

铬尖晶石和石榴石的相变:大陆科学钻探 CCSD PP3 孔超镁铁岩超高压变质作用的证据

陈世忠^{1,2}, 杨经绥¹, 许志琴¹, 李天福¹, 陈方远¹

1. 中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学实验室, 北京 100037

2. 中国地调局南京地质矿产研究所, 江苏南京 210016

摘要: PP3 超镁铁岩主要岩石类型有纯橄岩和石榴石橄榄岩, 两者为渐变, 主要矿物为橄榄石、铬尖晶石、石榴石、单斜辉石和斜方辉石。铬尖晶石的 $Cr^{\#} [Cr/(Cr+Mg) \times 100]$ 从 51~89 变化, TiO_2 和 MnO_2 值分别低于 0.26% 和 0.46%。铬尖晶石矿物表现为 4 期次演化的特点, 反映了从岩浆期、榴辉岩相、角闪岩相和绿片岩相演化特征。随着超镁铁岩的演化, 铬尖晶石表现为 $Cr^{\#}$ 不断增大, 而 $Mg^{\#} [Mg \times 100 / (Mg + Fe^{2+})]$ 不断减少、氧逸度不断增加的过程。PP3 铬尖晶石反映了地幔来源, 为大陆岩石圈超镁铁岩特征, 后期随折返而演化。从石榴石与铬尖晶石相互转变过程看出, PP3 超镁铁岩经历了深度加大的过程, 超镁铁岩曾经到达 100 km 以上的岩石圈地幔深处。在绿片岩相—绿片角闪岩相变质过程中, 铬尖晶石中 Cr、Mg 和 Al 减少, Fe 相对增加, 产生富 Cr 尖晶石变质作用样式。晚期剪切变形等次生变化影响了铬尖晶石矿物成分。

关键词: 石榴石橄榄岩; 铬尖晶石; UHP; CCSD PP3; 苏鲁。

中图分类号: P588.12; P578.4

文章编号: 1000-2383(2006)04-0475-13

收稿日期: 2006-06-02

Transformation of Chromium Spinel and Garnet: Evidence of CCSD PP3 Ultramafic Rocks Processed UHP Metamorphism

CHEN Shi zhong^{1,2}, YANG Jing sui¹, XU Zhi qin¹, LI Tian fu¹, CHEN Fang yuan¹

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

2. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Nanjing 210016, China

Abstract: The ultramafic rocks in the CCSD PP3 (China Continental Scientific Drilling) drill hole consist of dunite and garnet peridotite with a gradual margin between them. The main minerals in the rocks are olivine, chromium spinel, diopside, endiopside, and/or garnet, orthopyroxene, amphibole and phlogopite. Chromium spinels in PP3 ultramafic rocks can be divided into 4 groups with a varied composition, $Cr^{\#}$ (molar $100Cr/(Cr+Mg)$) from 51 to 89, which consists of four evolution stages of the ultramafic rocks. The 4 stages are partial melting, eclogite facies, amphibole facies and greenschist facies. When the $Cr^{\#}$ of chrome spinels increases, the $Mg^{\#}$ (molar $100Mg/(Mg+Fe^{2+})$) of chromium spinels decreases, but oxygen fugacity rises. Compositions of the chromium spinels reflect that the rocks originating from the shallow mantle have subducted to a depth of over 100 km and have then been exhumed to the surface. During the subsequent greenschist facies and amphibole facies metamorphism, the chromium spinels lost some Cr, Mg and Al, but gained relatively more Fe.

Key words: garnet peridotite; chromium spinel; UHP; CCSD PP3; Sulu.

铬尖晶石在超镁铁岩中为常见的副矿物, 由于指示超镁铁岩岩石成因 (Irvine, 1965; Dick and Bullen, 1984; Barnes and Roeder, 2001), 尤其是矿物成分多变和对形成条件的敏感性, 故多被用来

基金项目: 国家重点基础研究发展规划“973”项目 (No. 2003CB716503); 国家自然科学基金重大项目 (No. 40399143); 博士后基金项目。
作者简介: 陈世忠 (1967-), 男, 副研究员, 2002—2004 年中国地质科学院地质研究所博士后, 主要从事岩石学、矿物学和矿床学研究。

E-mail: nicshizhong@cgs.gov.cn

造山带中的超镁铁岩 (Press, 1986; Cookenbo *et al.*, 1997). 超镁铁岩在变质作用 (Evans and Frost, 1975) 和重结晶过程中 (Roeder and Campbell, 1985) 都有可能生成不同的铬尖晶石. 因此, 研究铬尖晶石的矿物学, 对比研究岩石变质作用化学模型, 对认识经历强变质作用的超镁铁岩岩石的成因具有重要意义.

大陆科学钻探工程 (CCSD) 预先导孔 PP3 位于江苏省赣榆县朱堵岗上 I 号超镁铁岩体上, 中国大陆科学钻探工程主孔的东北部 (杨经绥等, 2005), 构造上属于中朝地块和扬子地块之间的秦岭 - 大别 - 苏鲁超高压造山带的东端, 郯庐断裂带的东侧, PP3 钻探中超镁铁岩厚度约为 480 m, 与围岩斜长片麻岩和长英质片麻岩构造接触 (杨经绥等, 2005; 陈世忠等, 2005). 该超镁铁岩体为中国东部 MgO 含量最高的地幔岩类型. 矿物学和同位素地球化学等证据显示 PP3 超镁铁岩经历了超高压变质作用 (杨经绥等, 2005; 陈世忠等, 2005). PP3 超镁铁岩中铬尖晶石表现为多期形成的特点, 并观察到早期残留在石榴石中的铬尖晶石, 超高压变质作用过程铬尖晶石转变成石榴石的现象, 以及在折返过程可能反映石榴石退变成铬尖晶石的现象. 本文拟通过研究 PP3 超镁铁岩中保留的这些复杂的矿物相变化, 探讨超镁铁岩在超高压变质作用过程中的演变历史.

1 PP3 超镁铁岩的主要特征

PP3 超镁铁岩体位于中朝地块和扬子地块间的秦岭 - 大别 - 苏鲁超高压造山带的东部、中央巨型

超高压变质带的东端 (Yang, *et al.*, 2000, 2002)、郯庐断裂带的东侧、中国大陆科学钻探工程主孔的东北部, 属于江苏省赣榆县朱堵岗上 I 号超镁铁岩体上, 区域围岩为斜长片麻岩和长英质片麻岩.

橄榄岩在 PP3 钻孔中出露厚度约为 428 m, 由三大段 (蛇纹石化) 石榴石橄榄岩 (厚度约 97 m) 和六大段纯橄榄岩、蛇纹石化纯橄榄岩和蛇纹岩 (厚度约 331 m) 组成. 超基性岩中下部夹有榴辉岩 (厚度约 8 m)、退变榴辉岩、斜长角闪岩、片岩和片麻岩等. 下部 228 m 为斜长片麻岩和长英质片麻岩互层 (陈世忠等, 2005; 杨经绥等, 2005).

2 PP3 超镁铁岩中不同期次变质岩相学特征

2.1 不同期次的变质岩岩相学

PP3 超镁铁岩包括纯橄榄岩、石榴石橄榄岩和闪石化金云母橄榄岩等岩石类型. 纯橄榄岩是橄榄岩的主要组成岩石类型之一, 岩石蛇纹石化较强, 部分已完成蛇纹石化, 局部穿插网脉状的碳酸盐细脉. 岩石呈浅黄绿色 - 绿灰色, 块状构造或网格状构造, 细粒结构 (图 1a) 和碎斑状结构, 主要由橄榄石和其蚀变产物蛇纹石组成, 占 85% ~ 98%, 还含有少量的铬尖晶石 (1% ~ 10%)、单斜辉石 (0% ~ 4%) 和极少的斜方辉石 (0% ~ 2%) 等矿物; 以及次生矿物蛇纹石 (3% ~ 95%)、角闪石 (1% ~ 6%)、金云母 (0% ~ 2%)、水镁石 (0% ~ 4%)、绿泥石 (0% ~ 2%). 石榴石纯橄榄岩除了含石榴石外, 其他与纯橄榄岩并无明显的区别. 石榴石橄榄岩呈灰绿色 - 黄绿色, 细粒结构, 块状

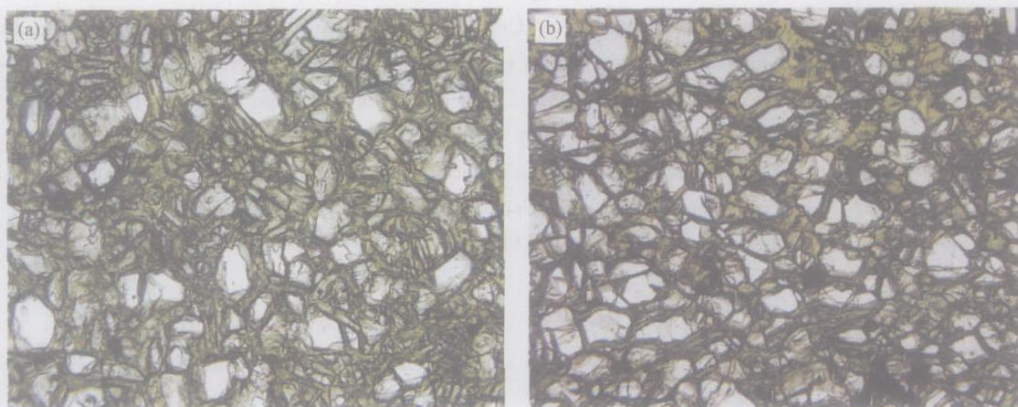


图 1 石榴石橄榄岩 (a) 和 (铬尖晶石) 纯橄榄岩 (b)

Fig. 1 Garnet peridotite (a) and chromium spinel peridotite (b)

构造。岩石组成简单, 主要由橄榄石组成, 含少量的铬尖晶石、石榴石(1%~15%)、单斜辉石、角闪石(3%~8%)、金云母、水镁石和绿泥石等矿物(图 1b)。

橄榄石为镁橄榄石(F_o 在 91.5~92.6 之间), 可识别出两期。早期橄榄石分布于石榴石中, 晚期橄榄石 Fe 和 Cr 含量增加, 橄榄石经历了重结晶作用。石榴石为钙饱和的镁铝榴石($Py_{65.945} Alm_{18.095} Uv_{7.518} Gr_{4.695} And_{3.605} Sp_{0.142}$), 斜方辉石成分都为顽火辉石($Opx I$; $En_{91.86} Fs_{7.80} Wo_{0.34}$; $Opx II$; $En_{91.83} Fs_{7.91} Wo_{0.21} Ac_{0.06}$)。斜方辉石呈粗大的残余颗粒, 并且出溶单斜辉石和铬尖晶石。 $Mg^{\#} [(Mg/(Mg+Fe) \times 100)]$ 在 91.7~92.5 间, Cr_2O_3 含量低于 0.32%, CaO 含量在 0.102%~0.199% 间, Al_2O_3 含量为 0.32%~1.06%, 均值为 0.72%; 单斜辉石可分为早期透辉石($Wo_{45.98} En_{47.89} Fs_{2.73} Ac_{3.39}$) 和晚期顽透辉石($Wo_{27.61} En_{68.78} Fs_{2.27} Ac_{1.34}$) 2 种, 早期透辉石被顽透辉石交代(陈世忠等, 2005)。铬尖晶石的 $Cr^{\#} [Cr/(Cr+Mg) \times 100]$ 从 51~89 变化, TiO_2 和 MnO_2 值分别低于 0.26% 和 0.46%, 铬尖晶石的变化反映了其形成多阶段的特征。矿物氧逸度的增加以及 $Mg^{\#}$ 和 $Cr^{\#}$ 有规律地变化, 都与超镁铁岩演化有关。橄榄石、铬尖晶石和单斜辉石等矿物组合表现为 4 期次的特点(陈世忠等, 2005)。

2.2 不同期次的 PP3 铬尖晶石

对于造山带超镁铁岩中各种成分的副矿物铬尖晶石可能经历了低绿片岩相-低角闪岩相, 甚至到榴辉岩相变质作用。大别-苏鲁超高压变质带中分布大量的超镁铁岩成分的岩石, 这些岩石包含各种成分的副矿物铬尖晶石。岩石经历了低绿片岩相-低角闪岩相, 是否经历了榴辉岩相变质作用? 通过研究铬尖晶石的结构和化学, 对比研究岩浆型尖晶石到变质尖晶石, 为研究变质作用与岩石和矿物的深部行为提供了可能。

PP3 铬尖晶石在所有超镁铁岩中出现, 细小的铬尖晶石呈褐红色他形(图 2A 5), 粗大的铬尖晶石呈黑褐色他形粒状(图 2G 4)、星点状(图 2A 6)或在橄榄岩和蛇纹石中呈他形的、无解理的粒状分布(图 2G 5)。根据矿物演化组合, 把 PP3 超镁铁岩划分为 4 期次特点; 从尖晶石演化来看, 岩石经历了 4 次事件:

(1) 早期铬尖晶石(Chr I) 多产在石榴石中, 作为包体出现(图 2A 8, 2B 1, 2A 3), 其 $Cr^{\#}$ 指数在 50.6~52.7 间。在石榴石和部分橄榄石中呈包体产出的铬尖晶石无裂理。细小、表面光滑。橄榄石

($F_o=92.2$) 和透辉石中铬铁矿(图 2A 5) 具有低的铬指数($Cr^{\#}=51$); 矿物可以表示为($Sp_{150} Chr_{42} Mags$)。

(2) 二期铬尖晶石(Chr II) 可作为早期斜方辉石的出溶物或包体(图 2B 3), 常见铬尖晶石包裹石榴石或为石榴石的退变产物围绕石榴石分布(图 2A 6, 7; 2B 1, 5)。其铬铁矿 $Cr^{\#}$ 在 66~68 之间, 也属于二期铬尖晶石(Chr II)。

(3) 三、四期铬尖晶石界线难以根据矿物共生组合划分, 主要根据矿物成分划分。三期铬尖晶石(Chr III) 产在角闪石中(图 2A 1, 2B 4, 2G 3); 也可以包裹角闪石、辉石和橄榄石(图 2B 6, 2G 8); 或产在晚期的透辉石(顽透辉石)中, 其 $Cr^{\#}$ 指数约为 69, 矿物组成表达为($Sp_{140} Chr_{48} Mag_{12}$)。角闪石包体铬尖晶石具有高的铬指数($Cr^{\#}=72\sim73$)。

(4) 四期铬尖晶石部分与三期铬尖晶石虽难以划分, 但四期铬尖晶石大部分发育八面体裂理, 边部围绕金云母和水镁石等矿物(图 2A 2, 2A 4, 2B 2, 2G 4), 为晚期的铬尖晶石(Chr IV); 金云母和水镁石等矿物围绕的铬尖晶石铬指数 $Cr^{\#}$ 变化于 76~89 之间。也可以产在橄榄石的边部, 与蛇纹石接触, 成分为铬铁矿(图 2B 8), $Cr^{\#}$ 值(97~98, $C_{111}\sim 11$), 代表了最晚的铬尖晶石, 反映了铬尖晶石多期和多阶段的特点。

总体上, 从早期到晚期, PP3 铬尖晶石 $Cr^{\#}$ 不断增大。晚期具有较高的 $Cr^{\#}$ 值(72~89), 在镜下表现为具有角闪石包体($Cr^{\#}=72\sim73$), 或发育八面体裂理; 发育劈理的橄榄岩中铬尖晶石为铬铁矿(图 2G 5), 具有最高的 $Cr^{\#}$ 值(97~100), 代表了角闪岩相期以后的产物(Chr IV)。也说明了铬尖晶石经历了绿片岩相-绿片角闪岩相变质作用(图 3), 常有硫化物与其共生。边部发育金云母、水镁石等共生矿物。

3 PP3 超镁铁岩中的铬尖晶石

矿物化学成分的电子探针测定在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室进行。电子探针分析条件为: 电压 15 kV, 束电流 20 nA, 计数时间 20 s, 电子束直径 1 μ m。矿物的扫描电镜(SEM) 分析在中国地质科学院大陆动力学实验室进行。

3.1 铬尖晶石矿物化学特征

铬尖晶石的矿物成分数据见表 1, 分析条件与其他矿物相似, 其矿物分子式及参数见表 2。

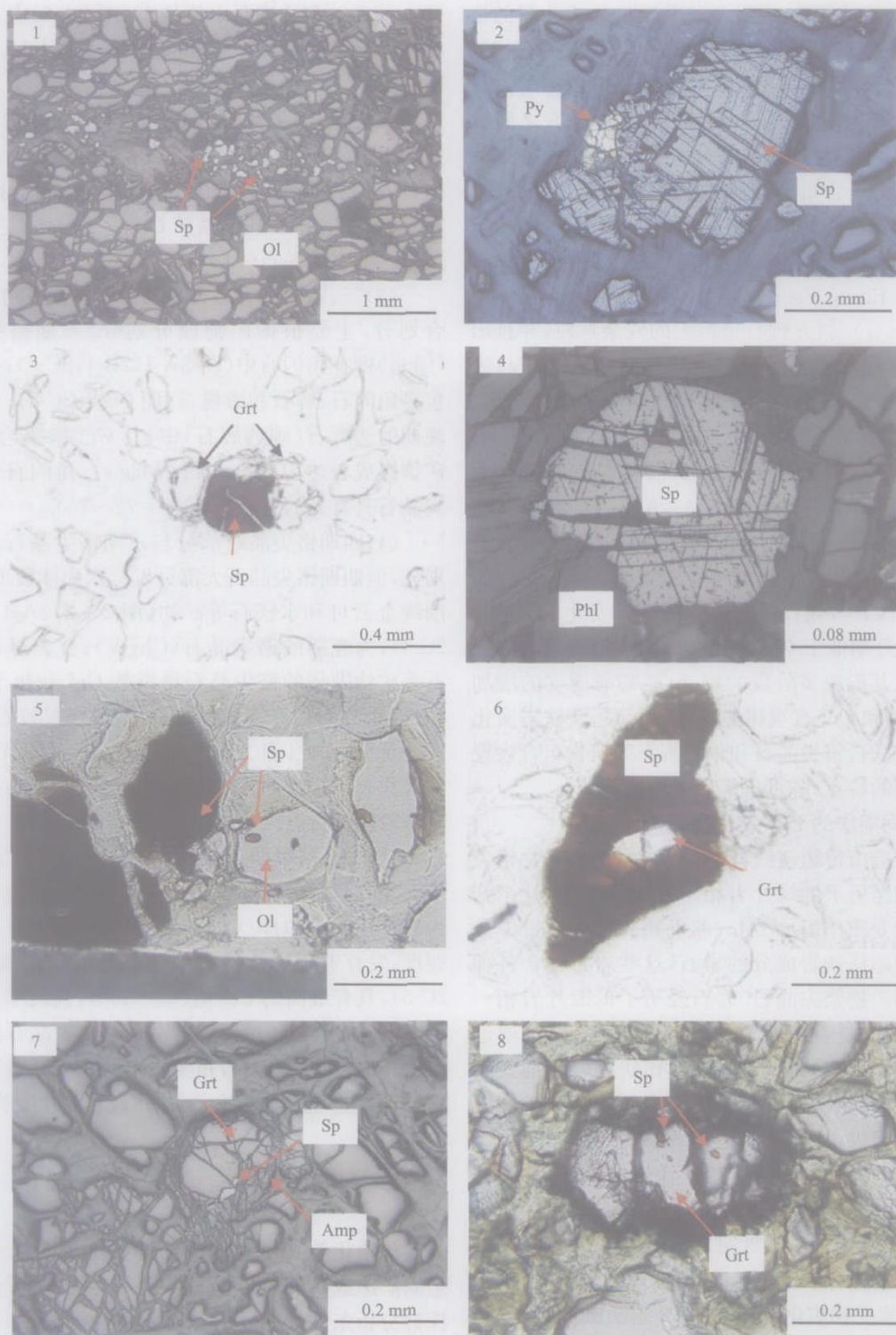


图 2A 不同期次的铬尖晶石在岩石中的分布

Fig. 2A Distribution of chromium spinels in different rocks

1. 尖晶石呈条带状分布(单偏光); 2. B15 R22P1 尖晶石与镍黄铁矿(反射光); 3. 石榴石与角闪石(单偏光); 4. 铬尖晶石裂理(反射光);
5. 橄榄石中尖晶石(单偏光); 6. 尖晶石中石榴石(单偏光); 7. 石榴石边部尖晶石和角闪石(反射光); 8. 石榴石中部和边部尖晶石(单偏光)

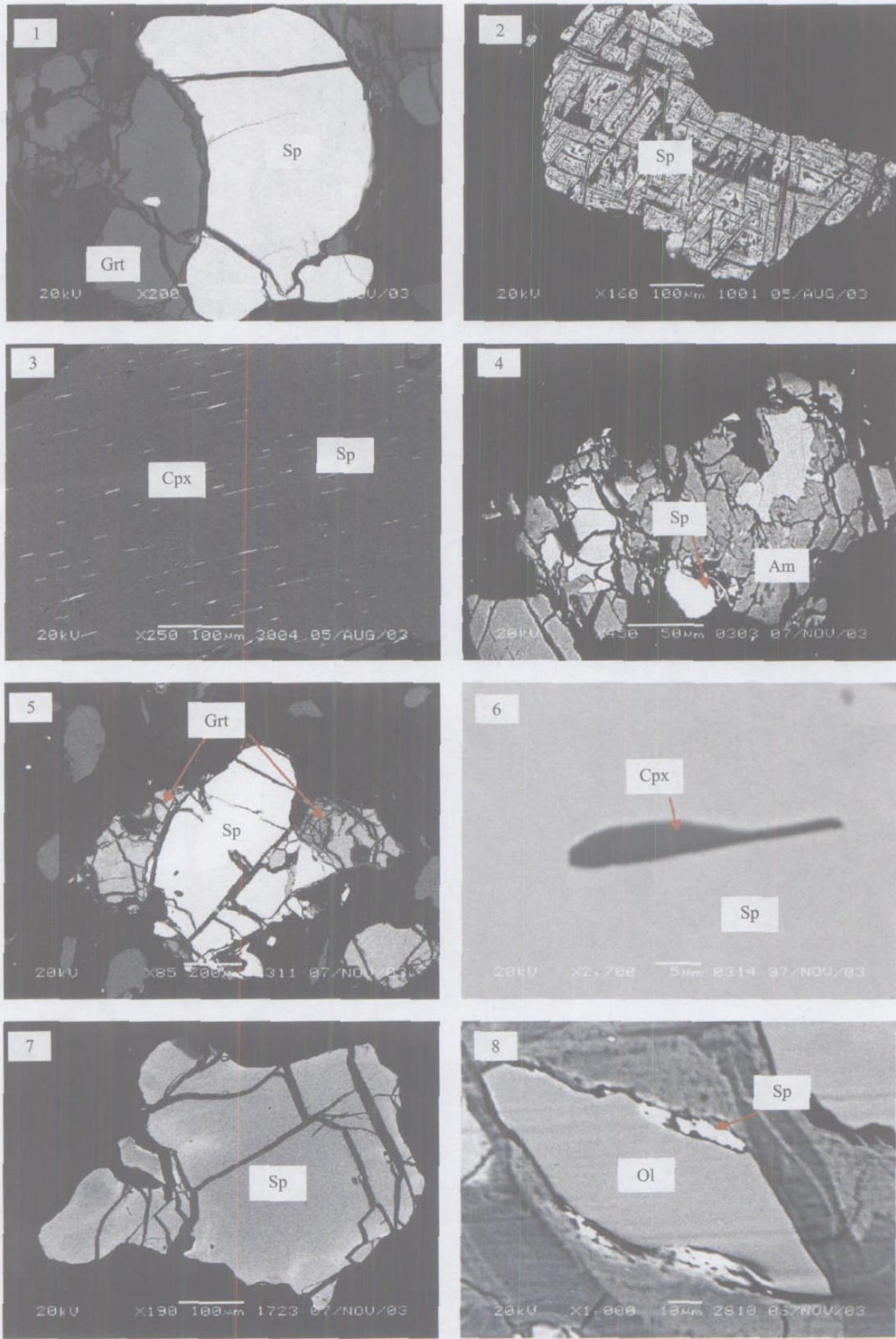


图 2B 不同期次的铬尖晶石在岩石中的分布

Fig. 2B Distribution of chromium spinels in different rocks

1. 石榴石中尖晶石(SEM); 2. “排骨状”铬尖晶石(SEM); 3. 斜方辉石出溶单斜辉石和尖晶石(SEM); 4. 角闪石和尖晶石(SEM); 5. 尖晶石与石榴石共生(SEM); 6. 尖晶石中单斜辉石(SEM); 7. 尖晶石的环状结构(SEM); 8. 橄榄石外部的尖晶石(SEM)

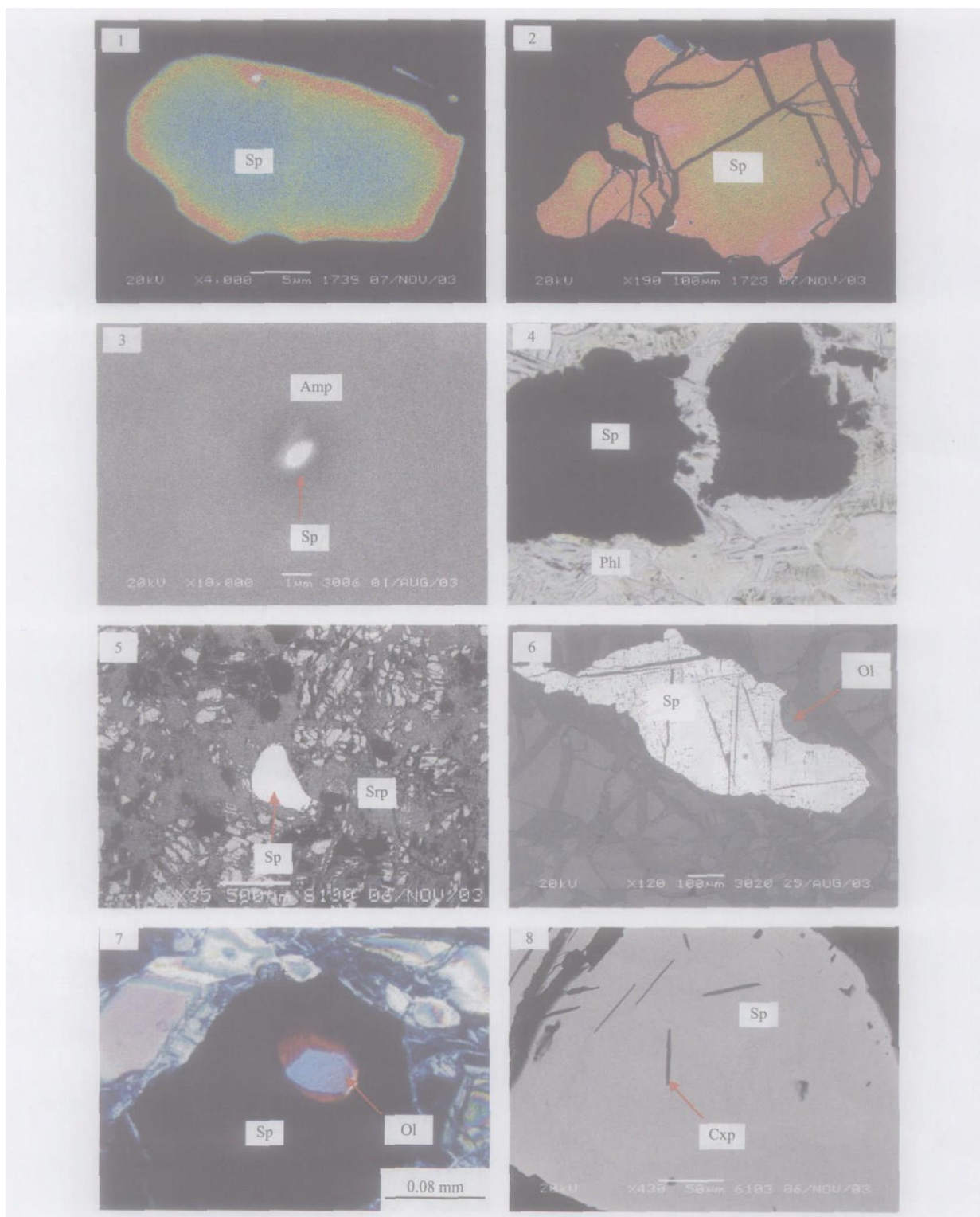


图 2C 不同期次的铬尖晶石在岩石中的分布

Fig. 2C Distribution of chromium spinels in different rocks

1. 尖晶石的环状结构(SEM); 2. 尖晶石的环状结构(SEM); 3. 角闪石中尖晶石(SEM); 4. 尖晶石边部金云母(单偏光); 5. 劈理发育的蛇纹石中尖晶石(SEM); 6. 被橄榄石交代的尖晶石(SEM); 7. 尖晶石中橄榄石(单偏光); 8. 尖晶石中单斜辉石(SEM)

表 1 铬尖晶石电子探针分析结果
Table 1 Composition of chrome spinels

序号	样品名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	总量	Cr [#]	Mg [#]
1	1	0.178	0.055	21.619	46.867	22.091	0.120	10.399	0.000	101.33	59	46
2	1	0.000	0.038	24.795	44.060	20.513	0.066	11.027	0.000	100.50	54	49
3	1	0.096	0.089	22.626	45.744	20.422	0.043	10.726	0.000	99.75	58	48
4	1	0.141	0.000	26.200	41.347	22.196	0.000	11.065	0.019	100.97	51	47
5	2	0.003	0.131	22.496	44.881	21.212	0.070	10.710	0.004	99.51	61	43
6	2	0.000	0.258	22.948	45.062	20.798	0.015	10.449	0.000	99.53	63	36
7	2	0.000	0.223	17.639	47.424	27.030	0.120	8.391	0.000	100.83	51	50
8	2	0.140	0.285	16.257	48.793	25.701	0.000	8.905	0.057	100.14	59	50
9	2	0.057	0.178	15.991	48.875	24.451	0.156	9.337	0.113	99.16	57	47
10	2	0.056	0.108	22.081	44.403	21.687	0.109	10.511	0.012	98.97	57	47
11	3	0.099	0.079	11.325	56.918	26.275	0.055	6.574	0.000	101.33	64	36
12	3	0.142	0.123	10.179	57.768	25.439	0.028	6.525	0.000	100.20	67	38
13	4	0.000	0.126	4.730	55.232	35.813	0.025	4.712	0.000	100.64	67	41
14	4	0.324	0.106	4.611	57.137	32.667	0.059	4.951	0.000	99.86	57	46
15	5	0.022	0.000	15.860	50.107	26.477	0.000	8.357	0.000	100.82	77	31
16	5	0.020	0.000	15.353	51.473	25.742	0.000	8.302	0.000	100.89	79	31
17	6	0.015	0.000	6.770	48.299	39.173	0.000	5.381	0.000	99.64	89	19
18	1	0.000	0.040	20.625	47.455	22.572	0.319	9.545	0.000	100.61	89	21
19	1	0.153	0.024	17.771	45.933	24.936	0.472	7.919	0.031	97.32	68	36
20	1	0.144	0.022	27.420	41.911	19.884	0.000	11.182	0.001	100.75	69	37
21	1	0.000	0.014	22.405	47.261	19.963	0.000	11.199	0.000	101.23	83	20
22	7	0.000	0.037	19.129	48.723	25.179	0.000	9.785	0.012	103.00	63	41
23	7	0.000	0.005	19.663	50.906	21.120	0.000	9.942	0.003	101.94	63	46
24	8	0.000	0.022	19.226	49.922	21.872	0.000	9.282	0.000	100.44	64	43
25	8	0.000	0.034	20.156	46.203	23.810	0.000	10.107	0.000	100.40	61	43
26	8	0.000	0.019	25.977	43.207	18.461	0.000	11.758	0.000	99.70	53	53
27	9	0.000	0.038	19.320	49.440	21.724	0.000	9.116	0.000	99.84	63	43

样品名称: 1. C19-4, 石榴石橄榄岩; 2. C29-10, 石榴石橄榄岩; 3. C31-1, 纯橄岩; 4. C86-6, 纯橄岩; 5. C89-5, 纯橄岩; 6. C104-7, 纯橄岩; 7. C27-11, 石榴石橄榄岩; 8. C52-3, 石榴石橄榄岩; 9. C96-7, 纯橄岩。

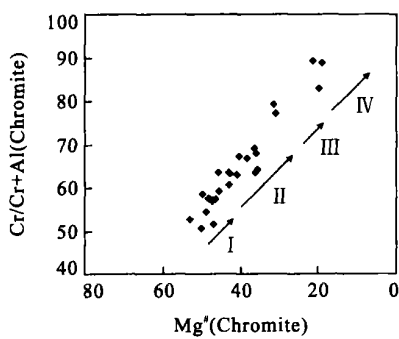


图 3 铬尖晶石的 Mg[#] - Cr[#] 相关关系

Fig. 3 Chromite correlation diagram of Mg[#] and Cr/(Cr+Al)

3.2 铬尖晶石形成氧逸度

尖晶石族矿物的化学式可表示为 AB₂O₄, A 表示二价阳离子, B 表示三价阳离子. 根据三价阳离子的种类, 可分为尖晶石系列 (Al)、磁铁矿系列 (Fe³⁺) 和铬铁矿系列 (Cr³⁺). 通常橄榄岩中的尖晶

石的成分在尖晶石 (MgAl₂O₄)、铁尖晶石 (FeAl₂O₄)、镁铬铁矿 (MgCr₂O₄) 和铬铁矿 (FeCr₂O₄) 4 个端元变化. 铬尖晶石的分子式 (Mg, Fe²⁺)(Cr, Al, Fe³⁺)₂O₄, Cr 和 Mg 在尖晶石与硅酸盐的分异中, 富集于固相, Al 在熔体中富集, 而且 Mg 和 Fe²⁺ 在尖晶石与熔体的分配系数与温度相关, Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 比值与 (fO₂) 氧逸度相关. 岩浆中结晶的尖晶石反映了岩浆温度、压力和熔体成分, 它对构造环境和形成环境的解释具有确定性 (Arai and Okada, 1991; Lee, 1999), 尤其对造山带的解释 (Press, 1986; Cookenboo *et al.*, 1997). 因此, 它是岩石物理化学条件的指示计 (Irvine, 1965; Dick and Bullen, 1984; Arai, 1992, 1994). 通常运用尖晶石的 Cr[#] (Cr/(Cr+Al) × 100), Mg[#]、Fe³⁺ 和 TiO₂ 含量来表达. Arai (1994)、Barnes and Roeder (2001)、Roeder (1994) 等人都对尖晶石成分进行了深入的研究.

表 2 32 个氧原子时铬尖晶石分子式和参数

Table 2 Molecular formula and parameter of chrome spinels

序号	Si	Ti	Al	Cr	Fe(III)	Fe(II)	Mg	Cr [#] / (Cr+Al)	Mg / (Fe+Mg)	Fe ³⁺ / (Fe ³⁺ +Fe ²⁺)	Mg/Fe
1	0.044	0.010	6.315	9.184	0.392	4.187	3.843	0.59	0.46	0.09	0.84
2	0.000	0.007	7.176	8.554	0.256	3.956	4.037	0.54	0.49	0.06	0.96
3	0.024	0.017	6.660	9.032	0.227	4.038	3.994	0.58	0.48	0.05	0.94
4	0.034	0.000	7.502	7.942	0.488	4.021	4.008	0.51	0.47	0.11	0.89
5	0.000	0.008	6.126	9.455	0.404	4.353	3.586	0.61	0.43	0.08	0.75
6	0.041	0.005	5.553	9.628	0.728	4.800	3.130	0.63	0.36	0.13	0.57
7	0.035	0.004	7.841	8.040	0.041	3.994	4.045	0.51	0.50	0.01	1.00
8	0.000	0.003	6.522	9.229	0.244	3.879	4.124	0.59	0.50	0.06	1.00
9	0.001	0.025	6.637	8.883	0.429	4.012	3.997	0.57	0.47	0.10	0.90
10	0.000	0.049	6.772	8.921	0.210	4.145	3.901	0.57	0.47	0.05	0.90
11	0.000	0.043	5.327	9.607	0.980	4.811	3.205	0.64	0.36	0.17	0.55
12	0.036	0.055	4.949	9.964	0.904	4.647	3.429	0.67	0.38	0.16	0.62
13	0.015	0.035	4.901	10.048	0.952	4.364	3.620	0.67	0.41	0.18	0.68
14	0.014	0.020	6.562	8.852	0.516	4.057	3.952	0.57	0.46	0.11	0.86
15	0.026	0.016	3.546	11.957	0.413	5.426	2.604	0.77	0.31	0.07	0.45
16	0.038	0.025	3.238	12.326	0.310	5.431	2.625	0.79	0.31	0.05	0.46
17	0.000	0.026	1.550	12.140	2.258	6.067	1.953	0.89	0.19	0.27	0.23
18	0.091	0.022	1.521	12.642	1.611	6.033	2.066	0.89	0.21	0.21	0.27
19	0.006	0.000	4.827	10.231	0.930	4.788	3.218	0.68	0.36	0.16	0.56
20	0.005	0.000	4.684	10.535	0.771	4.801	3.204	0.69	0.37	0.14	0.57
21	0.004	0.000	2.202	10.539	3.251	5.790	2.214	0.83	0.20	0.36	0.24
22	0.000	0.007	5.592	9.556	0.838	4.385	3.619	0.63	0.41	0.16	0.69
23	0.000	0.001	5.799	10.071	0.128	4.291	3.709	0.63	0.46	0.03	0.84
24	0.000	0.004	5.769	10.048	0.175	4.481	3.523	0.64	0.43	0.04	0.76
25	0.000	0.006	5.983	9.200	0.804	4.211	3.795	0.61	0.43	0.16	0.76
26	0.000	0.004	7.516	8.387	0.090	3.700	4.304	0.53	0.53	0.02	1.14
27	0.000	0.007	5.836	10.018	0.132	4.524	3.483	0.63	0.43	0.03	0.75

样品名称和岩石名称同表 1.

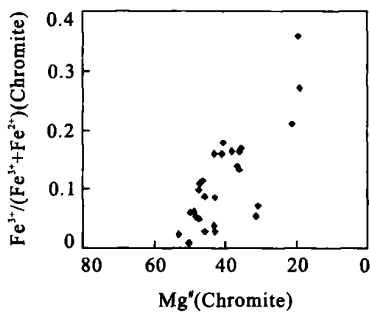


图 4 铬尖晶石 Mg[#] 与 Fe³⁺ / (Fe³⁺ + Fe²⁺) 关系

Fig. 4 Chromite corelationship diagram of Mg[#] and Fe³⁺ / (Fe³⁺ + Fe²⁺)

尖晶石中 Fe³⁺ 含量变化大, 并且与辉石和石榴石不同, 可以通过探针分析方法得到较可靠的结果 (Wood and Virgo, 1989). 所以对橄榄岩氧逸度的测定有着重要的意义. 晚期岩石 Fe³⁺ / Fe²⁺ 比值增大 (图 4), 氧逸度增加, 高氧逸度有利于尖晶石富集 Cr 和 Fe³⁺ (Roeder, 1974), 矿物颗粒也越来越大,

并出现了含水矿物 - 角闪石和金云母等. 较高的 Mg[#] 和 Cr[#] 说明了壳源物质的混染较弱.

Abe *et al.* (1992) 指出尖晶石的 Fe³⁺ / (Cr + Al + Fe³⁺) 明显在富角闪石的橄榄岩中富集. 富铝尖晶石在高氧逸度 ($f_{O_2} = MW$ and $IW + 2$) 中富集, 但 PP3 橄榄岩中铬尖晶石晚期富集 Cr³⁺ 与 Fe³⁺, 反映了 Cr³⁺ / (Cr³⁺ + Cr²⁺) 比值在晚期增大, Cr³⁺ 和 Cr²⁺ 都能在 QFM-IW 氧逸度的条件下存在, 但只有 Cr³⁺ 进入尖晶石的八面体结构, 高氧逸度 (f_{O_2}) 有利于尖晶石的结晶, 使与角闪石共生的尖晶石越来越大.

4 讨论和结论

4.1 PP3 铬尖晶石形成环境

4.1.1 铬尖晶石在不同橄榄岩类型中的特征 在岩浆分异结晶和部分熔融过程中, 尖晶石主要组分

表现不同行为, Cr 和 Mg 强烈分配在固态中, Al 强烈分配到熔体中. 另外, Mg 和 Fe²⁺ 在尖晶石和硅酸盐熔体和矿物中的分配关系由温度、铁价态的变化决定. 岩浆中铬尖晶石反映了岩浆条件, 例如压力、温度和熔体成分. 通常认为超镁铁岩尖晶石形成环境与深海橄榄岩、弧前橄榄岩、弧后橄榄岩、大陆裂谷橄榄岩和造山带环境橄榄岩有关.

作为真正洋壳组成的深海橄榄岩产生于大洋中脊. 深海橄榄岩被认为是地幔部分熔融的残余体 (Dick and Bullen, 1984). 其铬尖晶石的 Cr[#] 小于 60, 其最显著的特征是 Cr 和 Al 的变化大, 且 Cr[#] 与 Mg[#] 呈明显的负相关. 铬尖晶石中 Fe²⁺ 含量小于 5%, 随 Fe³⁺ 和 Cr[#] 含量增加略有增大 (Dick and Bullen, 1984). 绝大部分深海橄榄岩尖晶石具有很低的 TiO₂ 含量 (< 0.25%).

弧前橄榄岩主要是上地幔浅部俯冲带 (supra-subduction zone) 的方辉橄榄岩和壳幔过渡带的纯橄榄岩 (Arai, 1994). 其尖晶石 Cr[#] 变化于 40~90, 以 70 为主 (Bloomer and Fisher, 1987). 另外, Mg[#] 与 Cr[#] 负相关, Fe³⁺ / (Fe³⁺ + Al + Fe²⁺) 比值低, 小于 10.

日本海橄榄岩包体 (Ishii, 1987) 和 Circum Izu 块状橄榄岩为弧后橄榄岩 (Arai, 1991). 其岩性主要为二辉橄榄岩和方辉橄榄岩, 岩石中尖晶石数据较少, 其 Cr[#] 从 40~60 变化 (Arai, 1991).

大陆裂谷喷发的碱性玄武岩中橄榄岩包体, 其尖晶石 Cr[#] 变化较大, 从 5~80 变化, 大部分二辉橄榄岩包体的尖晶石 Cr[#] 小于 20 (Nixon, 1987).

造山带橄榄岩在各种板块边界出现, 地幔成因的造山带橄榄岩与活化造山带和岛弧有关 (Press,

1986). 造山带橄榄岩多为构造侵位, 而不是岩浆侵位. 造山带铬尖晶石 Cr[#] 含量在 8~95 之间变化, 并以 50 为主, 而且 Cr³⁺ 与 Fe³⁺ 呈正相关, 但 Fe³⁺ 含量很低. 方辉橄榄岩-二辉橄榄岩间尖晶石的 Cr[#] 以 50 为主. 蛇绿岩方辉橄榄岩与弧前橄榄岩一致, 蛇绿岩型二辉橄榄岩与洋底橄榄岩一致 (Arai, 1994).

4.1.2 PP3 铬尖晶石形成环境 PP3 超镁铁岩铬尖晶石 Mg[#] 与 Cr[#] 呈明显的负相关关系 (图 3), Cr[#] 大约为 70, Fe³⁺ 值小于 10, 这些都反映了弧前橄榄岩中尖晶石的特征 (Arai, 1994), 也反映了造山带橄榄岩的特征. 在铬尖晶石成分 Mg[#]-Cr[#] 图解上 (图 5a) (Guillot *et al.*, 2001), 多数 PP3 铬尖晶石样品落入弧前橄榄岩尖晶石中. 部分晚期样品落入深俯冲带, 反映了深度亏损地幔成因. 由于 PP3 铬尖晶石主要体现岩石在俯冲和折返过程中的变化, 尤以后期样品为主, 故保存岩石折返环境. 推断岩石在造山带与弧前类似的环境折返, 这就是高氧逸度、含水和基性岩交代或碳酸岩交代的特征.

结合 PP3 超镁铁岩铬尖晶石 Cr₂O₃ 与斜方辉石 Al₂O₃ 关系图 (图 5b), 斜方辉石的 Al₂O₃ 含量小于 1.1%, 铬尖晶石 Cr₂O₃ 含量为 41%~58%, PP3 超镁铁岩表现为大陆克拉通超镁铁岩的特征, 明显不同于大洋橄榄岩 (Widom *et al.*, 2003).

在橄榄石 Mg[#] 和尖晶石 Cr[#] 图解 (图 6) 上, 所有 PP3 样品落入橄榄石-尖晶石地幔阵列 (OSMA) 中, 反映了橄榄石与铬尖晶石在地幔中达到平衡, 相当于 MORB 地幔经 25%~45% 部分熔融而成.

PP3 超镁铁岩铬尖晶石与日本东北部 Miyamori 蛇绿岩杂岩体中铬铁矿岩的比较 (图 7) (Ozawa, 1994) 看出, PP3 超镁铁岩总体特征可以与蛇绿岩对

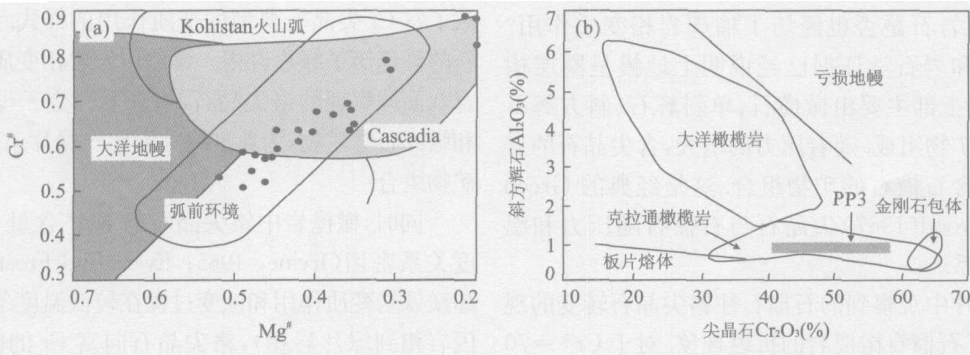


图 5 铬尖晶石成分图解 (a) 和铬尖晶石 Cr₂O₃ 与斜方辉石 Al₂O₃ 关系 (b)

Fig. 5 Composition of chromium spinels (a) and diagram of Cr₂O₃ of chromium spinels and Al₂O₃ of orthopyroxene (b)

图 a 据 Guillot *et al.*, 2001; 图 b 据 Kepezhinskas and Defant, 1997

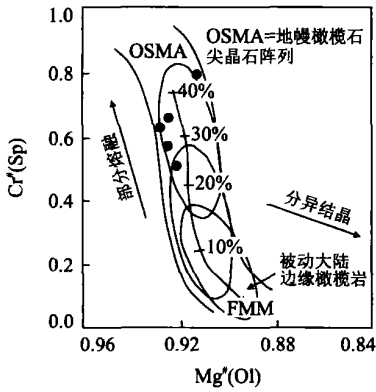


图 6 橄榄石 $Mg^{\#}$ 和铬尖晶石 $Cr^{\#}$ 图解 (Pearce *et al.*, 2000)
Fig. 6 Plot of chromium spinel $Cr^{\#}$ against olivine $Mg^{\#}$ for the PP3 peridotites

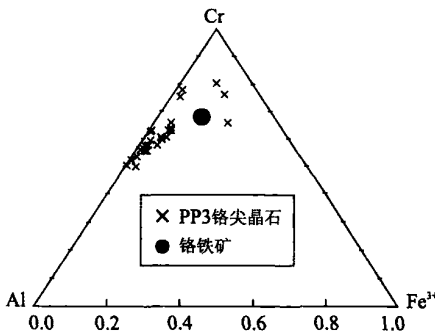


图 7 铬尖晶石 Cr 、 Al 和 Fe^{3+} 含量与铬铁矿比较
Fig. 7 Chromium spinel compositions shown in Cr 、 Al and Fe^{3+} ternary diagram

比,但其铬尖晶石成分变化较大,并且后期成分靠近蛇绿岩铬铁矿成分,与早期成分明显不同。

4.2 PP3 铬尖晶石的变质作用和蚀变特征

4.2.1 PP3 铬尖晶石超高压变质特征 PP3 超镁铁岩中间夹有超高压的榴辉岩。从铬尖晶石矿物研究的角度,岩石是否也经历了榴辉岩相变质作用?地球物理和岩石学证据已经说明上地幔呈圈层构造,地幔最上部主要由橄榄石、单斜辉石、斜方辉石和尖晶石矿物组成。随着压力的增大,含尖晶石的岩石转变为含石榴石的矿物组合。这是经典的 Green and Ringwood(1967)尖晶石与石榴石随压力和温度变化关系。

在薄片观察到的石榴石往铬尖晶石转变的现象,说明了石榴石橄榄岩的折返现象。对于 $Cr^{\#} = 70$ 的铬尖晶石来说,向石榴石转变需要 3.6 GPa 的压力(O'Neill, 1981)。PP3 超镁铁岩石榴石转变为铬尖晶石的现象,以及其较低的折返温度,估计岩石曾

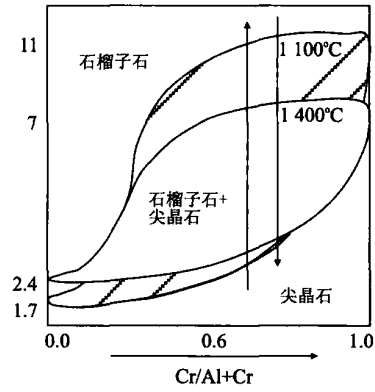


图 8 铬尖晶石矿物 $Cr^{\#}$ 演化变化(据 Klemme 2004 修改)
Fig. 8 Evolution of $Cr^{\#}$ of PP3 chromium spinels

经到达 4.0 GPa 以上压力环境(图 8)(Klemme, 2004)。俯冲的最大深度需要结合矿物学、化学动力学和实验等做进一步的研究。

通过上面分析,推断苏鲁超高压变质带中 PP3 超镁铁岩经历了深度加大的过程,超镁铁岩曾经到达 100 km 以上的岩石圈地幔深度,位于大陆板块边缘碰撞和加厚岩石圈中。

4.2.2 PP3 中晚期铬尖晶石蚀变和变质作用

(1) 尖晶石与粒间熔体的反应。早结晶的铬尖晶石可能迅速与粒间熔体反应(Roeder, 1994),尤其位于橄榄石间。Roeder and Campbell(1985)指出这种反应导致了 Mg 、 Cr 和 Al 含量的减少和 Fe 与 Ti 含量的增加。但这些特征与中低级变质作用特征一致,因此,粒间熔体反应对铬尖晶石的影响有多大尚无法估计。

(2) 中低级变质作用。尖晶石从早期富 Al 到后期富 Cr 和 Fe 的过程,与 Cr 一般在岩浆结晶作用过程中分配于先结晶的硅酸岩中不同,说明了角闪岩相变质作用导致了尖晶石中 Cr 、 Mg 和 Al 减少, Fe 相对增加,导致了富 Cr 尖晶石典型的变质作用的样式。PP3 尖晶石的确经历了绿片岩相-绿片角闪岩相变质作用。发育八面体解理的铬尖晶石,边部发育金云母、水镁石和绿泥石等矿物,为典型绿片岩相-绿片角闪岩相的矿物组合。

同时,橄辉岩中铬尖晶石的 $Mg^{\#}$ 含量与平衡温度关系密切(Irvine, 1965; Evans and Frost, 1975)。超镁铁岩变质作用和蚀变过程在较低温度条件下(角闪岩相到绿片岩相),铬尖晶石向富 Cr 的磁铁矿转变, $Mg^{\#}$ 指数减小。(3) 蛇纹石化和低温热液蚀变。PP3 铬尖晶石组分中磁铁矿含量的增加反映了晚期低级变质作用的特点。剪切变形强的样品中铬尖晶石具有

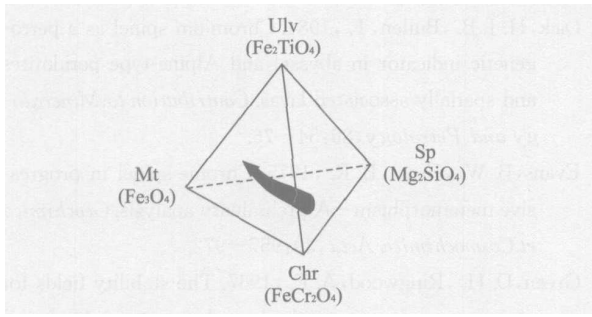


图 9 PP3 铬尖晶石化学蚀变样式示意图

Fig. 9 Chemical alteration patterns of the PP3 chromium spinel

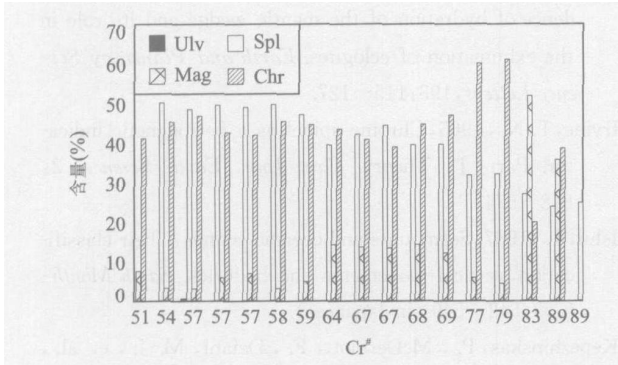


图 10 PP3 铬尖晶石矿物组分变化

Fig. 10 Composition variation patterns of the PP3 chrome spinel

更高的 $Cr^{\#}$ 值和 Fe^{3+} 含量、更低的 Fe^{2+} 和 Ti 含量, 剪切阶段形成的尖晶石表现为 Fe 总量的减少和 Fe^{3+} 的增加, 并与滑石和碳酸盐脉等低温蚀变有关。低 Ti 等特征反映了 CO 流体的交代条件。

综上所述, 早期铬尖晶石(CrI)代表了强烈亏损的尖晶石方辉橄榄岩(原始地幔经历了 25%部分熔融)经历了超高压环境, 其中经历了亏损火山弧拉斑玄武岩成分物质(相当于区域亏损的榴辉岩)的交代反应, 导致了与主体岩性和矿物尖晶石等不协调的石榴石的生成(另文阐述)。在退变过程中, 岩石局部和部分经历了部分熔融, 特别在碳酸岩熔体和流体的作用下(另文阐述), 致使岩石强烈亏损, 铬尖晶石向富 $Cr^{\#}$ 和低 Ti 的方向演化(尖晶石 III)(图 9, 10)。石榴石边部发育铬尖晶石反应边和 Cpx_{II} 中包裹铬尖晶石来看, 岩石可能在碳酸岩熔体的作用下经历了进一步的亏损, 实现了 $Ol + Grt = Sp + MELT(Cpx)$ 反应; 晚期低级变质作用、剪切变形和 CO 流体交代使铬尖晶石进一步演化。

PP3 铬尖晶石 TiO_2 与 $Cr^{\#}$ 图解(图 11)表明了部

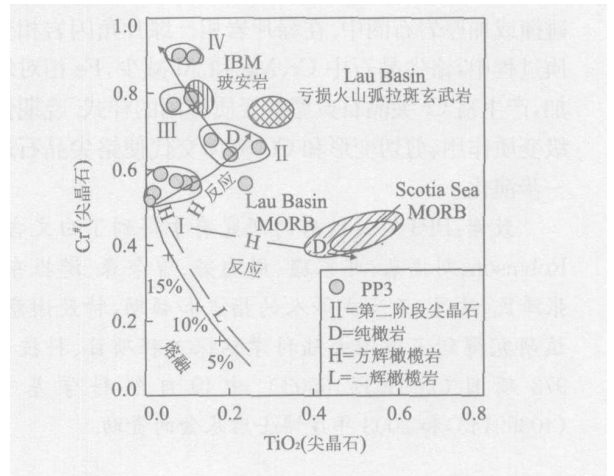


图 11 PP3 铬尖晶石 TiO_2 与 $Cr^{\#}$ 图解 Pearce *et al.*, 2000)

Fig. 11 Diagram of TiO_2 and $Cr^{\#}$ of PP3 chrome spinel

分早期铬尖晶石(CrI)保存着原始纯橄岩的特征, 部分受到了变质作用和交代作用(CrH III)。部分亏损橄榄岩经历了高温变形(CrIV), 并显示了蚀变交代作用(图 11)。

5 结论

PP3 超镁铁岩尖晶石为铬尖晶石, 其产出表现为多期次多阶段的特点; 结合矿相学和矿物化学表明: 4 期铬尖晶石反映了从岩浆期、榴辉岩相、角闪岩相和绿片岩相演化特征(图 12)。随着岩体的演化, 铬尖晶石 $Cr^{\#}$ 不断增大, $Cr^{\#}$ 变化于 51 ~ 100, 而铬尖晶石 $Mg^{\#}$ 与 $Cr^{\#}$ 呈负相关关系, 氧逸度不断增大。PP3 铬尖晶石反映了地幔来源, 为大陆岩石圈超镁铁岩特征, 石榴石与铬尖晶石相互转变关系表明, PP3 超镁铁岩经历了深度加大的过程, 超镁铁岩曾经到达 100 km 以上的岩石圈地幔深度, 曾位于大陆板块边缘

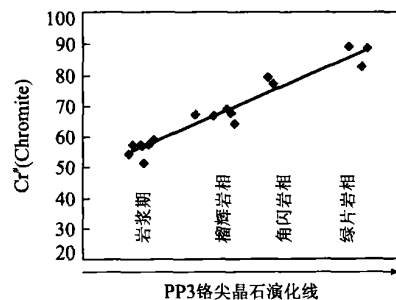


图 12 铬尖晶石矿物 $Cr^{\#}$ 演化变化

Fig. 12 Evolutionary phase of $Cr^{\#}$ of PP3 chromium spinels

碰撞或加厚岩石圈中。在绿片岩相 - 绿片角闪岩相变质过程中, 铬尖晶石中 Cr、Mg 和 Al 减少, Fe 相对增加, 产生富 Cr 尖晶石典型的变质作用的样式。晚期低级变质作用、剪切变形和 CO₂ 流体交代使铬尖晶石进一步演化。

致谢: PP3 超镁铁岩的研究有幸得到了白文吉、Robinson、刘福来、邱家骥、周珣若、曾令森、游振东、张泽民、沈昆、王汝成等人的指点和帮助, 特致谢意。该研究得到了中国大陆科学钻探工程项目、科技部 973 项目 (2003CB716503)、中国自然科学基金 (40399143) 和 2003 年度博士后基金的资助。

References

- Abe N., Arai S., Saeki Y., 1992. Hydration processes in the arc mantle; Petrology of the Megata peridotite xenoliths, the northeast Japan arc. *Jour. Min. Petr. Econ. Geol.*, 87: 305 - 317.
- Arai S., 1991. The Circum Izu Massive peridotite, central Japan, as back arc mantle fragments of the Izu Bonin arc system. In: Peters T. j., Nicolas A., Coleman R. G., eds., *Ophiolite genesis and evolution of the oceanic lithosphere*. Kluwer, Dordrecht, 807 - 822.
- Arai S., 1992. Chemistry of chromium spinel in volcanic rocks as a potential guide to magma chemistry. *Mineralogical Magazine*, 56: 173 - 184.
- Arai S., 1994. Characterization of spinel peridotites by olivine spinel compositional relationships; Review and interpretation. *Chemical Geology*, 113: 191 - 204.
- Arai S., Okada H., 1991. Petrology of serpentine sandstone as a key to tectonic development of serpentine belts. *Tectonophysics*, 195: 65 - 81.
- Barnes S. J., Roeder P. L., 2001. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *J. Petrol.*, 42: 2279 - 2302.
- Bloomer S. H., Fisher R. L., 1987. Petrology and geochemistry of igneous rocks from the Tonga Trench - A nonaccreting plate boundary. *Journal of Geology*, 95: 469 - 495.
- Chen S. Z., Yang J. S., Xu Z. Q., et al., 2005. Petrology and mineralogy of PP3 ultramafic rocks in Sulu UHP belt and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 369 - 380 (in Chinese with English abstract).
- Cookinbo, H. O., Bustin R. M., Wilks K. R., 1997. Detrital chromium spinel compositions used to reconstruct the tectonic setting of provenance; Implications for orogeny in the Canadian Cordillera. *Journal of Sedimentary Research*, 67: 116 - 123.
- Dick, H. J. B., Bullen T., 1984. Chromium spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and Alpine type peridotites and spatially associated lavas. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 86: 54 - 76.
- Evans B. W., Frost B. R., 1975. Chrome spinel in progressive metamorphism - A preliminary analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39: 957 - 972.
- Green, D. H., Ringwood A. E., 1967. The stability fields for aluminous pyroxene peridotite and garnet peridotite and their relevance in upper mantle structure. *Earth Planet. Sci. Letters* 3: 151 - 160.
- Guillot S., Hattori K. H., Sigoyer J. D., et al., 2001. Evidence of hydration of the mantle wedge and its role in the exhumation of eclogites. *Earth and Planetary Science Letters*, 193: 115 - 127.
- Irvine T. N., 1965. Chrome spinel as a petrogenetic indicator. Part I. Theory. *Can. Jour. Earth Science*, 2: 648 - 674.
- Ishii, T., 1987. Seamounts and oceanic islands; Their classification, vertical movements and histories. *Earth Monthly*, 9: 542 - 549 (in Japanese).
- Kepezhinskas P., McDermott F., Defant M. J., et al., 1997. Trace element and Sr Nd Pb isotopic constraints on a three component model of Kamchatka arc petrogenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61: 577 - 600.
- Kepezhinskas P. K., Defant M. J., 1997. Progressive enrichment of island arc mantle by melt peridotite interaction inferred from Kamchatka xenoliths. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 1217 - 1229.
- Klemme S., 2004. The influence of Cr on the garnet spinel transition in the Earth's mantle: Experiments in the system MgO-Cr₂O₃-SiO₂ and thermodynamic modelling. *Lithos* 77(1-4): 639 - 646.
- Lee Y. I., 1999. Geotectonic significance of detrital chromian spinel: A review. *Geosciences Journal*, 3(1): 23 - 29.
- Nixon P. H., 1987. *Mantle xenoliths*. Wiley, New York, 844.
- Ozawa, K., 1994. Melting and melt segregation in the mantle wedge above a subduction zone: Evidence from the chromite bearing peridotites of the Miyamori ophiolite complex, northeastern Japan. *J. Petrology*, 35: 647 - 678.
- O'Neill, H. St. C., 1981. The transition between spinel lherzolite and garnet lherzolite, and its use as a geobarometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 77: 185 - 194.
- Pearce, J. A., Barker, P. F., Edwards, S. J., et al., 2000. Geochemistry and tectonic significance of peridotites from

- the South Sandwich arc basin system, South Atlantic. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 139: 36 – 53.
- Press, S., 1986. Detrital spinels from alpinotype source rocks in Middle Devonian sediments of the Rhenish massif. *Geologische Rundschau*, 75: 333 – 340.
- Roeder, P., 1974. The crystallization of spinel from basaltic liquid as a function of oxygen fugacity. *J. Geol.*, 82: 709 – 729.
- Roeder, P. L., 1994. Chromite: From the fiery rain of chondrules to the Kilauea Iki lava lake. *Can. Mineral.*, 32: 729 – 746.
- Roeder, P. L., Campbell, I. H., 1985. The effect of postcumulus reactions on composition of chrome spinels from the Jimberlana intrusion. *Journal of Petrology*, 26(3): 763 – 786.
- Widom, E., Kepezhinskas, P., Defant, M., 2003. The nature of metasomatism in the sub arc mantle wedge: Evidence from Re Os isotopes in Kamchatka peridotite xenoliths. *Chemical Geology*, 196: 283 – 306.
- Wood, B. J., Virgo, D., 1989. Upper mantle oxidation state: Ferric iron contents of harzburgite spinels by ^{57}Fe Mossbauer spectroscopy and resultant oxygen fugacities. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 1277 – 1291.
- Yang J. S., Chen S. Z., Zhang Z. M., et al., 2005. A preliminary study of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) PP3 hole on the Gangshang garnet peridotite body in the Sulu UHPM belt. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 293 – 304 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. S., Xu, Z. Q., Pei, X. Z., et al., 2002. Discovery of diamond in North Qinling: Evidence for a giant UHPM belt across central China and recognition of Paleozoic and Mesozoic dual deep subduction between North China and Yangtze plates. *Acta Geologica Sinica*, 76(4): 484 – 495.
- Yang, J. S., Xu, Z. Q., Song, S. G., et al., 2000. Discovery of eclogite in Dulan, Qinghai Province and its significance for the HP UHP metamorphic belt along the central orogenic belt of China. *Acta Geologica Sinica*, 74: 156 – 168.

附中文参考文献

- 陈世忠, 杨经绥, 许志琴, 等. 2005. 大陆科学钻探 CCSD PP3 钻孔超镁铁岩岩石学和矿物学特征及其意义. *岩石学报*, 21(2): 369 – 380.
- 杨经绥, 陈世忠, 张仲明, 等. 2005. 苏鲁超高压变质带岗上石榴石橄榄岩岩体: 中国大陆科学钻探卫星孔 (CCSD PP3 钻孔) 初步研究. *岩石学报*, 21(2): 293 – 304.