这种低速层反映了地壳中熔融或部分熔融物质层的存在(廖其林 1988), 或是地壳中一个破碎带或韧性断层的存在(熊绍柏 1992), 笔者倾向于后一种观点。

参 考 文 献

- 广东省地质矿产局. 1982. 广东省区域地质志. 北京: 地质出版社
- 王入镜, 杨淑荣. 1987. 浙江嵛县-新昌新生代玄武岩及其包体的研究. 地球科学——武汉地质学院学报, (12) 3: 241~248
- 邓晋福, 赵海玲. 1990. 中国东部新生代上部软流圈性质及变迁历史. 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. 北京: 地震出版社. 8~13
- 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
- 刘若新, 樊祺诚, 孙建中. 1985. 中国几个地方石榴石二辉橄榄岩捕虏体研究. 岩石学报, 1 (4): 24~33
- 刘若新等. 1992. 中国新生代火山岩的 K-Ar 年代与构造环境. 见: 刘若新主编, 中国东部新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社, 1~43
- 朱介寿. 1986. 中国大陆地壳及上地幔分块结构特征. 成都地质学院学报. 13 (1): 75~94
- 汪屹华, 汪集场. 东南沿海地区岩石圈热结构与热演化. 见: 李继亮主编, 中国东南海陆岩石圈结构与演化研究. 北京: 中

- 国科学技术出版社. 302~315
- 张明等. 1992. 海南岛新生代玄武岩微量元素和同位素地球化学. 刘若新主编. 中国东部新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社. 246~268
- 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. 岩石学报. 1 (4): 34~48
- 周新民等. 1982. 我国东南沿海碱性玄武质岩石中的辉石和角闪石巨晶. 矿物学报. (1): 13~20
- 周新华, 朱炳泉. 1992. 中国东部新生代玄武岩同位素体系和地幔化学区划. 见: 刘若新主编. 中国东部新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社. 366~391
- 赵海玲. 1985. 广东普宁麒麟辉石岩幔源包体的岩石学特征. 岩石学报. 1 (1): 23~33
- 赵海玲. 1985. 广东普宁麒麟辉石岩幔源包体的矿物学特征及其形成条件. 地质论评. 31 (5): 411~420
- 赵海玲. 1987. 广东普宁麒麟幔源包体及其寄主玄武岩稀土元素的研究. 现代地质. 1 (2): 267~273
- 胡长霄. 1977. 广东玄武质火山岩中超基性岩地质特征. 地球化学. (2): 136~145
- 黄婉康等. 1992. 福建明溪石榴石二辉橄榄岩包体的 REE 及 Pb, Sr, Nd 同位素研究. 地球化学. (2): 101~112
- 曹荣龙, 朱寿华. 1983. 中国东部地幔岩包体的产出及其地球内部构造关系. 地球物理学报. 26 (2): 158~166
- 鄂莫岚, 赵大升. 1987. 中国东部新生代玄武岩及深源包体. 北京: 科学出版社. 349~475
- 廖其林等. 1988. 福州-泉州-汕头地区地壳结构的爆炸地震研究. 地球物理学报. 31 (3): 270~280
- 熊绍柏. 1992. 中国东南地区的岩石圈结构. 见: 李继亮主编. 中国东南海陆岩石圈结构与演化研究. 北京: 中国科学技术出版社. 267~277
- Anderson D L and Sammis C. 1970. Partial melting in the upper mantle. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 3:41~50
- Fan Q C and Hooper P R. 1991. The basaltic rocks of eastern China: Petrology and chemical composition. *Journal of Petrology*, 32:765~810
- Griffin W L and O'Reilly S Y. 1986. The nature of the lower continental crust. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 24:363~374
- Griffin W L and O'Reilly S Y. 1987. Is the continental Moho the crust-mantle boundary? *Geology*, 15:241~244
- Lovering J F and White A J R. 1969. Granulitic and eclogitic inclusions from basic pipes at Delegate, Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 21:9~52
- Pearson N J, O'Reilly S Y and Griffin W L. 1991. Heterogeneity in thermal state of the lower crust and upper mantle beneath eastern Australia. *Exploration Geophysics*, 22: 295~298
- Rudnick R L. 1992. Xenoliths—Samples of the lower continental crust. In: *The continental lower crust*, Chapter 7, Elsevier, 269~316
- Voshage H et al. 1990. Isotopic evidence from the Ivrea Zone for a hybrid lower crust formed by magmatic underplating. *Nature*, 347:731~736