

# 南天山榆树沟麻粒岩地体的尖晶石研究\*

王 焰 王润三 周鼎武 王居里

(西北大学地质系, 西安 710069)

**主题词** 尖晶石 麻粒岩地体 蛇绿岩套 榆树沟 南天山

**提 要** 新疆榆树沟麻粒岩地体中发育两类尖晶石: 一类见于中、基性麻粒岩体中, 其化学成分富 Al 贫 Cr, 属铝尖晶石, 镜下为深绿色, 呈半自形至他形粒状, 与其它变质矿物共生, 表现为麻粒岩相的新生变质矿物; 另一类发育在空间上与麻粒岩体紧密相邻的超镁铁质岩体中, 为铬尖晶石, 镜下为深褐红色, 呈不规则粒状分布于橄榄石、斜方辉石和单斜辉石之间, 为麻粒岩相变质过程中稳定的残余矿物。后者属于 Dick 等人划分的 I 型尖晶石, 它的存在说明超镁铁质岩体为大洋岩石圈地幔的组成部分。这两类尖晶石的特征一方面说明该地体遭受了麻粒岩相的变质作用改造, 另一方面也提供了榆树沟麻粒岩套蛇绿岩套属洋盆构造环境的直接矿物学证据。

在新疆托克逊县与和硕县交界的南天山榆树沟地区新近发现一麻粒岩地体<sup>①</sup>, 该地体由中、基性麻粒岩体和变质的超镁铁质岩体共同组成, 二者呈剪切带构造接触, 并在空间上共同构成一个呈北东—南西向延伸的“层”状地体, 这些“层”均为新生的透入性面理。该地体位于前人划分的早古生代“洋壳板段”<sup>[1]</sup>或“南天山蛇绿岩带”<sup>[2-4]</sup>中, 但对该地体存在不同的认识<sup>[1-9]</sup>。一般认为它由橄榄岩和辉长岩<sup>[5]</sup>或辉石闪长岩<sup>[2]</sup>组成, 相当于蛇绿岩中的超镁铁质—镁铁质层状堆积岩。但王润三等认为, 该层状杂岩体并非原生成火成堆积岩, 所谓的“辉长岩”或“辉石闪长岩”实际上是中、基性麻粒岩, 其中包括一套副变质岩<sup>[10]</sup>。他们认为, 超镁铁质岩体和中、基性麻粒岩体共同组成一基本完整的蛇绿岩套<sup>[11]</sup>, 是一个俯冲至 40~50km 的深地壳(甚至上地幔顶部)蛇绿岩残片, 在遭受了深地壳(高压)麻粒岩相变质作用改造后, 又经韧性剪切并构造抬升剥露于现今地表的特殊地体, 较完整地记录了南天山造山带的演化历史。因此, 探讨在空间上紧密共生的麻粒岩体和超镁铁质岩体的成因和二者之间的关系对该地体的进一步研究是很有意义的。

笔者发现, 在榆树沟超镁铁质岩体和麻粒岩体中分别发育深褐红色和深绿色两种尖晶石类矿物, 而且两类尖晶石的成因不同。本文着重讨论这两类尖晶石的特征, 为进一步明确超镁铁质岩体的成因和超镁铁质岩体与麻粒岩体的关系提供了矿物学信息。

## 1 地质概况

榆树沟麻粒岩地体是南天山众多镁铁质—超镁铁质杂岩体之一, 出露长度 11.2km, 宽

\* 国家自然科学基金资助项目(49472135)

第一作者简介 王 焰, 女, 1968 年 12 月生, 讲师, 现从事岩石学、矿物学和地球化学教学及研究工作。

① 王润三, 周鼎武, 王居里等. 南天山榆树沟华力西期深地壳麻粒岩地体研究. 中国科学, 待刊.

收稿日期 1999-03-09, 改回日期 1999-06-07

度 1~ 2.75km。该地体位于哈萨克斯坦板块南部科古琴山-米什沟岛弧-海沟板片的早古生代晚期哈尔克山-库米什-卡瓦布拉克洋壳-海沟板片内<sup>[1]</sup>,北距目前普遍认为的“中天山南缘”(包尔图)断裂带约 21km;其东北侧和西北端毗邻库米什中-新生界沉积断陷盆地;西南侧与中、上泥盆统(?)绿片岩相变质的火山-正常沉积地层呈韧性剪切构造接触;东南端被华力西期红色钾长花岗岩体侵入(图略)。

根据矿物共生组合及岩性特征,榆树沟麻粒岩地体可分为 4 个单元:(1) 变质橄榄岩单元,主要由尖晶二辉橄榄岩组成,夹多层尖晶斜长二辉岩;(2) 二辉麻粒岩单元,主要为尖晶斜长二辉岩,原岩为一套超镁铁质-镁铁质堆晶岩;(3) 石榴斜辉麻粒岩单元,主要由(角闪)斜长石榴斜辉岩和斜长角闪岩组成,原岩为洋脊拉斑玄武岩;(4) 中、基性麻粒岩互层单元,由(角闪)斜长石榴斜辉岩和斜长石榴二辉岩(原岩为拉斑玄武岩)以及斜长二辉角闪岩、变玄武质砂岩、变杂砂岩、变粘土岩等各种副变质麻粒岩和大理岩组成。

深褐红色的尖晶石发育在(1)单元的尖晶二辉橄榄岩中,而深绿色的尖晶石发育在不含石榴石的(1)和(2)单元的斜长二辉岩、(1)单元和(2)单元过渡带的方辉岩以及(4)单元的斜长二辉角闪岩中。

## 2 麻粒岩体中的尖晶石

### 2.1 化学成分

尖晶石的电子探针分析结果列于表 1。表中扣除杂质后得到的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$  和  $\text{MgO}$  值是根据王恒升等的方法<sup>[12]</sup>计算出来的,并依其分类方案确定了尖晶石的种属。

从表 1 可以看出,麻粒岩体的尖晶石属于王恒升等划分的硬铬尖晶石( $\text{Al}_2\text{O}_3 > 45\%$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3 < 20\%$ ),相当于路凤香<sup>[13]</sup>划分的铝尖晶石。其化学成分表现为特别富 Al、贫 Cr,  $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$  值介于 0.01~ 0.08, 平均为 0.03;  $\Sigma\text{FeO}$  含量相对较高,变化于 14.81%~ 30.47%,  $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$  值介于 0.43~ 0.8, 平均为 0.57。

### 2.2 镜下特征

榆树沟麻粒岩地体形成过程中,岩石普遍经历了较强的韧性变形改造,大多表现为典型的初糜棱结构。镜下尖晶石呈深绿色,半自形-他形粒状,含量 5% 左右,为岩石中的副矿物。尖晶石与其它变质矿物如斜方辉石、单斜辉石、斜长石和角闪石等一样,也表现为粗粒的碎斑(照片 1, 2)和细粒的动态重结晶基质(照片 3),但在一些薄片,碎斑和基质中的尖晶石与其它变质矿物如斜方辉石、单斜辉石、斜长石和角闪石等的接触界线均清楚、平直(照片 4, 5, 6),明显表现为共生关系。另外,电子探针分析结果(表 1)表明,粗粒碎斑尖晶石与细粒基质尖晶石在成分上(如 y159<sub>BH</sub> 和 y159<sub>J</sub>)基本一致,说明细粒基质尖晶石与粗粒碎斑尖晶石应为同一期变质作用的产物,只是伴随韧性剪切变形的强弱呈现为碎斑和基质两种形式。因此,这种尖晶石不是岩浆成因,而是麻粒岩相变质矿物。

### 2.3 形成条件

目前没有现成的与尖晶石有关的温压计来确定含尖晶石组合的变质温压。但已有的实验数据<sup>[13-15]</sup>表明,含有尖晶石的火成岩组合如尖晶二辉橄榄岩、尖晶辉石岩等均形成于较高的温压条件( $t > 500\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P > 10 \times 10^8\text{ Pa}$ )下。利用  $\text{Cpx}-\text{Opx}$  温度计<sup>[16]</sup>和  $\text{Ol}-\text{Cpx}$  压力计<sup>[17]</sup>得到的(1)单元尖晶斜长二辉岩的峰期温度和压力为  $1060\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1.76\text{ GPa}$ ;利用  $\text{Gt}$

- Cpx 温度计<sup>[18]</sup>和 Gt- Cpx- Pl- Q 压力计<sup>[19]</sup>得到的(2)单元尖晶斜长二辉岩的峰期温度和压力为 878 °C, 1.26GPa。因此, 榆树沟麻粒岩体的变质温压条件完全可以形成尖晶石。再结合前述该类尖晶石的镜下特征, 可以认定这种绿色尖晶石是麻粒岩相变质作用中的新生变质矿物。

表 1 榆树沟麻粒岩体和超镁铁质岩体中的尖晶石化学成分电子探针分析结果 (%)

Table 1 Electron microprobe analyses of spinels from granulite and ultramafic rock units (%)

样品	y159 <sub>III</sub>	y159 <sub>J</sub>	y83	y119- 1	y175	y157	y158	y162	y13	yw5*	yw10*	yw15*
SiO <sub>2</sub>	0.04	0.14	0.10	0.02	0.04	0.04	0.03	0.06	0.02	0.20	0.18	0.09
TiO <sub>2</sub>	0	0.14	0.09	0.06	0.08	0.06	0	0.08	0.08	0.10	0.16	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	64.19	61.47	58.12	55.67	56.59	41.40	46.58	41.76	44.25	40.80	39.70	40.96
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.44	0.92	1.70	7.48	2.73	25.83	21.28	25.43	20.90	22.81	24.85	23.21
FeO*	20.37	23.07	28.29	14.81	30.47	14.94	12.94	18.04	16.32	14.91	16.97	16.01
MnO	0.09	0.10	0.10	0.08	0.14	0.14	0.09	0.16	0.10	0.12	0.08	0
NiO	0.24	0.31	0.15	0.33	0.39	0.15	0.13	0.12	0.21	0.14	0	0.04
MgO	15.40	13.23	11.96	20.61	10.35	17.95	18.48	15.12	17.93	19.24	17.99	17.93
CaO	0.02	0.06	0.04	0	0.04	0.07	0	0.04	0.16	0	0.05	0
Na <sub>2</sub> O	0.04	0	0.05	0	0.08	0	0	0.02	0	0.04	0	0
Σ	101.83	99.44	100.60	99.06	100.91	100.58	99.53	100.83	99.97	98.36	99.98	98.24
以 4 个氧为基础计算的阳离子数												
Si <sup>4+</sup>	0.001	0.004	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.006	0.005	0.003
Al <sup>3+</sup>	1.937	1.926	1.838	1.712	1.811	1.345	1.493	1.375	1.428	1.338	1.302	1.356
Ti <sup>4+</sup>	0.000	0.003	0.002	0.001	0.002	0.001	0.000	0.002	0.002	0.002	0.003	0.000
Cr <sup>3+</sup>	0.029	0.019	0.036	0.154	0.059	0.563	0.458	0.562	0.452	0.502	0.546	0.515
Fe <sup>3+</sup>	0.034	0.041	0.118	0.129	0.127	0.087	0.047	0.057	0.113	0.145	0.133	0.123
Fe <sup>2+</sup>	0.402	0.472	0.516	0.194	0.565	0.257	0.247	0.364	0.260	0.202	0.261	0.253
Mn <sup>2+</sup>	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.004	0.002	0.003	0.002	0.000
Ni <sup>2+</sup>	0.005	0.007	0.003	0.007	0.009	0.003	0.003	0.003	0.005	0.003	0.000	0.001
Mg <sup>2+</sup>	0.588	0.524	0.478	0.802	0.419	0.738	0.749	0.630	0.732	0.798	0.746	0.751
Ca <sup>2+</sup>	0.001	0.002	0.001	0.000	0.001	0.002	0.000	0.001	0.005	0.000	0.001	0.000
Na <sup>+</sup>	0.002	0.000	0.003	0.000	0.004	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000
Σ	3.000	3.000	3.001	3.001	3.001	3.000	3.000	3.000	3.001	3.001	3.001	3.001
Cr/Cr+ Al	0.01	0.01	0.02	0.08	0.03	0.30	0.23	0.29	0.24	0.27	0.30	0.28
Mg/Mg+ Fe <sup>2+</sup>	0.59	0.53	0.48	0.80	0.43	0.74	0.75	0.63	0.74	0.80	0.74	0.75
扣除杂质后计算的四组分												
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.42	0.93	1.70	7.59	2.72	25.80	21.43	25.34	21.03	23.33	24.97	23.66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	63.30	62.29	58.08	56.48	56.51	41.35	46.92	41.61	44.52	41.73	39.90	41.75
FeO	20.09	23.38	28.27	15.02	30.42	14.92	13.03	17.98	16.42	15.25	17.05	16.32
MgO	15.19	13.41	11.95	20.91	10.34	17.93	18.61	15.07	18.04	19.68	18.08	18.28
种属	硬铬尖晶石						铬尖晶石					
颜色	深绿色						深褐红色					
赋存岩石	尖晶斜长二辉岩			方辉岩	斜长二辉 角闪岩	尖晶二辉橄榄岩						

\* 数据引自参考文献[6]。

测试条件: 加速电压 15kV, 电流 20nA, 束斑直径 2μm, ZAF 校正;

测试单位及测试者: 西安地质矿产研究所 刘文峰。

### 3 与超镁铁质岩体中尖晶石的比较

榆树沟超镁铁质岩主要由二辉橄榄岩组成,二辉橄榄岩中的尖晶石与各类麻粒岩中的尖晶石相比(表 1),  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{MgO}$  含量较高,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{FeO}$  含量较低,  $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$  值介于

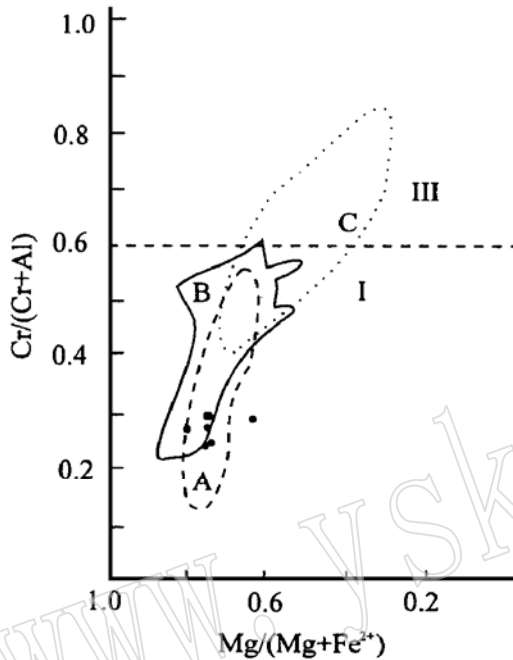


图 1 尖晶石的  $\text{Cr}^* - \text{Mg}^*$  图

(据 Dick *et al.*, 1984)

Fig. 1  $\text{Cr}^* - \text{Mg}^*$  diagram of spinels

(from Dick *et al.*, 1984)

I—阿尔卑斯 I 型橄榄岩; III—阿尔卑斯 III 型橄榄岩;  
A—深海橄榄岩; B—深海玄武岩; C—马里亚纳海沟的  
镁铁质—超镁铁质岩

0.23~0.30, 平均为 0.27,  $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$  值介于 0.63~0.80, 平均为 0.74, 属王恒升等划分的铬尖晶石 ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 20\% \sim 40\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 30\% \sim 45\%$ )。

二辉橄榄岩强烈蛇纹石化, 同时亦具初糜棱结构。镜下这种尖晶石呈深褐红色, 多呈不规则状分布于橄榄石、斜方辉石和单斜辉石之间, 粒度较大, 常见一黑色不透明的由铁质组成的黑边, 常呈残缕状, 边缘呈港湾状(照片 1, 2, 3, 4), 为麻粒岩相变质作用中的稳定残余矿物, 其特征应可提供原岩的成因信息。

Dick 等<sup>[20]</sup>利用尖晶石的  $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$  值把超镁铁质构造岩分为 3 类:  $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al}) < 0.6$  的为 I 型;  $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al}) > 0.6$  的为 III 型; II 型为过渡类型, 包括 I 型至 III 型尖晶石的变化范围。深海橄榄岩属于 I 型, 代表真正的大洋岩石圈; III 型为与岛弧有关的火山岩和侵入岩、大陆侵入岩组合以及大洋高原玄武岩。II 型则具复合成因, 洋内岛弧系统属于这一类型。

统计和实验资料表明, 尖晶石中  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含量是阿尔卑斯橄榄岩形成深度(压力)的相对指示剂。球粒陨石和金刚石包裹体中发现的尖晶石为高压型, 玄武岩包体中的尖晶石为中低压型<sup>[12]</sup>。榆树沟地体二辉橄榄岩中的铬尖晶石

相当于 I 型尖晶石(图 1), 其  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量与玄武岩包体中尖晶石的大致相当。由此看来, 本区的尖晶石二辉橄榄岩也应属大洋岩石圈地幔的组成部分, 但可能形成于较浅的地幔层位中<sup>[21]</sup>。这一点为确定超镁铁质岩体属蛇绿岩套的组成部分提供了矿物学方面的直接依据。

### 4 讨 论

通过以上对比可以发现, 榆树沟麻粒岩体和超镁铁质岩体中的尖晶石在化学成分和镜下特征方面均表现出一定的差异, 显示出不同的特征, 应为不同时期的产物。麻粒岩体中的深绿色尖晶石相对富 Al 贫 Cr, 为铝尖晶石, 与麻粒岩中的其它变质矿物为共生关系, 表现

出麻粒岩相变质成因的特征, 应是新生的变质矿物; 而超镁铁质岩中的深褐红色尖晶石呈残斑状, 为铬尖晶石, 表现出稳定的残余矿物的特征, 其  $Cr/(Cr+Al)$  和  $Mg/(Mg+Fe^{2+})$  比值属于 Dick 等认为的 I 型尖晶石, 说明超镁铁质岩体为大洋岩石圈地幔的组成部分, 这一点为证明榆树沟超镁铁质岩体为蛇绿岩的组成部分提供了直接的矿物学证据。

在 Cr-Y 图解上, 超镁铁质岩体和麻粒岩体中各类岩石的 Cr、Y 值分别投在亏损地幔区域和原始地幔部分熔融区域(图略), 因此, 它们应来源于同一地幔源区。笔者认为, 超镁铁质岩体来源于地幔部分熔融的残留体, 而麻粒岩体的原岩是同一岩浆源部分熔融的产物。在地幔部分熔融过程中, Cr 几乎全部进入残留体地幔二辉橄榄岩中, 从而形成深褐红色的铬尖晶石, 而地幔部分熔融的产物因 Cr 含量较低, 故没有尖晶石形成, 但在后来的麻粒岩相变质过程中, 在不含石榴石的岩石中, 生成了变质成因的深绿色铝尖晶石。

超镁铁质岩体中尖晶石的成分特征充分证明超镁铁质岩体为蛇绿岩套的组成部分, 麻粒岩体的地球化学特征也说明其应属蛇绿岩<sup>[11]</sup>, 因此, 榆树沟超镁铁质岩体和麻粒岩体共同构成了一个基本完整的蛇绿岩套。同时, 超镁铁质岩体中夹有多层麻粒岩相斜长二辉岩, 而且, 几乎具备阿尔卑斯型变质橄榄岩的全部特征<sup>[11]</sup>, 说明超镁铁质岩体同样经历了麻粒岩相的变质作用, 其中的尖晶石可以认为是形成于地幔部分熔融的残留体中, 但在后来的麻粒岩相变质过程中是稳定的, 因为地幔橄榄岩的形成温压与麻粒岩相的变质温压基本一致。

综上所述, 在榆树沟麻粒岩体和超镁铁质岩体中产出的两类尖晶石表现出不同的成因特征。这些特征一方面说明该蛇绿岩体遭受了麻粒岩相的变质作用改造, 另一方面也提供了榆树沟麻粒岩相蛇绿岩套及其洋盆构造环境的直接矿物学证据。

张旗研究员对本文初稿提出了许多建设性的意见, 在此谨致衷心感谢。

#### 参 考 文 献

- 1 肖序常, 汤耀庆, 冯益民等. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 1992, 9~ 44.
- 2 王作勋, 郭继易, 吕喜朝等. 天山多旋回构造演化及成矿规律. 北京: 科学出版社, 1990, 114~ 119.
- 3 张 驰. 新疆蛇绿岩某些地质特征. 地质论评, 1981, 27: 397~ 314.
- 4 马瑞士, 王赐银, 叶尚夫等. 东天山构造格架及地壳演化. 南京: 南京大学出版社, 1993, 47~ 61.
- 5 吴文奎, 姜常义, 杨 复. 库米什地区古生代地壳演化及成矿规律. 西安: 陕西科学技术出版社, 1992, 69~ 84.
- 6 何国琦, 刘德权, 李茂松等. 新疆主要造山带地壳发展的五阶段模式及成矿系列. 新疆地质, 1995, 13 (2): 142~ 144.
- 7 李茂松, 何国琦, 高 俊等. 中国西南天山的蛇绿岩带. 见: 张 旗主编. 蛇绿岩与地球动力学研究. 北京: 地质出版社, 1996, 112~ 116.
- 8 汤耀庆, 高 俊, 赵 民等. 西南天山蛇绿岩和蓝片岩. 北京: 地质出版社, 1995, 1~ 135.
- 9 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1993, 549~ 565.
- 10 王润三, 王 焰, 刘养杰等. 新疆南天山榆树沟层状杂岩体中的副麻粒岩——岩石学特征及其地球动力学意义. 西北大学学报, 1997, 27 (5): 411~ 416.
- 11 王润三, 王居里, 周鼎武等. 南天山榆树沟遭受麻粒岩相变质改造的蛇绿岩套研究. 地质科学, 1999, 34 (2): 166~ 176.
- 12 王恒升, 白文吉, 王炳熙等. 中国铬铁矿床及成因. 北京: 科学出版社, 1983.
- 13 路凤香. 地幔岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988.
- 14 鄂莫岚, 赵大升. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体. 北京: 科学出版社, 1987.
- 15 Sack R O and Ghiorso M S. Chromian spinels as petrogenetic indicators: Thermodynamics and petrological applications.

- American Mineralogist, 1991, 76: 827~ 847.
- 16 Brey G P and Kohler T P. Geothermobarometry in four-phase lherzolite II: New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. J. Petrol., 1990, 31: 1353~ 1378.
  - 17 Kohler T P and Brey G P. Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as a geothermobarometer for natural peridotites from 2 to 60 kb with applications. Geochim. Cosmochim. Acta., 1990, 54: 2375~ 2388.
  - 18 Ellis D J and Green D H. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. Contrib. Mineral. Petrol., 1979, 71: 13~ 22.
  - 19 Newton R C and Perkins D. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz. Am. Mineral., 1982, 67: 203~ 222.
  - 20 Dick H J K and Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine type peridotites and spatially associated lavas. Contrib. Mineral. Petrol., 1984, 86: 54~ 70.
  - 21 邓万明. 藏北蛇绿岩中尖晶石类矿物的化学成分. 地质科学, 1988, 23 (2): 121~ 127.

## A Study of Spinel from a Granulite Terrain in Yushugou, South Tianshan Mountain

Wang Yan, Wang Runsan, Zhou Dingwu, Wang Juli  
(Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069)

**Key words:** spinel; granulite terrain; ophiolite suite; Yushugou; South Tianshan Mountain

### Abstract

There are two kinds of spinels in a granulite terrain of Yushugou, South Tianshan Mountain. One occurs in the intermediate and basic granulite units and is characterized by enriched Al and poor Cr, belonging to Al-spinel. In thin sections it shows dark green color and subhedral to anhedral form, and coexists with other metamorphic minerals, suggesting a neogenic metamorphic mineral of granulite facies. The other occurs in the adjacent ultramafic rock unit, belonging to Cr-spinel. In thin sections, it is dark brown in color and is scattered among olivine, clinopyroxene and orthopyroxene as irregular grains, indicating a stable residual mineral in the process of granulite facies metamorphism. The spinel in the ultramafic rock unit belongs to L-type spinel, as proposed by Dick *et al.* This implies that the ultramafic rock is a part of oceanic lithosphere mantle. Characteristics of these two kinds of spinels not only indicate that the whole terrain underwent granulite facies metamorphism but also provide direct mineralogical evidence for the argument that Yushugou ophiolite suite of granulite facies lies in an environment of oceanic basin.

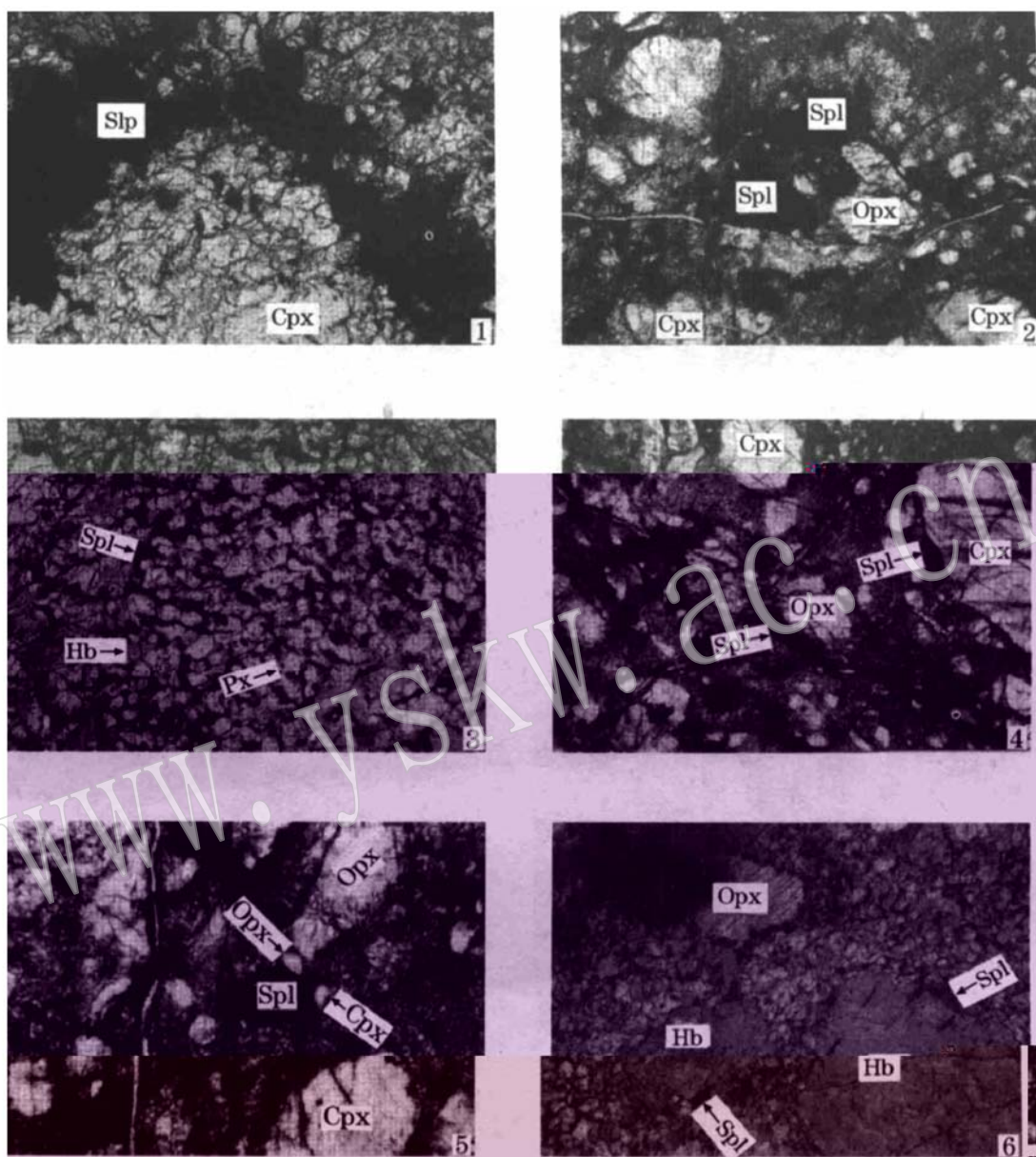


图 版 说 明

照片 1 至照片 6 为麻粒岩地体中深绿色尖晶石的显微照片

照片 1 他形一半自形尖晶石(Spl)和单斜辉石(Cpx)碎斑 薄片 Y-159 单偏光 视域范围 0.83 × 0.56mm

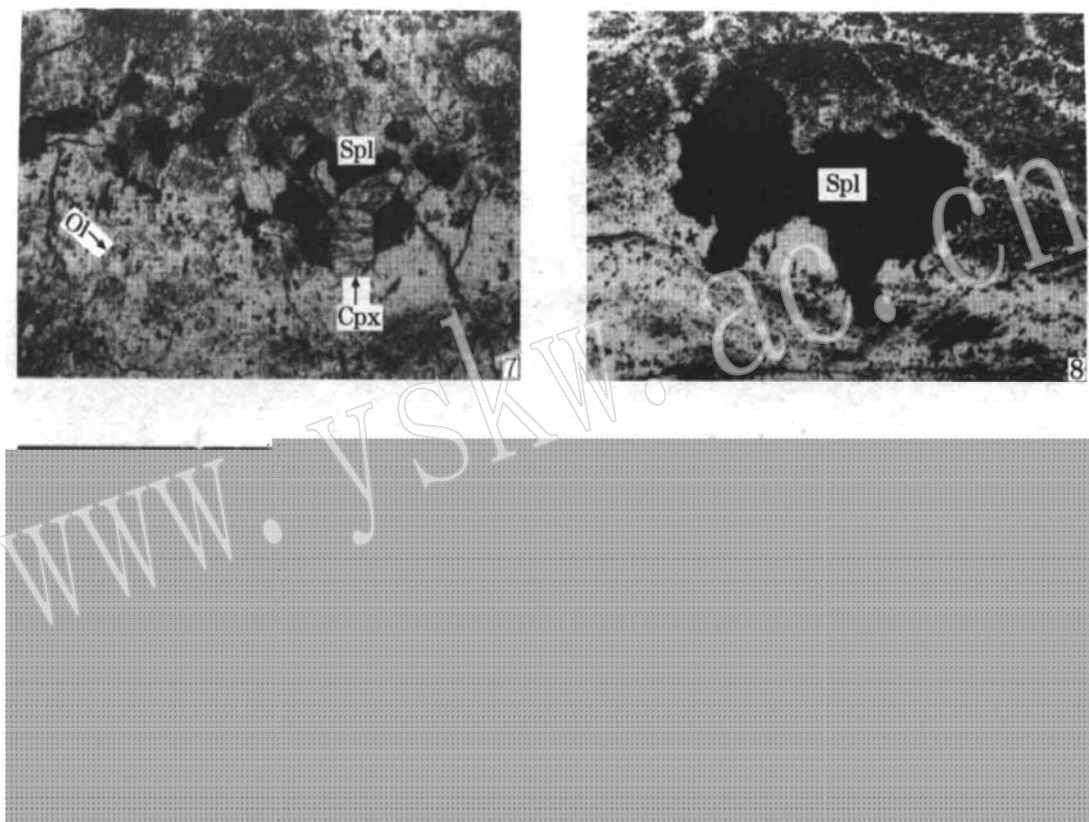
照片 2 尖晶石、单斜辉石、斜方辉石(Opx)碎斑分布于基质中 薄片 Y-159 单偏光 视域范围 3.34 × 2.22mm

照片 3 由尖晶石(黑色)、角闪石(Hb, 深灰)、辉石(Px, 浅灰)等组成的动态重结晶基质, 各矿物接触界面平直, 表现为共生关系 薄片 Y-175 单偏光 视域范围 0.83 × 0.56mm

照片 4 尖晶石与单斜辉石、斜方辉石的接触界面平直、清楚 薄片 Y-159 单偏光 视域范围 2.63 × 1.75mm

照片5 尖晶石与单斜辉石、斜方辉石的接触界线平直、清楚,表现为共生关系 薄片Y-159 单偏光 视域范围  $1.33 \times 0.89\text{mm}$

照片6 尖晶石与角闪石的接触界线平直、清楚 薄片Y-175 单偏光 视域范围  $1.33 \times 0.89\text{mm}$



#### 图版说明

照片7至照片10为二辉橄榄岩中深褐红色尖晶石的显微照片

照片7 尖晶石呈不规则粒状分布于单斜辉石、橄榄石(Ol,已强烈蛇纹石化)之中 薄片Y-13 单偏光 视域范围  $1.73 \times 1.12\text{mm}$

照片8 不规则粒状尖晶石,具铁质黑边 薄片Y-157 单偏光 视域范围  $1.73 \times 1.12\text{mm}$

照片9 尖晶石与单斜辉石、斜方辉石等共生 薄片Y-157 单偏光 视域范围  $4.21 \times 2.80\text{mm}$

照片10 尖晶石边部具铁质黑边,与橄榄石(蛇纹石化)、单斜辉石(已变为细粒)共生 薄片Y-162 单偏光 视域范围  $0.83 \times 0.56\text{mm}$