

华北克拉通和华南地区下地壳麻粒岩捕虏体的研究进展及其地质意义

沈其韩 耿元生

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘要: 本文主要在前人研究的工作基础上, 对华北克拉通(中朝克拉通)和华南地区产出的下地壳麻粒岩捕虏体的研究进展及其地质意义作一简要综述。文中共涉及8个方面: ①基本情况; ②国内外研究现状; ③麻粒岩捕虏体的产出特征; ④麻粒岩捕虏体的岩石类型, 伴生的地幔岩、共生矿物组合、温压条件; ⑤麻粒岩捕虏体的原岩年龄和变质年龄; ⑥麻粒岩捕虏体的岩石化学和地球化学特征; ⑦华北和华南麻粒岩捕虏体所代表的下地壳位置; ⑧麻粒岩捕虏体同位素年龄的地质意义和麻粒岩捕虏体的成因。并提出了4个科学问题和今后工作的建议。

关键词: 华北克拉通; 麻粒岩捕虏体; 岩石化学和地球化学

中图分类号: P588.34

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)05-0759-22

Some progresses in the study of the lower continental crust granulite xenoliths in North China Craton and South China region and their geological significance

SHEN Qi-han and GENG Yuan-sheng

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Based on previous researches, this paper chiefly summarized some progresses made in the study of continental lower crust granulite xenoliths in North China Craton (Sino-Korean Craton) and South China region as well as their geological significance. Eight aspects are dealt with in this paper: ① general situation; ② current researches conducted both in China and abroad; ③ modes of occurrence of granulite xenoliths; ④ rock types, associated mantle rocks, mineral assemblages and *p-t* conditions of granulite xenoliths; ⑤ dating of original rock age and metamorphic age; ⑥ petrochemistry and geochemistry of granulite xenoliths; ⑦ lower crust position in North China Craton and South China region represented by granulite xenoliths; ⑧ geological significance of isotope ages and genesis of granulite xenoliths. Four scientific problems and some suggestions concerning further studies are also put forward in this paper.

Key words: North China Craton; granulite xenolith; petrochemistry and geochemist

麻粒岩是大陆下地壳的主要组成岩石,是研究大陆下地壳的主要依托。它是联系深部地壳与上地幔的纽带,是大陆地壳生长、壳幔物质交换的重要场所。

麻粒岩的产出状态基本有两类:一类是产于古老克拉通地区的早前寒武纪麻粒岩地体,分布广且量多;另一类是火成岩特别是中生代玄武岩岩浆侵位过程中在中下地壳捕获带到地表的麻粒岩捕虏

收稿日期: 2011-04-02; 修订日期: 2011-08-02

基金项目: 中国地质调查局资助项目(1212010611702)

作者简介: 沈其韩(1922-), 研究员, 中国科学院资深院士, 长期从事变质地质及早前寒武纪研究。

体(有人称“包体”,本文统一称“捕虏体”),常与地幔岩类捕虏体伴生,个体小而量也不多。由于组成麻粒岩地体的岩石经过长期复杂的变质变形才到达地表,它们实际上已不能很好的代表现今的下地壳,但仍可作为古老下地壳的代表不断深入研究。而由中新世玄武岩(还包括其他超镁铁质岩石、中酸性侵入岩等,但部分中酸性侵入岩携带的麻粒岩包体不是直接来自下地壳)携带到地表的麻粒岩捕虏体由于是快速上升到地表,基本保持了当时下地壳的原始面貌,而且常与各种地幔岩共生,可以同时测定地温曲线,判定其形成深度,确定壳幔边界,建立岩石圈结构剖面并与速度结构剖面对比,深入进行壳幔演化的研究,对大陆下地壳的研究具有十分重要的科学意义。所以,麻粒岩捕虏体的研究和麻粒岩地体的研究一样日益受到人们的重视。

1 国内外研究现状

国内对麻粒岩地体的研究随着古老克拉通的全面研究而开展,研究内容已涉及到地质学、岩石学、矿物学、同位素年代学、微量元素地球化学和同位素地球化学等不同学科。其形成的地质背景等都已有许多文章报道,而着重以麻粒岩地体作为下地壳的专门论述开始于 20 世纪 90 年代初期至中期(Rudnick and Taylor, 1987; Salisbury and Fountain, 1988; Harley, 1989; Bohlin and Mezger, 1989; 刘庆生等, 1990; Verzeut and Vidal, 1990; Kemplton *et al.*, 1990; 翟明国, 1991; 沈其韩等, 1992; Fountain, 1992; Percival *et al.*, 1992; Gao *et al.*, 1992, 2002; 孙勇等, 1993; 翟明国等, 1996, 2002)。

关于大陆下地壳麻粒岩捕虏体的研究,在 20 世纪 90 年代前后开始受到中国岩石学家和地球化学家的重视并着手研究,起初更侧重于新生代玄武岩中地幔岩包体(捕虏体)的研究(胥怀济等, 1979; 刘若新等, 1981; 从柏林等, 1982a, 1982b, 1983; 赵海玲, 1985; 张儒瑗等, 1985; 鄂莫岚等, 1987; Song and Frey, 1989; 周新民等, 1992; 王方正等, 1997; 支霞臣等, 2001)。麻粒岩捕虏体最早是在研究安徽女山地幔岩时发现的,随后对这种岩石开展了各种研究(Zhou *et al.*, 1992; Yu and Zhou, 1993; Xu *et al.*, 1996, 1998, 2000; 黄小龙等, 2001, 2002; Huang *et al.*, 2004; Zheng *et al.*, 2004)。在研究河北汉诺坝地区的地幔岩时也发现了多种类型的麻粒岩捕虏体

(谢漫泽等, 1993; 樊祺诚等, 1996),从而对麻粒岩捕虏体展开了多方面的研究(解广轰等, 1992; 樊祺诚等, 1996, 1998; Chen *et al.*, 1996; 陈道公等, 1997; 陈绍海等, 1998; 张国辉等, 1998a, 1998b, 1998c; 储雪蕾等, 1999; 林传勇等, 2001, Chen *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2001; 黄小龙等, 2001; 刘勇胜等, 2001, 2003, 2004; Zhou *et al.*, 2002)。同时与麻粒岩伴生的地幔岩也有研究(刘丛强等, 1996)。在此前后,在东秦岭桐柏山(孙勇等, 1993)、粤西云炉(陈斌等, 1994; 周汉文等, 1994, 1996)、广东普宁麒麟镇(徐夕生等, 1995; Xu *et al.*, 1996; Yu *et al.*, 1998)、湖南道县(钟应先等, 1993; 孔华等, 2000)、广东雷州半岛英峰岭(于津海等, 1998, 2002; Yu *et al.*, 2003)、两广交界地区(杜杨松等, 1999)、内蒙古喀喇沁(邵济安等, 2000; 韩庆军等, 2000)、浙江新昌(王人镜等, 1987; 陶奎元等, 2001)、台湾澎湖(Chung *et al.*, 1996)、河南信阳(Zheng *et al.*, 2003, 2004; 郑建平等, 2005)等地区都发现了麻粒岩捕虏体。寄主岩石以中、新生代的玄武岩为主,还包括中生代的闪长岩和加里东期的 S 型花岗岩和紫苏花岗岩等。以上地区的麻粒岩捕虏体,除浙江新昌地区未进行详细研究外,其他地区都进行了不同程度的研究,普遍进行了岩相学和主成分及微量元素分析、典型的矿物共生组合和平衡矿物温压条件研究,大部分进行了岩石组成矿物的化学分析、岩石的稀土元素地球化学研究,部分地区进行了 Sr、Nd、Pb 等同位素比值和各种方法的同位素年代学研究,有的地区在研究麻粒岩捕虏体的同时,还结合地幔岩研究成果和地球物理测定数据如波速、地震资料编制了下地壳—地幔岩石结构剖面 and 地震波速剖面(孔华等, 1998; Gao *et al.*, 2000; 史兰斌等, 2000)。有的则侧重于麻粒岩捕虏体岩石的波速和流变学等方面的研究(刘顺等, 1997; 孔华等, 2000; Gao *et al.*, 2000; 林传勇等, 2001),部分文章强调麻粒岩捕虏体的研究意义和研究进展(杜杨松, 1994; 吴有林等, 1995; 孔华等, 1998; 张海祖等, 2001; 于津海等, 2002)。Tatsumoto 等(1992)对华东火山岩中超镁铁质捕虏体的 Sr、Nd 和 Pb 同位素进行了研究,徐夕生等(1999)论述了中国东南部下地壳物质与花岗岩的成因。

国外对麻粒岩捕虏体的研究开始于 20 世纪 80 年代初期,随后研究者越来越多,最具代表性和系统性的文章是 Rudnick(1992)在 Fountain D M 主编的“Continental Lower Crust”一书中刊出的“Xenoliths-

Sample of lower continental crust”一文,在文中共收集了南北美洲、欧洲、非洲、中东、澳洲、南极洲等 47 个国家和地区的下地壳麻粒岩捕虏体以及少量斜长角闪岩捕虏体资料,指出下地壳捕虏体所测时代都比较年轻,有 34% 位于显生宙,34% 位于元古宙,仅有 14% 位于太古宙。文中比较了麻粒岩地体与麻粒岩捕虏体的差异,编制了世界范围的麻粒岩地体和麻粒岩捕虏体的分布图,描述了捕虏体的产出特征,共生矿物的 $p-t$ 范围,物理性质包括地震波速和产热率等以及化学成分和同位素特征,最后还列举出若干地区实例并附各家所计算的下地壳代表性的化学成分,极具参考价值。

本文根据已公开发表的研究成果,对我国华北 6 个地区、华南 8 个地区产出的麻粒岩捕虏体,从捕虏体的类型、产出状态、平衡矿物公式计算的温压条件、主要的岩石化学和地球化学特征、所处下地壳的位置、年代学以及南北麻粒岩捕虏体产出的差异等方面论述其研究进展,而对麻粒岩捕虏体所测得的大量矿物化学和地球化学数据,地温曲线, Nd、Sr、Pb 等元素不均一数据未进行全面总结。最后在前人工作基础上,对一些基本问题提出几点讨论性意见,并对今后工作提出一些建议。

2 麻粒岩捕虏体的类型和一般地质特征

华北 6 个地区、华南 8 个地区麻粒岩捕虏体的类型及一般地质特征简要综合为表 1,其产出位置详见图 1。

3 麻粒岩捕虏体的岩石类型、共生矿物组合和温压条件

3.1 河北汉诺坝麻粒岩捕虏体

谢漫泽等(1993)最早将汉诺坝碱性玄武岩麻粒岩捕虏体划分为暗色麻粒岩和浅色麻粒岩两种,前者包括石榴辉石麻粒岩、斜长二辉麻粒岩等,后者包括石榴钾长石英麻粒岩、石榴斜长石英麻粒岩、辉石二长麻粒岩、辉石钾长麻粒岩等,分类不够严谨。樊祺诚等(1996)认为汉诺坝麻粒岩捕虏体可分为二辉麻粒岩(为主)、紫苏辉石麻粒岩和中性麻粒岩,并指出 3 个二辉麻粒岩的矿物组成为 $\text{Opx}_{65\% \sim 75\%} + \text{Cpx}_{10\% \sim 15\%} + \text{Pl}_{10\% \sim 15\%}$,其平衡温度为 $976 \sim 1050^\circ\text{C}$,1 个紫苏辉石麻粒岩的矿物组成为 $\text{Opx}_{20\%} + \text{Pl}_{65\%} +$

$\text{Qtz}_{15\%}$,其平衡温度为 $968 \sim 1028^\circ\text{C}$,用二辉石温度计计算出的温度可能偏高 60°C ,则其平衡温度应在 $900 \sim 1000^\circ\text{C}$ 之间,认为是一种高温麻粒岩。根据麻粒岩中单斜辉石的 Al_2O_3 和 Al^{IV} 及 Na_2O 含量,估算其压力达 $1.0 \sim 1.2 \text{ GPa}$,相当于 $33 \sim 40 \text{ km}$ 的深度。

据陈绍海等(1998)研究,二辉麻粒岩中出现黑云母,并作为退变产物在斜方辉石和单斜辉石边缘出现;个别样品中斜方辉石的后成合晶包含了橄榄石,可能指示了麻粒岩捕虏体曾经历了升温或降压过程,计算的温度在 $800 \sim 950^\circ\text{C}$ 之间,主要集中在 $900 \pm 50^\circ\text{C}$ 范围内,压力范围为 $0.6 \sim 1.16 \text{ GPa}$ 。据史兰斌等(2000)对 15 件麻粒岩样品测定结果,无论是用 Wood 还是用 Wells 温度计计算的结果均在 $790 \sim 900^\circ\text{C}$ 之间。刘勇胜等(2003)指出大麻坪地区产出的麻粒岩捕虏体以基性麻粒岩为主,只有少量中性和长英质麻粒岩,周坝地区几乎全是长英质麻粒岩,并有少量麻粒岩相变沉积岩,他重点研究了石榴基性麻粒岩,其共生矿物组合为 $\text{Cpx} + \text{Grt} + \text{Opx} + \text{Pl}$,测得的矿物平衡温度为 $780 \sim 920^\circ\text{C}$,压力为 $0.9 \sim 1.5 \text{ GPa}$,相当于 $27 \sim 45 \text{ km}$ 深度,并认为属于高温麻粒岩,表 1 中所列为刘勇胜等(2003)的计算数据。

3.2 内蒙古喀喇沁大营子麻粒岩捕虏体

主要有两种:一种为二辉麻粒岩,占主体,另一种为单斜辉石麻粒岩。二辉石麻粒岩的矿物共生组合为 $\text{Opx}_{15\% \sim 30\%} + \text{Cpx}_{20\% \sim 30\%} + \text{Bt}_{1\% \sim 10\%} + \text{Pl}_{40\% \sim 50\%}$,单斜辉石麻粒岩的矿物共生组合为 $\text{Cpx}_{30\% \sim 40\%} + \text{Bt}_{5\% \sim 10\%} + \text{Pl}_{40\% \sim 50\%}$,两种辉石中的副矿物主要为磁铁矿和磷灰石,偶见金红石,岩石中不含角闪石和石榴子石。韩庆军等(2000)根据 Wood 和 Wells 方法计算确定的平衡温度为 $850 \sim 900^\circ\text{C}$,参考其他实验数据推定的压力为 $0.6 \sim 1.0 \text{ GPa}$,形成深度不超过 31 km 。

3.3 河南信阳早中生代火山角砾岩中高压麻粒岩捕虏体

据郑建平等(2005)的研究,麻粒岩捕虏体主体具细粒变晶结构,其共生矿物组合为 $\text{Gt} + \text{Cpx} + \text{Pl} + \text{Hbl} \pm \text{Kfs} \pm \text{Qtz} \pm \text{TiFe}$ 氧化物,常见透辉石残斑并发育出熔结构,残斑石榴子石中见金红石包体,全岩化学成分相当于橄榄拉斑-石英拉斑玄武岩。由细晶矿物所计算的温度是 $765 \sim 890^\circ\text{C}$,压力是 $1.25 \sim 1.59 \text{ GPa}$,属高压麻粒岩,相当于形成在 52 km 的深度。与基性麻粒岩伴生的榴辉岩捕虏体共生矿物组

表 1 麻粒岩捕房体的地质特征
Table 1 Geological characteristics of granulite xenoliths

序号	产地	麻粒岩捕房体的 岩石类型	寄主岩石和 侵入时代	伴生的地幔岩及 其他岩石	麻粒岩捕房体的 原岩性质	麻粒岩捕房体 的典型矿物共 生组合	平衡温度 /°C	平衡压力 /GPa	壳幔边界 /km	麻粒岩捕房体 变质年龄/Me	资料来源
1	河北北部 汉诺坝、大 麻坪和周 坝等地	以基性二辉麻 粒岩为主(部 分含石榴子 石)、紫苏辉石 麻粒岩、长英 质麻粒岩	第三纪汉诺坝碱 性玄武岩与拉斑 玄武岩互层(14 ~27 Me)	尖晶石二辉橄辉岩 (90%)、橄辉二辉 岩、含金云母尖晶 石橄辉二辉岩、石 榴辉石岩、橄辉岩	基性麻粒岩原 岩为辉长岩, 长英质麻粒岩 原岩为变沉积 岩	Cpx+Opx+Pl ±Kfs, Cpx+Opx+Pl (大麻坪)	①800~900, 多在90±10; ②700~900, ③911~914 (大麻坪)	0.6~1.19; 0.81~1.4	42.35~ 42 为壳 幔过渡带	二辉麻粒岩与紫苏麻 粒岩(锆石 U-Pb) ①140.2±0.5 ②124.9±1.1 ③120.9±0.6 ④泥质麻粒岩下交点 年龄 120 Me	谢漫泽等(1993); 樊琪 诚等(1996,1998); 陈绍 海等(1998); 黄小龙等 (2001); 刘勇胜等 (2001,2003,2004)
2	内蒙古喀喇 沁大营子南	以基性麻粒岩 为主,紫苏辉 石麻粒岩、单 斜辉长麻粒岩	早中生代黑云母 石英闪长岩(205 ~255 Me)	镁铁质-超镁铁质 堆晶岩	玄武质岩石	Opx+Cpx+Pl ±Bt, Pl+Cpx+Bt, Pl+Opx+Bt +Qz	850~900	0.6~1.0	31	紫苏辉石麻粒岩(锆石 U-Pb)251±5 Me	邵济安等(2000); 韩庆 军等(2000)
3	河南信阳明 港-合肥断 裂以北 22 km	高压基性麻粒 岩、中性麻粒 岩、酸性麻粒 岩	早中生代玄武 岩、火山角砾岩 (179~206 Me)	尖晶石蛇纹岩、辉 石岩、榴辉岩、变辉 长岩、角闪岩	相当于橄辉拉 斑-石英拉斑 玄武岩	Gr+Cpx+Pl +Hbl±Kfs+ Qz, 榴辉:Gr+Opx	765~890, 800~820	1.25~1.59; 1.3~1.7	41		郑建平等(2005)
4	安徽女山	二辉斜长麻粒 岩、透辉斜长 麻粒岩	新生代玄武岩 (0.55~0.72 Me)	尖晶石辉石岩、石 榴子石二辉橄辉 岩、尖晶石(石榴子 石)二辉橄辉岩、紫 苏花岗岩	玄武质岩石	Opx+Cpx+Pl +Qz±Bt	720~810, 809~899, 集中于 850 ±20	0.7~0.8; 0.65~0.85	31, 未 见壳 幔过渡 带	140±4, 117±5 (锆石 U-Pb)	Zhou <i>et al.</i> (1992); Yu (1998); 黄小龙等 (2002); Huang <i>et al.</i> (2004)
5	秦岭桐 柏山	二辉麻粒岩、 石榴麻粒岩、 中性长英质麻 粒岩	古生代花岗岩 质片麻岩(435 Me)	部分为玄武岩 变质,部分为 副变质岩	部分为玄武岩 变质,部分为 副变质岩	Opx+Cpx+Pl +Gr+Qz± Rut±Fe-Ti ox- ide, Opx+Gr+Pl+ Rut + Mg + Qz	818~840, M1: 770~ 830, M2: 850~ 940, M3: 700	0.95~0.98; 0.56~0.74; 0.85~1.0; 0.7	40? 有壳 幔过渡 带	470±14(单颗粒锆石 Pb-Pb 年龄,孙勇等, 1993); 443±3.1(锆石 U-Pb, Xiang <i>et al.</i> , 2010)	孙勇等(1993); Xiang <i>et al.</i> (2010)
6	山东莒 南县	二辉麻粒岩、 含石榴子石麻 粒岩	晚白垩纪玄武质 角砾岩	蛇纹石化橄辉岩、 含石榴子石辉石 岩、辉石岩、榴辉岩	玄武岩	Pl+Opx+Cpx +Qz±Kfs+ Fe-Ti oxide, Pl+Opx+Cpx +Gt+Qz± Hbl	806~920	0.86~1.12	35, 39 km 处有超 基性榴 辉岩		晋怀济等(1979); 英 基丰等(2010)

续表 1-1
Continued Table 1-1

序号	产地	麻粒岩捕虏体的岩石类型	寄主岩石和侵入时代	伴生的地幔岩及其他岩石	麻粒岩捕虏体的原岩性质	麻粒岩捕虏体典型矿物共生组合	平衡温度 / $^{\circ}\text{C}$	平衡压力 /GPa	壳幔边界 /km	麻粒岩捕虏体变质年龄/Ma	资料来源
7	广东雷州半岛英峰岭	二辉麻粒岩、石榴麻粒岩	新生代玄武岩、火山碎屑岩	尖晶石二辉橄榄岩、尖晶石石榴石岩	玄武质岩石	Cpx + Opx + Pl + Qz; Cpx + Pl + Gt + Qz (Mg $^{\#}$ < 0.8, Mg $^{\#}$ > 0.8)	800 \pm , 1155 910~945	0.65~0.8, 1.65 1.08~132	35, 26 ~ 35 幔过渡带	于津海等 (1998, 2002)	
8	广东汕头普宁市麒麟镇	二辉麻粒岩 (辉长质麻粒岩)、堆晶麻粒岩	新生代玄武质角砾岩筒侵入于燕山期黑云母花岗岩中	尖晶石二辉橄榄岩、二辉橄榄岩、尖晶石石榴二辉岩、角闪石巨晶	辉长质岩石	Cpx + Opx + Pl \pm Gt \pm Kfs \pm Ss	855-803, 1043, 827~885	1.07, 1.65, 1.70, 1.07	31, 27 ~ 31 幔过渡带	徐夕生等 (1998, 1999)	
9	浙江衢县西垄	二辉麻粒岩	新生代霞石玄武岩	尖晶石二辉橄榄岩、石榴二辉岩、辉石巨晶、方辉橄榄岩	玄武质岩石	Cpx + Opx + Pl + Il				于津海等 (2002); 张儒琛等 (1985)	
10	两广交界地区 (粤西南与桂东南)	中性石榴麻粒岩	S型花岗岩	变粒岩、片麻岩	富含泥质的沉积岩	YG: Pl + Opx + Qz + B + Gt \pm Kfs; GG: Pl + Opx + Qz + B + Gt \pm Kfs;	781, 879~883	0.527, 0.704~0.709	>23	低压麻粒岩 950 (锆石 U-Pb)	杜杨松等 (1999)
11	粤西云炉	二辉麻粒岩、紫苏麻粒岩	紫苏花岗岩和含紫苏堇青岩 (1158 \pm 10 Ma)	角闪岩相的变基性岩和片麻岩	富含泥质的沉积岩	Opx + Cpx + Pl + Qz + B \pm Gt \pm Kfs; Pl + Qz + Opx + B \pm Gt \pm Kfs; Gt + Cord + Sl + B + Pl + Opx + Qz	807~836	0.6~0.69	>23		陈斌等 (1994); 周汉文等 (1994, 1996)

续表 1-2
Continued Table 1-2

序号	产地	麻粒岩捕虏体的 岩石类型	寄主岩石和 侵入时代	伴生的地幔岩及 其他岩石	麻粒岩捕虏体的 原岩性质	麻粒岩捕虏体 典型矿物共 生组合	平衡温度 /°C	平衡压力 /GPa	壳幔边界 /km	麻粒岩捕虏体 变质年龄/Me	资料来源
12	浙江新昌 三界镇南 集湾	二辉斜长麻粒 岩	第三纪嵛县组玄 武岩	尖晶石二辉橄橄 岩、纯橄岩、巨晶辉 石岩	玄武质岩石	Opx + Cpx + Pl	848~867		38		王人镜等(1987); 陶奎元等(2001)
13	湖南道县- 新田一带 虎子岩	二辉麻粒岩、 角闪二辉麻粒 岩	中生代末玄武岩 或基橄橄岩(48 ~104 Me)	纯橄岩-尖晶石二 辉橄橄岩、巨晶辉 石岩、花岗片麻岩	辉长岩	Cpx + Opx + Pl + Sp, Cpx + Opx + Pl + Hbl + Sp, Cpx + Opx + Pl ± Sp ± Hbl	845~950, 807~858, 948, 630~680	0.734, 1.08, 1.06	35		钟应先等(1993);孔 华等(1998)
14	台湾澎湖 地区	基性麻粒岩	新生代碱性玄武 岩(10 Me)	石榴辉石岩、纯橄 榄岩、方辉橄橄岩、 尖晶石二辉橄橄岩	玄武质岩石	Pl + Cpx + Opx ± Kfs + Qz	810~970	0.6~0.95	20~35		Chung <i>et al.</i> (1996)

注:①Pl:斜长石;Opx:斜方辉石;Cpx:单斜辉石;Hbl:紫苏辉石;Kfs:钾长石;Qz:石英;Grt:石榴子石;Bt:黑云母;Il:角闪石;Omp:绿辉石;Mus:白云母;Rut:金红石;Il:钛铁矿;Meg:磁铁矿;Sp:尖晶石;Fe-Ti Oxide:铁钛氧化物。②YG:粤西南高州长坡等地花岗岩中麻粒岩捕虏体;CG:桂东南大容山-十万大山一带花岗岩中的麻粒岩捕虏体。

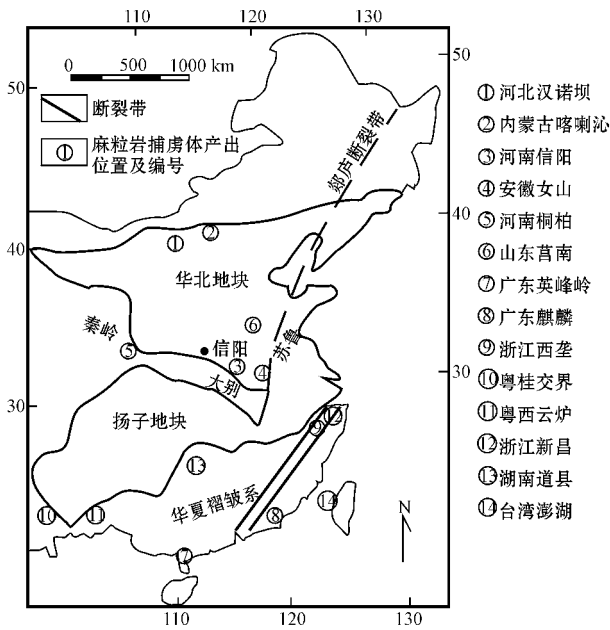


图 1 麻粒岩捕虏体产出位置示意图(据 Xu *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 2001; Zheng *et al.*, 2003; 郑建平, 2005)
 Fig. 1 Sketch map showing simplified tectonic units and locations of granulite xenoliths in North China and South China (after Xu *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 2001; Zheng *et al.*, 2003; Zheng Jianping, 2005)

合为 $Gt + Omp + Rut \pm Mus$, 个别样品中的石榴子石和绿辉石中存在蓝晶石 + 刚玉和蓝晶石 + 兰闪石 + 黝帘石包体。榴辉岩的矿物平衡温度为 $800 \sim 828^\circ\text{C}$, 压力为 $1.30 \sim 1.70 \text{ GPa}$, 对应深度为 $43 \sim 56 \text{ km}$, 与麻粒岩的来源深度相似但略深。岩石莫霍面的深度上限为 41 km , 地震波速莫霍面为 35 km , 二者有一定差别。

3.4 安徽女山麻粒岩捕虏体

据黄小龙等(2001)的研究,本区麻粒岩捕虏体的主要矿物共生组合为 $Opx + Cpx + Pl$, 均为条带状构造,他利用 Wells 辉石温度计与 Mearthy 等的 $Cpx + Pl + Qtz$ 压力计计算得到共生平衡压力为 $0.6 \sim 0.95 \text{ GPa}$ 。Xu 等(1998)利用 Wells 方法测得二辉麻粒岩的平衡温度是 $830 \sim 869^\circ\text{C}$, 平均值为 842°C 。Huang 等(2004)用 Wells 和 Wood and Banno 温度计计算女山麻粒岩的平衡温度范围为 $804 \sim 899^\circ\text{C}$, 主要集中于 $850 \pm 20^\circ\text{C}$, 二者基本一致,数据稍低于汉诺坝地区(Chen *et al.*, 2001)。由于女山麻粒岩的最高平衡温度不超过 900°C , 与前者一致,而地幔捕虏体的平衡温度大于 900°C , 下地壳底部温度为

900°C , 因此他们认为女山地区新生代时期的壳幔边界深度为 31 km 。张四维等(1988)所测的 HQ-13 地震测深剖面正好通过女山地区,由 V_p 所示的莫霍面深度约为 31 km , 以 31 km 作为壳幔边界进一步得到证实。

3.5 山东莒南麻粒岩捕虏体

据英基丰等(2010)的研究,本区麻粒岩分为两种类型,一为二辉麻粒岩,其典型矿物共生组合为 $Pl + Opx + Cpx \pm Qtz \pm Kfs \pm TiFe$ 氧化物,另一种为数量很少的含石榴子石麻粒岩,其矿物共生组合为 $Pl + Opx + Cpx \pm Gt \pm Qtz + Mag \pm Hbl$, 计算显示平衡温度为 $806 \sim 920^\circ\text{C}$, 压力为 $0.86 \sim 1.12 \text{ GPa}$, 埋藏深度约为 35 km , 该地区的地震 Moho 面与岩石学壳幔边界一致,不存在壳幔过渡带,同时,对比华北克拉通在早侏罗纪的 $40 \sim 50 \text{ km}$ 深的下地壳,暗示华北克拉通的下地壳在晚中生代发生了约 10 余公里的减薄。

3.6 东秦岭桐柏麻粒岩捕虏体

该地区的岩石类型、矿物共生组合和温压条件详见表 1,未获得该地区的压力数据。据孙勇等(1993)转引沈步明的研究数据,中性麻粒岩矿物共生组合的平衡温度是 757°C , 压力为 $0.95 \sim 0.98 \text{ GPa}$, 岩石莫霍面深度约为 $30 \sim 40 \text{ km}$ 。无地震波速资料。

3.7 广东雷州半岛英峰岭麻粒岩捕虏体

据于津海等(1998)的研究,该地区麻粒岩捕虏体的岩石类型和矿物共生组合见表 1。温压计算显示二辉麻粒岩形成于 800°C 左右和 $0.65 \sim 0.80 \text{ GPa}$ 的条件下,石榴子石麻粒岩在矿物成分和化学成分上与二辉麻粒岩有一定区别,计算出一个石榴子石麻粒岩(XW-2, $Mg^\# < 0.8$)形成于 1155°C 和 1.65 GPa , 另 2 个样品(XW-3 和 XW-4, $Mg^\# > 0.8$)形成于 $910 \sim 945^\circ\text{C}$, 压力为 $1.08 \sim 1.32 \text{ GPa}$ 。

压力计算指出英峰岭石榴子石单斜麻粒岩形成于 35 km 以下,个别可达 50 km , 而地球物理资料表明雷南琼北地幔隆起区莫霍面深度只有 26.5 km 左右,可能的解释是二辉麻粒岩形成于下地壳而石榴子石麻粒岩形成于 35 km 或大于 50 km 的上地幔,其间有壳幔过渡带,此处高的地温梯度明确指出岩石可能形成于裂谷环境。

3.8 广东汕头麒麟县新生代玄武岩中麻粒岩捕虏体

本区所见麻粒岩捕虏体主要是辉长质麻粒岩,其矿物共生组合主要为 $Cpx + Opx + Pl \pm Gt \pm Il$, 据

徐夕生等(1995)的研究其共生矿物平衡温度为 800~850℃,据 Xu 等(1996)报道形成温度为 855℃、803℃和 1 043℃,主要为 827~885℃,形成压力为 1.07 GPa,岩石莫霍面约为 27 km,地震波速莫霍面约为 31 km,可能存在壳幔过渡带。

3.9 浙江衢县西堍新生代玄武岩中麻粒岩捕虏体

于津海等(2002)研究认为该区麻粒岩的主要共生矿物组合为 $Cpx + Opx + Pl + Il$,其矿物共生平衡温度为 837~856℃,无压力资料。

3.10 两广交界地区 S 型花岗岩中麻粒岩捕虏体

本区所见麻粒岩主要是中酸性石榴紫苏麻粒岩,据杜杨松等(1999)报道可分为粤西南高州长坡等地花岗岩中的麻粒岩捕虏体(简称 YG)和桂东南大容山-十万大山一带花岗岩中的麻粒岩捕虏体(简称 GG),总体的矿物共生组合主要为 $Pl + Qtz + Bt + Cpx + Hy \pm Gt \pm Kfs$,YG 捕虏体中黑云母杂乱排列不定向,与钾长石接触的黑云母和紫苏辉石周围有细小的石榴子石生成,而 GG 捕虏体中黑云母是定向排列,石榴子石的周围尚可见到紫苏辉石后成合晶冠状体。YG 捕虏体的形成温度是 781℃,压力为 0.527 GPa,地温梯度为 45℃/km,GG 捕虏体的形成温度为 877~883℃,压力为 0.70~0.71 GPa,地温梯度为 38℃/km,温压条件均比 YG 高,紫苏花岗岩的形成温度为 666℃,压力为 0.56 GPa,地温梯度为 36℃/km,相应的深度为 17.4~23.4 km。最近据赵亮等(2010)报道,桂东南大容山-十万大山过铝质(S 型)花岗岩中含有丰富的副变质超高温麻粒岩捕虏体,它含有 $Sp + Qtz + Hy + Sil$ 等高温矿物组合,但未见有条纹斜长石,不能称为超高温系列,矿物温压计计算的温度为 950~1 000℃,压力为 0.75~0.80 GPa,峰期后退变质温压条件为 790~820℃,压力为 0.32~0.37 GPa。

3.11 粤西云炉紫苏花岗岩中的麻粒岩捕虏体

据陈斌等(1994)的研究,麻粒岩捕虏体主要是紫苏麻粒岩,有时含有石榴子石,其主要矿物共生组合为 $Pl_{60\%} + Qtz_{15\%} + Opx_{15\%} + Bt_{5\%} \pm Gt \pm Kfs \pm Fe$ 氧化物,石榴子石常被包于斜长石中,黑云母定向分布。由 $Gt-Bt$ 组合三种模型测得温度为 807~836℃,压力为 0.60~0.69 GPa,相当于深度大约为 20~23 km,地热梯度为 37.5℃/km。

对应于紫苏花岗岩的共生矿物组合为 $Gt + Bt + Hy + Pl + Qtz$,测得的温度范围为 765~842℃(个别偏低),压力为 0.52 GPa,表明岩体大约在 17 km 处

开始结晶。

3.12 浙江新昌第三纪(新近纪)嵊县玄武岩中麻粒岩捕虏体

据陶奎元等(2001)报道,本区麻粒岩捕虏体包于气孔状碱性玄武岩底部熔岩中,数量稀少,大小不等,主要是二辉斜长麻粒岩,其共生矿物组合主要是 $Cpx + Opx + Pl + Mag$,用 Wood-Banno 和 Wells 的二辉石温度计计算其温度为 848~876℃,未获得压力数据。据王人镜等(1987)对本区尖晶石二辉橄榄岩包体(I 型包体)计算的温度为 975℃,压力为 1.57 GPa,相当于 50 km 深度,而据地球物理资料,本区上地幔顶面深度 38 km,因此,I 型包体形成于上地幔顶部之下,而本区麻粒岩则多形成于上地幔顶部之上的下地壳中,有可能不是下地壳的最底部。

3.13 湖南道县中生代末玄武质岩石中的麻粒岩捕虏体

据钟应先等(1993)研究,麻粒岩的矿物组合为 $Pl_{40\% \sim 45\%} + Cpx_{25\%} + Opx_{25\%} + Sp_{5\%} + Hbl$,Hbl 为退变产物,计算的平衡温度范围为 807~858℃,压力为 1.08 GPa,平均深度为 35.5 km。另据孔华等(2000)的研究,捕虏体产于玻基橄辉岩中,呈圆球状,与寄生岩石界线清楚,柱粒状变晶结构,矿物共生组合及含量为 $Pl_{45\% \sim 50\%} + Cpx_{25\% \sim 30\%} + Opx_{10\% \sim 15\%} + Sp + \text{细粒物质}_{5\% \sim 8\%}$,用 Wood 和 Banno 二辉石温度计计算的温度为 845~950℃,用 Mercier 单斜辉石计算的压力为 0.734 GPa,相当于深度为 26 km。

将两位研究者的结果加以比较,其平衡温度基本一致,而钟应先等(1993)计算的深度比孔华等(2000)计算的高,与本区人工地震所测得的莫霍面为 35.5 km 一致,本区下地壳底界应为 35 km,麻粒岩即产于下地壳底部。

3.14 台湾澎湖新生代玄武岩中麻粒岩捕虏体

据 Chung 等(1996)报道本区麻粒岩捕虏体基本上属基性麻粒岩,其共生矿物组合主要是 $Pl + Cpx + Opx \pm Kfs \pm Qtz + \text{黑色矿物}$,计算的平衡温度为 810~970℃,平衡压力为 0.6~0.95 GPa,对应的深度为 20~35 km。

4 麻粒岩捕虏体的原岩年龄和变质年龄

河北汉诺坝地区、河南信阳地区和安徽女山地区研究比较详细,而且应用多种方法测定,有的地区

虽然已有些数据,但质量和可靠性尚需进一步确认,广东英峰岭、湖南道县、浙江新昌和台湾澎湖等地的麻粒岩捕虏体至今尚未有年龄测定结果。现将各地区已有年龄结果作一归纳。

4.1 河北汉诺坝地区麻粒岩捕虏体年龄

本区是同位素年代学研究比较详细的地区之一,樊祺诚等(1998)选择了大麻坪2个二辉麻粒岩和1个紫苏麻粒岩样品中的锆石进行了U-Pb同位素年龄测定,获得了 140.2 ± 0.5 Ma、 124.9 ± 1.1 Ma和 120.9 ± 0.6 Ma三组数据,认为其代表了3期麻粒岩相变质作用。

刘勇胜等(2001)对汉诺坝地区长英质麻粒岩捕虏体中斜长石-石榴子石和全岩应用Sm-Nd同位素定年获得 424 ± 10 Ma的年龄,认为这种捕虏体可能为残留于下地壳的古老物质,可能反映了加里东时期蒙古板块向华北板块俯冲而发生的变质再就位抬升作用的时间。Liu等(2001)测得周坝变泥质麻粒岩捕虏体中14个锆石颗粒的上交点年龄为 1980 ± 77 Ma和上交点年龄为 120 Ma,另外3个样品一致线年龄为 132 ± 15 Ma。上交点年龄与樊祺诚等(1998)所测得的结果十分吻合。

刘勇胜等(2004)利用LA-ICP-MS法对汉诺坝大麻坪低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 中性麻粒岩捕虏体进行了单颗粒锆石U-Th-Pb年龄测定,获得 2444 ± 110 Ma和 2494 ± 85 Ma两组年龄。据郑建平(2005)报道,汉诺坝中性麻粒岩有3颗锆石的核分别给出 3097 ± 17 Ma(边部 2824 ± 17 Ma)、 2489 ± 17 Ma和 2447 ± 18 Ma的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,其他17颗锆石有非常一致的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1850 ± 20 Ma,这些锆石的Hf模式年龄变化较大为 $1.9 \sim 2.6$ Ga, ϵ_{Hf} 值多近于零。上述年龄的获得证实了汉诺坝麻粒岩捕虏体的复杂成因,显然用单一的中生代幔源岩浆底侵作用不足以解释所有麻粒岩捕虏体的成因。 2.5 Ga和 1.9 Ga的上交点年龄反映该类捕虏体形成于晚太古和古元古的地壳增生事件。这些结果表明目前该地区下地壳仍然存在早前寒武纪形成的下地壳物质。

4.2 内蒙古喀喇沁麻粒岩捕虏体的年龄

据邵济安等(2000)报道,紫苏辉石麻粒岩捕虏体中锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 251 ± 5 Ma,另一组为上交点年龄 1839 ± 15 Ma,前者代表麻粒岩捕虏体结晶年龄,因这些锆石为变质锆石,所以这一年龄被解释为麻粒岩相变质作用的年代,而后一数据可能是麻粒岩原岩玄武岩的形成年龄,指示了麻

粒岩捕虏体原岩形成于古元古代。

4.3 河南信阳中性麻粒岩和辽宁复县基性麻粒岩捕虏体年龄

郑建平(2005)对河南信阳早中生代玄武安山岩中的酸性麻粒岩捕虏体和辽宁复县古生代中性金伯利岩(463 Ma)中的基性麻粒岩捕虏体中锆石采用LA-ICP-MS进行U-Pb定年。信阳地区两个样品(XY9951和XY9928)的上下交点年龄分别是 3670 ± 120 Ma、 1981 ± 260 Ma和 3655 ± 100 Ma、 1707 ± 210 Ma,另一个样品锆石的上、下交点年龄分别是 2035 ± 60 Ma和 972 ± 230 Ma。酸性麻粒岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(0)$ 值均为负值(-41.1),所有锆石年龄与 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均呈线性反相关,指示有Pb丢失。这些锆石的Hf同位素亏损地幔模式年龄非常老,最大为 4.0 Ga,U-Pb年龄老的锆石多对应正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和较低的Hf模式年龄($2.2 \sim 2.3$ Ga),而U-Pb年龄小的锆石则对应负的 ϵ_{Hf} 值和较高的模式年龄($2.6 \sim 2.7$ Ga)且测点落在铅丢失线下方,说明锆石的生长过程中有陆壳组分的参与。

辽宁复县中生代金伯利岩中的基性麻粒岩捕虏体的锆石年龄由4个样品测定。样品F25的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄为 $2300 \sim 2500$ Ma,平均为 2518 ± 10 Ma,样品Ln9841的年龄分别为 $2350 \sim 2509$ Ma和 $1804 \sim 1849$ Ma,并给出了 2428 ± 150 Ma和 1852 ± 140 Ma的上、下交点年龄,样品Ln9849的年龄分别为 $2473 \sim 2593$ Ma和 $1750 \sim 1900$ Ma,给出的上、下交点年龄分别为 2580 ± 7 Ma和 1904 ± 46 Ma,样品9834的5颗锆石年龄的平均值为 1934 ± 54 Ma,其他4颗锆石的年龄在 $629 \sim 718$ Ma之间,其上、下交点年龄分别为 1927 ± 55 Ma和 605 ± 98 Ma。年龄老的锆石($2.4 \sim 2.6$ Ga)具有明显大于零的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,说明其含有初始地幔物质,最高 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值见于最古老锆石,其接近亏损地幔值。多种迹象均显示锆石有Pb丢失和老锆石的重结晶作用。复县基性麻粒岩样品Ln9843中较年轻锆石的年龄为 $600 \sim 700$ Ma,具负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,反映有新的锆石生长,不能确定这一热事件是否影响到下地壳。不同成分的麻粒岩捕虏体中锆石年龄记录着复县和信阳下地壳长期复杂的演化历史。

4.4 山东莒南麻粒岩捕虏体的年龄

本区麻粒岩捕虏体中普遍含有锆石,据英基丰等(2010)报道,选择二辉麻粒岩中2个样品进行锆石的原位U-Pb年龄和Hf同位素测试,阴极发光图

像显示,锆石普遍具有核边结构,核部具不清晰的震荡环带,边部无明显结构,U-Pb 年龄测试结果表明锆石已经历了较强的铅丢失,核部上交点年龄为 2.3~2.4 Ga,边部上交点年龄为 1.9 Ga,锆石的 Hf 同位素具有较大的变化范围,其中一个样品的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-17.4 \sim 8.4$,另一个样品的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-17.4 \sim -7.2$ 。

4.5 安徽女山麻粒岩捕虏体的年龄

Huang 等(2004)曾对安徽女山 2 个中性麻粒岩捕虏体样品 NS214 和 NS202 中的锆石进行了 SHRIMP U-Pb 定年。NS214 样品中锆石主要呈半自形柱状,部分呈圆形,阴极发光图像显示很多锆石具有核边结构,核部是具有震荡环带的岩浆锆石,边部无环带,是经历了变质重结晶的锆石。少部分圆形的锆石具有均一的阴极发光图像,是麻粒岩相变质或强变质重结晶的结果。对样品 NS214 中的 23 颗锆石测试了 30 个 U-Th-Pb 测点,测点 M3-1 和 N11-1 给出了 2 282 Ma 和 1 949 Ma 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 谐和年龄,变质锆石的 11 个测点给出的上交点年龄为 $1\,915 \pm 27$ Ma,这一数据被认为是麻粒岩相变质作用的年龄,最近胶东 Mazhenkou 花岗片麻岩获得一个锆石 U-Pb 年龄为 $1\,960 \pm 67$ Ma (Huang *et al.*, 2004),表明胶东前寒武纪结晶基底在晚古元古代具有很强的热构造事件。女山麻粒岩相变质作用的年龄 $1\,915 \pm 27$ Ma 与这一事件一致。测点 M3-1 获得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 谐和年龄为 $2\,282 \pm 13$ Ma 表明女山麻粒岩捕虏体的原岩形成于 2.2 Ga 之前。另外,一个测点 N6-1 给出了 $2\,483 \pm 21$ Ma 的核部年龄和 $1\,977 \pm 264$ Ma 的边部年龄,前者可能为 2.5 Ga 左右的岩浆事件,后者代表了麻粒岩相变质作用。来自基性麻粒岩样品 NA202 中 10 个自形锆石颗粒获得了 140 ± 4 Ma 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄,另外, H13-1 获得稍年轻的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为 117 ± 5 Ma,这些年龄表明部分女山下地壳麻粒岩捕虏体曾形成于中生代。

女山麻粒岩捕虏体的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值在 0.510 8~0.511 4 之间,单阶段球粒陨石 Nd 模式年龄在 2.4~3.4 Ga 之间,大部分在 2.4~2.9 Ga 之间, $\epsilon_{\text{Nd}}(2.5\text{ Ga})$ 在 $-9.7 \sim 1.9$ 之间,位于中朝克拉通太古宙岩石的 Nd 同位素组成范围内。

4.6 东秦岭桐柏地区麻粒岩捕虏体的年龄

孙勇等(1993)曾对本区正副变质的麻粒岩及其围岩花岗闪长质片麻岩进行单颗粒锆石 Pb-Pb 定年,对正变质的二辉麻粒岩采取了 T1 和 T4 两个样

品,样品 T1 的 2 个锆石颗粒的年龄均为 470 ± 20 Ma,样品 T4 中 2 颗锆石的年龄分别为 470 ± 14 Ma 和 469 ± 14 Ma,平均年龄为 470 ± 14 Ma,2 个样品的定年结果十分一致,麻粒岩围岩花岗闪长质片麻岩的年龄为 435 ± 14 Ma,孙勇等认为桐柏地区麻粒岩的原岩分属于玄武岩和沉积岩,在 470~435 Ma 期间这些岩石在壳幔过渡带经受了麻粒岩相变质。孙勇等(1993)对副变质二辉麻粒岩样品 T4 获得碎屑锆石的平均年龄为 827 ± 5 Ma,该年龄反映了原岩的沉积物源年龄。

Xiang 等(2010)对该地区的研究则认为加里东的年龄应该是麻粒岩相变质作用的年龄,并把变质作用按年龄的大小分为 4 个阶段:初始变质阶段(M1)形成的时间为 443.3 ± 3.1 Ma,峰期变质阶段(M2)的年龄为 431.8 ± 4.3 Ma;角闪岩相变质阶段(M2)大约在 419 Ma;绿片岩相阶段(M4)年龄为 400 Ma。孙勇等(1993)和 Xiang 等(2010)对加里东的年龄所代表的意义的认识基本一致。

4.7 广东麒麟镇辉长质麻粒岩捕虏体的年龄

徐夕生等(1999)测得较大而单一的辉长质麻粒岩捕虏体的全岩-辉石-斜长石的矿物 Sm-Nd 等时线年龄为 112.3 ± 17.8 Ma,这一年龄与来自地幔和地壳的两种岩浆发生混合作用形成的 100~120 Ma 的玄武岩-流纹岩复合岩流以辉长岩-花岗杂岩中基性单元出露的年龄相近,是华南大陆边缘底侵作用物质在地壳底部的结晶时间。

4.8 两广交界和粤西云炉地区麻粒岩捕虏体的年龄

两广交界地区的中-酸性麻粒岩捕虏体曾测得 Rb-Sr 全岩年龄为 638~813 Ma(周汉文等,1994),根据粤西高州龙修-云炉地区紫苏花岗岩中低压麻粒岩中锆石的 U-Pb 同位素年龄的研究,提出云开低压麻粒岩相变质作用发生在 950 Ma 相当于晋宁期,改变了云开隆起变质作用最老为加里东期的认识。

5 麻粒岩捕虏体的岩石化学和地球化学特征

由于各地区研究程度详略不一,华北地区河北汉诺坝、河南信阳地区和安徽女山地区、华南地区的广东英峰岭和麒麟县等地数据较全,其他地区很多数据不全,难以进行全面对比,现暂按华北和华南两个地区分别讨论其地球化学特征。

5.1 华北地区麻粒岩捕虏体的岩石化学和地球化学数据

每一个地区麻粒岩捕虏体往往有多种类型,但研究大都以基性麻粒岩作为研究重点,而对于次要的长

英质和中性麻粒岩捕虏体的研究不够,所以不少原始资料欠缺,作者尽可能加以收集,列于表 2 中。

表 2 华北地区麻粒岩捕虏体的岩石化学和地球化学数据表
Table 2 Data of petrochemistry and geochemistry of granulite xenoliths in North China

产地	河北汉诺坝			内蒙古喀喇沁	河南信阳	安徽女山	秦岭桐柏		
	二辉麻粒岩 (10)	紫苏麻粒岩 (2)	长英质麻粒岩 (9)	二辉麻粒岩 (4)	高压麻粒岩 (5)	二辉麻粒岩 (6)	基性麻粒岩 (3)	中性麻粒岩 (3)	
主元素	SiO ₂	49.38	60.09	64.58	50.82	48.3	51.68	49.01	63.59
	TiO ₂	0.55	0.56	0.62	0.52	2.31	0.77	1.63	0.80
	Al ₂ O ₃	12.37	14.46	16.23	15.48	13.92	17.89	15.95	14.64
	MgO	10.44	5.29	1.61	9.32	6.73	5.56	6.01	3.59
	CaO	9.72	4.83	2.26	10.0	9.77	8.77	8.41	4.73
	K ₂ O	1.47	1.88	4.92	1.39	1.16	0.65	1.96	1.98
	Na ₂ O	1.89	2.94	2.94	1.95	2.28	3.56	3.15	2.91
	Mg [#]	72.08	58	45	65~80	52	45.2		
微量元素	U	0.08		0.43		0.26	0.12		
	Th	0.221		3.35		1.0	0.35		
	Pb	3.72	28.05	79		27.28	3.92	86.30	63.9
	Sr	638	820	559		522.4	1 178	776	615
	Ba	852	1 217	1 492		697	932	1 351	1 023
	Nd	8.14	6.68	29.86		27.2	58.83		
	Nb	2.62		17.5		11.08	4.89	16.05	12.5
稀土元素	REE	12.59		189		77.68	277.5		
	La/Yb	2.05		30.5		4.74	13.64		
同位素比值	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.160 2 [14]	0.097 4 [1]						
	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.707 19 [14]	0.708 33 [1]				0.001 9~0.042 9		
	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	17.905					0.704 1~0.707 4		
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	15.379							
	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	37.399							
	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.511 84 [14]		0.511 463 ± 16		0.512 514	0.511 10~0.511 43		
<i>t</i> _{DM} / <i>t</i> _{Ga}		3.8	2.3		1.9	2.4~3.4			
εNd(<i>t</i>)			-10.93		-5.72~1.01	-9.7~1.9			

注: 主量元素单位为 $w_B/\%$, 微量和稀土元素单位为 $w_B/10^{-6}$ (*n*) 表示参与计算的样品的个数, 河北汉诺坝数据据张国辉等(1998a), 樊祺诚等(1998), 刘勇胜等(2001); 内蒙古喀喇沁数据据邵济安等(2000), 韩庆军等(2000); 河南信阳数据据郑建平(2005); 安徽女山数据据 Zhou et al.(1992), 黄小龙等(2001); 秦岭桐柏数据据孙勇等(1993), Xiang et al.(2010)。

华北地区的基性麻粒岩 SiO₂ 含量平均 49.84%, 一般最高不超过 52%, 最低不低于 48%, 如安徽女山为 51.68%, 内蒙古喀喇沁为 50.82%, 河北汉诺坝为 49.38%, 河南信阳基性高压麻粒岩为 48.3%, 秦岭桐柏为 49%。TiO₂ 含量, 河南信阳高压麻粒岩最高达 2.31%, 东秦岭达 1.63%, 其他地区均小于 0.77%, 一般在 0.52%~0.56% 之间。Al₂O₃ 含量以安徽女山二辉麻粒岩最高达 17.89%, 河北汉诺坝二辉麻粒岩最低为 12.37%, 河南信阳高压麻粒岩为 13.92%, 其他地区在 14%~15% 之间。MgO 含量以河北汉诺坝地区的二辉麻粒岩最高达 10.44%, 内蒙古喀喇沁二辉麻粒岩次之达 9.32%, 其余在 5.56%(女山)和 6.73%(信阳)之间。微量元素 U、Th 含量均较低, 河北汉诺坝的二辉麻粒岩

U 含量只有 0.08×10^{-6} , 河南信阳高压麻粒岩 Th 含量最高只有 1.03×10^{-6} , 其他地区都在 0.35×10^{-6} 以下。Nd 含量以安徽女山二辉麻粒岩最高达 58.81×10^{-6} , 河南信阳高压麻粒岩次之为 27.2×10^{-6} , 河北汉诺坝二辉麻粒岩为 8.14×10^{-6} 。Nb 含量以河南信阳高压麻粒岩含量最高达 11.08×10^{-6} , 安徽女山二辉麻粒岩为 4.89×10^{-6} , 而河北汉诺坝二辉麻粒岩的 Nb 含量只有 2.62×10^{-6} 。各地区稀土元素总含量也有一定差别, 以安徽女山地区的二辉麻粒岩含量最高为 277.5×10^{-6} , 河南信阳高压麻粒岩次之为 77.68×10^{-6} , 河北汉诺坝二辉麻粒岩含量最低为 12.59×10^{-6} 。

Huang 等(2004) 曾将安徽女山麻粒岩捕虏体与河北汉诺坝长英质和基性麻粒岩捕虏体的主元素及

其比值作了一些对比,发现女山麻粒岩捕虏体主元素的某些比值都位于中朝克拉通麻粒岩地体的分布区;汉诺坝长英质麻粒岩的某些比值只有小部分分布于中朝克拉通麻粒岩地体范围内。两地不同成分麻粒岩捕虏体的 $Mg^{\#}/SiO_2/Al_2O_3$ 图解显示它们位于不同的原岩区,但女山麻粒岩捕虏体仍位于中朝克拉通范围内。安徽女山麻粒岩捕虏体的 Nb 对 $Mg^{\#}$ 、Cr 对 $Mg^{\#}$ 、Ni 对 $Mg^{\#}$ 和 $K(%)$ 对 $Rb(\times 10^{-6})$ 作图均位于中朝克拉通麻粒岩地体范围,说明女山麻粒岩捕虏体与中朝克拉通麻粒岩地体的密切

关系。而汉诺坝无论长英质麻粒岩捕虏体或基性麻粒岩捕虏体的以上几种微量元素与 $Mg^{\#}$ 的比值,均不在中朝克拉通麻粒岩地体范围。

5.2 华南地区麻粒岩捕虏体的岩石化学和地球化学数据

华南地区麻粒岩捕虏体的岩石化学和地球化学数据见表 3,与华北地区一样,有些地区如两广交界地区、粤西云炉地区及浙江新昌地区均缺乏系统的主量元素及其他资料,因数据不多,全面论述和比较存在一定困难。

表 3 华南地区麻粒岩捕虏体的岩石化学和地球化学数据表

Table 3 Petrochemistry and geochemistry of granulite xenoliths in South China

地区	广东英峰岭	广东麒麟镇	浙江西莒	两广交界地区	粤西云炉	湖南道县	台湾澎湖
岩石性质	二辉麻粒岩 (4)	二辉麻粒岩 (5)	二辉麻粒岩 (1)	中性石榴麻粒岩 (7)	二辉麻粒岩 (4)	辉长质麻粒岩 (1)	基性麻粒岩 (1)
主元素	SiO ₂	48.5	46.92	47.86		45.56	48.52
	TiO ₂	2.32	0.81	2.84		0.49	
	Al ₂ O ₃	14.62	16.08	18.44		14.88	8.20
	MgO	10.49	10.6	5.70		8.58	3.13
	CaO	10.64	9.04	8.67		16.13	8.40
	K ₂ O	0.54	0.48	1.03		1.49	1.01
	Na ₂ O	2.86	2.06	3.94			1.45
	Mg [#]	56.6	62.8	50.3			
微量元素	U	0.04	0.135	0.05		0.79	
	Th	0.28	0.274	0.22		19.3	
	Pb	6.74	9.02	13.6	82.5		
	Sr	396	500	634	192.8		
	Ba	207	373	574.5			
	Nd		13.21	26.21	24.74		
	Nb	6.24	3.92	16.92			
稀土元素	REE	39.76	66.98	122.87	188.10		
	La/Yb	5.61	5.95	9.64			2.10
同位素比值	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.034 27	0.063 79	0.060 52	1.199 2		
	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.704 28	0.705 32	0.710 961	0.729 47		
	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512 830	0.512 628	0.512 099			
	<i>t</i> _{DM} /Ga		1.105	1.62			
	εNd(<i>t</i>)	4.02	-3.02	-9.4			5~7

注 主量元素单位为 $w_B/\%$, 微量和稀土元素单位为 $w_B/10^{-6}$ (n) 表示参与计算的样品的个数;广东英峰岭、广东麒麟镇数据据于津海等(2002);浙江西莒数据据于津海等(2002), Yu *et al.* (2003);两广交界地区数据据杜杨松等(1999),周汉文等(1994,1996);粤西云炉数据据陈斌等(1994),周汉文等(1994,1996);湖南道县数据据钟应先等(1993),孔华等(1998);台湾澎湖数据据 Chung *et al.* (1996)。

于津海等(2002)和 Yu 等(2003)对广东雷州半岛英峰岭、广东普宁麒麟镇和浙江西莒三地基性麻粒岩捕虏体的研究,按其地球化学特征分为岩浆麻粒岩(第一组)和堆晶麻粒岩(第二组),它们与华北大安徽女山麻粒岩捕虏体在地球化学与特征上有显著差别,岩浆麻粒岩和堆晶麻粒岩的岩石化学和地球化学的差别简列于表 4。

广东英峰岭、麒麟镇和浙江西莒基性麻粒岩(相当于岩浆麻粒岩)捕虏体的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 与 $Mg^{\#}$ 正相关,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 LREE/HREE 比值呈正相关,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 $Mg^{\#}$ 呈负相关,¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 与 LREE/HREE 比值呈负相关。这与下地壳的玄武质岩浆受同化和分离结晶作用的特征是一致的,岩浆麻粒岩捕虏体的同位素特征表明它与地表的玄武质岩是属于同一

表 4 岩浆麻粒岩和堆晶麻粒岩的岩石化学特征

Table 4 Petrochemical characteristics of magmatic and cumulus crystal granulites

	岩浆麻粒岩	堆晶麻粒岩
主量元素含量特征	富 Al_2O_3 、 K_2O 和 P_2O_5 低 CaO	低 Al_2O_3 、 K_2O 和 P_2O_5 高 CaO
稀土含量和微量元素特征	稀土含量高, $73.5 \times 10^{-6} \sim 142.5 \times 10^{-6}$, 配分曲线为右倾, 具弱 Eu 异常, Sr 、 Ba 、 Pb 正异常, Rb 、 Th 、 U 、 Ta 、 Zr 、 Ti 和 Hf 负异常, 高 Rb 低 Sr 、 Ni	稀土含量低, $14.4 \times 10^{-6} \sim 33.4 \times 10^{-6}$, 配分曲线呈轻、重稀土较低而中稀土较高的拱形, 无 Nb 、 Ta 、 Zr 、 Hf 和 Ti 负异常, Ba 、 Sr 和 Pb 含量高, Rb 含量低
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	7.87~9.87	除个别外, 多数 > 2.7
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	较高, 为 0.707 882	较低在 0.703 0~0.703 3 之间
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	稍高, 为 0.512 334	稍低, 为 0.510 491

类型岩石。

湖南道县和台湾澎湖地区麻粒岩捕虏体的岩石化学资料少, 但从其分布和产出状态看与上述地区同属一个岩带, 其地球化学特征是十分相似的。

两广交界地区和粤西云炉地区的麻粒岩捕虏体的岩石化学和地球化学特征同属一类, 但目前尚缺乏详细数据。

6 华北和华南麻粒岩捕虏体代表的下地壳位置

前面章节介绍了华北和华南地区麻粒岩捕虏体的矿物平衡温压条件, 本节着重对这些温压条件数据对应的岩石莫霍面、壳幔边界以及地震波速所代表的莫霍面加以分析。以河北汉诺坝为例, 二辉石麻粒岩给出的是最低温度, 石榴子石辉石岩得出的是最高温度, 而尖晶石二辉橄榄岩得出的温度在二者之间, 计算出的岩石莫霍面约为 30 km, 根据地震数据限定的莫霍面与产出最深的麻粒岩产出深度重合, 为 41 km 左右, 在 32~42 km 之间约有 10 km 左右的下地壳-上地幔过渡带, 其中基性麻粒岩和尖晶石二辉橄榄岩呈互层产出。在下地壳过渡带之上存在老麻粒岩地体, 其时代为太古-古元古代, 推断前新生代原始壳幔边界和岩石莫霍面界线为 28 km。上地幔上部(41 km 之下)为尖晶石二辉橄榄岩层, 其下有一较厚的尖晶石-石榴子石橄榄岩层的过渡层, 大致位于 55 km 深度。其下为石榴子石橄榄岩区, 详见图 2a。安徽女山地区中上地壳主要为沉积岩和花岗片麻岩, 其下残存新太古代和古元古代由麻粒岩和紫苏花岗岩组成的下地壳。中生代新生下地壳(31 km 以下), 壳幔边界为 31 km, 也是莫霍面的位置, 详见图 2b。女山与汉诺坝地区不同之处是只有较少的玄武岩物质底侵于莫霍面附近, 所以没有像汉诺坝一样发育有意义的壳幔过渡带。山东莒

南地区的岩石莫霍面与地震波速莫霍面基本一致, 约为 35 km, 即为壳幔边界深度, 不具有明显的壳幔过渡带。河南信阳地区中上地壳为变质岩和片麻岩, 其深度是估计的, 没有确切的依据, 根据波速 6.5~6.8 km/s 和 8 km/s 以及岩性特征, 壳幔边界(CMB)为 41 km, 其下为上地幔, 其上为下地壳, 下地壳上部可能存在古老的中酸性麻粒岩, 在 53 km 处分别出现高压麻粒岩(HG)和榴辉岩(Ecl), 已属上地幔上部, 详见图 2c。

据孙勇等(1993), 华北桐柏地区麻粒岩捕虏体的矿物平衡温压条件对应的岩石莫霍面为 30~40 km, 没有地震波速莫霍面作为参考, 确切的壳幔边界难以确定, 可能存在壳幔过渡带。

华南地区可分为两个部分: 一是东南沿海产于新生代玄武岩中的麻粒岩捕虏体, 包括广东雷州半岛英峰岭, 汕头普宁麒麟镇, 浙江新昌和台湾澎湖等地, 这些地区的麻粒岩捕虏体的寄主岩石均为新生代玄武岩质岩石, 分布大体呈东北向, 沿一定断裂构造分布, 麻粒岩捕虏体具相似的地质和地球化学特征, 具有相似的壳幔边界和存在壳幔过渡带, 只是有的地区研究不够, 尚缺乏这方面的资料。据现有资料, 英峰岭麻粒岩捕虏体岩石莫霍面为 35 km, 而地震波速莫霍面为 26 km, 壳幔边界为 26 km。麒麟镇麻粒岩捕虏体的岩石莫霍面为 25 km, 地震波速莫霍面为 31 km, 壳幔边界为 31 km, 过渡带约 6 km, 过渡带由麻粒岩、辉石岩和二辉橄榄岩等组成(廖其林等, 1988; 徐夕生等, 1995, 1999; Xu *et al.*, 1996, 1998; Chung *et al.*, 1996; Yu *et al.*, 1998)。以麒麟镇地区为本部分的代表, 编制了一个下地壳岩性剖面图, 见图 3a。

华南地区的另一地带是两广交界处和粤西云炉地区, 与东南沿海地区不同, 麻粒岩捕虏体的原岩时代与寄主岩石均不同。麻粒岩捕虏体被包于 S 型花

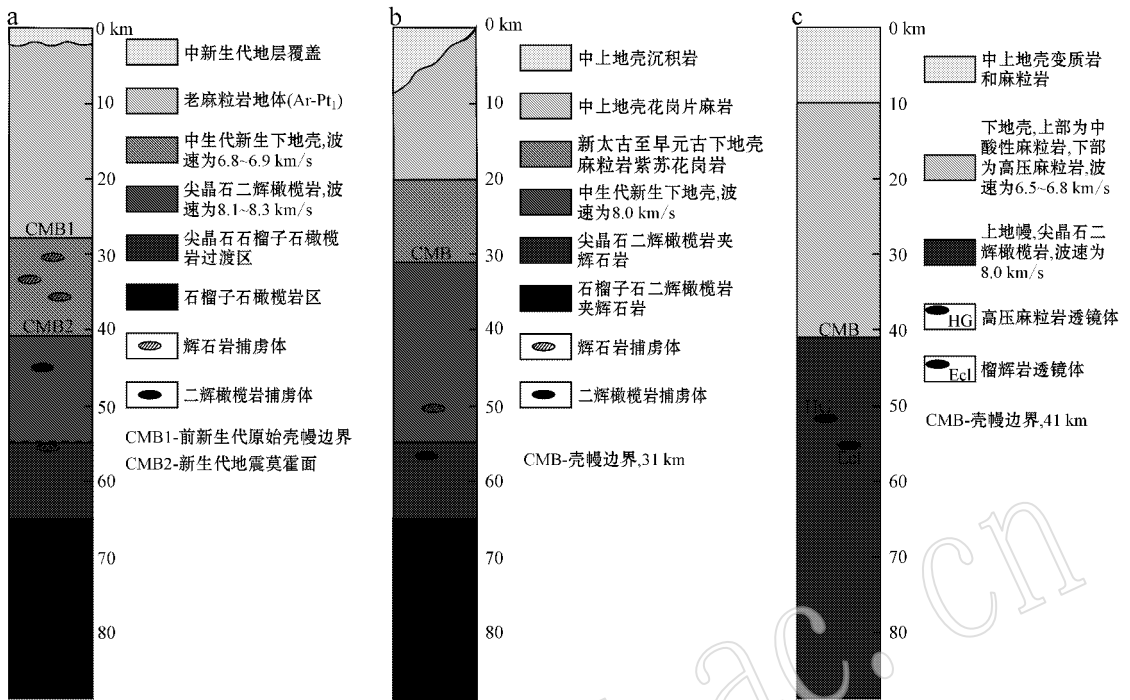


图 2 河北汉诺坝 (a) 安徽女山 (b) 和河南信阳 (c) 下地壳-上地幔岩性示意剖面

Fig. 2 Lithologic profile of the lower crust-upper mantle in Hannuoba (a), Nüshan (b) and Xinyang (c)

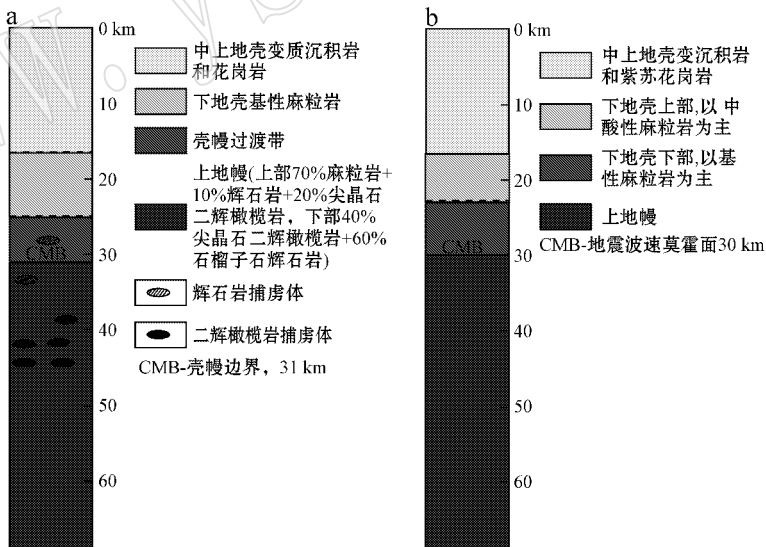


图 3 广东麒麟地区 (a) 两广交界和粤西云炉地区 (b) 下地壳-上地幔岩性剖面示意图

Fig. 3 Lithologic profile of the lower crust-upper mantle in Qilin (a) and Yunlu (b) areas

花岗岩和紫苏花岗岩中,由麻粒岩捕虏体中平衡矿物计算出温压条件所对应的岩石莫霍面大致为 20~23 km,明显高于其他地区,表明这些麻粒岩捕虏体所赋存的位置相当于下地壳的中上部,真正的下地壳

下部的岩石尚未出现。本区目前尚缺乏地震波速和其他壳幔演化的有关资料。据杜杨松等(1999)、陈斌等(1994)、周汉文等(1994,1996)等资料编制了一个下地壳岩性剖面图,见图 3b。

7 麻粒岩捕虏体同位素年龄的地质意义

前面章节中已详述了华北地区和华南地区麻粒岩捕虏体获得的许多定年结果,本节着重对其地质意义进行一些讨论。

7.1 华北地区麻粒岩捕虏体测年结果的地质意义

在华北克拉通范围内,北部的河北汉诺坝、内蒙古喀喇沁、东部的山东莒县、东北部的辽宁复县、东南部的安徽女山以及河南信阳,大部分麻粒岩捕虏体中都见有 1.95~1.85 Ga 的古元古代年龄,在河北汉诺坝、辽宁复县、安徽女山、河南信阳均有 2.5 Ga 的新太古代年龄,个别地区还有大于 3000 Ma 的年龄,信阳地区甚至在酸性麻粒岩的锆石中测得 3670 ± 120 Ma 和 3655 ± 100 Ma 的古太古代年龄,同时又测定了它的铅模式年龄,反映其初始物质来自于 4.0 Ga 年前。以上表明华北麻粒岩捕虏体不论产于华北北部、东部、东北部、东南缘或南缘都保留有新太古代和古元古代的年龄,它们都具有相似的古老克拉通属性,属于统一的克拉通聚集块体。上述这些包裹麻粒岩捕虏体的中、新生代玄武质岩石岩浆穿过华北克拉通麻粒岩地体,在上升过程中携带一些古老麻粒岩捕虏体是十分自然的现象,但有的麻粒岩原来所处的位置较高,未受到深部热流改造的影响,有的则已受到不同程度的改造和置换,其地球化学特征已与原始麻粒岩地体有区别。目前,华北克拉通北部麻粒岩地体中还未发现比信阳酸性麻粒岩中锆石年龄大的古太古代年龄,但有与其相近的,如内蒙古叠布斯格麻粒岩中测得残余锆石年龄为 3.57 Ga (耿元生等, 2007); 山东沂水地区的基性麻粒岩 Sm-Nd 等时线年龄为 3.0 Ga (沈其韩等, 1993), 由二次离子探针测得的锆石的最大变质年龄不超过 2.79 Ma, Lu-Hf 模式年龄最大为 2.76 Ga, 尚未获得确切的原岩年龄(赵子然等, 2009); Jahn 等(1987)测得冀东迁西黄白峪地区出露的曹庄斜长角闪岩-麻粒岩 Sm-Nd 等时线年龄为 3.5 Ga, 基于该地区 3.5 Ga 角闪岩有正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(2.7), Jahn 等(1987)推测华北地块最初的地幔亏损事件发生在 4.0 Ga 前, 因此, 郑建平(2005)认为华北克拉通南北相似, 但最近刘敦一等未发表的数据认为这套斜长角闪岩系侵入于古老片麻岩中, 锆石 U-Pb 年龄为 2750 Ma, 原测年数据偏老是受古老物质混染所致, 因此, 目前在华北克拉通北部还没有找到与克拉通南

缘的 >3.6 Ga 的酸性麻粒岩年龄相当的麻粒岩相岩石。就华北地区而言, 在地表的英云闪长质或奥长花岗质等岩石的锆石或覆盖区的深部岩浆岩残余锆石均有中-新太古代的年龄存在(刘敦一等, 2007), 如鞍山地区有 3.8~3.0 Ga 的锆石年龄(万渝生等, 2001; Wan *et al.*, 2002; 刘敦一等, 2007), 胶东有 3.45~2.85 Ga 的年龄(刘敦一等, 2007), 冀东有 3.8~3.6 Ga 的年龄(Liu *et al.*, 1992), 内蒙古固阳有 3.5~2.9 Ga 的年龄(刘敦一等, 2007), 沂水有 3.06~2.8 Ga 的数据(沈其韩等, 1993), 原称为中央造山带中部的焦作有 3.4 Ga 的年龄(高林志等, 2005)。沈其韩等(2005)还报道了华北北部地区, 在其他岩石中包裹有中太古-古元古的残余锆石年龄。张宏福等(2010)也指出下地壳的多期增生事件。由此可见华北克拉通是由多期古-中太古代英云闪长质-奥长片麻岩+中基性麻粒岩组成的复杂地体。

值得指出的是河北汉诺坝大麻坪地区的二辉麻粒岩和紫苏麻粒岩中锆石的 U-Pb 同位素年龄有 140.2 ± 0.5 Ma, 124.9 ± 1.1 Ma 和 120.9 ± 0.6 Ma 三组数据(樊祺诚等, 1998) 樊等认为代表三期麻粒岩相变质作用。晚侏罗世(140 Ma)时, 基性岩浆底侵于下地壳, 发生壳-幔混合和第一次麻粒岩相变质作用, 紫苏辉石麻粒岩即为这一时期的产物。大规模的底侵事件主要发生在白垩纪早期(124~120 Ma), 基性玄武质岩浆直接底侵于下地壳底部, 形成不同的堆积岩, 再经麻粒岩相变质作用, 形成以二辉麻粒岩为代表的镁铁质麻粒岩, 实际上应为两期或两阶段的麻粒岩相变质作用。

安徽女山 NA202 中 10 个自形锆石颗粒获得 140 ± 4 Ma 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 另一个麻粒岩样品 H13-1 获得稍年轻的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为 117 ± 5 Ma, 与樊祺诚等(1998)所测得的 120 Ma 年龄也十分一致, 以上数据表明, 中生代是华北克拉通重要的构造转折时期, 是新的下地壳主要形成时期, 河北汉诺坝、安徽女山、山东莒南和河南信阳的基型麻粒岩捕虏体和基性高压麻粒岩捕虏体组成的下地壳, 都是这一时期形成的。翟明国等(2002)认为华北克拉通下地壳的部分或大部分已经被中生代下地壳置换, 这种置换不仅发生在克拉通的边缘部分而且发生在内部。华北克拉通中生代的地幔上涌作用造成前寒武纪的下地壳被中生代下地壳取代, 可称为华北克拉通中生代换底作用。这种置换作用应包括同化混染、部分熔融、分离结晶和重结晶, 具有十分复

杂的演化过程。

安徽女山的下地壳基性麻粒岩捕虏体中 Cpx 、 Opx 、 Gt 等矿物成分与河北汉诺坝地区同类岩石的矿物成分不同而与太古宙麻粒岩地体中的矿物成分十分相近,说明安徽女山基性麻粒岩捕虏体与古老麻粒岩地体具有亲缘性。

华北基性麻粒岩捕虏体的基性岩类从 140 Ma 起开始底垫于下地壳一直到 120 Ma 结束,樊祺诚等(1998)认为经历了 3 次的麻粒岩相变质作用,这方面的论据尚感不足,也许只是大演化中的若干不同阶段,从现有麻粒岩样品的薄片显微镜下观察还未发现多次麻粒岩相变质作用叠加的痕迹。

内蒙古喀喇沁麻粒岩捕虏体已测得的变质锆石 U-Pb 加权平均年龄为 251 ± 5 Ma 代表麻粒岩相变质作用的时间,麻粒岩捕虏体中紫苏辉石的 K-Ar 年龄为 229 ± 6.8 Ma 代表麻粒岩相变质岩冷却的年龄。比河北汉诺坝、安徽女山和河南信阳等地下地壳麻粒岩捕虏体的形成时代早,此前,邵济安等(2000)在同一地区早中生代闪长岩中陆续发现镁铁质-超镁铁质堆晶岩捕虏体,其同位素年龄是 $237 \sim 220$ Ma 是否是另一次岩浆底垫的结果仍需深入研究。另一组上交点年龄为 1839 ± 15 Ma 指示该区麻粒岩捕虏体的原岩时代属古元古代,表明该区下地壳麻粒岩捕虏体具有古元古代的物质。

东秦岭桐柏地区下地壳麻粒岩捕虏体的变质年龄为 470 ± 14 Ma(孙勇等,1993)或 432 ± 43 Ma(Xiang *et al.*, 2010),两者在误差范围内一致,均属加里东期变质。需要指出的是东秦岭桐柏地区属秦岭-大别造山带高压-超高压变质带的组成部分,秦岭-大别造山带的俯冲碰撞时代为印支-燕山期,东秦岭桐柏地区显然也受到该期事件的影响,在此之前还有加里东期的热事件的影响。

7.2 华南地区麻粒岩捕虏体测年结果的地质意义

据于津海等(2002)研究,东南沿海新生代玄武岩中的麻粒岩捕虏体地球化学特征被分为岩浆麻粒岩和堆晶麻粒岩,它们是晚中生代玄武质岩浆底垫于壳幔边界结晶变质而成,它们与研究区地表出露的晚中生代辉长岩和玄武岩的地球化学特征一致,显示了它们之间的成因联系。

粤桂交界地区和云炉地区以 S 型花岗岩和紫苏花岗岩为寄主岩石的麻粒岩捕虏体已测得的同位素变质年龄为晋宁期,时代为 950 Ma(周汉文等,1994)。周汉文等(1996)根据麻粒岩变质作用特征,

认为当时地壳处于拉张状态,热扰动主要由于地幔上隆,麻粒岩的熔融紫苏花岗岩浆的反应发生于加里东期。该时期地壳处于挤压状态,地壳经挤压加厚,热扰动增强,发生了一期以中压型为特征的麻粒岩相变质作用,同时形成了大量花岗质岩石和混合岩。

总之,麻粒岩的形成是地幔上隆导致地壳上部产生区域高热流状态的结果,紫苏花岗岩等的形成(450 Ma)是由于地壳挤压加厚,在富 CO_2 流体参与下由麻粒岩熔融而成。

汪绍年(1991)研究也认为粤桂地区花岗岩类在矿物组成、化学成分、微量和稀土元素及同位素组成上十分相似,都来源于上地壳,属陆壳转生型麻粒岩,其原岩是由角闪岩相-麻粒岩相变质的变质沉积岩。

7.3 麻粒岩捕虏体指示的下地壳意义

华北克拉通地区被包裹于新生代玄武岩(或古生代金伯利岩)中的麻粒岩捕虏体主要是基性麻粒岩(有的属高温)和高压麻粒岩,属岩浆成因,源于地幔分异出的基性岩浆底垫于地壳下部,经麻粒岩相变质作用而成,其时代为中生代,形成了一定范围的中生代下地壳。与基性麻粒岩共生的尚有一些中酸性或长英质麻粒岩(即有岩浆成因也有变质成因),源于古老下地壳,属古老麻粒岩地体的一部分,有的尚保留有原有面貌和古老年龄数据,但也有一部分已被改造和置换,熔入了中生代下地壳,而成为其组成部分,由此可知中生代下地壳的组成和成因十分复杂,不能完全用单一的基性岩浆底垫作用形成来解释。郑建平等(2010)认为华北深部地壳具有不均一性特征,本文同意这一观点。通过对华北克拉通麻粒岩捕虏体的对比研究,除河北汉诺坝地区有比较高的中生代新生下地壳外,安徽女山也证明有中生代新生下地壳存在,而在华北其他地区,深部地壳主体有可能由古老的岩石组成,但不少已经被交代置换、同化混染而被改造。完全保留古老岩石组成的下地壳可能仍占一定比例。新生的中生代下地壳的形成与演化与华北克拉通的破坏具有十分重要的意义。

在克拉通北部的内蒙古地区中尚见有麻粒岩捕虏体的变质时代为 251 Ma(邵济安等 2000),老于中生代,提示我们在华北克拉通基底中,除中生代下地壳是否还有更老的下地壳基底,这还需要进一步研究。

华南地区和东南沿海和粤桂交界地区明显有不同的下地壳,在这两个地区下地壳中均没有发现相当于华北克拉通中生代下地壳中古老麻粒岩捕虏体的残留物,粤桂交界地区花岗岩中的麻粒岩捕虏体

根据其矿物共生组合估算其代表的位置仅相当于下地壳的中上部位,反映出的壳幔边界较高(约23 km),麻粒岩捕虏体的变质相属低压麻粒岩或超高温相,原岩为变泥质岩,与地表见到的区域变质形成的同类麻粒岩有紧密联系,与地表大规模出露的S型花岗岩也有重要的亲缘关系。

8 问题与建议

当前麻粒岩捕虏体的研究仅少部分地区研究比较详细,获得了不少对下地壳特征和演化的认识,但大部分地区的研究程度仍较低,缺乏详细的岩石和矿物的地球化学研究和定年,各地区的对比研究,仍存在一定的困难。对下地壳的形成和演化的全面的了解还有一定距离,因此需要对这些地区继续开展深入的研究,收集更多的资料。此外不断发现新的地区,扩大研究范围,建议建立较长远的研究计划,持之以恒,不断深入研究下去。

加强麻粒岩捕虏体的研究,不能忽视或削弱麻粒岩地体的研究,二者互为补充,关系密切,应把两者有机的结合起来进行对比研究。下地壳麻粒岩捕虏体常与大量地幔岩伴生,代表下地壳和上地幔物质(组成)的信息源,它们是一个完整的系统,是研究下地壳-上地幔演化过程的实物链,一定要紧密结合起来研究。在研究方法上要采用地质学、岩石学、岩石化学、地球化学、年代学、构造背景等综合研究手段,才能取得更好的效果。

麻粒岩捕虏体定年是一个十分困难的问题。下地壳麻粒岩捕虏体一部分经历过多次热干扰(变质)同化混染、部分熔融、分离结晶和重结晶,原岩有一定的改造和物质迁移,或者说被“置换”,对年龄测定都有不同程度的干扰和影响,目前应用离子探针锆石进行年龄测定都认为是比较好的方法。但麻粒岩捕虏体有达高压和高温麻粒岩,有的甚至已达超高温,温度一般在800~950℃之间,已超出锆石的封闭温度,必然要受到重结晶。地幔岩的温度一般都超过1000℃,影响将更大,定年存在一定的不确定性。因此,应高度重视对测年方法的研究和对原测定方法所得数据的评价,更要加强锆石成因矿物学研究。

目前在研究麻粒岩捕虏体时,采用的岩石命名比较混乱,对进行岩石类型对比造成一定困难,应该重视命名的统一原则,以减少对比时的麻烦。

麻粒岩捕虏体的温压计算方法多样,数据有一

定的出入,压力计算如无石榴子石出现,只能利用 Al_2O_3 和 Na_2O 含量和 Al^{IV} 数据加以估算,因此需要研究新的温压计算方法,不断使之完善。

致谢 宋会侠同志在资料收集和文字录入及图件绘制等方面做了大量工作,特致以深切的谢意!

References

- Bohlen S R and Mezger K. 1989. Origin of granulite terranes and formation of the lowermost continental crust [J]. *Science*, 244: 326~329.
- Chen Bin and Zhuang Yuxun. 1994. The petrology and petrogenesis of Yunlu charnockite and its granulite inclusions, west Guangdong, South China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 10(2): 139~150 (in Chinese with English abstract).
- Chen Daogong, Zhi Xiachen, Li Binxian, et al. 1997. Nd, Sr and Pb isotopic compositions and their petrogenetic information of pyroxenite xenoliths from Hannuoba basalts, China [J]. *Geochemistry Geochimica*, 2(1): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Chen S H, O'Reilly S Y, Zhou X, et al. 2001. Thermal and petrological structure of the lithosphere beneath Hannuoba, Sino-Korean Craton, China: Evidence from xenolith [J]. *Lithos*, 56: 267~301.
- Chen S H, Sun M, Zhou X H, et al. 1996. Pyroxenite and granulite xenolith in tertiary Hannuoba Basalts, Hebei Province: petrology and *P-t* estimation [A]. Abstract of 30th International Geological Congress [C]. Beijing, 1~22.
- Chen Shaohai, Zhang Guohui, Zhou Xinhua, et al. 1998. Petrological investigation on the granulite xenoliths from Hannuoba basalts, northeast Sino-Korean Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 366~380 (in Chinese with English abstract).
- Chu Xuelei, Li Xiaolin, Xu Jiuhua, et al. 1999. The PGE distribution features of Hannuoba basalt and its peridotite-granulite xenoliths from the mantle [J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(8): 859~863 (in Chinese).
- Cong Bailin and Zhang Ruyuan. 1982a. Transition metal geochemistry of Hannuoba basalts and their ultramafic inclusion [J]. *Petrological Research*, 1: 44~53 (in Chinese with English abstract).
- Cong Bailin and Zhang Ruyuan. 1982b. Petrological research of Hannuoba basalt and its ultramafic xenoliths [J]. *Scientia Sinica B*, 12: 1109~1122 (in Chinese).
- Cong Bailin and Zhang Ruyuan. 1983. Petrogenesis of Nepheline basalt and their ultramafic inclusions from Xilong, Zhejiang Province [J]. *Petrological Research*, 3: 95~107 (in Chinese with English abstract).
- Chung S L, Chen C H and Jahn B M. 1996. Formation of mafic lower crust in continental extension province: evidence of granulite xenoliths from southeast China [A]. Abstract of 30th International Geological Congress [C]. Beijing, 118.
- Du Yangsong. 1994. A reviews of the studies on the features of lower crust enclaves and their geological significance [J]. *Geological Science and Technology Information*, 13(3): 33~39 (in Chinese with Eng-

- lish abstract).
- Du Yangsong, Ken D Collersen, Zhao Jianxin, *et al.* 1999. Characteristics and petrogenesis of granulite enclaves in S-type granites in the junction of Guangdong and Guangxi Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 309~314 (in Chinese with English abstract).
- E Molan and Zhao Dasheng. 1987. The Cenozoic Basalt and Deep-Seated Xenolith in Eastern China [M]. Beijing: China Science Press (in Chinese).
- Fan Qicheng and Liu Ruoxin. 1996. High temperature granulite xenolith from Hannuoba [J]. *Chinese Science Bulletin*, 41(3): 235~238 (in Chinese).
- Fan Qicheng, Liu Ruoxin, Li Huimin, *et al.* 1998. Zircon chronology and rare earth elements geochemistry of Hannuoba granulite xenoliths [J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(2): 133~137 (in Chinese).
- Fountain D M, Arculus R and Kay R. 1992. Continental Lower Crust [M]. New York: Elsevier.
- Gao Linzhi, Zhao Ting, Wan Yusheng, *et al.* 2005. Zircon SHRIMP U-Pb age of the Yuntaishan Proterozoic metamorphic basement, Jiaozuo, Henan, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 24(12): 1089~1093 (in Chinese with English abstract).
- Gao Shan, Kern H, Liu Y S, *et al.* 2000. Measured and calculated seismic velocities and densities for granulite from xenoliths occurrence and the adjacent exposed lower crust sections: A comparative study from the north China Craton [J]. *J. Geophys. Res.*, 105: 18965~18976.
- Gao S, Rudnick R L, Carlur R W, *et al.* 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the north craton [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 198: 307~322.
- Gao S, Zhang B R and Luo T C, *et al.* 1992. Chemical composition of the continental crust in the Qinling orogenic belt and its adjacent north China and Yangze Craton [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 56: 3933~3950.
- Geng Yuansheng, Wang Xinshe, Shen Qihan, *et al.* 2007. Chronology of the precambrian metamorphic series in the Alxa area, Inner Mongolia [J]. *Geology in China*, 34(2): 251~261 (in Chinese with English abstract).
- Han Qingjun and Shao Ji'an. 2000. Mineral chemistry and metamorphic P-t conditions of granulite xenoliths in early Mesozoic diorite in Harkin region, Eastern Inner Mongolia Autonomous Region, China [J]. *Earth Science Journal of China University of Geoscience*, 25(1): 21~27 (in Chinese with English abstract).
- Harley S L. 1989. The origin of granulites: a metamorphic perspective [J]. *Geol. Mag.*, 126(3): 215~247.
- Huang Xiaolong, Xu Yigang, Chu Xuelei, *et al.* 2001. Geochemical comparative studies of some granulite terranes and granulite xenoliths from North China Craton [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 318~328 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xiaolong, Xu Yigang and Liu Dunyi. 2004. Geochronology, petrology and geochemistry of the granulite xenoliths from Nüshan, east China: implication for a heterogeneous lower crust beneath the Sino-Korean Craton [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(1): 127~149.
- Huang Xiaolong, Xu Yigang, Wang Rucheng, *et al.* 2002. The Nüshan granulite from Anhui Province, China: mineralogical characteristics of the lower crustal and their implications for genesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 383~391 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Aurray B, Cornchet J, *et al.* 1987. 3.5 Ga old amphibolites from eastern Hebei Province, China: field occurrence, petrography, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry [J]. *Precambrian Research*, 34: 311~346.
- Kempton P D, Harmon R S, Hawkesworth C J, *et al.* 1990. Petrology and geochemistry of lower crustal granulites from the geromine volcanic field, South Arizona [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 54: 3401~3426.
- Kong Hua, Jin Zhenmin and Lin Yuanxian. 2000. Petrology and chronology of granulite xenoliths in Daoxian County, Hunan Province [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(2): 115~119 (in Chinese with English abstract).
- Kong Hua, Jin Zhenmin and Xie Douke. 1998. Some new progresses in studying continental lower crust [J]. *Geophysics Progresses*, 13(4): 9~21 (in Chinese with English abstract).
- Liao Qilin, Wang Zhenming, Wang Pinglu, *et al.* 1988. Explosion seismic study of the crustal structure in Fuzhou-Quanzhou-Shantou region [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 31(3): 270~280 (in Chinese).
- Lin Chuanyong, Zhang Younan, Shi Lanbin, *et al.* 2001. Measurement of elastic wave velocity of lower crust xenoliths and their geological implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 277~285 (in Chinese with English abstract).
- Liu Congqiang, Xie Guanghong and Akimasa Masuda. 1996. REE and Sr and Nd isotope geochemistry of mantle xenoliths from basalts in Hannuoba [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3): 382~389 (in Chinese with English abstract).
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, *et al.* 1992. Remnant of 3800 Ma crust in Chinese part of the Sino-Korean Craton [J]. *Geology*, 20: 339~342.
- Liu Dunyi, Wan Yusheng, Wu Jiashan, *et al.* 2007. Archean crustal evolution and the oldest rocks in the North China Craton [J]. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1131~1138 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qingsheng and Gao Shan. 1990. Geochemical and geophysical properties of the lower crust granulites from Qingling orogenic belt [J]. *Earth Science Journal of China University of Geoscience*, 15(4): 441~449 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ruoxin, Yang Meifei, Xu Huaaji, *et al.* 1981. Preliminary study on ultramafic xenoliths in Cenozoic alkali basalt in North China area [J]. *Seismology and Geology*, 3: 1~16 (in Chinese).
- Liu Shun, Xiao Xiaohui and Zhong Dalai. 1997. Experimental research on rheological properties of a felsic granulite [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 24(1): 42~47 (in Chinese).
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Jin Shuyan, *et al.* 2001. Geochemistry and petrogenesis of lower crust xenoliths from Hannuoba, North China: implications for the continental lower crust composition and evolution at convergent margin [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 65: 2580~2604.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Liu Xiaoming, *et al.* 2003. Thermodynamic col-

- lection of xenoliths from lower crust to upper mantle in Hannuoba area [J]. Chinese Science Bulletin, 48(14): 1 575~1 581(in Chinese).
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Liu Xiaoming, *et al.* 2004. Zircon geochronology of the low- ϵ Nd intermediate xenoliths from Damaping, Hannuoba, China [J]. Geochimica, 33(3): 261~267(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Zhou Lian, *et al.* 2001. Geochronology and Geodynamic implications of the felsic granulite xenoliths from the Hannuoba Basal [J]. Geochimica, 30(1): 51~56(in Chinese with English abstract).
- Percival J A, Fountain D M and Salisbury M M. 1992. Exposed crustal cross-section as windows on the lower crust [A]. Fountain D M, Arculus R and Kay R W. Continental Lower Crust [C]. New York : Elsevier, 317~319.
- Rudnick R. 1992. Xenoliths : sample of the lower continental crust [A]. Fountain D M, Arculus R and Kay R W. Continental Lower Crust [C]. New York : Elsevier, 269~316.
- Rudnick R and Taylor S R. 1987. The composition and petrogenesis of the crust : a xenolith study [J]. J. Geophys Research, 92 : 13 981~14 005.
- Salisbury M M and Fountain D H. 1988. Exposed Cross-Section of The Continental Crust [M]. Netherlands : Kluwer Academic Publisher.
- Shao Ji'an, Han Qingjun and Li Huimin. 2000. Discovery of early Mesozoic granulite xenoliths in North China Craton [J]. Chinese Science Bulletin, 30(supplement), 148~153(in Chinese).
- Shen Qihan, Geng Yuansheng, Song Biao, *et al.* 2005. New information from the surface outcrops and deep crust of Archean rocks of the North China and Yangtze Blocks and Qinling-Dabie Orogenic Belt [J]. Acta Geologica Sinica, 79(5): 616~627(in Chinese with English abstract).
- Shen Qihan, Xu Huifen, Zhang Zongqing, *et al.* 1992. Early Precambrian Granulite of China [M]. Beijing : Geological Publishing House, 237(in Chinese).
- Shen Qihan, Zhang Zongqing and Xu Huifen. 1993. The Sm-Nd isochron age and its geological significance of meta-basites in the Yishui complex, Shandong Province [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 12(4): 189~296.
- Shi Lanbin, Lin Chuanyong, Chen Xiaode, *et al.* 2000. A xenolith derived Geolhern for the lower crust and upper mantle beneath Hannuoba area, Hebei Province, China and its geologic implications [J]. Seismology and Geology, 22(1): 37~46(in Chinese with English abstract).
- Song Y and Frey F A. 1989. Geochemistry of peridotite xenoliths in basalt from Hannuoba, eastern China : Implications for subcontinental mantle heterogeneity [J]. Geochim Cosmochim Acta, 53 : 97~113.
- Sun Yong, Yu Zaiping and Kröner A. 1993. Characteristics of lower crustal granulite xenoliths from the east Qinling orogenic belt and their tectonic implications [J]. Geochimica, (3): 227~236(in Chinese with English abstract).
- Tao Kuiyuan, Xing Guangfu, Wang Qinghua, *et al.* 2001. Primary re-search of basic granulite xenoliths of Xinchang, Zhejiang Province [J]. China Regional Geology, 20(3): 328~330(in Chinese).
- Tatsumoto M, Basu A R, Huang W K, *et al.* 1992. Sr, Nd and Pb isotopes of ultramafic xenoliths in volcanic rocks of Eastern China : enriched components EM1 and EM2 in subcontinental lithosphere [J]. Earth and Planet Science Letter, 113 : 107~128.
- Vielzeuf D and Vidal P. 1990. Granulites and Crust Evolution [M]. Amsterdam : Kluwer Academic Publisher.
- Wan Yusheng, Song Biao, Liu Dunyi, *et al.* 2001. Geochronology and geochemistry of 3.8~2.5 Ga ancient rock belt in the Dongshan scenic park, Anshan area [J]. Acta Geologica Sinica, 75(3): 363~370(in Chinese with English abstract).
- Wan Y S, Song B and Liu D Y. 2002. Zircon SHRIMP age of Mesoproterozoic meta-argillaceous rock in the Anshan area and its geological significance [J]. Science in China (Series B), 45(Supp): 121~129.
- Wang Fangzheng, Li Hongli, Zhu Qinwen, *et al.* 1997. Assemblages of anatectic xenoliths from volcanic and the petrology model of lithosphere in south Hunan Province [J]. Geological Science and Technology Information, 16(3): 3~7(in Chinese with English abstract).
- Wang Renjing and Yang Shurong. 1987. Research on Cenozoic basalts and inclusions in Shengxian-Xinchang County, Zhejiang Province [J]. Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology, 12(3): 241~248(in Chinese with English abstract).
- Wang Shaonian. 1991. Characteristics and genesis of granitoids in the Darongshan and Shiwandashan area of Guangxi Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 7(2): 73~80(in Chinese).
- Wu Youlin, Zhang Qinghua, Lin Ge, *et al.* 1995. New advances in research concerning the continental subcrust [J]. Geological Science and Technology Information, 14(4): 3~7(in Chinese with English abstract).
- Xiang Hua, Zhong Zengqiu and Zhang Li. 2010. Geochronology and petrology of granulites in North Tongbai, Central China : tracing the *P-T-t* path of metamorphism using trace elements and Hf isotopes in zircon [A]. Symposium of National Symposium on Petrology and Geodynamics [C]. Beijing, 255.
- Xie Guanghong and Wang Junwen. 1992. Geochemistry of Hannuoba basalt and its ultramafic xenoliths [A]. Liu Ruoxin. Geochronology and Geochemistry of Chinese Cenozoic Volcanic Rocks [C]. Beijing : Seismological Press, 149~170(in Chinese).
- Xie Manze, Feng Jialin, Zhang Gailan, *et al.* 1993. Discovery of the granulite xenolith in Hannuoba Basalts, Hebei Province, China [J]. Journal of Hebei College of Geology, 16(6): 587~593(in Chinese with English abstract).
- Xu Hua'iji, Wang Wenhua and Guo Jindi. 1979. Deep-seated eclogites in Junan and Rizhao, Shandong Province, China [J]. Seismology and Geology, 1(2): 57~66(in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng, O'Reilly S Y, Griffin W L, *et al.* 1998. The nature of the Cenozoic lithosphere at Nüshan, Eastern China [A]. Marlin J J, *et al.* Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia [C]. 167.

- Xu Xisheng, O'Reilly S Y, Griffin W L, *et al.* 2000. Genesis of young lithosphere mantle in southeastern China: an LAM-ICP-MS trace element study[J]. *J. Petrology*, 41(1): 111~148.
- Xu Xisheng, O'Reilly S Y, Zhou Xinmin, *et al.* 1996. A xenolith-derived geotherm and the crust-mantle boundary at Qinling, South-eastern China[J]. *Lithos*, 38: 41~62.
- Xu Xisheng and Zhou Xinmin. 1995. The xenoliths from Qilin Cenozoic basaltic pipe, Guangdong[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(4): 441~447 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng, Zhou Xinmin, O'Reilly S Y, *et al.* 1999. Exploration for the lower crust materials and granulite genesis in south China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 217~223 (in Chinese with English abstract).
- Ying Jifeng, Zhang Hongfu and Tang Yanjie. 2010. Geochronology and geochemical character of Juman granulite xenolith, Shandong Province: controlling of lower crust composition and structural attribute[A]. Beijing, Symposium of National Symposium on Petrology and Geodynamics[C]. 351 (in Chinese).
- Yu Jinhai, Fang Zhong, Lai Mingyuan, *et al.* 1998. Discovery of garnet granulite facies xenoliths from Guangdong Leizhou Cenozoic basalt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(18): 1988~1992 (in Chinese).
- Yu Jinhai, Fang Zhong, Zhou Xinmin, *et al.* 1998. Garnet granulite facies xenoliths from Yingfengling Cenozoic basalt in Leizhou, Guangdong Province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(23): 2013~2017.
- Yu Jinhai, Xu Xisheng, O'Reilly S Y, *et al.* 2003. Granulite xenolith from Cenozoic basalts in southeast China provide geochemical fingerprint to distinguish lower crust terranes from the North and South China tectonic blocks[J]. *Lithos*, 67: 77~102.
- Yu Jinhai, Xu Xisheng and Zhou Xinmin. 2002. Geochemical research of basic granulite xenoliths and the lower crust composing of South China seaboard[J]. *Scientia Sinica D*, 32(5): 383~393 (in Chinese).
- Yu Jinhai and Zhou Xinmin. 1993. Granulite facies middle-lower crustal xenolith from Nüshan alkali basalt in northeastern Anhui Province, China[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 12(4): 339~351.
- Zhai Mingguo. 1991. The main characteristics of granulites in north China and the orientain of further research on them[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 7(4): 66~77 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo and Fan Qicheng. 2002. Mesozoic replacement of bottom in north China Craton: anorogenic mantle-crust interaction[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Guo Jinghui, Yan Yuehua, *et al.* 1996. A oblique cross section of archaean continental crust in Shanxi-Hebei-Inner Mongol junctive area, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12(2): 222~238 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guohui, Zhou Xinhua, Sun Min, *et al.* 1998a. Sr, Nd and Pb isotopic characteristic of granulite and pyroxenite xenoliths in Hannuoba basalt, Hebei Province and their implications for geologic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 190~197 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guohui, Zhou Xinhua, Chen Shaohai, *et al.* 1998b. Sr, Nd and Pb isotopic character in five dimensional space of granulite and pyroxenite xenoliths in Hannuoba basalt, Hebei Province and their implications for geologic processes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(20): 2218~2224 (in Chinese).
- Zhang Guohui, Zhou Xinhua, Sun Min, *et al.* 1998c. Highly chemical heterogeneity in the lower crust and crust-mantle transitional zone: geochemical evidences from xenoliths in Hannuoba basalt, Hebei Province[J]. *Geochimica*, 27(2): 153~167 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Haizu and Zhang Hongfei. 2001. Some new progresses and geological significance in studying continental lower crust granulite xenoliths[J]. *Progress in Precambrian Research*, 24(4): 247~256 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfu, Ying Jifeng, Santosh M, *et al.* 2010. Multi-period growth of lower crust in North China Craton: evidence from U-Pb and Hf of zircon[A]. Beijing, Symposium of National Symposium on Petrology and Geodynamics[C]. 354 (in Chinese).
- Zhang Ruyuan and Cong Bailin. 1985. The geothermal and constituent of uppermost mantle derived from xenoliths in southeastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1(4): 34~49 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Siwei, Zhang Suoxi and Kang Rongyu. 1988. Interpretation of the Fujiji-Fengxian DSS profile in Xiayangzi region[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 31(6): 637~648 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Hailing. 1985. Petrological characteristics of the mantle-derived pyroxenite xenoliths from Qilin, Puning County, Guangdong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1(1): 23~33 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Liang, Guo Feng, Li Chaowen, *et al.* 2010. Genesis of ultra-high temperature granulite xenoliths in Indo-China epoch granite and their indicative significance to regional crust evolution, southeast Guangxi [A]. Beijing, Symposium of National Symposium on Petrology and Geodynamics[C]. 238 (in Chinese).
- Zhao Ziran, Song Huixia, Shen Qihan, *et al.* 2009. The petro-geochemical characters and SHRIMP U-Pb zircon ages of meta- mafic rocks from the Yishui complex in Yishui County, Shandong Province [J]. *Geological Review*, 55(2): 286~299 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping. 2005. The U-Pb dating ages and Hf isotopic compositions of zircon from various granulite xenoliths: the formation and reworking of the lower crust beneath the North China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 24(1): 7~16 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping, Griffin W L, O'Reilly R Y, *et al.* 2004. 3.6 Ga lower crust in central China: new evidence on the assembly of the north China craton[J]. *Geology*, 32(3): 229~232.
- Zheng Jianping, Sun Min, Lu Fengxiang, *et al.* 2003. Mesozoic lower crust xenoliths and their significance in lithosphere evolution beneath

- the Sino-Korean Craton[J]. *Tectonophysics*, 361: 37~60.
- Zheng Jianping, Sun Min, Lu Fengxiang, *et al.* 2005. Xinyang mafic granulitic xenoliths and its significance for the early Mesozoic lower crustal nature on the south margin of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 91~98(in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping, Yu Chunmei, Liu Qingsheng, *et al.* 2010. Lower crust formation and alteration of North China Craton: evidence from granulite xenoliths[A]. Beijing, Symposium of National Symposium on Petrology and Geodynamics[C]. 356(in Chinese).
- Zhi Xiachen, Peng Zicheng, Chen Daogong, *et al.* 2001. The osmium isotopic compositions and model feldspar xenoliths from Jiangsu-Anhui area and their Geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 11~18(in Chinese with English abstract).
- Zhong Yingxian, Liu Yuanchao and Cai Xueting. 1993. Study of the granulite xenoliths from the lower crust in basalt, Hunan, China[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 20(1): 56~61(in Chinese with English abstract).
- Zhou Hanwen, You Zhendong, Zhong Zengqiu, *et al.* 1994. New findings of low pressure granulite facies metamorphic age in the Yunkai unroofed[J]. *Geological Science and Technology Information*, 13(3): 23~26(in Chinese with English abstract).
- Zhou Hanwen, You Zhendong, Zhong Zengqiu, *et al.* 1996. Radioactive element distribution in the granulites and charnockites of the Yunkai Precambrian basement and their petrogenetic implication, Western Guangdong[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 21(5): 529~535(in Chinese with English abstract).
- Zhou X H, Sun M, Zhang G H, *et al.* 2002. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China: Isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean craton[J]. *Lithos*, 62(1~4): 111~124.
- Zhou X M, Yu J H and Xu X S. 1992. Discovery and significance of granulite xenoliths in Nüshan basalts, East China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 37(20): 1730~1734.
- 陈斌, 庄育勋. 1994. 粤西云炉紫苏花岗岩及其麻粒岩包体的主要特点和成因讨论[J]. *岩石学报*, 10(2): 139~150.
- 陈道公, 支霞臣, 李彬贤, 等. 1997. 汉诺坝玄武岩中辉石岩类包体 Nd、Sr、Pb 同位素及其成因信息[J]. *地球化学*, 26(1): 1~12.
- 陈绍海, 张国辉, 周新华, 等. 1998. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩类捕虏体的岩石学特征[J]. *岩石学报*, 14(3): 366~380.
- 储雪蕾, 李晓林, 徐九华, 等. 1999. 汉诺坝玄武岩及其地幔橄榄岩—麻粒岩捕虏体的 PGE 分布特征[J]. *科学通报*, 44(8): 859~863.
- 从柏林, 张儒瑗. 1982a. 汉诺坝玄武岩及超镁铁质包体的过渡金属地球化学研究[J]. *中国科学院地质研究所岩石学研究第一辑*, 44~53.
- 从柏林, 张儒瑗. 1982b. 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辑)*, 12: 1109~1122.
- 从柏林, 张儒瑗. 1983. 浙江西茛霞石玄武岩及其超镁铁质岩包体的成因岩石学研究[J]. *中国科学院地质研究所岩石学研究第三辑*, 95~101.
- 杜杨松. 1994. 火成岩中下地壳岩石包体的特征及其研究意义[J]. *地质科技情报*, 13(3): 33~39.
- 杜杨松, Ken D Collerson, 赵建新, 等. 1999. 两广交界地区 S 型花岗岩中麻粒岩包体的特征和成因[J]. *岩石学报*, 15(2): 309~314.
- 鄂莫岗, 赵大升. 1987. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石捕虏体[M]. 北京: 科学出版社.
- 樊祺诚, 刘若新. 1996. 汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕虏体[J]. *科学通报*, 41(3): 235~238.
- 樊祺诚, 刘若新, 李惠民, 等. 1998. 汉诺坝捕虏体麻粒岩锆石年代学与稀土元素地球化学[J]. *科学通报*, 43(2): 133~137.
- 高林志, 赵汀, 万渝生, 等. 2005. 河南焦作云台山早前寒武纪变质基底锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. *地质通报*, 24(12): 1089~1093.
- 耿元生, 王新社, 沈其韩, 等. 2007. 内蒙古阿拉善地区前寒武纪变质岩形成时代的初步研究[J]. *中国地质*, 34(2): 251~261.
- 韩庆军, 邵济安. 2000. 内蒙古喀喇沁地区早中生代闪长岩中麻粒岩捕虏体矿物学及变质温压条件[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(1): 21~27.
- 黄小龙, 徐义刚, 储雪蕾, 等. 2001. 华北地台部分麻粒岩地体及包体的地球化学特征对比[J]. *岩石矿物学杂志*, 20(3): 318~328.
- 黄小龙, 徐义刚, 王汝成, 等. 2002. 安徽女山麻粒岩包体: 矿物学特征、下地壳地温曲线及其成因意义[J]. *岩石学报*, 18(3): 383~391.
- 孔华, 金振民, 林源贤. 2000. 道县玄武岩中麻粒岩包体的岩石学及年代学[J]. *长春科技大学学报*, 30(2): 115~119.
- 孔华, 金振民, 谢宾克. 1998. 大陆下地壳的研究进展综述[J]. *地球物理学进展*, 13(4): 9~22.
- 廖其林, 王振明, 王屏路, 等. 1988. 福州—泉州—汕头地区地壳结构的爆炸地震研究[J]. *地球物理学报*, 31(3): 270~280.
- 林传勇, 张友南, 史兰斌, 等. 2001. 下地壳麻粒岩包体波速测定及其地质意义[J]. *地质学报*, 75(3): 277~288.
- 刘丛强, 解广轰, 增田彰正. 1996. 汉诺坝玄武岩中地幔岩捕虏体 REE 和 Sr、Nd 同位素地球化学[J]. *岩石学报*, 12(3): 382~389.
- 刘敦一, 万渝生, 伍家善, 等. 2007. 华北克拉通太古宙演化和最老的岩石[J]. *地质通报*, 26(9): 1131~1138.
- 刘庆生, 高山. 1990. 东秦岭地区下地壳麻粒岩的地球化学与地球物理性质[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 15(4): 441~449.
- 刘若新, 杨美娥, 胥怀济, 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[J]. *地震地质*, 3: 1~16.
- 刘顺, 肖晓辉, 钟大赉. 1997. 长英质麻粒岩流变性质的实验研究[J]. *成都理工学院学报*, 24(1): 42~47.
- 刘勇胜, 高山, 柳小明, 等. 2003. 汉诺坝下地壳—地幔包体的岩石圈热动力记录[J]. *科学通报*, 48(14): 1575~1581.
- 刘勇胜, 高山, 柳小明, 等. 2004. 汉诺坝大麻坪低 ϵ_{Nd} 中性麻粒岩

附中文参考文献

- 包体单颗粒锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 地球化学, 33(3):261~268.
- 刘勇胜,高山,周炼,等. 2001. 汉诺坝长英质麻粒岩包体同位素年代学及其地球动力学意义[J]. 地球化学, 30(1):51~56.
- 邵济安,韩庆军,李惠民. 2000. 华北克拉通早中生代麻粒岩捕虏体的发现[J]. 中国科学(D辑), 30(增刊):148~153.
- 沈其韩,耿元生,宋彪,等. 2005. 华北和扬子陆块及秦岭、大别造山带地表和深部太古宙基底的新信息[J]. 地质学报, 79(5):616~627.
- 沈其韩,徐惠芬,张宗清,等. 1992. 中国早寒武纪麻粒岩[M]. 北京:地质出版社, 237.
- 沈其韩,张宗清,徐惠芬. 1993. 山东沂水杂岩中变基性岩类的 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 12(4):289~296.
- 史兰斌,林传勇,陈孝德,等. 2000. 由包体推导的河北汉诺坝下地壳-上地幔地温线及其地质意义[J]. 地震地质, 22(1):37~46.
- 孙勇,于在平, Kroner A. 1993. 东秦岭深源麻粒岩包体的性质及其构造意义[J]. 地球化学, (3):227~236.
- 陶奎元,邢光福,汪庆华,等. 2001. 浙江新昌基性麻粒岩包体初步研究[J]. 中国区域地质, 20(3):328~330.
- 万渝生,宋彪,刘敦一,等. 2001. 鞍山山东山风景区 3.8~2.5 Ga 古老岩带的同位素地质年代学和地球化学[J]. 地质学报, 75(3):363~370.
- 汪绍年. 1991. 广西大容山-十万大山岩带中花岗岩类特征及成因[J]. 岩石学报, 7(2):73~80.
- 王方正,李红丽,朱勤文,等. 1997. 湖南火山岩深源包体组合及岩石圈岩石学模型[J]. 地质科技情报, 16(3):3~7.
- 王人镜,杨淑荣. 1987. 浙江嵊县-新昌新生代玄武岩及包体的研究[J]. 地球科学——武汉地质学院学报, 12(3):211~248.
- 吴有林,张翠华,林舸,等. 1995. 大陆下地壳研究的新进展[J]. 地球科技情报, 14(4):3~7.
- 解广轰,王俊文. 1992. 汉诺坝玄武岩及其超镁铁岩捕虏体的地球化学[A]. 刘若新. 中国新生代火山岩年代学和地球化学[C]. 北京:地震出版社, 149~170.
- 谢漫泽,冯家麟,张改兰,等. 1993. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩捕虏体的发现[J]. 河北地质学院学报, 16(6):587~593.
- 胥怀济,王文湖,郭金弟. 1979. 莒南、日照地区的深源榴辉岩类[J]. 地震地质, 1(2):57~66.
- 徐夕生,周新民. 1995. 广东麒麟新生代玄武岩角砾岩筒中岩石包体的研究[J]. 岩石学报, 11(4):441~447.
- 徐夕生,周新民, O'Reilly S Y, 等. 1999. 中国东南部下地壳物质与花岗岩成因探索[J]. 岩石学报, 15(2):217~223.
- 英基丰,张宏福,汤艳杰. 2010. 山东莒南麻粒岩捕虏体的年代学和地球化学特征:对下地壳组成和构造属性的制约[A]. 2010年全国岩石学与地球动力学研讨会论文集摘要[C]. 351.
- 于津海,方中,赖鸣远,等. 1998. 广东雷州新生代玄武岩中石榴麻粒岩相岩石捕虏体的发现[J]. 科学通报, 43(18):1988~1992.
- 于津海,徐夕生,周新民. 2002. 华南沿海基性麻粒岩捕虏体的地球化学研究及下地壳组成[J]. 中国科学(D辑), 32(5):383~393.
- 翟明国. 1991. 华北麻粒岩相岩石的主要特征及今后研究中值得注意的问题[J]. 岩石学报, 7(4):66~77.
- 翟明国,樊祺诚. 2002. 华北克拉通中生代下地壳置换:非造山过程的地幔交换[J]. 岩石学报, 18(1):1~8.
- 翟明国,郭敬辉,闫月华,等. 1996. 太古宙克拉通型下地壳剖面:华北怀安-丰镇-尚义的麻粒岩-角闪岩系[J]. 岩石学报, 12(2):222~238.
- 张国辉,周新华,陈绍海,等. 1998a. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩类和辉石岩类捕虏体 Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 14(2):190~197.
- 张国辉,周新华,陈绍海,等. 1998b. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩和辉石岩类捕虏体 Sr-Nd-Pb 同位素五维空间特征及其地质意义[J]. 科学通报, 43(20):222~238.
- 张国辉,周新华,孙敏,等. 1998c. 下地壳及壳幔过渡带化学不均一性——河北汉诺坝地区深源捕虏体元素地球化学证据[J]. 地球化学, 27(2):153~169.
- 张海祖,张宏飞. 2001. 下地壳麻粒岩包体研究进展及其意义[J]. 前寒武纪研究进展, 24(4):247~256.
- 张宏福,英基丰, Santosh M, 等. 2010. 华北下地壳的多期增生事件:锆石 U-Pb 和 Hf 同位素证据[A]. 2010年全国岩石学与地球动力学研讨会论文集摘要[C]. 354.
- 张儒瑗,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):34~49.
- 张四维,张锁喜,康荣余. 1988. 下扬子地区符离集-奉贤地震测深资料解释[J]. 地球物理学报, 31(6):637~648.
- 赵海玲. 1985. 广东普宁麒麟辉石岩幔源包体的岩石学特征[J]. 岩石学报, 1(1):23~33.
- 赵亮,郭峰,李超文,等. 2010. 桂东南印支期花岗岩中超高温麻粒岩包体成因及其对区域地壳演化的指示意义[A]. 2010年全国岩石学与地球动力学研讨会论文集摘要[C]. 238.
- 赵子然,宋会侠,沈其韩,等. 2009. 山东沂水杂岩中变基性岩的岩石地球化学特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 地质论评, 55(2):286~299.
- 郑建平. 2005. 捕虏体麻粒岩锆石 U-Pb 年龄和钨同位素:华北地块下地壳形成与再造[J]. 矿物岩石地球化学通报, 24(1):7~16.
- 郑建平,孙敏,路凤香,等. 2005. 信阳基性麻粒岩捕虏体及华南北缘早中生代下地壳性质[J]. 岩石学报, 21(1):91~98.
- 郑建平,余淳梅,刘庆生,等. 2010. 华北深部地壳形成和改造过程:麻粒岩包体研究[C]. 2010年全国岩石学与地球动力学研讨会论文集摘要[C]. 356.
- 支霞臣,彭志成,陈道公,等. 2001. 苏皖地区幔源橄辉岩捕虏体的钨同位素组成、模式年龄及其意义[J]. 岩石学报, 17(1):11~18.
- 钟应先,刘援朝,蔡学林. 1993. 湖南道县玄武岩中壳源麻粒岩包体的初步研究[J]. 成都地质学院学报, 20(1):56~61.
- 周汉文,游振东,钟增球,等. 1994. 云开隆起低压麻粒岩相变质作用时代的重要发现[J]. 地质科技情报, 13(3):23~26.
- 周汉文,游振东,钟增球,等. 1996. 粤西云开前寒武纪基底麻粒岩、紫苏花岗岩放射性元素分布特征与岩石成因讨论[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 21(5):530~535.
- 周新民,于津海,徐夕生. 1992. 女山玄武岩中麻粒岩捕虏体的发现与意义[J]. 科学通报, 37(13):1198~1201.