

苏鲁芝麻坊超镁铁岩的岩石成因:大陆科学 钻探卫星孔(CCSD-PP1)岩心研究

杨经绥¹, 李天福¹, 张仲明¹, 陈松永¹, 张儒媛²

1. 中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室, 北京 100037

2. 美国斯坦福大学地质与环境科学系, 加利福尼亚州 94305

摘要: 苏鲁超高压变质带(UHP)中的芝麻坊超基性岩体是一个不寻常的地幔岩块,由高度亏损的橄榄岩组成,因地幔交代作用而富集REE和LILE.岩体由交替出现的石榴石橄榄岩和不含石榴石橄榄岩层组成.2种类型的岩石具有许多共同的成分特征,并在相同的温压 p - T 条件下形成.岩石记录了数期地质事件,但没有进变质作用的证据.平衡矿物对计算出的 p - T 条件为6~7 GPa.发生在中元古代的部分熔融的差异造成了互层状的2种岩石类型.橄榄岩中锆石²²⁰Ma的U-Pb同位素年龄记录了扬子板块和北中国板块碰撞,但此年龄也许并不代表岩石UHP变质峰期的年龄,而可能记录了俯冲带中地幔楔的碎块从深部折返时的年龄.我们认为石榴石可能不是由于俯冲变质作用形成,有可能是岩石从地幔深部上升过程中从斜方辉石中出溶而成.

关键词: 石榴石橄榄岩;苏鲁;CCSD;超高压变质作用;地幔.

中图分类号: P588.12

文章编号: 1000-2383(2006)04-0437-20

收稿日期: 2006-06-02

Petrogenesis of the Zhi mafang Ultramafic Body in the Sulu Ultrahigh Pressure Metamorphic Belt : CCSD-PP1 Core Study

YANG Jing sui¹, LI Tian fu¹, ZHANG Zhong-ming¹, CHEN Song yong¹, ZHANG Ru yuan²

1. Key Laboratory for Continental Dynamics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Department of Geological and Environmental Sciences, Stanford University CA 94305, USA

Abstract: The Zhi mafang ultramafic body in the Sulu ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt is a block of unusual mantle composed of highly depleted peridotite, which has been enriched in REE and LILE by metasomatism. It consists of inter-layered garnet peridotite and garnet free peridotite, which have many common compositional features and formed under the same p - T conditions. The rocks record several geological events; however, evidence of progressive metamorphism has not been confirmed. Calculated p - T conditions from equilibrium mineral pairs suggest pressures of 6-7 GPa. Partial melting of the sequence in the Mesoproterozoic was probably responsible for the interlayering of the two rock types. A U-Pb zircon age of 220 Ma records the collision between Yangtze and North China blocks, but this age may not represent the time of peak UHP metamorphism. More likely, it records exhumation of the block from the deep portion of the subduction zone. The available data suggest that the garnet was exsolved from enstatite as rocks rose from the deep mantle.

Key words: garnet peridotite; Sulu; CCSD; UHP metamorphism; mantle.

自从柯石英在大别山被发现以来(Xu, 1987; Okay *et al.*, 1989; Wang *et al.*, 1989; Hiraji *et al.*, 1990),大别苏鲁超高压变质带(UHPM)已被公认为世界上保存最完整的超高压变质带之一(Liou and Zhang, 1998; Jahn, 1998).大别苏鲁超高压变质带代表了南部的扬子板块和北部的北中国板

基金项目: 中国大陆科学钻探“973”项目(No. 2003CB716500); 国家自然科学基金重大项目(No. 40399140).

作者简介: 杨经绥(1950-), 男, 研究员, 岩石学专业, E-mail: yangjsui@ccsd.org.cn

块在大约 220 Ma 的碰撞聚合带(Ames *et al.*, 1993; Li *et al.*, 1993; Hacker and Wang, 1995). 对大别苏鲁超高压变质岩石的大量地球化学和同位素地球化学的研究, 结合构造和地球物理调查, 使得对聚合板块边缘的陆壳的俯冲、碰撞和折返过程有了更好的认识和了解(Cong *et al.*, 1992; Liou and Zhang, 1998; Yang *et al.*, 1998). 稳定同位素地球化学的研究提供了超高压变质岩原岩在俯冲和碰撞之前曾经出露地表的重要证据(Rumble and Yui, 1998). 最近在南苏鲁地区东海的超高压变质带的超镁铁岩石和榴辉岩中发现金刚石, 进一步证明大别苏鲁超高压变质岩曾经被俯冲到比大多数超高压变质带更深的地球深部(Xu *et al.*, 2005; 杨经绥等, 未刊资料).

经过十多年的研究, 大别苏鲁超高压变质带已被国际大陆科学钻探项目确定为最理想的开展深钻的地区, 并由中国大陆科学钻探项目(CCSDB)实施(Xu *et al.*, 1998). 大陆科学钻探的主要目的之一是研究地幔岩在俯冲带中的行为及其俯冲与折返的机制.

大别苏鲁超高压变质带中出露有许多超镁铁岩块, 岩块大小从数十米到数千米. 通常认为这些超镁铁岩代表了地幔岩, 它们早先侵位到上地壳, 在大陆碰撞过程中被俯冲到深部, 并在其后的地质事件中被折返到地表(Zhang *et al.*, 1994; Liou and Zhang, 1998; Yang and Jahn, 2000). 另一种解释是这些超镁铁岩代表了地幔楔的碎片, 在地壳俯冲过程中被带入到地幔深部, 又随折返的陆壳带至地表(Zhang *et al.*, 2000). 由于野外出露的岩体孤立且体积较小, 并已高度风化, 所能获取的资料十分有限. 中国大陆科学钻探在大别苏鲁超高压变质带上完成了数个钻孔, 获取了几个连续的新鲜的超镁铁岩石的岩心剖面. 我们研究了这些岩石以确定其原生结构和成分组合、在超高压变质作用过程中以及折返和侵位过程中的反应. 本文提供了中国大陆科学钻探项目的先导孔 PP1 中获取的连续的芝麻坊橄榄岩岩心样品的岩石学研究结果.

1 芝麻坊橄榄岩体的产出

秦岭—大别—苏鲁造山带延伸超过 1 000 km, 宽 200 km, 呈东西向穿越中国东中部地区, 分割了其南部的扬子地块和北部的中朝地块(图 1). 郯庐断裂将秦岭—大别—苏鲁造山带切为 2 部分: 大别造山带在西部, 苏鲁造山带在东部. 每个造山带包括

3 个构造单元: 北部的高级变质混合岩区, 中部的超高压变质岩区和南部的高压变质岩区(Xu *et al.*, 1998). 东海地区(东海是江苏省一县名)位于苏鲁造山带中部的超高压变质岩区(图 1a).

东海地区虽然有十余个超镁铁岩体出露, 但由于露头不好和风化严重, 均缺乏系统研究. 芝麻坊超镁铁岩是一个较大的岩块, 位于东海县城向东约 30 km. 超镁铁岩体呈透镜状产出, 长约 1 000 m, 宽 60~180 m, 厚度约 50~100 m, 其围岩为片麻岩(图 1b). 中国大陆科学钻探项目工程的先导孔(CCSDB-PP1)以及其他的几个先导孔的岩心, 提供了一个十分难得的研究石榴石橄榄岩体连续剖面的机会.

超镁铁岩体与其围岩通常呈明显的构造接触, 围岩多为花岗片麻岩, 少量其他的片麻岩、硬玉石英岩和大理石. 超高压变质带中的一些片麻岩也已经历了超高压变质作用(Wang and Liou, 1991; Okay *et al.*, 1992; Liu *et al.*, 2002). 超镁铁岩在不同的地区有产状和岩性上的明显区别, 但本地区主要存在 2 种类型的超镁铁岩: 一类是由单一的超镁铁岩组成; 另一类是由镁铁岩和超镁铁岩组成的杂岩体. 主要的岩石类型有方辉橄榄岩、二辉橄榄岩、异剥橄榄岩和辉石岩. 石榴石和金云母在超镁铁岩中普遍存在, 但也有含石榴石和不含石榴石的 2 种橄榄岩存在.

中国大陆科学钻探先导孔(PP1)深度为 432 m, 岩心的回收率达 80% 以上. 根据岩性, 可将岩心分为 3 段: 上部为片麻岩、中部为超镁铁岩、下部为片麻岩(图 2a). 上部层序主要由角闪斜长片麻岩、角闪二长片麻岩和黑云母斜长片麻岩组成. 在上部层序的片麻岩中有一个 3 m 厚的榴辉岩体, 在下部层序的片麻岩中有一个 5 m 厚的榴辉岩体. 2 个榴辉岩体与其围岩均呈渐变过渡接触. 榴辉岩主要含有石榴石—绿辉石—多硅白云母—金红石—石英, 在石榴石中发现柯石英包体(未发表资料). 在片麻岩中还有一些薄层(0.5~1 m)片岩, 与片麻岩呈整合接触关系. 这些片岩为多硅白云母石英片岩和绿帘石角闪石片岩, 其中蓝晶石也较常见.

中段的超镁铁岩体出露在深度 137.82~256.37 m 之间, 总厚度 118.55 m, 其中包括 7 m 厚的片麻岩层. 岩心提供了超镁铁岩体的几乎连续的层序剖面, 并保存了不同岩性的接触带. 超镁铁岩体上部与片麻岩之间为断层接触, 接触带附近的岩石也遭受了强烈的剪切和形变. 虽然超镁铁岩体沿接触带有强烈的蛇纹石化, 但往超镁铁岩体内部, 岩石

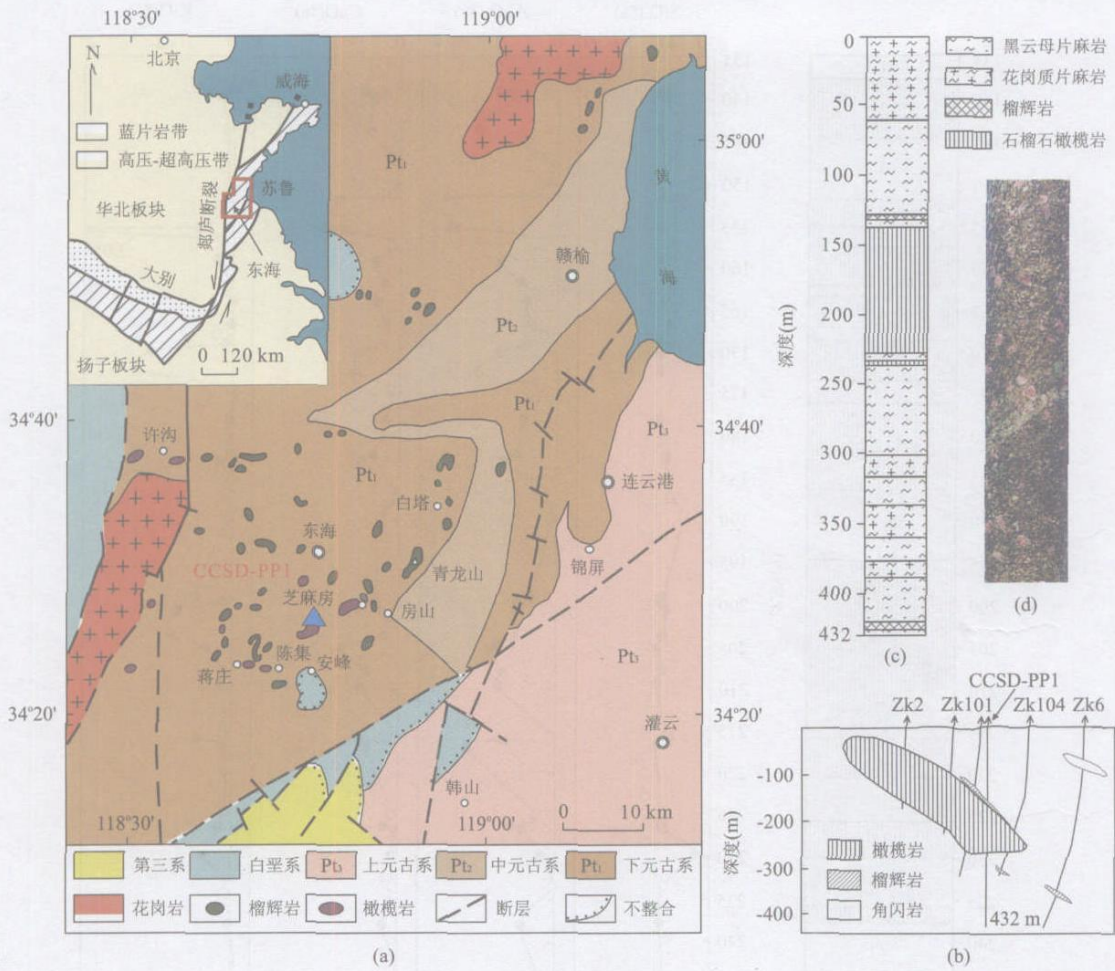


图 1 南苏鲁地区简化地质图(a);芝麻坊超镁铁岩体和中國大陸科学钻探CCSD-PP1钻孔位置(b);PP1钻孔主要岩性单元的简化柱状图(c);石榴石橄榄岩的岩芯照片(d)

Fig. 1 A simplified geological map of the southern Sulu region (a); profile of the Zhi mafang ultramafic body and location of the PP1 drill hole of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) (b); a simplified column of the main lithological units of the PP1 (c); and a photograph of the garnet peridotite core (d)

则逐渐新鲜.在超镁铁岩体底部靠近边界有5 m厚的片麻岩和2 m厚的金云母岩脉.与超镁铁岩体的上部接触带相似,超镁铁岩体的下部与片麻岩也是断层接触,但有可能在构造侵位期间或之后受到影响使得接触界线变得不清楚.

超镁铁岩体可以进一步分为石榴石(Grt)橄榄岩(矿物符号采用Kretz, 1983)和不含石榴石(GF)橄榄岩.2种不同类型的超镁铁岩呈互层状产出,层之间为渐变关系.超镁铁岩岩石显示微弱的蛇纹石化现象,石榴石橄榄岩和不含石榴石的橄榄岩之间的渐变关系保存良好,通常过渡带的宽度为几cm.每一单层岩性描述见表1.

2 岩相学特征

不同类型的石榴石橄榄岩和不含石榴石橄榄岩的区别主要是根据其矿物学,尤其是根据单斜辉石和斜方辉石的相对丰度.本文中的岩石名称我们采用了Streckeisen(1976)的命名法.岩石超过90%的蛇纹石化命名为蛇纹岩.

2.1 石榴石橄榄岩

石榴石橄榄岩包括石榴石方辉橄榄岩和石榴石二辉橄榄岩,由不同数量的橄榄石、顽火辉石、透辉石、石榴石和金云母组成.一些层中产有少量的钛斜硅镁石(Ti-Chu)、铬铁矿、碳酸岩和磷灰石.岩石有不同程度叶理化,一些矿物尤其是金云母,具有清楚的

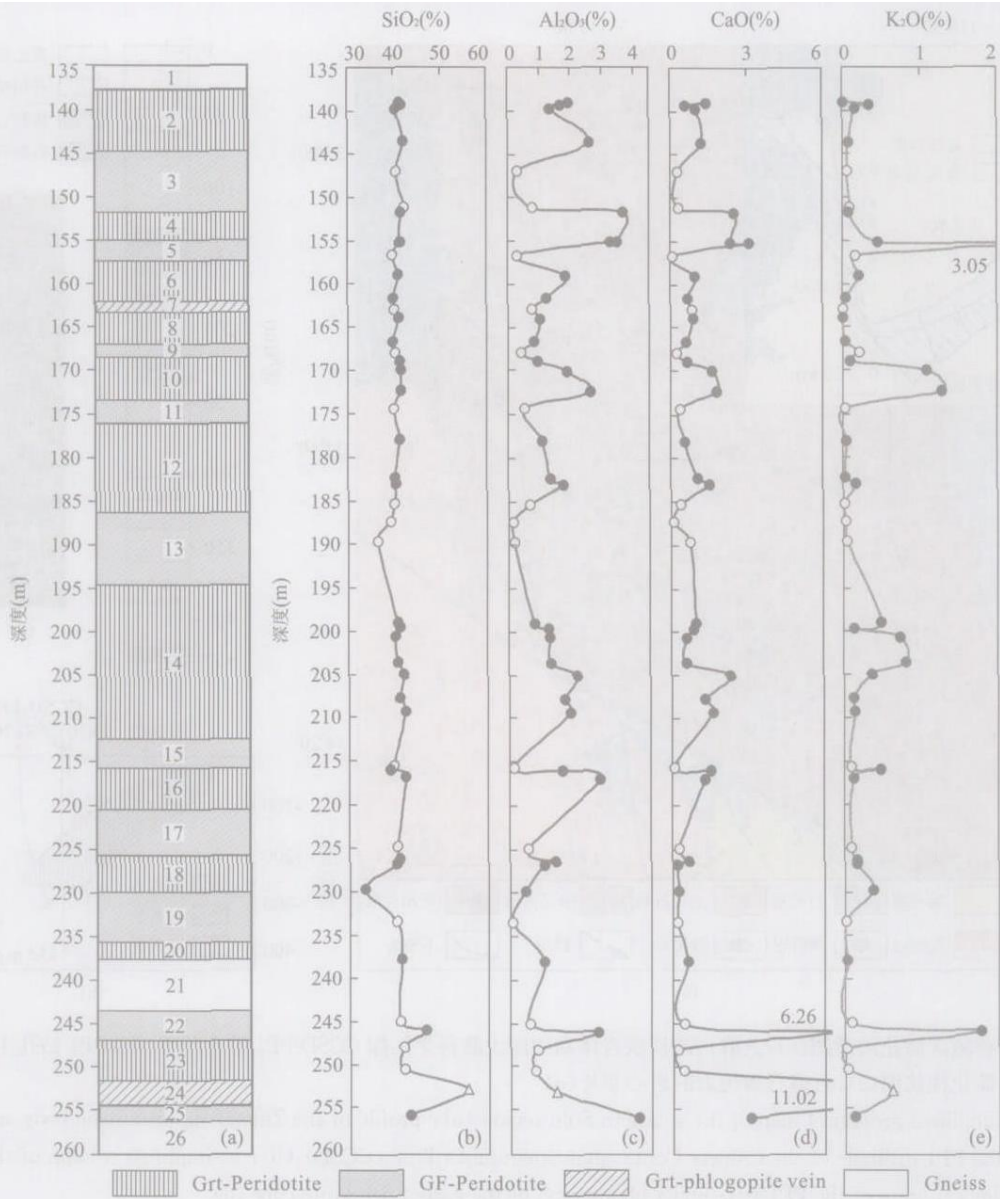


图 2 PP1 钻孔超镁铁岩石柱状图(a);成分剖面中SiO₂、Al₂O₃、CaO 和 K₂O 含量随岩石类型的变化(b-e)

Fig. 2 Column of the ultramafic section in the PP1 drill hole (a); SiO₂, Al₂O₃, CaO and K₂O content variation with rock types in compositional profiles (b-e)

定向构造,但岩石变形的程度随岩石不同而不同.

石榴石二辉橄榄岩和石榴石方辉橄榄岩(例如: C 24-141-59, C 25-143-61, C 28-145-65, C 47-165-92, C 21-134-55, C 25-141-60, C 27-144-63, C 34-151-74)通常具有变斑晶、等粒结构和镶嵌结构,颗粒之间具有典型的三联点(120°)结构(图 3a).岩石由 5%~15%的石榴石、70%~80%的橄榄石、5%~8%的斜方辉石、2%~6%的单斜辉石、3%~5%的金云母和 1%~2%的铬铁矿组成.

石榴石变斑晶占这些岩石体积的 5%~10%.

虽然斑晶直径大多小于 10 mm,但大的斑晶直径可达 20 mm.石榴石变斑晶产在相对细粒(<2 mm)的由橄榄石(Ol)、顽火辉石(En)、透辉石(Di)、石榴石(Grt)和金云母(Phl)组成的基质中.单个晶体通常呈半自形,其边部常呈弯曲和不规则状(图 3b).很多石榴石含有矿物包裹体,如橄榄石和斜方辉石,或它们的蚀变产物,表明这些变斑晶晚于这些基质矿物.石榴石变斑晶具边缘环带,环带由角闪石+铬尖晶石(或富铬磁铁矿)、含金云母或不含金云母组成.

一些颗粒则完全被绿泥石+方解石或绿泥石、云母

表 1 CCSD-PP1 钻孔岩心的岩性单元

Table 1 Lithological units in the PP1 drill hole

单元 编号	岩石名称	样品		单元	
		编号	深度(m)	深度(m)	厚度(m)
1	片麻岩	C 20-129-51	137.82		
1	基性岩	C 20-130-52	138.50	138.75	
2	石榴石方辉橄榄岩	C 21-132-53	139.00		6.54
2	石榴石方辉橄榄岩	C 21-133-54	139.30		6.54
2	石榴石方辉橄榄岩	C 21-134-55	139.75		6.54
2	石榴石二辉橄榄岩	C 22-135-56	143.57	145.29	6.54
3	方辉橄榄岩	C 23-136-57	147.00		
3	方辉橄榄岩	C 23-139-58	151.14	151.44	
4	石榴石方辉橄榄岩	C 24-141-59	151.74		3.58
4	石榴石方辉橄榄岩	C 25-141-60	155.16		3.58
4	石榴石方辉橄榄岩	C 25-143-61	155.16	155.02	3.58
5	纯橄岩	C 26-143-62	156.68	157.84	2.82
6	石榴石方辉橄榄岩	C 27-144-63	159.00		9.49
6	石榴石方辉橄榄岩	C 27-144-64	161.65	162.3	9.49
7	石榴石金云母脉	C 28-145-65	162.95	163.52	1.22
8	石榴石方辉橄榄岩	C 30-146-66	164.00		3.83
8	石榴石方辉橄榄岩	C 30-146-67	166.65	167.35	3.83
9	纯橄岩	C 31-147-68	168.00		8.8
9	二辉橄榄岩	C 31-148-69	169.00		8.8
9	二辉橄榄岩	C 31-149-70	170.05		8.8
9	二辉橄榄岩	C 32-149-71	172.37		8.8
9	方辉橄榄岩	C 33-150-72	174.30	176.15	8.8
10	石榴石方辉橄榄岩	C 34-150-73	178.00		9
10	石榴石方辉橄榄岩	C 34-151-74	182.27		9
10	石榴石方辉橄榄岩	C 35-152-75	183.00	185.15	9
11	二辉橄榄岩	C 35-153-76	185.30		14.15
11	纯橄岩	C 36-153-77	187.30		14.15
11	方辉橄榄岩	C 37-154-78	189.60		14.15
11	方辉橄榄岩	C 38-156-79	199.00	199.3	14.15
12	石榴石方辉橄榄岩	C 38-157-80	199.60		2.6
12	石榴石方辉橄榄岩	C 39-157-81	200.60	202.1	2.6
13	方辉橄榄岩	C 40-158-82	203.60	204.3	2.2
14	石榴石方辉橄榄岩	C 41-159-83	205.00		7.9
14	石榴石方辉橄榄岩	C 42-159-84	207.75		7.9
14	石榴石方辉橄榄岩	C 43-160-85	209.35	212.2	7.9
15	纯橄岩	C 45-163-86	215.64	215.82	3.62
16	石榴石二辉橄榄岩	C 46-164-87	216.00		5.08
16	石榴石二辉橄榄岩	C 46-164-89	216.94	220.9	5.08
17	方辉橄榄岩	C 47-165-90	224.86	225.56	4.66
18	石榴石方辉橄榄岩	C 48-166-91	226.27		2.71
18	石榴石方辉橄榄岩	C 49-166-92	226.77	228.27	2.71
19	方辉橄榄岩	C 50-166-93	229.77		7.33
19	方辉橄榄岩	C 51-167-94	233.40	235.6	7.33
20	石榴石方辉橄榄岩	C 52-169-95	237.81	238.16	2.56
21	片麻岩	C 53-169-96	238.51		7.9
21	片麻岩	C 54-171-97	242.00	243.5	7.9
22	方辉橄榄岩	C 55-172-98	245.00		3.5
22	方辉橄榄岩	C 55-173-99	246.00	247	3.5
23	石榴石方辉橄榄岩	C 55-175-100	248.00		4.78
23	石榴石方辉橄榄岩	C 55-176-101	250.56	251.78	4.78
24	金云母脉	C 56-176-102	253.00	254.5	2.72
25	石榴石方辉橄榄岩	C 56-177-103	256.00	256	1.5
26	片麻岩				124.64

共 26 个单元,其中石榴石橄榄岩 13 个单元,60.79 m,单个单元厚度 1.2~9.5 m;不含石榴石橄榄岩共 10 个单元,55.95 m,单个单元厚度 2.2~14.2 m.

和不透明微粒(铬铁矿)所替代.

小颗粒的石榴石(~1 mm)在基质中也很常见,但含量少于橄榄石和辉石.基质中的石榴石几乎均呈自形至圆粒状散布于岩石中.一个重要的现象是这些小颗粒的石榴石总是与顽火辉石伴生,甚至很小的颗粒也不例外(图 3a, 3c).类似于变斑晶,基质中的石榴石也包含顽火辉石、橄榄石和铬铁矿矿物包裹体(图 3d),有时其周围伴随一些含水矿物,如角闪石和金云母.小石榴石与 Ol 和 Opx 有时有微弱定向排列,表明它们产于一个高应力的生成环境.

这些超镁铁岩的主要矿物橄榄石多呈粒状至板状,1~2 mm 大小,与共生的顽火辉石或有时与基质中的石榴石呈平衡结构.橄榄石中含有一些典型的铁钛矿出溶晶片,一些橄榄石呈包裹体产在石榴石中.一些小蛇纹石充填于橄榄石的微小裂隙中.

顽火辉石和透辉石的直径为 0.3~1.5 mm,多数小于 1 mm.标本中的新鲜透辉石呈浅绿色,在退变质和受交代作用下成透闪石和铬铁矿.透辉石中常见钛斜硅镁石、钛粒硅镁石(许志琴等,2003)和金云母的出溶晶片.顽火辉石十分新鲜,或部分被滑石交代.一些顽火辉石颗粒包含透辉石和铬铁矿的出溶晶片.

金云母呈小片产出,大小(0.1~0.2)mm × (0.5~1)mm.细小的钛斜硅镁石(0.1~0.2 mm)局部包含在橄榄石和辉石晶体中.菱镁矿或白云石的小集合体产于基质中.铬铁矿的微小晶体作为包体存在于石榴石和基质中.也可见一些相对大的透辉石晶体,通常含有顽火辉石的出溶晶片.

一般来讲,方辉橄榄岩、异剥橄榄岩和纯橄岩与石榴石二辉橄榄岩在结构上相似,但在矿物成分比例上不同.方辉橄榄岩含有<5%的透辉石,纯橄岩则由橄榄石和小于<10%的金云母、石榴石和辉石组成.在一些叶理化的方辉橄榄岩和异剥橄榄岩中,所有的矿物,包括橄榄石、透辉石、顽火辉石和金云母,都有拉伸和定向的现象,矿物颗粒长宽比为 2:1~6:1.

2.2 不含石榴石橄榄岩

不含石榴石橄榄岩(例如:C 38-156-79,C 45-163-86,C 50-166-93)有方辉橄榄岩、纯橄岩和异剥橄榄岩,它们均含有较高的含量不等的铬铁矿.岩石的特征为典型的等粒状结构,少有叶理状构造,无斑状变晶和蛇纹石化较弱(图 3e-3h).岩石含有橄榄石 80%~90%、斜方辉石 10%~20%、单斜辉石 1%~3%、金云母 3%~5%和铬铁矿 2%~3%.橄榄石颗粒为 1~2 mm 大小,具典型的三联点(120°)结构.

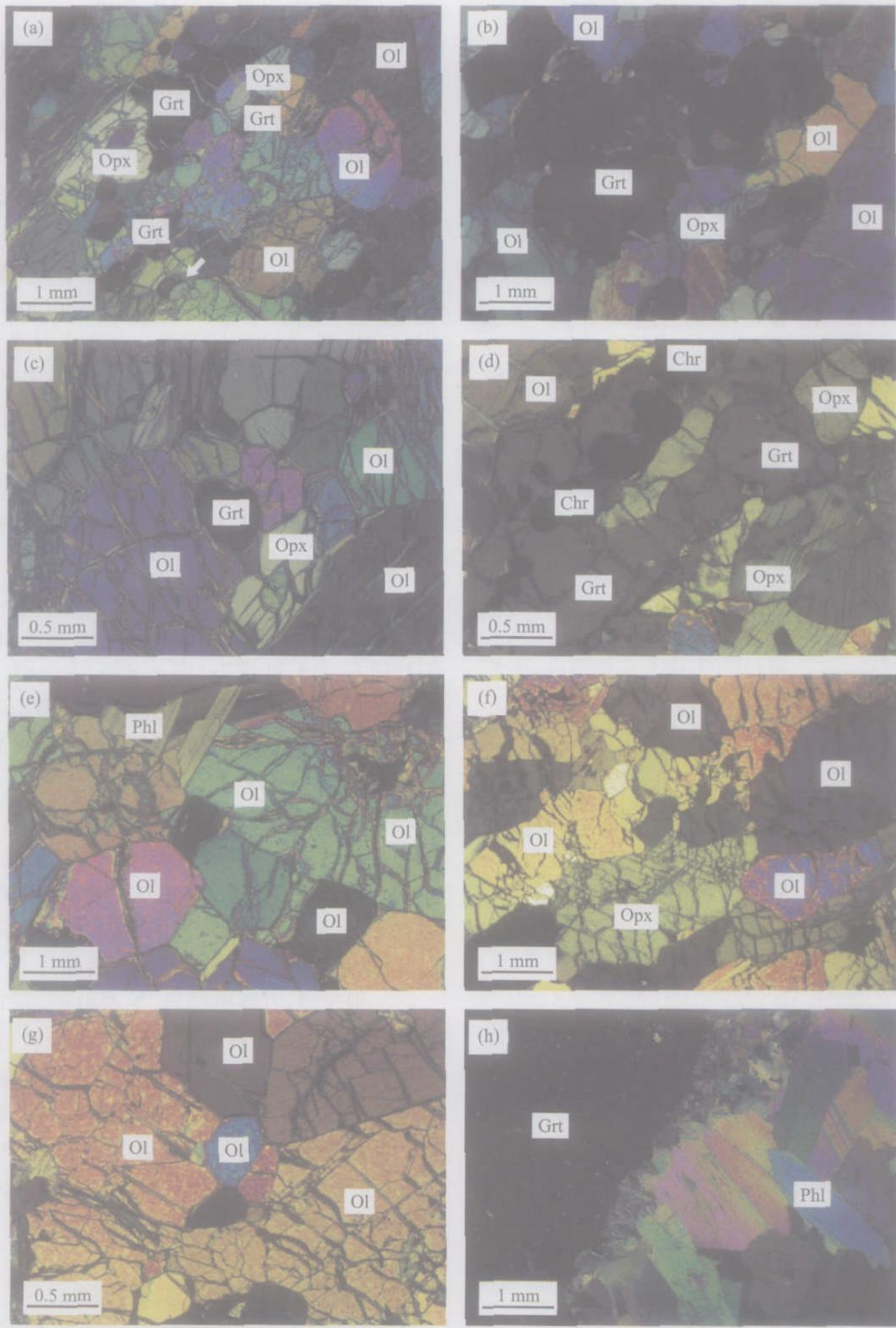


图 3 石榴石橄榄岩和不含石榴石橄榄岩的显微照片

Fig. 3 Microphotographs of garnet peridotite and garnet free peridotite

a. 石榴石方辉橄榄岩(C 21-134-55):等粒结构,石榴石在空间上与Opx 伴生,甚至很小的颗粒(见箭头);b. 石榴石方辉橄榄岩(C 34-151-74):石榴石变斑晶中橄榄石包体;c. 石榴石方辉橄榄岩(C 27-144-63):小颗粒的Grt、Opx 和Ol 作为粗粒Ol 之间的空隙充填物;d. 石榴石方辉橄榄岩(C 25-141-60):空间伴生的Grt、Opx 和铬铁矿e. 纯橄岩(C 31-147-68):无形变的等粒结构f. 方辉橄榄岩(C 37-154-78):粗粒Ol 和Opx 的嵌晶结构和弱定向g. 纯橄岩(C 36-153-77):粗粒Ol 间充填的小Ol h. 石榴石金云母片(C 28-145-65):变斑晶石榴石和金云母片是岩石中仅有的矿物,石榴石有蚀变边

方辉橄榄岩含有平均 10% 的斜方辉石和 1%~3% 的透辉石。斜方辉石以与橄榄石粗晶平衡的大颗粒产出,或以细粒状与小颗粒的橄榄石和透辉石伴生充填在大晶体之间(图 3)。多数透辉石呈小颗粒充填状产出,但也有少数大晶体并有顽火辉石的出溶晶片。未见斜方辉石中有透辉石的出溶晶片。多数透辉石具有相同的成分,平均 $Wo = 47 \sim 48$, $En = 50 \sim 51$, $Fs = 1.5 \sim 2.7$,但也观察到不同的成分(见下文矿物化学节)。金云母在岩石中也有不同的颗粒大小。小颗粒的金云母与其他矿物保持均衡,而大颗粒(直径达 10 mm)金云母则常常切穿其他矿物或呈假斑晶产出。结构关系表明至少有 2 期的金云母产出,早期的金云母伴随 $Ol + Opx + Cpx$ 结晶,晚期的金云母伴随含水矿物结晶,可能与地幔中的交代作用有关。小颗粒的铬铁矿($< 0.5 \text{ mm}$)呈自形晶普遍存在,或充填在其他矿物之间,或作为包裹体存在于橄榄石和斜方辉石中。

新鲜的纯橄岩(例如:样品 C 31-147-68, C 36-153-77, C 45-163-86)含有橄榄石 $> 90\%$ 、金云母 $\sim 5\%$ 和铬铁矿 $\sim 3\%$,呈等粒结构。橄榄石和金云母的粒度为 $1.3 \sim 4 \text{ mm}$ 。铬铁矿粒度较小, $0.1 \sim 0.6 \text{ mm}$,作为橄榄石中的包裹体或粒间充填物。样品 C 45-163-86 仅含有 $\sim 1\%$ 的铬铁矿,极少量的透辉石和少量次生碳酸岩。样品 C 38-156-79 为不含石榴石的方辉橄榄岩,含有橄榄石、顽火辉石、透辉石和金云母、少量菱镁矿和一些钛斜硅镁石及小颗粒($0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$)的铬铁矿。

2.3 含菱镁矿和钛斜硅镁石的橄榄岩

含菱镁矿的橄榄岩(C 41-159-83, C 49-166-92)中的菱镁矿可达 $\sim 5\%$,并含少量金云母($3\% \sim 10\%$)。菱镁矿在岩石中或呈大斑晶($3.5 \sim 15 \text{ mm}$)或作为基质的小颗粒($< 1 \text{ mm}$)存在。局部见有菱镁矿细脉存在。大多数的菱镁矿颗粒边缘有细粒的白云石土方解石集合体的环带。钛斜硅镁石作为包裹体存在于橄榄石和辉石中的少见,多数存在于基质中。

在芝麻坊橄榄岩体中,大多数钛斜硅镁石作为包裹体存在于橄榄石和辉石中,但也有一些大晶体出现,例如:C 49-166-92,该样品包含 Ol 、 Di 、 En 和钛斜硅镁石。另外,少量的钛斜硅镁石也出现在一条主要含 $Mgs + Phl$ 的脉岩中。样品中的钛斜硅镁石大多数颗粒在 $0.2 \sim 1.5 \text{ mm}$ 之间,但粗粒的钛斜硅镁石伴随绿泥石出现在脉岩中。没有见到石榴石残留体,圆形集合体的绿泥石有可能是石榴石假象。

3 全岩地球化学成分

对 25 个样品的石榴石橄榄岩和 16 个不含石榴石橄榄岩进行了全岩地球化学分析(李天福等, 2006)。它们的主要特点如下:

石榴石橄榄岩和不含石榴石橄榄岩都是镁质超镁铁岩,它们有相同的镁值 $Mg^{\#} = [100 Mg / (Mg + Fe)]$,多数 $90 \sim 92$,平均 91 。主元素显示规律性变化,尤其是 Al_2O_3 、 CaO 、 SiO_2 和 MgO (图 4)。在 Al_2O_3 、 CaO 和 SiO_2 与 $MgO + \langle FeO \rangle$ 的变异图及与 Cr_2O_3 的变异图中 2 种岩石显示负相关变化趋势, NiO 和 $\langle FeO \rangle$ 变化区间很小,但 K_2O 显示随机和较宽范围的变化。

虽然 2 种类型的岩石主元素成分的变化在图 4 中有明显的重叠,但石榴石橄榄岩比不含石榴石橄榄岩具有较高的 Al_2O_3 (多数 $> 1\%$)、 CaO (多数 $0.6\% \sim 1.6\%$)、 SiO_2 和较低的 MgO ($40\% \sim 45\%$),而不含石榴石的橄榄岩则 $Al_2O_3 < 1\%$, $CaO < 0.4\%$ 和 $MgO 45\% \sim 47\%$ (图 4)。另外,尽管石榴石橄榄岩和不含石榴石橄榄岩有相同丰度的 Cr 、 Ni 和 Ti ,但石榴石橄榄岩比不含石榴石橄榄岩有较高丰度的 Sc 、 Ba 、 Sr 和 V 。石榴石橄榄岩中 $Mg^{\#}$ 值 ($90.3 \sim 92.2$) 稍低于不含石榴石橄榄岩 ($91.2 \sim 92.7$),但两者均属于亏损型上地幔。

石榴石橄榄岩和不含石榴石橄榄岩具有相同的球粒陨石标准化 REE 模式,表现为 LREE 轻微富集(图 4, 4)。石榴石橄榄岩的 $[La/Yb]_N$ 球粒陨石标准化比值为 $2.8 \sim 8.9$ (平均 7.0),与不含石榴石橄榄岩的比值区间 ($2.8 \sim 10.9$, 平均 7.1) 相似。两者的 $[Tb/Yb]_N$ 比值都大于 1,石榴石橄榄岩的平均值为 2.23 ,不含石榴石橄榄岩的平均值为 1.79 ,表明石榴石不是残余相。实验数据表明高温的 Al_2O_3 在斜方辉石中稳定,随着温度的降低,将出溶石榴石而产生新的相。南非的高温方辉橄榄岩中已经观察到斜方辉石和石榴石从斜方辉石中出溶的现象(Cox *et al.*, 1987)。在其他造山带中也观察到此种现象(Obata and Morten, 1987)。在芝麻坊橄榄岩体的斜方辉石中,低含量的 Al_2O_3 ($< 0.3\%$)、 CaO ($< 0.15\%$) 和高组分的 En (达 96) 很可能反映石榴石和单斜辉石从早期的高温斜方辉石中出溶。未在这些矿物中见到出溶结构,可能被后期重结晶作用、变质作用和变形作用叠加所致。岩石地球化学成分和矿物学特征表明,芝麻坊橄榄岩代表了一种

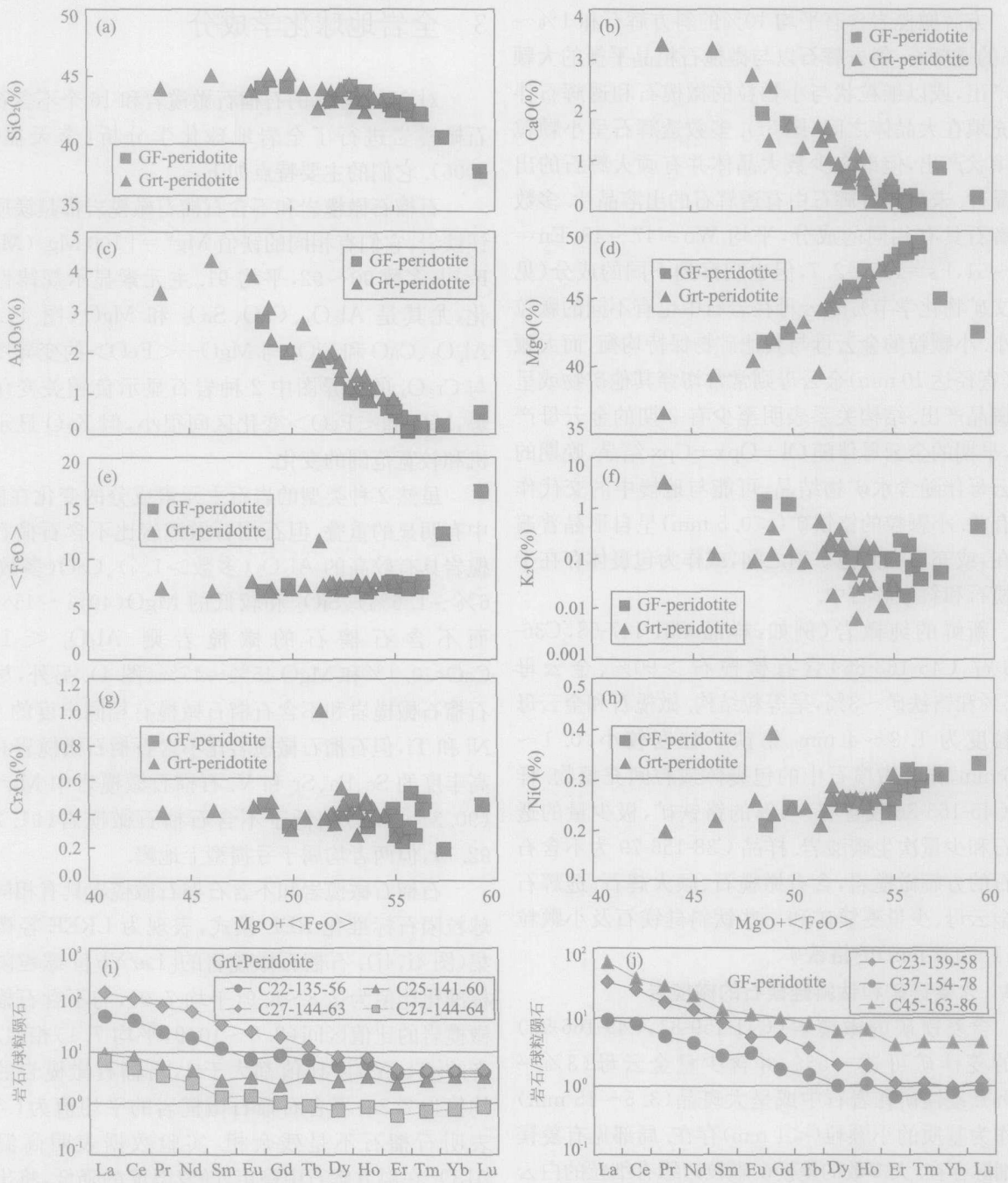


图 4 K₂O、Al₂O₃、MgO、NiO、FeO、Cr₂O₃、SiO₂ 与 MgO + <FeO> 的变异图 (a-h), 石榴石橄榄岩较不含石榴石橄榄岩有相对高的 Al₂O₃、CaO、SiO₂ 和低的 MgO 以及含量相同的 Cr₂O₃ 和 NiO; 2 种岩石均显示球粒状陨石标准化 LREE 富集模式, 但石榴石橄榄岩的 REE 丰度要高于不含石榴石橄榄岩 (i-j)

Fig. 4 K₂O, Al₂O₃, MgO, NiO, FeO, Cr₂O₃, SiO₂ vs. MgO + <FeO> diagrams (a-h) clearly separate Grt peridotite from GF peridotite by higher Al₂O₃, CaO and SiO₂, and lower MgO, and similar contents of Cr₂O₃ and NiO; both show chondrite normalized LREE enriched patterns, but the REE abundance of Grt peridotite are higher than that of GF peridotite (i-j)

方辉橄榄岩型的亏损地幔岩块, 即斜方辉石和橄榄石曾经是岩石中仅有的原生硅酸岩矿物。随机和高含量的 K₂O 和 LREE 富集的特征与亏损地幔特征的不一致, 则可能与地幔交代作用有关 (李天福等, 2006)。

4 矿物成分

上述芝麻坊橄榄岩中矿物学和结构特征表明该岩石有一个复杂的成岩历史,矿物的生长至少经历了3个阶段:(I)大多数等粒状的矿物,如Ol、Opx、Cpx和Grt,和(或)斑晶状Grt;(II)角闪岩相的退变质矿物;(III)绿泥石相的叠加矿物.另外有一些橄榄石和铬铁矿包裹体出现在其他矿物中证明有更早期的矿物生成,而一些细粒的金云母则说明有早期的地幔交代作用.

矿物成分分析主要用斯坦福大学JEOL super-probe 733电子探针完成,部分分析在中国科学院地质和地球物理研究所完成.全铁写作FeO,角闪石中Fe³⁺含量估算方法是根据Schumacher(1991),在铬铁矿中的计算方法是用电价平衡法,假设正离子=3.芝麻坊橄榄岩体中代表性矿物成分组合见表2-表5.

4.1 橄榄石

石榴石橄榄岩中的33个橄榄石样品和不含石榴石橄榄岩中的8个橄榄石样品的分析结果见表2.橄榄石中总的Fo端元成分从89~93(多数91~93);相对来说,不含石榴石橄榄岩中的Fo含量较高(92~93),但其SiO₂含量较低(<41%);石榴石橄榄岩中Fo的含量(91~93)(图5).大多数颗粒成分均匀,橄榄石通常具有较窄的Fo端元成分区间(Fo 91.4~91.9).一些不含石榴石橄榄岩显示轻微的反环带(例如样品C 21-147-68-1)颗粒核心Fo成分为Fo 92.2,边部为Fo 92.8;样品C 21-147-68-4颗粒核心Fo成分为Fo 92.5,边部为Fo 92.7(表2).这些变化可能与地幔中的交代作用有关.2种橄榄岩的橄榄石中钛铁矿的出溶片晶表明原生橄榄石含少量TiO₂,0.01%~0.09%.不含石榴石橄榄岩中的次生橄榄石产在钛斜硅镁石的边部,比原生橄榄石含有较多的铁(Fo 89).许多橄榄石颗粒含有NiO 0.3%~0.4%,高可达0.6%.矿物成分变化可能与其不同生长阶段的重结晶作用叠加有关,而原生矿物成分也许并没有不同.

4.2 辉石

2种橄榄岩均含有丰度较高的顽火辉石(平均10%),透辉石的丰度体积分数为(1%~5%).从石榴石橄榄岩中获得26个透辉石(Cpx)分析,55个顽火辉石(Opx)分析;从不含石榴石橄榄岩中获得5个Cpx和9个Opx.分析结果见表3.

石榴石橄榄岩中的透辉石含有较高的Mg[#]=(Mg/(Mg+Fe)),0.93~0.95,相当数量的Cr₂O₃

(0.38%~2.09%,多数1%~2%)和变化的Al₂O₃(0.2%~2.3%),Na₂O(0.5%~2.5%).由于Na₂O含量在Cpx中是压力敏感参数,用其和其他重要元素进行对比作图(图6).图中显示Na₂O含量与Al₂O₃和Cr₂O₃呈正相关,而与CaO和MgO的含量呈负相关,与SiO₂没有线性相关关系.在Cpx中,区分出2组数据:(1)Na₂O>1.5%;(2)Na₂O<1%.高Na₂O的Cpx也含有高Al₂O₃(1%~2.3%)和Cr₂O₃(多数>1.2),但具有低含量的MgO(11~16.5)和CaO(20~22.5).这种Cpx在橄榄石中形成较粗的颗粒,也有小颗粒的Cpx作为包裹体存在于橄榄石中.一些Cpx颗粒从核心到边缘显示环带状的成分特征,例如样品C 30-164-87-7,Na₂O的含量变化从2.42%~2.32%;Al₂O₃的含量变化从2.29%~2.18%;Cr₂O₃的含量变化从1.80%~1.88%;SiO₂的含量变化从53.95%~51.66%,表明压力递减的变化趋势.

Na₂O含量低的Cpx以低Al₂O₃(0.2%~0.8%)、低Cr₂O₃(0.3%~0.7%)、高MgO(17%~17.8%)和高CaO(23.7%~24.6%)为特征(图6).这些变化见于在低温条件下重结晶的小充填颗粒.斜方辉石都属于顽火辉石(En 92~93),但具有不同含量的MgO(33.3%~37.5%)和SiO₂(56.7%~60.2%).它们仅含有痕量的Cr₂O₃(0%~0.1%,仅有一例达到0.3%)和Al₂O₃(0%~0.3%).一些顽火辉石颗粒从核部到边部有微弱的成分环带,例如样品C 30-164-87-6,具有SiO₂从57.7%~58.4%,Al₂O₃从0.1%~0.19%,Cr₂O₃从0.07%~0.13%.橄榄岩中的Opx具有低含量的Al₂O₃被认为是形成于高压条件下.虽然测试的样品有限,但顽火辉石在2种橄榄岩中成分变化的区间是相同的.

4.3 石榴石

分析了73个石榴石样品,其成分变化见表4,所有成分的变异图见图7.端元组分的计算顺序为钙铬榴石、钙铁榴石、钙铝榴石、镁铝榴石、锰铝榴石和铁铝榴石.石榴石在异剥橄榄岩和方辉橄榄岩均为含铬镁铝榴石(Ura₄₋₁₂Prp₆₂₋₇₃Alm₁₄₋₂₄Grs₁₋₁₀Sps₀₋₂).石榴石中Cr₂O₃含量(1.28%~4.23%),因样品而变化.与岩相学特征相一致,石榴石可分为2个成分组.早期形成的石榴石主要是等粒状和大颗粒的核部,Cr₂O₃含量较高,可达~4%.变斑晶的石榴石主要含Cr₂O₃较低,最大值仅有2%,但Al₂O₃(21~24),SiO₂(42~43)和MgO(19~21)的

表 2 芝麻坊橄榄岩中橄榄石的代表性化学成分
Table 2 Representatives of olivine in the Zhimafang peridotite

岩石 样号	石榴石橄榄岩														不含石榴石橄榄岩						
	c34-151-74							c34-150-73							c46-164-87				c31-147-68		
	2-4	2-5	6-10	7-3	8-5	2-4	3-8	10	14	19	2-3c	2-4r	3-1	1-1c	1-2r	3c	3-2r	4-1c	4-2r		
SiO ₂	41.62	41.56	41.08	41.43	41.37	41.71	41.00	41.24	41.33	41.14	41.36	41.01	40.91	40.44	40.80	40.05	40.57	40.34	40.73		
TiO ₂	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.04	0.05	0.02	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00		
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01		
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.32	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00		
FeO	8.86	8.62	8.59	8.52	8.66	8.12	8.31	9.19	8.77	8.76	6.67	6.74	6.63	7.74	7.15	7.64	7.62	7.41	7.13		
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.15	0.07	0.07		
MgO	49.80	50.17	50.11	50.31	50.38	50.38	49.75	49.85	49.44	49.70	50.91	51.45	51.00	51.64	51.49	51.42	51.10	51.61	51.18		
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.59	0.61	0.44	0.50	0.40	0.38	0.44	0.40		
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.05	0.02	0.01	0.01	0.00		
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03	0.04		
NaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Total	100.28	100.35	99.94	100.26	100.41	100.20	99.06	100.28	99.54	99.60	99.89	100.15	99.35	100.31	100.05	99.69	99.87	100.29	99.56		
Si	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	0.99	1.00	0.98	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99		
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00		
Fe	0.18	0.17	0.17	0.17	0.18	0.16	0.17	0.19	0.18	0.18	0.14	0.14	0.14	0.16	0.15	0.16	0.16	0.15	0.15		
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Mn	1.80	1.81	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82	1.81	1.80	1.81	1.84	1.86	1.85	1.87	1.86	1.87	1.86	1.87	1.86		
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Fo	90.93	91.22	91.23	91.33	91.21	91.71	91.43	90.63	90.95	91.00	93.18	93.16	93.21	92.27	92.83	92.23	92.15	92.51	92.69		
Fa	9.07	8.78	8.77	8.67	8.79	8.29	8.57	9.37	9.05	9.00	6.85	6.84	6.79	7.76	7.23	7.69	7.71	7.45	7.24		

c 表示 core, 核部; r 表示 rim, 边部。

表 3 芝麻坊超镁铁岩体中石榴石橄榄岩和不含石榴石橄榄岩中代表性的辉石化学成分

Table 3 Representatives of pyroxenes in Grt- and GF-peridotite from the Zhimafang ultramafic body

岩石 样号	Grt-perid C38-157- 80Cpx	Grt-perid c30-164- 87Cpx	Grt-perid C21-132- 53Opx	Grt-perid C27-144- 63Opx	Grt-perid c30-164- 87Opx	Grt-perid c30-164- 87Opx	Grt-perid C47-165- 90Cpx	Grt-perid C47-165- 90Cpx	Grt-perid C47-165- 90Cpx	Grt-perid C51-167- 94Cpx	Grt-perid C47-165- 90Opx	Grt-perid C47-165- 90Opx	Grt-perid c51-167- 94Opx	Grt-perid C51-167- 95Opx
点位	/2-1	2-2(inol)	7-1(core)	7-2(rim)	/2-1	/5-1	6-1(core)	6-2(rim)	54.73	54.97	55.57	58.13	58.47	58.85
SiO ₂	54.21	53.98	53.95	51.66	58.87	56.68	57.68	58.38	54.64	54.73	54.97	55.57	58.13	58.32
Al ₂ O ₃	0.25	1.48	2.29	2.18	0.18	0.18	0.10	0.19	1.49	1.45	1.37	0.50	0.08	0.02
Na ₂ O	0.50	1.71	2.42	2.33	0.02	0.01	0.04	0.04	2.38	1.58	2.11	0.85	0.01	0.02
TiO ₂	0.07	0.01	0.07	0.06	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.34	1.21	1.80	1.88	0.00	0.07	0.07	0.13	2.04	1.25	2.09	0.83	0.07	0.11
Fe ₂ O ₃	2.35				0.00	0.00								1.84
FeO	0.00	2.55	2.60	5.35	5.29	4.58	4.12	4.14	2.27	2.08	2.25	1.74	4.86	4.67
MnO	0.06	0.22	0.00	0.00	0.16	0.14	0.04	0.01	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08	0.16
MgO	17.80	16.16	15.21	15.44	35.55	37.14	36.92	36.64	15.62	16.18	15.42	17.14	36.89	37.32
CaO	24.60	21.87	20.78	20.80	0.10	0.11	0.07	0.06	21.08	21.99	21.01	24.03	0.08	0.05
K ₂ O	0.01	0.00	0.03	0.04	0.00	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03
Total	100.24	99.78	99.72	100.49	100.23	99.01	99.44	99.85	99.57	99.32	99.31	100.80	100.30	100.69
Si	1.96	1.97	1.96	1.89	2.01	1.95	1.98	1.99	1.99	2.00	2.01	2.00	1.98	1.98
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	0.01	0.06	0.10	0.09	0.00	0.00	0.00	0.01	0.06	0.04	0.06	0.02	0.00	0.00
Al	0.01	0.03	0.05	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00	0.06	0.06	0.06	0.02	0.01	0.00
Fe ²⁺	0.06	0.08	0.08	0.16	0.15	0.13	0.12	0.12	0.07	0.06	0.07	0.05	0.14	0.13
Mn	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Mg	0.96	0.88	0.82	0.84	1.81	1.90	1.89	1.86	0.85	0.88	0.84	0.92	1.88	1.89
Ca	0.95	0.85	0.81	0.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.82	0.86	0.82	0.93	0.00	0.00
Na	0.04	0.12	0.17	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.11	0.15	0.06	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
En	0.49	0.49	0.48	0.46	0.92	0.93	0.94	0.94	0.49	0.49	0.49	0.48	0.93	0.94
Fs	0.03	0.04	0.05	0.09	0.08	0.06	0.06	0.06	0.04	0.04	0.04	0.03	0.07	0.06
Wo	0.48	0.47	0.47	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	0.48	0.48	0.49	0.00	0.00

En, 顽火辉石; Fs, 铁辉石; Wo, 硅辉石.

表 4 芝麻坊石榴石橄辉岩中代表性石榴石的化学成分
Table 4 Representatives of garnet composition from the garnet peridotite in Zhimafang

样号	C21-132-53	C21-134-55	C21-134-55	C34-150-73	C34-151-74	C34-151-74	C27-144-63	C25-143-61	C25-143-61	C25-143-61	C25-143-61	C25-143-61	C28-145-65	C28-145-65	C28-145-65	C47-165-90		
点位	/5-4Grt	/2-1Grt	/10-3Grt	/3-2Grt	96(rim)	97(core)	/5-2Grt	1-1(core)	1-2(rim)	395(rim)	396m	397m	399(core)	/1-1Grt	/1-3Grt	/1-2Grt	Grt(core)	
	Sn	Sn	Sn	Sn	Sn	Sn	Sn	Sn	Sn	Lg	Lg	Lg	Lg	Lg	Lg	Lg	Lg	
SiO ₂	40.10	41.26	41.68	40.83	42.48	42.21	40.43	41.76	41.67	42.00	41.81	41.79	41.99	41.84	42.70	42.35	42.04	42.12
TiO ₂	0.02	0.10	0.04	0.01	0.02	0.02	0.00	0.02	0.01	0.05	0.07	0.05	0.05	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	22.63	22.17	22.34	21.62	22.73	22.49	21.96	21.41	21.33	22.74	22.97	22.76	22.71	23.91	24.27	23.95	22.87	22.79
Cr ₂ O ₃	2.35	2.40	2.54	2.76	1.89	2.03	2.54	1.98	2.23	1.35	1.32	1.29	1.31	0.65	0.30	0.38	1.42	1.63
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.31	1.12					0.00	0.00	0.00		
MgO	20.39	17.91	19.78	17.16	17.97	18.56	18.39	19.60	19.35	19.36	19.29	19.20	20.49	20.39	20.53	20.73	19.73	20.00
CaO	5.02	5.04	5.20	5.47	4.62	4.63	4.83	4.77	4.64	4.77	4.75	4.76	5.02	4.62	5.37	4.28	4.03	4.55
MnO	0.40	0.73	0.41	0.86	0.53	0.52	0.69	0.41	0.54	0.38	0.37	0.40	0.28	0.41	0.21	0.22	0.71	0.35
FeO	8.23	11.00	8.01	11.67	10.42	9.61	11.00	8.26	8.60	9.85	9.75	10.31	8.04	8.78	7.57	8.29	10.10	9.14
NiO	0.00	0.02	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03					0.05	0.00	0.02		
Na ₂ O	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.03	0.01	0.04	0.04	0.03	0.02	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.18	100.64	100.04	100.41	100.66	100.11	99.87	99.58	99.57	100.53	100.35	100.61	99.90	100.67	100.97	100.22	100.95	100.60
Si	2.87	2.97	2.97	2.96	3.03	3.02	2.92	6.01	6.01	2.99	2.98	2.98	2.99	2.95	2.99	2.99	2.98	2.98
Ti	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.91	1.88	1.88	1.85	1.91	1.90	1.87	3.63	3.62	1.91	1.93	1.91	1.90	1.98	2.00	1.99	1.91	1.90
Cr	0.13	0.14	0.14	0.16	0.11	0.12	0.15	0.23	0.25	0.08	0.07	0.07	0.07	0.04	0.02	0.02	0.08	0.09
Fe ³⁺	0.21	0.05	0.03	0.08	0.00	0.00	0.14	0.14	0.12					0.09	0.01	0.02	0.07	0.04
Mg	2.18	1.92	2.10	1.85	1.91	1.98	1.98	4.20	4.16	2.06	2.05	2.04	2.17	2.14	2.14	2.18	2.08	2.11
Ca	0.39	0.39	0.40	0.42	0.35	0.36	0.37	0.74	0.72	0.36	0.36	0.36	0.38	0.35	0.40	0.32	0.31	0.35
Mn	0.02	0.04	0.03	0.05	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.04	0.02
Fe ²⁺	0.28	0.62	0.44	0.63	0.62	0.58	0.52	0.99	1.04	0.59	0.58	0.62	0.48	0.43	0.43	0.47	0.53	0.50
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					0.00	0.00	0.00		
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Uv	9.30	9.20	9.50	10.70	7.30	7.80	9.90	5.65	6.38	3.76	3.70	3.58	3.62	2.50	1.10	1.40	0.00	0.00
Ad	14.80	3.10	2.30	5.40	0.00	0.00	9.80	3.61	3.07	0.00	0.00	0.00	0.00	5.80	0.70	1.30	4.40	2.80
Gr	0.00	0.80	1.40	0.00	4.80	4.30	0.00	3.02	2.53	8.25	8.33	8.37	8.92	3.60	11.70	8.10	0.50	2.70
Py	75.90	64.70	70.80	62.70	65.50	67.30	67.90	70.28	69.56	67.86	67.96	67.06	71.22	72.70	71.60	73.00	70.30	70.90
Sp	0.80	1.50	0.80	1.80	1.10	1.10	1.40	0.83	1.11	0.76	0.74	0.79	0.55	0.80	0.40	0.40	1.40	0.70
Al	9.80	20.70	14.90	21.20	21.30	19.60	17.90	16.62	17.36	19.37	19.27	20.20	15.68	14.60	14.50	15.70	18.00	16.80

Sn-Grt. 小石榴石(等粒状石榴石); Lg-Grt. 大石榴石(斑状石榴石); m. 石榴石中部; Uv. 铍铝榴石; Ad. 钙铁榴石; Gr. 钙铝榴石; Py. 铁铝榴石; Sp. 锰铝榴石; Al. 铁铝榴石.

表 5 芝麻坊橄榄岩中代表性铬铁矿成分分析

Table 5 Chromite compositions in the Zhi mafang peridotite

岩石	GF perid	GF perid	Grt perid	Grt perid	Grt perid	Grt perid	Grt perid	Grt perid	Grt perid	Grt perid	Grt perid	Grt perid
样号	31-147-68	31-147-68	34-150-73	33-150-73	34-150-73	34-151-74	34-151-74	24-141-59	24-141-59	24-141-59	24-141-59	24-141-59
点位	2-1	5	1-2	2-1	10-3	6-6	9-3	Z ⁶ Chr	Z ⁶ Chr	Z ⁹ Chr	Z ⁹ Chr	Z ⁹ Chr
SiO ₂	0.00	0.01	0.00	0.22	0.35	0.20	0.00					
TiO ₂	0.10	0.12	0.00	0.00	0.00	0.33	0.30					
Al ₂ O ₃	3.93	3.74	4.03	4.42	2.94	4.51	6.67	5.68	5.54	4.9	5.39	4.81
Cr ₂ O ₃	52.30	51.15	56.37	57.60	47.98	54.29	51.58	52.09	51.67	53.77	52.05	52.85
FeO	24.66	24.86	36.07	32.88	42.78	37.11	37.73	37.32	38.75	36.77	37.43	36.03
MnO	0.63	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
MgO	4.24	3.94	4.20	4.88	4.97	4.24	3.95	4.97	4.81	5.25	4.93	5.66
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	0.00	0.00					
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
NaO	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
Fe ₂ O ₃	12.95	14.00										
NiO	0.10	0.25										
ZnO	0.36	0.32										
Total	99.30	99.08	100.66	99.99	99.475	100.69	100.24	100.06	100.77	100.69	99.8	99.35
x	38.1	34.7	17.2	20.9	17.2	16.9	15.7	19.2	18.1	20.3	19.0	21.9
y	89.9	90.2	90.4	89.7	91.6	89.0	83.8	93.2	94.2	95.2	96.2	97.2

x = 100 Mg / (Mg + Fe²⁺); y = 100 Cr / (Cr + Al); GF perid 表示不含石榴石橄榄岩; Grt perid 表示石榴石橄榄岩.

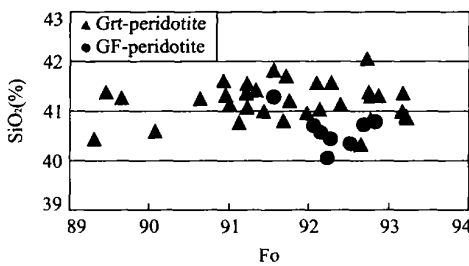


图 5 石榴石橄榄岩中的橄榄石比不含石榴石橄榄岩显示较宽区域的 Fo 和较高的 SiO₂ 含量

Fig. 5 Olivine in Grt peridotite shows wider range of Fo and higher SiO₂ contents than GF peridotite

含量都高于早期的石榴石(图 7). 等粒状石榴石有成分环带, 从核心到边缘, 铁铝榴石增加而镁铝榴石减少(图 4). 一些变斑晶石榴石也具有环带结构, Cr₂O₃ 的含量从核部到边缘递减. 成分的环带结构在等粒石榴石中保存完好, 例: Cr₂O₃、MgO 和 Al₂O₃ 的含量在等粒石榴石中从中心到边缘分别为 3.4%~4.2%, 18.4%~17.5% 和 21.1%~20.1%. 金云母岩脉中的石榴石(样品 C28-145-65)含有较高的镁铝榴石(Ura₁Prp₇₄Alm₁₄Gr₈Sps₁)和较低的钙铬榴石. 在所有的石榴石中, 氧化钛的含量都很低, 多数小于 0.05%. 低含量的 TiO₂ 被认为是低温石榴石橄榄岩 (<1 100 °C) 的特征之一(Boyd, 1989).

4.4 铬铁矿和铬尖晶石

铬铁矿或铬尖晶石在 2 种橄榄岩中都是重要的

伴生矿物. 它们通常以包裹体的形式出现在 Ol、Opx、Cpx 和 Grt 中. 铬铁矿的分析数据见表 5. 铬铁矿的分子式计算是按照 3 个阳离子, 它们需要相当数量的 3 价铁离子来保持电价平衡.

铬铁矿是以高含量的 Cr₂O₃ 和 FeO 为特征. 石榴石橄榄岩中的铬铁矿含 Cr₂O₃ 49%~58%, FeO 33%~43%; 不含石榴石橄榄岩中铬铁矿的 Cr₂O₃ 49%~52%, FeO 24%~26%. 2 种橄榄岩中铬铁矿的 Al₂O₃ 含量都很低, 分别是 3%~9% 和 2%~4%. 铬铁矿也有较高的 Cr × 100 / (Al + Cr) 比值(76~99)和较低的 Mg[#] (0.21~0.35), 主要由 4 种组分组成: FeCr₂O₄、MgCr₂O₄、Fe₃O₄、MgAl₂O₄. 也有一些 (FeMg)Cr₂O₄ 和 Fe₃O₄ 之间的过渡组分, 其中磁铁矿的含量变化区间为 40%~60%. 这些都是次生相, 主要产在被金云母和绿泥石交代的石榴石中. 在 100 Mg / (Mg + Fe²⁺) 和 100 Cr / (Cr + Al) 比值的变异图中, 2 种类型橄榄岩的铬铁矿数据的投影点都远离蛇绿岩超镁铁岩区, 而靠近富铁的 Alpine 型橄榄岩(图 8). 铬铁矿的颗粒在 2 种橄榄岩中都未见到成分的环境现象.

4.5 含水相矿物和碳酸岩

在芝麻坊橄榄岩体中, 金云母是主要含水矿物. 其特征是高 MgO (24.95%~26.15%; Mg / (Fe + Mg) = 0.95), 低 FeO (2.02%~2.66%) 和 TiO₂ (0.04%~0.12%). 在石榴石-金云母-角闪

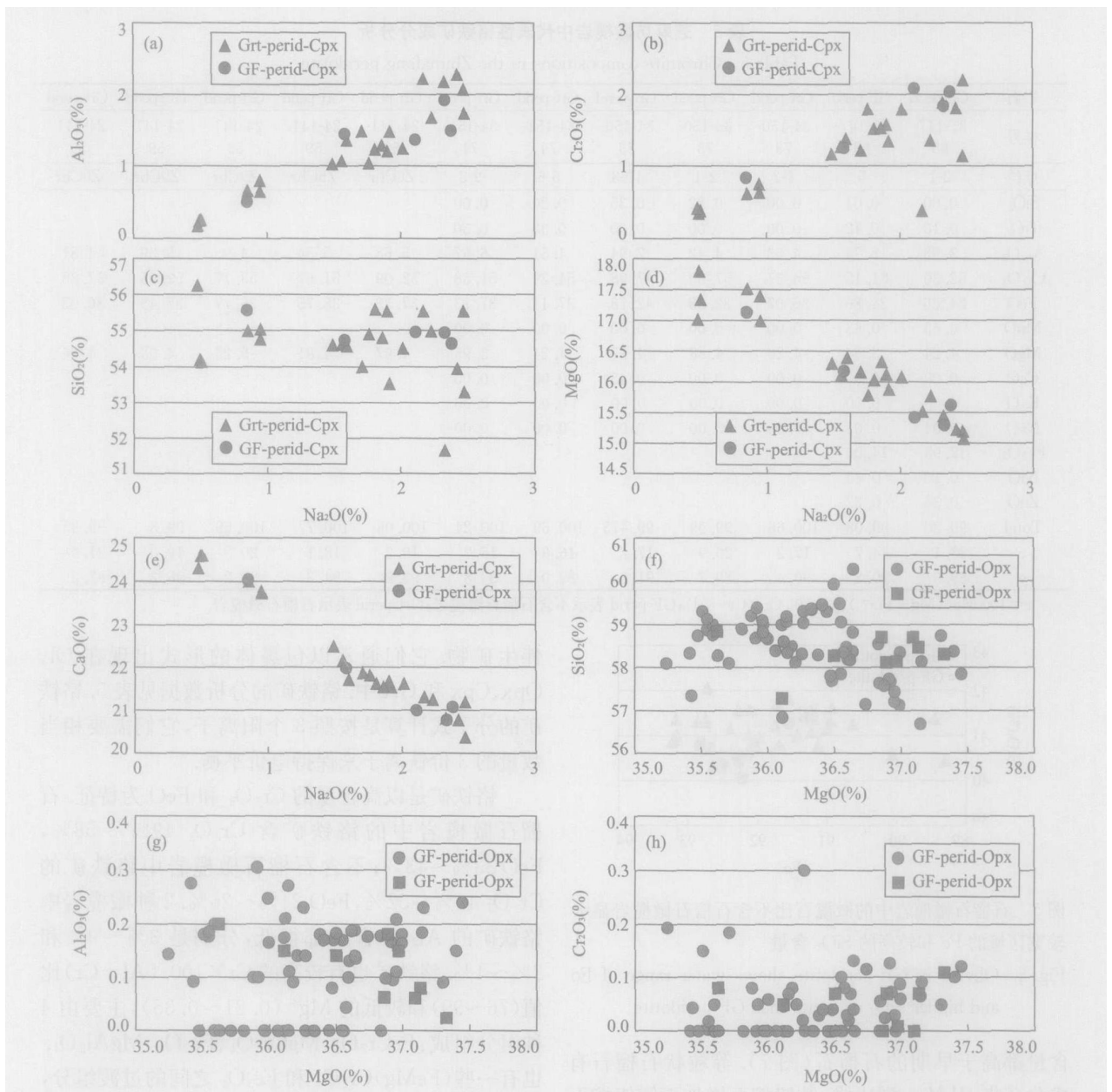


图 6 石榴石橄榄岩和不含石榴石橄榄岩中透辉石和顽火辉石显示相同的宽度大的成分区间; Na_2O 、 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 呈正相关, 但与 MgO 和 CaO 呈负相关

Fig. 6 Diopside and enstatite in Grt and GF peridotite show a similar and wide range in composition; Na_2O shows a positive relation to Al_2O_3 , Cr_2O_3 and a negative relation to MgO and CaO

石岩脉中的金云母与橄榄岩中的金云母相同, 但岩脉中的金云母有稍高一些的 FeO (3.04%) 和低比值的 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ (0.94)。

钛斜硅镁石在地幔中是一种密集的含水镁硅酸盐 (Thompson, 1992), 它在深度 150~300 km (5~10 GPa) 和温度在 700~1100 °C (Ahrens, 1989) 时稳定。橄榄岩中钛斜硅镁石中 TiO_2 的含量变化于 1.96%~3.58% 之间, 其中 TiO_2 的含量最高的钛

斜硅镁石 (4.82%~7.19%) 和钛粒斜硅镁石 (7.57%~8.62%) 是作为出溶晶片产出在粗粒石榴石的一个透辉石包裹体中 (许志琴等, 2003)。钛斜硅镁石的 $(\text{Mg} + \text{Fe} + \text{Ti})/\text{Si}$ 比值是 2.22, 略低于典型钛斜硅镁石的统计数据, 矿物中没有测到 F 成分。

4.6 菱镁矿

菱镁矿作为大斑晶或细小基质存在于数个橄榄石的样品中。很多大斑晶中通常含有金云母包裹体,

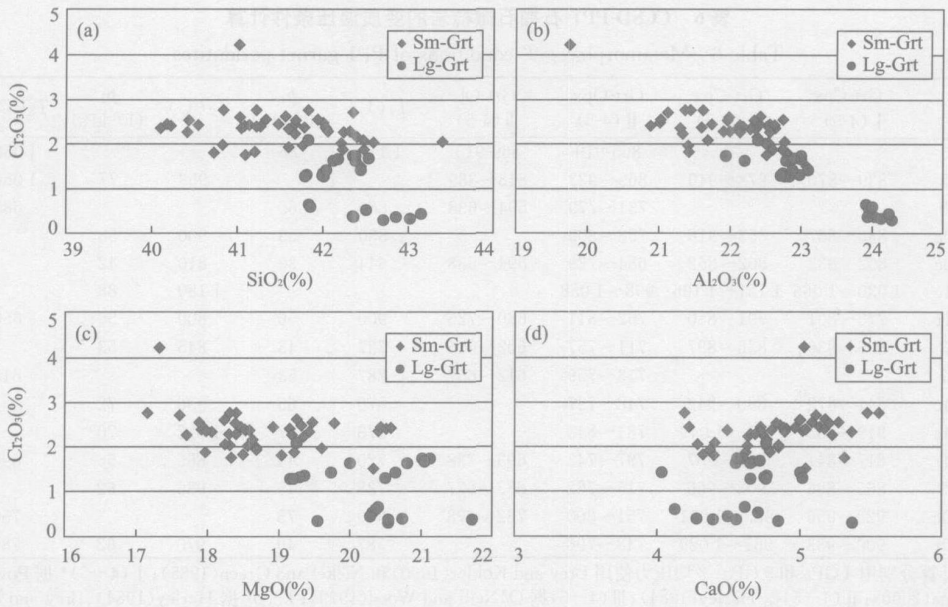


图 7 铬铁矿在 2 种橄榄岩中均显示高 $100\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$, 石榴石橄榄岩比不含石榴石橄榄岩有相对高的 $100\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$, 但两者都落在已知构造区外

Fig. 7 Chromite in both Grt- and GF peridotite shows high $100\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$, the former has relatively high $100\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ than the latter, and both are plotted away from tectonically known region

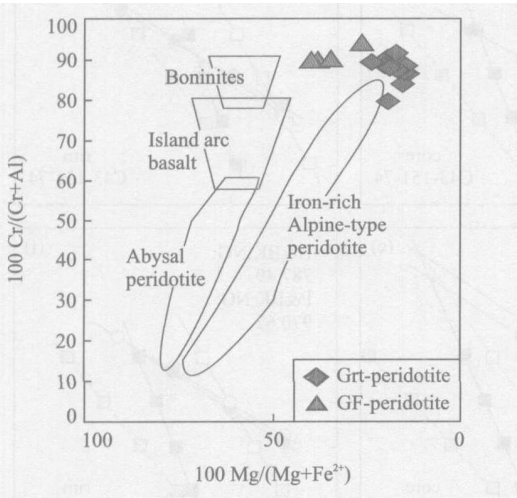


图 8 石榴石橄榄岩中变斑晶石榴石 (Lg-Grt) 和等粒石榴石 (Sm-Grt) 的组分是变化的, Sm-Grt 比 Lg-Grt 有相对高的 Cr_2O_3 和相对低的 Al_2O_3 、 MgO 、 SiO_2 含量

Fig. 8 Compositions of porphyroblastic garnet (Lg-Grt) and equigranular garnet (Sm-Grt) in Grt peridotite are varied, the Sm-Grt have relatively higher contents of Cr_2O_3 and lower contents of Al_2O_3 , MgO and SiO_2 than Lg-Grt

少数含有钛斜硅镁石包裹体. 菱镁矿中几乎不含钙 (CaO 0.06%~0.23%), 但有较高的 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 比值 (0.93~0.95). 矿物的边缘由白云石+方解石的集合体组成, 可能由减压作用形成. 退变白云

石含有 0.76%~0.89% 的 FeO , 方解石含有少量的 MnO (1.25%) 和 MgO (1.61%).

4.7 退变角闪石

替代石榴石的退变角闪石成分与替代透辉石的退变角闪石成分不同. 石榴石的次变边含有的角闪石具有较高的 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ 比值 (0.91~0.95), Ca 的含量小于 1.5. 替代透辉石的是透闪石, 其中 FeO 和 Na_2O 含量很小 (<0.3%). 替代石榴石的次生绿泥石含有少量 Cr_2O_3 , 有时达 2.0% (样品 C34-151-74).

5 计算岩石生成的温压 (p-T) 条件

确定橄榄岩的 p-T 峰值条件是一件困难的事情, 因为矿物的组分在退化变质过程中被改变. 我们用来做分析的许多岩心样品都较新鲜, 它们的原生矿物成分组合可能被保存或仅有轻微改变. 这给我们提供了用 Grt-Cpx 地质温度计 (Powell, 1985; Ravna, 2000)、Grt-Opx 地质温度计 (Harley, 1984)、Grt-Ol 地质温度计 (O'Neill and Wood, 1979) 和 Al in orthopyroxene 地质温度计 (Nickel and Green, 1985; Brey and Köhler, 1990) 来重建 p-T 峰值条件的机会. 以此为目的, 我们假设所有在 Ol, Grt, Opx 和 Cpx 的 Fe 都是 Fe^{2+} . 因为 Fe^{3+} 的

表 6 CCSD-PP1 石榴石橄榄岩的变质温压条件计算
Table 6 Meta morphic p - T conditions of PP1 garnet peridotites

样品	Grt-Cpx I (4-5) *	Grt-Cpx I (4-5)	Grt-Opx II (4-5)	Grt-Ol III (4-5)	T_1 (°C)	p_1 (10^5 kPa)	T_2 (°C)	p_2 (10^5 kPa)	T_3 (°C)	p_3 (10^5 kPa)
C 21-132-53			865-919	869-915	1 114	86			1 058	81
C 21-134-55	839~870	878~940	869~923	843~889			953	77	1 060	83
C 24-141-59			731~779	594~638	860	65			683	48
C 24-141-60e	836~867	853~916	758~809		830	53	900	58		
C 24-141-60e	802~832	802~862	684~729	594~638	644	30	810	42		
C 25-143-61e	1 030~1 066	1 121~1 196	998~1 058				1 180	88		
C 25-143-61e	772~801	791~850	762~811	680~725	900	56	800	50	650	40
C 27-144-63	806~836	836~897	711~757	602~645	727	43	845	53		
C 30-146-67			713~759	612~657	787	53			615	40
C 34-151-74e	841~872	880~943	748~797		870	65	936	72		
C 34-151-74e	919~952	981~1 049	784~843		878	67	1 012	70		
C 34-151-74e	817~847	845~907	797~743	693~738	720	45	865	56	690	40
C 35-152-75	865~896	903~966	715~762	633~677	738	45	935	62		
C 47-165-90e	923~956	983~1 051	751~800	732~778	919	75			750	59
C 47-165-90e	900~933	961~1 029	748~796		787	49	970	62	780	49

* . 温度计算分别用 4 GPa 和 5 GPa ; 平均压力使用 Brey and Köhler (1990) 和 Nickel and Green (1985); I (4-5) * 据 Powell (1985); I (4-5) 据 Ravna (2000); II (4-5) 据 Harley (1984); III (4-5) 据 O'Neill and Wood (1979); T_1, p_1 据 Harley (1984), Brey and Köhler (1990) 和 Nickel and Green (1985); T_2, p_2 据 Powell (1985), Brey and Köhler (1990) 和 Nickel and Green (1985); T_3, p_3 据 O'Neill and Wood (1979), Brey and Köhler (1990) 和 Nickel and Green (1985).

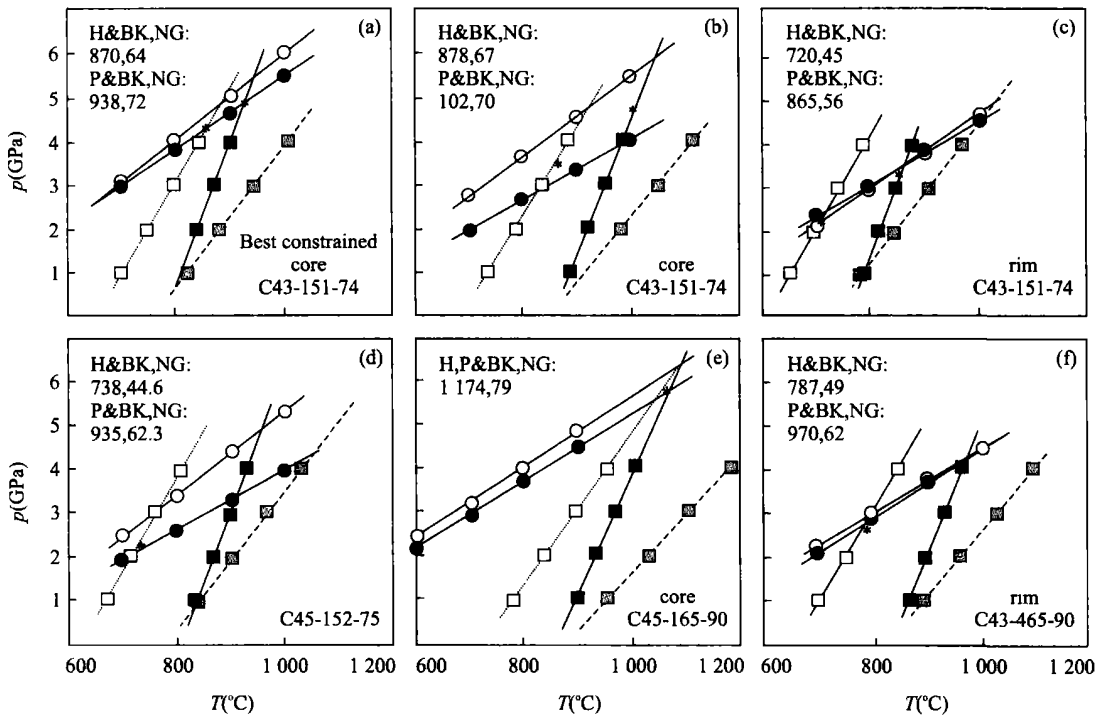


图 9 芝麻坊超镁铁岩体中石榴石橄榄岩和不含石榴石橄榄岩的 p - T 条件计算

Fig. 9 Calculated p - T condition for Grt and GF peridotite from the Zhi mafang ultra mafic body
左上角字母是参考文献中作者; 数字分别是获得的温度(°C)和压力(10^5 kPa); 详细计算结果参见表 6

含量在橄榄岩中可以忽略不计. 斜方辉石在 M1 and M2 位置的所有阳离子被标准化到 1. 温度和压力计算分别采用压力 3、4、5 和 6 GPa, 温度 700、800、900 和 1 000 °C, 数据见 p - T 直方图(表 6, 图 9).

根据 Grt-Cpx 温度计, 当压力在 4 GPa 时计算出岩心的平衡温度为 835~920 °C (Powell, 1985) 和 850~980 °C (Ravna, 2000). 去掉其最高值和最低值, 单一样品颗粒边部较核部温度低 20~30 °C.

但这些数据高于用 Grt-Opx (Harley, 1984) 和 Grt-Ol (O'Neill and Wood, 1979) 地温计测得的数据, 它们分别是 715~870 °C 和 612~840 °C。增加压力使得温度随之上升, 根据不同地温计的使用, 其上升率为 ~30~60 °C/1 GPa (图 8)。

为了获得岩心的平均压力和温度, 数据中最高值和最低值被排除。平均压力值是采用 Nickel and Green (1985) 以及 Brey and Köhler (1990) 的方法获得。应用 Harley (1984) 地温计和上述压力平均值, 获得矿物核部的温度为 860~920 °C, 压力 6.5~7.5 GPa, 边部温度 645~785 °C, 压力 3.0~4.9 GPa; 应用 Powell (1985) 地温计 p - T 条件估算的核部温度 900~970 °C, 压力 5.8~7.1 GPa, 边部温度 810~865 °C, 压力 4.2~5.6 GPa。用 O'Neill and Wood (1979) 地温计获得的结果相似, 核部温度 750~1060 °C, 压力 8.1 GPa, 边部温度 650~780 °C, 压力 4.0~4.9 GPa。根据所有数据的平均值, 我们对 p - T 峰值条件的最好估算为温度 850~1000 °C, 压力 6.0~7.5 GPa, 证明芝麻坊橄榄岩体的重结晶是在地热梯度很低 (≤ 5 °C/km) 的俯冲带。

6 讨论

根据以上研究, 芝麻坊超镁铁岩体由互层状的石榴石橄榄岩和不含石榴石橄榄岩组成。它们属于亏损地幔岩石, 主元素 Mg[#] 为 0.91~0.92, REE 和 LILE 富集。岩石经历了几次地质事件, 在 p - T 条件的计算中没有见到进变质现象, 获得压力达到 5~7 GPa。在本节中我们将讨论在文章开始时提出的 2 个基本问题: (1) 芝麻坊超镁铁岩体最初从哪里来? (2) 这个超镁铁岩体与中生代时期扬子板块和北中国板块的俯冲有没有成因关系?

6.1 芝麻坊超镁铁岩体的来源

Zhang R Y *et al.* (2005) 报道来自芝麻坊超镁铁岩体中锆石 220 Ma 的 U-Pb 年龄数据, 代表 UHP 的变质峰期, 此年龄数据可与来自威海橄榄岩中含柯石英的锆石的 UHP 变质峰期的年龄 (221 Ma) 对比 (Yang *et al.*, 2003)。但是, 芝麻坊橄榄岩中新获得的锆石的 Hf 同位素成分表明石榴石橄榄岩的原岩的年龄至少在中元古代 (TDM 模式年龄 1.4 Ga) (Zheng *et al.*, 个人通讯)。这一解释得到了橄榄岩中 Os 同位素数据的支持, 进一步证实该橄榄岩属于一个古地幔 (> 1 Ga)。岩石的同位素

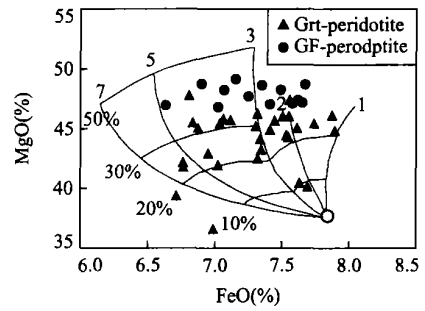


图 10 芝麻坊橄榄岩全岩 MgO-FeO 关系 (Boyd *et al.*, 2004)
Fig. 10 Bulk rock MgO-FeO relations for the Zhi mafang peridotite

熔融曲线表示在不同压力下被熔融成分的百分比 (10% 的间隔), 以 GPa 为单位 (从 1~7 GPa; Walter, 1998)

特征表明这些岩石代表大陆地幔楔而不是与俯冲的海洋岩石圈伴随的地幔 (Widom, 个人通讯)。

根据全岩 MgO-FeO 成分 (去除挥发分, 将 FeO 作为全铁), 芝麻坊石榴石橄榄岩可能经历了 20%~30% 部分熔融, 而不含石榴石橄榄岩经历了 35%~45% 部分熔融 (Boyd and Köhler, 1990) (图 10), 说明 2 种岩石各自经历了不同程度的部分熔融。我们注意到石榴石橄榄岩和不含石榴石橄榄岩具有相同的大于 5 GPa 的熔融压力 (或深度), 与根据平衡矿物组合 p - T 条件计算获取的 UHP 变质峰期压力 5~7 GPa (Zhang *et al.*, 2000) 以及本文的计算可以对比。然而, 我们认为这一压力数据仅代表了岩石所达到的深度, 不一定代表 UHP 变质峰期的 p - T 条件, 因为在这些岩石中还没有发现 UHP 变质的直接证据, 相反, 由于所记录的压力数据是来自部分熔融, 它可能代表俯冲板片折返时的下降压力。

6.2 互层状的石榴石橄榄岩和不含石榴石橄榄岩是如何形成的?

石榴石橄榄岩和不含石榴石橄榄岩 2 种岩石在化学成分上显示了规律性变化。石榴石橄榄岩比不含石榴石橄榄岩有明显的高 Al₂O₃ (>1%) 和 CaO (0.6%~1.6%) 含量、较高的 SiO₂ 和较低的 MgO (40%~45%)。另外, 石榴石橄榄岩有较高丰度的 Sc、Ba、Sr 和 V, 但 2 种岩石具有相同丰度的 Cr、Ni 和 Ti。它们也具有非常相同的球粒陨石标准化 REE 模式, LREE 轻微富集和相同的 REE 含量总和。2 种橄榄岩的 [Tb/Yb]_N 比值都大于 1, 不含石榴石橄榄岩的平均比值为 2.23; 而石榴石橄榄岩为 1.79, 通常表明石榴石不属于残留相 (Yang *et al.*, 1998)。

实验数据表明在高温下 Al_2O_3 将保留在斜方辉石岩中,随着温度降低, Al_2O_3 将出溶而形成石榴石和单斜辉石.这种从斜方辉石中出溶石榴石和斜方辉石在南非的高温方辉橄榄岩中(Cox *et al.*, 1987)和其他造山带中被证实(Obata and Morten, 1987).由于粒状石榴石仅与顽火辉石而不是 Cpx 相伴生,我们提出芝麻坊橄榄岩中斜方辉石的高 En 和低含量的 Al_2O_3 和 CaO 反映石榴石从原高温斜方辉石中出溶.这种出溶可能源于无水橄榄岩固结线区,压力大约在 $40 \times 10^5 \sim 80 \times 10^5$ kPa (Yamada and Takahashi, 1984).在靠近无水橄榄岩固结线或其上的高温区是一个合适的 $p-T$ 区间,该区间是石榴石橄榄岩之前的方辉橄榄岩源区,而且该区间的压力被认为与石榴石橄榄岩形成的压力是可对比的(Cox, 1987).重结晶、变质和变形作用可能掩盖了出溶结构,但芝麻坊橄榄岩的矿物和岩石组合表明它是方辉橄榄岩型亏损地幔原始组合,即在岩石中斜方辉石和橄榄石是仅有的原生矿物.

石榴石橄榄岩和不含石榴石橄榄岩有不同的化学成分和矿物组合,但形成的 $p-T$ 条件基本相同.因此,我们认为呈互层状 2 种类型的橄榄岩是由于原始方辉橄榄岩部分熔融的结果.

6.3 理论上的原始斜方辉石

表 7 给出了原生方辉橄榄岩中理论斜方辉石的成分,该成分得自石榴石橄榄岩中斜方辉石岩的粒状石榴石.这里采用了石榴石橄榄岩中的 22 个 Opx 和 42 个石榴石分析数据的平均值,来计算位于无水橄榄岩固结线附近方辉橄榄岩源区中的理论斜方辉石.在表 7 中,黑体 6.00 和 7.00 表示 6 份 Opx 和 1 份石榴石中能够产生理论柱 3 的 Opx, 7 份 Opx 和 1 份石榴石中能够产生理论柱 4 的 Opx, 认为理论柱 3 和 4 的 Opx 有可能代表先于石榴石二辉橄榄岩相的斜方辉石.

6.4 芝麻坊超镁铁岩体和中生代俯冲作用的关系

石榴石橄榄岩和不含石榴石橄榄岩中矿物的氧同位素数据证明芝麻坊超镁铁岩体是一地幔岩块,没有地壳岩石混染(Zhang Z M *et al.*, 2005). 15 个样品分析,包括 Grt、Opx、Cpx 和 Ol 分离矿物,获得 $\delta^{18}O$ ‰ 平均值为 5.75‰,标准误差为 0.3‰.这些数值与地幔包体和巨晶没有区分,说明石榴石橄榄岩可能来源于克拉通岩石圈下的富集地幔源,而非对流地幔.

然而,芝麻坊石榴石橄榄岩锆石年龄的重要意义还不明确,尽管该年龄受苏鲁地区超高压变质带

表 7 计算得出的理论上斜方辉石的成分

Table 7 Weight percent analyses of theoretical orthopyroxenes

成分(%)	$n_1(\text{Opx})$	$n_2(\text{Grt})$	$n_1(\text{Opx})/n_2(\text{Grt})$	
			6.00	7.00
SiO ₂	58.10	41.48	55.62	55.92
Al ₂ O ₃	0.12	21.95	3.23	2.84
TiO ₂	0.01	0.03	0.02	0.02
Cr ₂ O ₃	0.06	2.43	0.40	0.36
FeO	5.39	10.07	6.04	5.96
MnO	0.09	0.41	0.14	0.13
MgO	36.37	18.66	33.77	34.09
CaO	0.07	4.86	0.75	0.67
Na ₂ O	0.02	0.02	0.02	0.02
K ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.01
Total	100.23	99.92	100.00	100
离子数	60	240	60	60
Si	1.987	5.979	1.920	1.93
⁽⁴⁾ Al	0.013	0.021	0.080	0.07
⁽⁶⁾ Al	0.008	3.708	0.052	0.04
Ti	0.000	0.003	0.000	0.00
Cr	0.002	0.277	0.011	0.01
Fe ²⁺	0.154	1.214	0.174	0.17
Mn ²⁺	0.003	0.050	0.004	0.00
Mg	1.855	4.010	1.738	1.75
Ca	0.002	0.750	0.028	0.02
Na	0.001	0.005	0.001	0.00
K	0.000	0.001	0.000	0.00
Total	4.010	16.018	4.009	4.01

FeO 代表全 Fe.

中变质作用的影响.芝麻坊岩体中的锆石记录了这一事件,但不同于威海超镁铁岩体中的超高压变质锆石,这些锆石的变质边缘中含有柯石英和绿辉石包体,其年龄数据在 220 Ma (Yang *et al.*, 2003), Th/U 小于 0.1,表明与俯冲作用相关的流体参与到岩石中.芝麻坊超镁铁岩体中的锆石含有 Ol、Opx、Cpx、Ti-Chu 和 Apt 包体,与橄榄岩中的矿物相同,通常具有高 Th/U 比值 0.2~0.8,这在变质锆石中不常见(Katayama *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2004).因此,我们认为这些锆石在不同于威海超镁铁岩体的生成条件下形成,即岩石中没有俯冲流体加入,而是在高温条件下的板块俯冲和碰撞环境中形成.另外,它们可能是古的继承性锆石,如同位素数据和 CL 影像所显示环带构造那样(Zhang R Y *et al.*, 2005).

7 结论

苏鲁 UHP 超高压变质带中的芝麻坊超镁铁岩体是一个不寻常的地幔块,由高度亏损的橄榄岩组

成,但因地幔交代作用而富集 REE 和 UILE. 岩体由交替出现的石榴石橄榄岩和不含石榴石橄榄岩层组成,2 种类型的岩石形成的 p - T 条件相同.2 种岩性分层现象可能反映发生在中元古代部分熔融的差异.橄榄岩中锆石 220 Ma 的 U-Pb 同位素年龄记录了扬子板块和北中国板块碰撞,但此年龄也许并不代表岩石 UHP 变质峰期的年龄,而可能记录了俯冲带中地幔楔的碎块从深部折返时的年龄.我们认为石榴石的形成可能不是由于俯冲变质作用,有可能当岩石从地幔深部上升过程中从斜方辉石中出溶石榴石.因此,它可能记录了岩石演化过程中的一个单独阶段.

致谢:江苏省地质六队的陆永增高级工程师协助了现场岩心编录,在此表示感谢.研究得到大陆科学钻探 973 项目和国家自然科学基金重大项目资助.

References

- Ames, L., Tilton, G. R., Zhou, G. Z., 1993. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons. *Geology*, 21:339-342.
- Boyd, F. R., 1989. Compositional distinction between oceanic and cratonic lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 96:15-26.
- Brey, G. P., Kohler, T., 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology*, 31:1352-1378.
- Cong, B. L., Zhang, R. Y., Li, S., et al., 1992. Preliminary study of isotopochronology of eclogites in northern Jiangsu and eastern Shandong provinces, China. In: *Exploration of volcanoes and rocks in Japan, China and American: Commemorative papers for Prof. Yukio Matsunoto, Yamaguchi University, Yamaguchi, Japan*, 411-417.
- Cox, K. G., Smith, M. R., Beswetherick, S., 1987. Textural studies of garnet lherzolites: Evidence of exsolution origin from high temperature harzburgites. In: Nixon, P. H., ed., *Mantle xenoliths*, 537-550.
- Hacker, B., Wang, Q. C., 1995. Thermal history of ultrahigh pressure rocks, Dabie Mountains, China. *Tectonics*, 14:994-1006.
- Harley, S. L., 1984. An experimental study of the partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86:359-379.
- Hirajima, T., Ishiwatari, A., Cong, B. L., et al., 1990. Identification of coesite in Mengzhong eclogite from Donghai County, northeastern Jiangsu Province, China. *Mineralogical Magazine*, 54:579-584.
- Jahn, B. M., 1998. Geochemical and isotopic characteristics of UHP eclogites and ultramafic rocks of the Dabie orogen: Implications for continental subduction and collision tectonics. In: Hacker, B., Liou, J. G., eds., *When continents collide: Geodynamics and geochemistry of ultrahigh pressure rocks*. Dordrecht, Kluwer, 203-239.
- Katayama I., Maruyama, S., Parkinson, C. T., et al., 2001. Iron microprobe U-Pb zircon geochronology of peak and retrograde stages of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Kokchetav massif, northern Kazakhstan. *Earth and Planetary Science Letters*, 188:185-198.
- Kretz, R., 1983. Symbols for rock forming minerals. *American Mineralogist*, 68:277-279.
- Li, T. F., Yang, J. S., Zhang, R. Y., 2006. Rich and carbonatic melt metasomatism in depleted upper mantle: Geochemical evidences from peridotites in pre-pilot hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Earth Science - Journal of China University of Geosciences*, 31(4):457-474 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. G., Chen, Y., Cong, B. L., et al., 1993. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogite: Timing and processes. *Chemical Geology*, 109:70-89.
- Liou, J. G., Zhang, R. Y., 1998. Petrogenesis of a ultrahigh pressure garnet-bearing ultramafic body from Mao wu, Dabie Mountains east central China. *The Island Arc*, 7:115-134.
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Liou, Z. G., et al., 2002. Ultrahigh pressure mineral inclusions in zircons from gneissic core samples of the Chinese Continental Scientific Drilling site in eastern China. *Eur. J. Mineral.*, 14:499-512.
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Liou, Z. G., et al., 2004. SHRIMP U-Pb ages of ultrahigh pressure and retrograde metamorphism of gneisses, south-western Sulu terrane, eastern China. *J. Metamorphic Geol.*, 22:315-326.
- Nickel, K. G., Green, D. H., 1985. Empirical geothermobarometry for garnet peridotites and implications for the nature of the lithosphere, kimberlites and diamonds. *Earth and Planetary Science Letters*, 73:158-170.
- Obata, M., Morten, L., 1987. Transformation of spinel lherzolite to garnet lherzolite in ultramafic lenses of the Austriac crystalline complex, Northern Italy. *Journal of Petrology*, 28:599-632.
- Okay, A. I., Xu, S., Seng, Q., A. M. C., 1989. Coesite from the Dabie Shan eclogites, central China. *European Journal of Mineralogy*, 1:595-598.
- Okay, A. I., Seng, Q., A. M. C., 1992. Evidence for intra-continental thrust related exhumation of the ultrahigh pres-

- sure rocks in China. *Geology*, 20:411—414.
- O'Neill, H. St. C., Wood, B. J., 1979. An experimental study of Fe-Mg partitioning between garnet and olivine and its application as a geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70:59—70.
- Powell, R., 1985. Regression diagnostic and robust regression in geothermometer-geobarometer calibration: The garnet-clinopyroxene geothermometer revisited. *Journal of Metamorphic Geology*, 3:231—243.
- Ravna, E. J. K., 2000. The garnet-clinopyroxene geothermometer: An updated calibration. *J. Metamorph. Geol.*, 18:211—219.
- Rumble, D., Yu, T. F., 1998. The Qilongshan oxygen and hydrogen isotope anomaly near Donghai in Jiangsu Province, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62:3307—3321.
- Schumacher, J. C., 1991. Empirical ferric iron corrections: Necessity, assumptions and effects on selected geothermometers. *Mineralogical Magazine*, 55:3—18.
- Streckeisen, A., 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Sci. Rev.*, 12:1—33.
- Wang, X. M., Liou, J. G., 1991. Regional ultrahigh pressure coesite-bearing eclogitic terrane in central China: Evidence from country rocks, gneiss, marble, and metapelite. *Geology*, 19:933—936.
- Wang, X. M., Liou, J. G., Mao, H. K., 1989. Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains in central China. *Geology*, 17:1085—1088.
- Xu, S. T., Liu, Y. C., Chen, G. B., et al., 2005. Microdiamonds, their classifications for the host eclogites from the Dabie and Su-Lu regions in central eastern China. *Mineralogical Magazine*, 69:509—520.
- Xu, Z. Q., Chen, J., Yang, J. S., et al., 2003. Discovery of titanoclinohumite and titanochondrodite exsolution in clinopyroxene included in garnet peridotite and their significance. *Acta Geologica Sinica*, 77(4):547—555 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., 1987. Etude tectonique et microtectonique de la Chine Paléozoïque et Triasique des Qilings (China). Thesis doctorate, Univ. Sci. Tech. Languedoc, Montpellier.
- Xu, Z. Q., Yang, W. C., Zhang, Z. M., et al., 1998. Scientific significance and site selection researches of the first Chinese continental scientific deep drill hole. *Continental Dynamics*, 3:1—13.
- Yamada, H., Takahashi, E., 1984. Subsolidus phase relations between coexisting garnet and two pyroxenes at 50 to 100 kbar in the system CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-In: Kornprobst, Q. V., ed., *Kimberlites I, II: The mantle and crust-mantle relationships*. Elsevier, Netherlands, 247—255.
- Yang, J. J., Jahn, B. M., 2000. Deep subduction of mantle-derived garnet peridotites from the Su-Lu UHP metamorphic terrane in China. *Journal of Metamorphic Geology*, 18:167—180.
- Yang, J. S., Wooden, J. L., Wu, C. L., et al., 2003. SHRIMP U-Pb dating of coesite-bearing zircons from the ultrahigh-pressure metamorphic rocks, Sulu terrane, east China. *Journal of Metamorphic Geology*, 21:551—560.
- Yang, J. S., Xu, Z. Q., Bai, W. J., 1998. Petrogenesis of the garnet peridotite and spinel peridotite from the Zhi-mafang ultramafic block in the Donghai region south of the Sulu UHPM belt. China. In International workshop on UHP metamorphism and Exhumation. Stanford University, USA. A52—56.
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., 1994. Significance of magnesite paragenesis in ultrahigh-P metamorphic rocks. *American Mineralogist*, 79:397—400.
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., Cong, B. L., 1995. Ultrahigh pressure metamorphosed talc, magnesite and Ti-clinohumite-bearing mafic-ultramafic complex, Dabie Mountains, east central China. *Journal of Petrology*, 36:1011—1037.
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., Cong, B. L., 1994. Petrogenesis of garnet-bearing ultramafic rocks and associated eclogites in the Su-Lu ultrahigh-P metamorphic terrane, eastern China. *Journal of Metamorphic Geology*, 12:169—186.
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., Yang, J. S., et al., 2000. Petrochemical constraints for dual origin of garnet peridotites from the Dabie-Sulu UHP terrane, eastern central China. *Journal of Metamorphic Geology*, 18:149—166.
- Zhang, R. Y., Yang, J. S., Wooden, J. L., et al., 2005. U-Pb SHRIMP geochronology of zircon in garnet peridotite from the Sulu UHP terrane, China: Implications for mantle metasomatism and subduction zone UHP metamorphism. *Earth and Planetary Science Letters*, 237:729—743.
- Zhang, Z. M., Rumble, D., Liou, J. G., et al., 2005. Oxygen isotope geochemistry of rocks from the pre-pilot hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSD-PPH1). *American Mineralogist*, 90:857—863.

附中文参考文献

- 李天福, 杨经绥, 张儒媛, 2006. 亏损上地幔中的富钾熔体和碳酸盐交代作用: 来自 CCSD 预先导孔橄榄岩的地球化学证据. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(4): 457—474.
- 许志琴, 陈晶, 杨经绥, 等, 2003. 苏鲁超高压变质带石榴石橄榄岩中含钛硅镁石出溶体的发现及其意义. *地质学报*, 77(4): 449—555.