

·综述与进展·

# 硬柱石榴辉岩岩石学研究进展

杜瑾雪, 张立飞

(北京大学地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要:**硬柱石榴辉岩是洋壳经历冷俯冲形成的典型低温高压变质岩, 硬柱石是俯冲带将水带入地幔深处的重要载体, 其具有指示俯冲带深部流体作用的重要科学意义。文中总结了近20年来硬柱石及硬柱石榴辉岩岩石学的主要研究进展及问题: ①硬柱石榴辉岩的全球分布; ②硬柱石榴辉岩的分类及硬柱石的产状; ③硬柱石榴辉岩稳定性的实验及相平衡模拟研究; ④硬柱石榴辉岩的形成与保存; ⑤硬柱石榴辉岩相关的流体行为。以上几点, 特别是硬柱石相关的流体行为, 一直是俯冲带研究中的热点领域。西南天山榴辉岩和蓝片岩中广泛发育进变质和退变质脉体, 对其进行深入研究, 将会对洋壳深俯冲过程中的流体行为进行更好的约束。

**关键词:**硬柱石 榴辉岩 洋壳冷俯冲; 流体行为 变质岩石学

中图分类号: P578.94; P588.34

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)01-0174-11

## Progress in petrologic study of lawsonite-bearing eclogites

DU Jin-xue and ZHANG Li-fei

(Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Lawsonite eclogites are typical low-*t* and high-*p* metamorphic rocks formed during cold oceanic subduction. Lawsonite is an important carrier that brings water into deep mantle and hence plays a crucial role in fluid behavior of deep subducted slab, thus attracting widespread attention. This paper provides an overview of the progress in petrologic study of lawsonite and lawsonite-bearing eclogites in the past two decades: ① the distribution of lawsonite eclogites worldwide; ② the classification of lawsonite eclogites and modes of occurrence of lawsonite; ③ experimental studies and thermodynamic modelling upon the stability of lawsonite eclogites; ④ the formation and preservation of lawsonite eclogites; ⑤ fluid behavior in lawsonite eclogites. The above aspects, especially the last one, are long hotspots in the study of the subduction zone. Both prograde and retrograde veins commonly occur in blueschists and eclogites from Southwestern Tianshan. Further research on these veins will provide important constraints on fluid behavior during deep oceanic subduction.

**Key words:** lawsonite; eclogite; cold oceanic subduction; fluid behavior; metamorphic petrology

硬柱石(lawsonite)是属于斜方晶系的钙铝硅酸盐矿物,分子式为 $\text{CaAl}_2(\text{H}_2\text{O})[\text{Si}_2\text{O}_7](\text{OH})_2$ ,分子中含有约11.5%(质量分数)的水。实验及自然界发现的硬柱石均接近其理想端员成分,含有少量的 $\text{Fe}^{3+}$ (表1),并能储存相当量的REE、Sr、Pb、Th和

U等微量元素(Tribuzio *et al.*, 1996; Spandler *et al.*, 2003)。实验岩石学及相平衡模拟均显示,硬柱石仅稳定于非常低温高压的条件下,通常产于冷型洋壳俯冲变质带中,是低温蓝片岩和榴辉岩的重要组成部分(图1),因而被作为低温高压变质作用的特

收稿日期: 2013-07-02; 修订日期: 2013-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41121062, 41090371, 41272069), 国家重点基础研究发展计划“973”资助项目(2009CB825007)

作者简介: 杜瑾雪(1985-), 博士研究生在读, 主要从事高压超高压变质地质学研究, E-mail: dujinxue1@163.com

征矿物(Okamoto and Maruyama, 1999; Whitney and Davis, 2006)。硬柱石榴辉岩(lawsonite eclogite)也被认为是冷的岩石圈发生俯冲作用的重要标志,但仅在上世界上少数一些地方被发现(Poli *et al.*, 2009; Brovarone *et al.*, 2011; Wei and Clarke, 2011; Endo *et al.*, 2012)。硬柱石是目前已知含水量最高的高压稳定矿物,其在俯冲带深部的分解不仅可能影响地幔熔融作用和岛弧岩浆作用,还可能将大量的水带入地幔深处(Pawley, 1994; Tsujimori *et al.*, 2006a),具有指示俯冲带深部流体活动等方面的重要科学意义;同时,对硬柱石榴辉岩变质作用  $p-t$  条件及  $p-t$  轨迹的限定为恢复造山带热结构等提供了重要信息。因而,硬柱石及含硬柱石组合,特别是硬柱石榴辉岩吸引了众多岩石学家的关注。

本文定义硬柱石榴辉岩为含有平衡共生的硬柱石、石榴石和绿辉石的变质岩石,不管它们的含量多少。本文旨在总结硬柱石及硬柱石榴辉岩岩石学研究的最新进展,并探讨其中存在的问题。

文中矿物缩写依照沈其韩(2009)。

表 1 典型硬柱石的化学成分

Table 1 Compositions of representative lawsonite

	北祁连蓝 片岩 慧等 2012)	北祁连榴 辉岩 慧等 2012)	南天山蓝 片岩 Du <i>et al.</i> , 2011)	MORB+H <sub>2</sub> O* (Okamoto and Maruyama, 1999)	
SiO <sub>2</sub>	40.01	38.27	38.89	40.34	40.58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.24	31.85	32.06	29.85	28.72
TiO <sub>2</sub>	0.09	0.14	0.06	0.24	0.19
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.38	0.04	0.01	-	-
FeO	0.92	0.65	0.43	0.92	1.12
MnO	0.02	0.02	0.01	-	-
MgO	0.00	0.02	0.00	0.75	0.97
CaO	17.20	17.25	16.60	15.12	15.11
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.02	0.00	0.57	0.53
K <sub>2</sub> O	0.04	0.01	0.00	0.02	0.00
Total	89.90	88.34	88.06	87.82	87.22
O	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Si	2.06	2.01	2.04	2.12	2.15
Al	1.90	1.97	1.98	1.85	1.79
Ti	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
Cr	0.02	0.00	0.00	-	-
Fe <sup>3+ **</sup>	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02
Mn	0.00	0.00	0.00	-	-
Mg	0.00	0.00	0.00	0.06	0.08
Ca	0.95	0.97	0.93	0.85	0.86
Na	0.00	0.00	0.00	0.06	0.05
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	4.98	5.00	4.97	5.00	5.00

注: \* 为洋中脊玄武岩(MORB)+水(H<sub>2</sub>O)体系下实验结果; \*\* 全铁按 Fe<sup>3+</sup> 计算。

## 1 硬柱石榴辉岩的全球分布

硬柱石榴辉岩主要分布于显生宙以来的造山带中(图 2),到目前为止,全球共发现约 20 处硬柱石榴辉岩地体(Poli *et al.*, 2009; Wei and Clarke, 2011; Brovarone *et al.*, 2011; Endo *et al.*, 2012)。中国境内比较确切的硬柱石榴辉岩主要出露在北祁连-北阿尔金(Zhang and Meng, 2006)和西南天山低温高压变质带中(笔者未发表数据),苏鲁-大别造山带中的低温榴辉岩也被认为经历了峰期硬柱石榴辉岩相变质作用(Li *et al.*, 2005; Wei *et al.*, 2010)。大部分硬柱石榴辉岩都以构造块体(如透镜体、枕状)产出在蛇纹岩和变质泥质岩中(Tsujimori *et al.*, 2006a; Zhang *et al.*, 2001),而科罗拉多高原的硬柱石榴辉岩以捕虏体产出于金伯利岩筒中(Usui *et al.*, 2006)。除石榴石、绿辉石和硬柱石之外,硬柱石榴辉岩中通常还含有蓝闪石、白云母、石英/柯石英、金红石/榍石、绿泥石等矿物,后期常遭受蓝片岩相叠加。

从硬柱石产状来看,部分硬柱石榴辉岩中硬柱石既作为石榴石的包体,也作为基质矿物,例如危地马拉莫塔瓜和土耳其锡夫里希萨尔地区的硬柱石榴辉岩(图 1; Davis and Whitney, 2006; Tsujimori *et al.*, 2006b; Endo *et al.*, 2012)。部分硬柱石榴辉岩中的硬柱石仅保留在石榴石等矿物中,岩石整体遭受绿帘石榴辉岩相的叠加,例如北祁连硬柱石榴辉岩(图 3a, b; Zhang and Meng, 2006),而少数推测的硬柱石榴辉岩仅在局部区域保留了硬柱石假像(盒状的斜黝帘石+钠云母或蓝晶石+绿帘石+石英),例如大别山黄镇-朱家冲的硬柱石榴辉岩(图 3c, d; Li *et al.*, 2004)。上述硬柱石榴辉岩分别对应于 Wei 和 Clark(2011)分类中的 L 型、E 型和 U 型硬柱石榴辉岩。另一种分类方案是依据石榴石中的包裹体的变化特征,将硬柱石榴辉岩区分为 L 型和 E 型:前者石榴石中仅含硬柱石包体而不含绿帘石包体,表明石榴石仅在硬柱石稳定域内生长;后者石榴石边部可能含有绿帘石包体,表明石榴石记录的温压条件进入了绿帘石稳定域(Tsujimori *et al.*, 2006a)。相比而言,后者的分类方案存在明显缺陷:首先,很难区分石榴石中的绿帘石是否是石榴石生长过程中包裹的原生包体,因为硬柱石在后期退变中也可能形成这样一些包体;其次,在  $p-t$  视剖面图

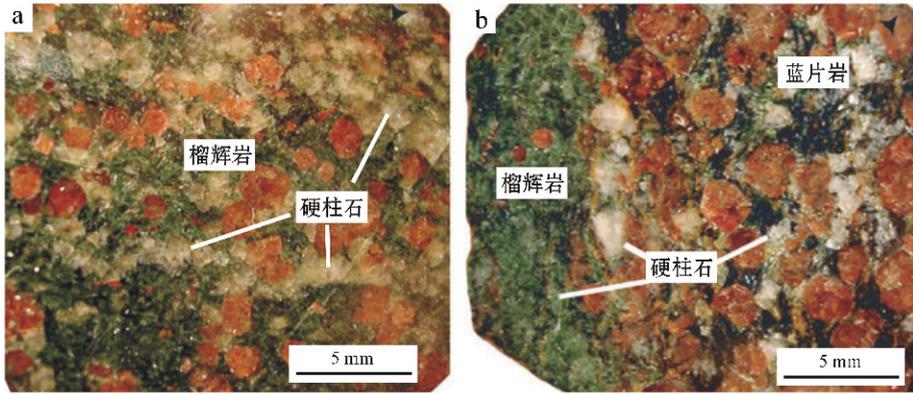


图 1 土耳其锡夫里希萨尔地区 L 型硬柱石榴辉岩(a)和蓝片岩(b)中的硬柱石(Davis and Whitney, 2006)

Fig. 1 Lawsonite from L-type lawsonite eclogite (a) and blueschist (b) in Sivrihisar, Turkey (after Davis and Whitney, 2006)



图 2 全球硬柱石榴辉岩分布图(改自 Tsujimori 等, 2006a; 硬柱石榴辉岩分类依据 Wei & Clarke, 2011)

Fig. 2 Distribution of lawsonite eclogites worldwide (modified after Tsujimori *et al.*, 2006a; the classification of lawsonite eclogites after Wei & Clarke, 2011)

上,对于大多数硬柱石榴辉岩,石榴石成分反映的峰期  $p-t$  条件位于硬柱石稳定域而不是绿帘石稳定域,多数集中于 1.8~2.9 GPa 和 500~610°C (Wei and Clarke, 2011),对应地热梯度 6~8 °C/km。因而,笔者更推荐采用前者的分类方案。相平衡模拟显示西南天山超高压榴辉岩也经历了峰期硬柱石榴辉岩相变质作用(Lü *et al.*, 2009)。根据该分类方案,西南天山超高压榴辉岩既可归入 E 型硬柱石榴辉岩,也可归入 U 型硬柱石榴辉岩,这表明该分类方案有重叠。事实上,Wei 和 Clarke(2011)所指的 U 型硬柱石榴辉岩峰期变质作用温度普遍较高(>

600°C),而 L 型和 E 型硬柱石榴辉岩峰期温度较低 (<600°C)。西南天山超高压硬柱石榴辉岩峰期温度较低(470~510°C; Lü *et al.*, 2009),反映了更低的地热梯度 <5 °C/km,进入到所谓的“变质作用禁区”(Forbidden Zone),因而笔者更倾向于将其归入 E 型而不是 U 型硬柱石榴辉岩。

## 2 硬柱石榴辉岩的稳定性

硬柱石的最大稳定域,可以很好地利用 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O(CASH)体系下的实验研究和相

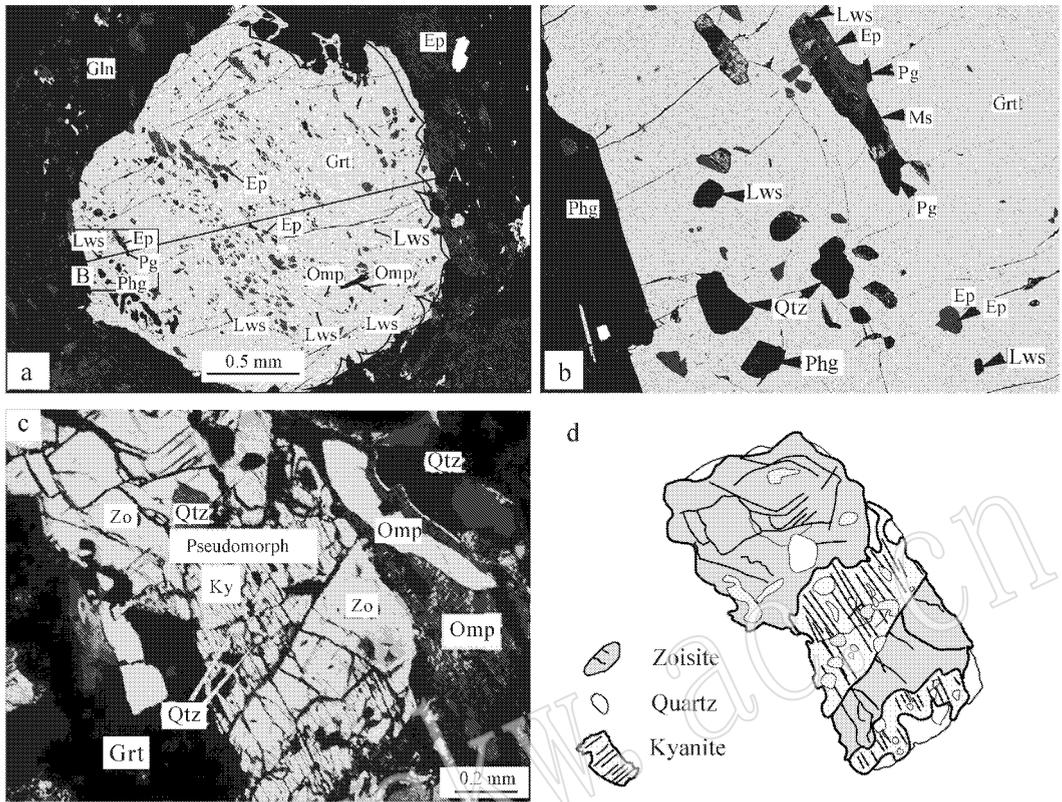


图 3 E 型和 U 型硬柱石榴辉岩

Fig. 3 E-type and U-type lawsonite eclogites

a—北祁连地区的 E 型硬柱石榴辉岩 (Zhang and Meng, 2006); b—a 中石榴石边部的局部放大; c—大别山地区的 U 型硬柱石榴辉岩 (Li et al., 2004); d—c 中硬柱石假像的示意图; Ep—绿帘石; Gln—蓝闪石; Grt—石榴石; Ky—蓝晶石; Lws—硬柱石; Ms—白云母; Omp—绿辉石; Pgg—钠云母; Phg—多硅白云母; Pseudomorph—假像; Qtz—石英; Zo—黝帘石

a—E-type lawsonite eclogite from North Qilian (after Zhang and Meng, 2006); b—detail of garnet rim in a; c—U-type lawsonite eclogite from Dabieshan (after Li et al., 2004); d—sketch map of lawsonite pseudomorph in c; Ep—epidote; Gln—glaucophane; Grt—garnet; Ky—kyanite; Lws—lawsonite; Ms—muscovite; Omp—omphacite; Pgg—paragonite; Phg—phengite; Pseudomorph—lawsonite pseudomorph; Qtz—quartz; Zo—zoisite

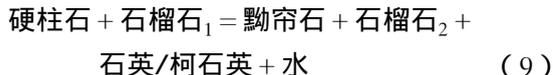
平衡模拟进行限定。在这方面,上述两种方法得到的结果差别很小。主要的控制反应有如下一些:

- 硬柱石 = 黝帘石 + 珍珠云母 + 斜钙沸石 + 水 (1)
- 硬柱石 = 黝帘石 + 珍珠云母 + 石英 + 水 (2)
- 硬柱石 = 黝帘石 + 蓝晶石 + 石英/柯石英 + 水 (3)
- 硬柱石 = 钙铝榴石 + 蓝晶石 + 柯石英 + 水 (4)
- 硬柱石 = 钙铝榴石 + 水黄晶 + 斯石英 + 水 (5)
- 硬柱石 = 钙铝榴石 + 水黄晶 + “egg” + 水 (6)
- 硬柱石 = 钙铝榴石 + 水铝石 + “egg” + 水 (7)
- 硬柱石 = 钙铝榴石 + 水铝石 + 斯石英 + 水 (8)

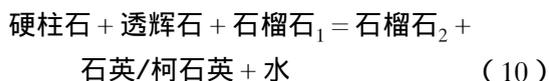
实验表明,水饱和的 CASH 体系下,硬柱石最高稳定温度大于 1 000 °C,最高稳定压力超过 12~14 GPa (Pawley, 1994; Schmidt, 1995)。但是,自然体系下硬柱石的稳定域远小于该最大稳定域。值得注意的是,上述 CASH 体系下的硬柱石分解反应并没

有产生完全不含水的矿物组合[反应(4)除外],特别是控制温度和压力上限的反应(5)和(7),即如果俯冲地热梯度足够低,即便硬柱石分解了,岩石中的水也可能被带到地幔更深的深度去。然而,这些含水相,例如,水黄晶、水铝石和 Egg 相,是否能在自然体系中稳定存在还是个待解问题。

水饱和玄武岩体系下的高温高压实验表明,硬柱石只稳定于地热梯度 < 7°C/km,最高可以稳定到 > 800°C 和 8~9 GPa (Poli and Schmidt, 1995; Schmidt and Poli, 1998; Okamoto and Maruyama, 1999) 相当于地表以下 ~300 km 的深度。这种低的地热梯度在现代俯冲大洋板片中非常常见。当温度低于 700°C 时,向高温低压方向,硬柱石分解为黝帘石,同时硬柱石榴辉岩/蓝片岩转变成绿帘石榴辉岩/蓝片岩,其反应可以写作:



其中,石榴石<sub>2</sub>相对于石榴石<sub>1</sub>具有更高的钙铝榴石组分,该反应具有较低的斜率(Poli and Schmidt, 1995)。在俯冲带中,硬柱石榴辉岩向绿帘石榴辉岩的转变,部分学者强调递进变质过程中的升温升压作用(Tsujimori *et al.*, 2006a),也有部分学者强调退变质过程中的降压作用(Wei *et al.*, 2009b)。这两种途径的差别主要表现在后者矿物组合可能很难达到平衡(Wei *et al.*, 2009b),从而使除硬柱石而外的峰期矿物组合和矿物成分得到一定程度上的保存。当温度高于 700°C 时,绿帘石不再稳定,硬柱石通过连续反应转变为石榴石,从而使硬柱石榴辉岩转变为干榴辉岩,



该反应具有较高的斜率(Schmidt and Poli, 1998; Okamoto and Maruyama, 1999)。

在相平衡模拟方面,目前还没有适当的热力学数据能模拟如此高的温压条件。在相对低压和低温的温压范围内,相平衡模拟显示 MORB 全岩成分下硬柱石榴辉岩具有更大的稳定域(图 4; Wei and Clarke, 2011)。通常情况下,实验岩石学研究只处理一个或者少数几个样品,这很难考虑全岩成分的变化,事实上,利用不同样品实验所得的结果确实存在一定程度的差异(Poli and Schmidt, 1995; Schmidt and Poli, 1998; Okamoto and Maruyama, 1999);同时低温下进行的实验研究也难以达到化学平衡,而相平衡模拟却能很好地解决这些问题(Powell and Holland, 2008)。因此,相比而言,相平衡模拟得到的硬柱石榴辉岩稳定域可能更接近真实情况。

根据实验研究和相平衡模拟的结果,可以发现全岩成分和流体成分对硬柱石稳定域的影响事实上是不能忽略的。Poli 等(2009)对遭受海底蚀变的 MORB 成分实验研究表明,全岩成分中钙长石 An 指数的增加会扩大硬柱石的稳定域,尽管其认为流体中 CO<sub>2</sub> 组分的加入,也会扩大硬柱石稳定域,但这并不能排除全岩成分其它因素对其造成的影响(例如其样品中较高的 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量)。而对 MORB 成分的相平衡模拟也显示,全岩成分中高的全岩水含量、低的 CO<sub>2</sub>/(CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O) 和 Fe<sup>3+</sup>/(Fe<sup>3+</sup> + Fe<sup>2+</sup>) 比值倾向于扩大硬柱石的稳定域,而 CaO/

(MgO + FeO<sub>total</sub> + MnO + Na<sub>2</sub>O) 和 MgO/(MgO + FeO<sub>total</sub>) 等则对其作用不大(Rebay *et al.*, 2010; Wei and Clarke, 2011)。

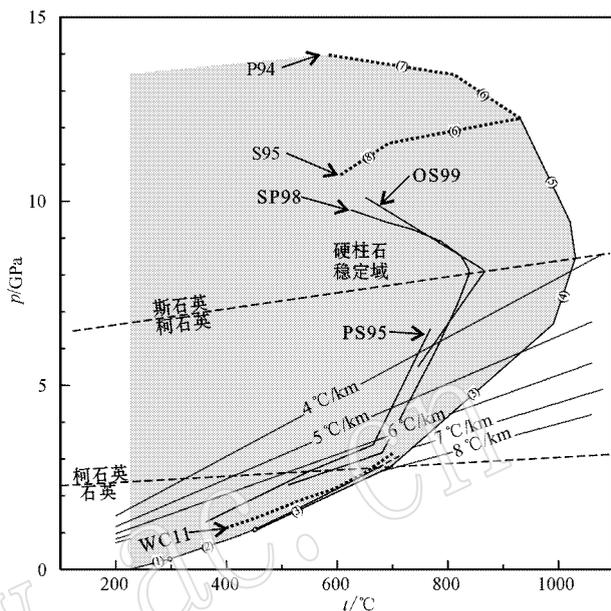


图 4 实验(实线)与相平衡模拟(虚线)的硬柱石稳定域  
Fig. 4 Lawsonite stability from experiments (solid lines) and thermodynamic modeling (dashed lines)

CASH 体系: P94, Pawley (1994); S95, Schmidt (1995); 虚线为利用 Thermocalc 3.33 计算的结果。玄武岩 + 水体系: PS95, Poli and Schmidt (1995); OS99, Okamoto 和 Maruyama (1999); SP98, Schmidt 和 Poli (1998); WC11, Wei 和 Clarke (2011); 带数字实线和虚线对应于正文中的相应化学反应

CASH system: P94, Pawley (1994); S95, Schmidt (1995); dashed lines are results calculated using Thermocalc 3.33. MORB + H<sub>2</sub>O: PS95, Poli and Schmidt (1995); OS99, Okamoto and Maruyama (1999); SP98, Schmidt and Poli (1998); WC11, Wei and Clarke (2011); The solid and dashed lines with numbers on them correspond to reactions with the same numbers in the text

### 3 硬柱石的形成与保存

实验岩石学和相平衡模拟均显示,硬柱石榴辉岩具有相当大的稳定范围,应该是冷型洋壳俯冲变质带 45 ~ 300 km 深度的典型岩石(Schmidt and Poli, 1998; Okamoto and Maruyama, 1999; Wei and Clarke, 2011)。然而,硬柱石榴辉岩在现今造山带中很少出露(图 1; Tsujimori *et al.*, 2006a; Whitney and Davis, 2006; Gropo and Castelli, 2010; Wei and Clarke, 2011)。这就引起了学者们对洋壳俯冲与抬升过程中硬柱石榴辉岩形成与保存问题的热烈讨论(Zack *et al.*, 2004; Clarke *et al.*, 2006; Whit-

ney and Davis, 2006; Ravna *et al.*, 2010; Wei and Clarke, 2011)。

洋壳俯冲过程中硬柱石榴辉岩的形成需要岩石中较高的  $H_2O$  含量,同时需要较低的俯冲地热梯度(Zack *et al.*, 2004; Groppo and Castelli, 2010; Ravna *et al.*, 2010; Wei and Clarke, 2011)。对于大多数遭受过充分海底热液蚀变水化的古老洋壳,大洋表面以下 800 m 厚度的玄武岩能够储存 5%~6% 的  $H_2O$  (Maruyama and Okamoto, 2007),它们的俯冲能够满足以上要求(Peacock and Wang, 1999; Wei and Clarke, 2011)。即便洋壳没有充分水化,只要岩石中含有一定量的  $H_2O$  (0.3%~0.5%),岩石都可能在硬柱石榴辉岩相适当的温压条件下达到饱和,从而发生变质演化,形成硬柱石榴辉岩(魏春景等, 2011)。事实上,许多高压超高压变质地体中的蓝片岩或榴辉岩虽然不含硬柱石,但是含有大量的含水矿物(例如蓝闪石和绿帘石等)和硬柱石假像,其温压条件也落入硬柱石的稳定域(Will *et al.*, 1998; Balleve *et al.*, 2003),在这些岩石中,硬柱石的发现只是概率问题。这些事实表明,洋壳冷俯冲过程中变质基性岩中能够形成一定量的硬柱石,因而硬柱石形成与否不是硬柱石榴辉岩稀少的关键所在。Zack 等(2004)总结认为,硬柱石榴辉岩的稀少反映的是不同寻常的折返过程而非不一样的形成条件。

相比而言,硬柱石榴辉岩的保存需要考虑的因素比其形成更为复杂。首先,洋壳向深处持续俯冲可能会导致硬柱石榴辉岩并不被抬升到地表(Zack *et al.*, 2004),或者硬柱石等含水矿物脱水而转变为绿帘石榴辉岩(Tsujimori *et al.*, 2006a)、蓝晶石榴辉岩(Wei *et al.*, 2010)、甚至干榴辉岩(Rebay *et al.*, 2010)。其次,即便峰期温压条件在硬柱石稳定域,其折返也同样可能发生硬柱石脱水(Wei and Clarke, 2011),而这种脱水作用促进了峰期矿物组合遭受绿帘石榴辉岩相/绿帘石蓝片岩相的退变改造(Guiraud *et al.*, 2001)。另外,硬柱石的保存也受到其分解反应动力学和折返过程中流体渗透作用的影响(Zack *et al.*, 2004; Whitney and Davis, 2006)。硬柱石在榴辉岩中的保存,目前主要有两种可能的折返模式(图 5):一种是榴辉岩折返发生在硬柱石的稳定域,以发卡状的  $p-t$  轨迹沿着俯冲相反的方向折返,岩石经历可观的冷却作用(Clarke *et al.*, 2006; Tsujimori *et al.*, 2006a),硬柱石的最大稳定域不被穿过,从而使硬柱石能够在基质得以保存,

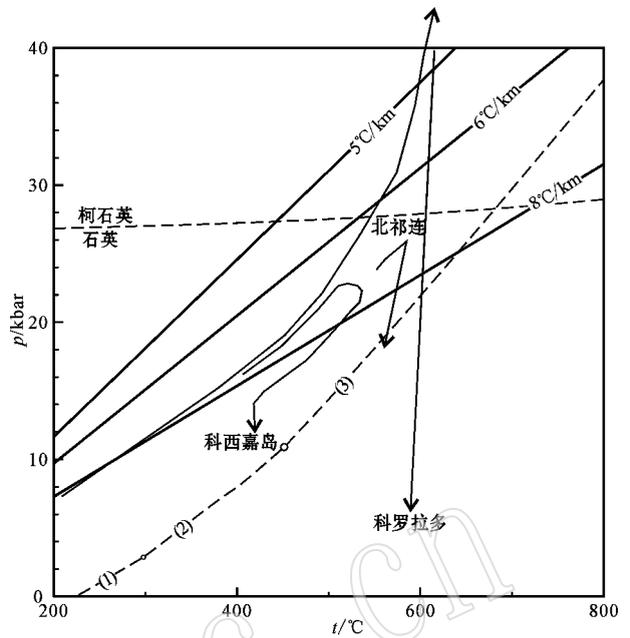


图 5 代表性硬柱石榴辉岩的  $p-t$  轨迹

Fig. 5  $p-t$  paths of representative lawsonite eclogites.  $p-t$  轨迹来自于北祁连(Wei *et al.*, 2009b)、科西嘉岛(Brovarone *et al.*, 2011)和科罗拉多(Usui *et al.*, 2003)。  
 $p-t$  paths are from North Qilian(Wei *et al.*, 2009b), Corsica (Brovarone *et al.*, 2011) and Colorado(Usui *et al.*, 2003)。

这种模式通常产生 L 型硬柱石榴辉岩(Tsujimori *et al.*, 2006a; Wei *et al.*, 2010),例如科西嘉岛的硬柱石榴辉岩(Brovarone *et al.*, 2011);另一种是岩石快速折返跨过绿帘石稳定域,岩石缺乏变形和相应的流体渗透作用(Whitney and Davis, 2006),尽管基质中的硬柱石可能被耗尽,但在一些特殊的结构域,硬柱石也能被保存(Wei and Clarke, 2011),这种模式通常产生 E 型硬柱石榴辉岩,例如北祁连的硬柱石榴辉岩(Zhang and Meng, 2006)。从某种意义上说,以上两个模型的特点分别是“冷”和“快”。从含水量上来看,降温降压  $p-t$  轨迹,通常切穿含水量等值线,并向水增加的方向,这并不利于矿物组合演化,而当硬柱石榴辉岩沿等温降压轨迹,跨过硬柱石分解线,硬柱石发生明显的脱水作用,硬柱石分解为绿帘石,硬柱石榴辉岩仅在特定结构域中保存硬柱石,形成 E 型硬柱石榴辉岩。峰期矿物组合的不同,相似的折返轨迹可能造成不同程度的退变叠加(魏春景等, 2011),例如,含绿泥石的硬柱石榴辉岩比不含绿泥石的硬柱石榴辉岩在等温降压过程中更易于保存峰期矿物组合(Wei and Clarke, 2011)。当硬柱石榴辉岩随着递进变质作用形成 U 型硬柱石榴辉

岩时,通常硬柱石含量已经很小,这时发生等温降压折返,即便在石榴石中也很难保留硬柱石,例如大别山硬柱石榴辉岩(Li *et al.*, 2004)。

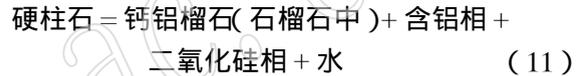
硬柱石已经在西南天山榴辉岩相变质泥岩中发现,其被石英所包裹,而这些石英本身也作为相对刚性矿物蓝闪石的包体,石英周围寄主矿物常常出现裂纹(Du *et al.*, 2011)。北祁连等地区的硬柱石榴辉岩中的硬柱石也被石英包裹,后者被刚性矿物石榴石包裹(林宜慧等, 2012),这是一种比较奇特的产状。通常,由于寄主矿物与包体矿物间塑性形变性质的差异,当温压条件偏离包体矿物被包裹的温压条件时,包裹体矿物内可能产生剩余压力(residual pressure 或者 overpressure), Enami 等(2007)指出榴辉岩相条件下(2~2.5 GPa 和 660~710°C)包裹于石榴石中的石英包体到达地表后,能够产生 8~11 kbar 的剩余压力。如此大的剩余压力足够使被包裹于石英中的硬柱石在经历等温降压甚至升温降压的过程中,并不穿越由反应 3 所控制的硬柱石最大稳定域。因而,在抬升过程早期缺乏脆性变形(产生破裂)的情况下,特定结构域中硬柱石的保存,岩石的折返的“快”和“冷”很可能并不是必要条件。西南天山高压超高压变质岩石峰期变质作用发生在~320 Ma(Su *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2011),而退变质作用发生在~230 Ma(Zhang *et al.*, 2007),期间经历了 90 Ma,这或许从侧面印证了上述有关硬柱石保存的可能性。科罗拉多的硬柱石榴辉岩的保存(Usui *et al.*, 2006)也同样可以上述原理解释:将金伯利岩视为刚性的石榴石而榴辉岩视为石英,它们之间同样存在着塑性形变性质的差异;相反,其它一些地区的 E 型硬柱石榴辉岩,其折返受包裹它们的变质泥质岩或者蛇纹岩等较软的岩石的浮力控制,榴辉岩基质中并不能形成剩余压力,因而即便经历了快速折返,榴辉岩基质中硬柱石也难以保留,只在石榴石等矿物中存留残余硬柱石颗粒。

另外,硬柱石榴辉岩折返过程中缺乏变形±流体交代而引发的退变叠加是硬柱石榴辉岩得以保存的必要条件之一(Whitney and Davis, 2006)。Whitney 和 Davis(2006)报道了土耳其锡夫里希萨尔地区同一岩体上同时出露未退变的硬柱石榴辉岩和退变产生的绿帘石榴辉岩。该地区大多数硬柱石榴辉岩样品基质中保存了大量的硬柱石(可达 40%,图 1),而仅有硬柱石榴辉岩块体边部或者较小的块体发生了退变质作用而产生了绿帘石、云母和绿泥石等矿

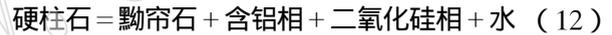
物,因而可以推测该地区的硬柱石榴辉岩属于上述 L 型硬柱石榴辉岩,其经历了发卡状(降温降压)的折返轨迹。而后期变形作用可能促进了榴辉岩块体边部的流体交代作用,从而引起绿帘石、绿泥石等退变矿物的叠加(Whitney and Davis, 2006)。相比于进变质作用过程中硬柱石榴辉岩向绿帘石榴辉岩的演化,这种改造作用的特点在于退变作用难以完全抹掉峰期信息,因而硬柱石及其峰期矿物组合得以部分或全部保留。

## 4 流体行为

硬柱石的分解伴随着强烈的脱水作用(反应 1~10)。总结起来,硬柱石的脱水作用可以分为以下两类(图 6)通过连续反应:



渐进脱水和通过近似单变反应的快速脱水:



前者主要发生在俯冲进变质作用过程中(图 6 进变轨迹 I 和 II),而后者在进变质和退变质作用中都可发生(图 6 进变轨迹 II 和退变轨迹 III)。这些脱出的水流体溶解俯冲带物质,并离开岩石,将对周围岩石及上覆岩石圈地幔产生重要影响。

从硬柱石蓝片岩相到硬柱石榴辉岩相再到干榴辉岩相的进变质作用过程中,岩石持续发生绿泥石、蓝闪石和硬柱石等矿物的脱水作用,这种脱水作用不仅有利于矿物组合演化,释放的流体所携带的物质也可能在岩石形成各类脉体,例如含绿辉石脉体等(John *et al.*, 2008):随着流体在岩石中的聚集,当流体压力大于静岩压力时,岩石发生破碎,产生裂隙,此时流体压力迅速降低,从而导致元素溶解度下降,脉体沉淀。在岩石早期折返的热弛豫或等温降压过程中硬柱石如果发生分解,岩石也将发生重要的脱水作用(Wei and Clarke, 2011),导致硬柱石榴辉岩相比干榴辉岩更易于发生退变改造(Brovarone *et al.*, 2011; Endo *et al.*, 2012),并可能完全抹掉硬柱石存在的证据。同时,这些释放出来的流体可能形成许多切穿岩石的脉体,例如绿帘石脉、蓝晶石-石英脉等(Li *et al.*, 2004)。

西南天山高压超高压榴辉岩中也产出多种类型的脉体,例如,绿辉石±石英±方解石(Gao and Klemd, 2001),金红石±白云石±帘石(Gao *et al.*,

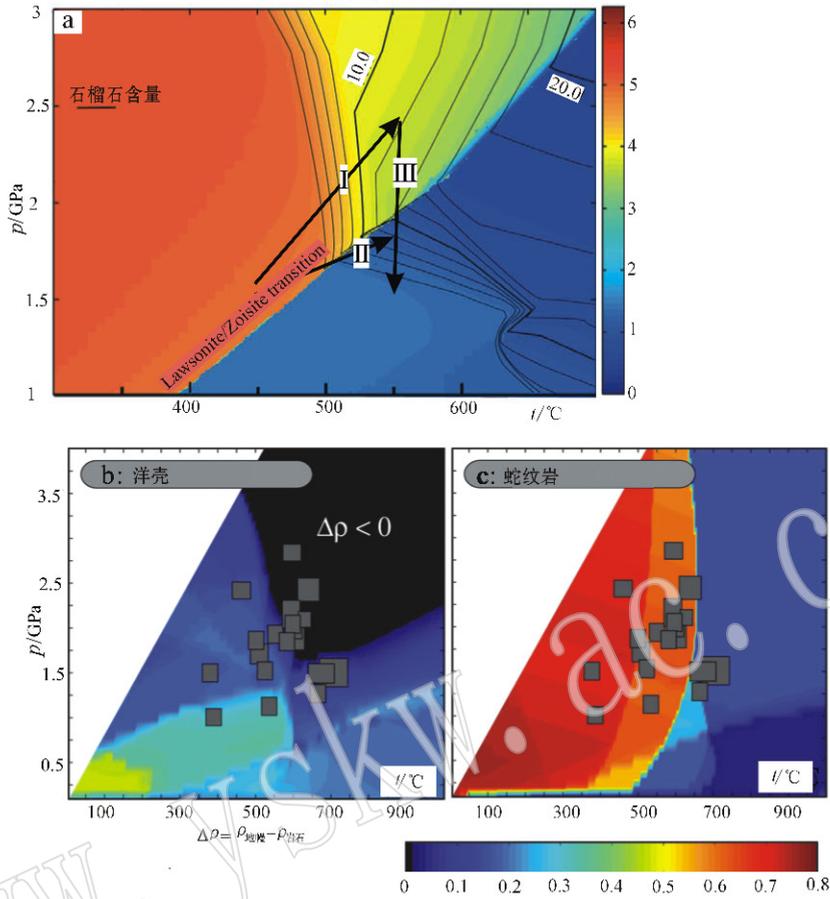


图 6 榴辉岩水含量变化(a, 改自 Brovarone 等, 2011)和俯冲洋壳及蛇纹岩在地幔中的净浮力变化(b, c, 改自 Agard 等, 2009)

Fig. 6 Variation of water content in eclogites (a, modified after Brovarone *et al.*, 2011) and variations of net buoyancy of subducted oceanic crust and serpentinite (b, c, modified after Agard *et al.*, 2009)

a 中 I、II 和 III 分别为可能的进变和退变轨迹; b 和 c 中灰色方块为全球俯冲洋壳高峰期温压条件;  $\rho$  为密度

the arrows with labels of I, II and III in Fig. 6a are possible prograde and retrograde  $p$ - $t$  paths; The gray squares in b, c are plots of peak  $p$ - $t$  conditions of subducted oceanic crust worldwide;  $\rho$  refers to the density

2007; Lü *et al.*, 2012)等脉体, 指示高压超高压变质作用中强烈的流体活动。前者被认为是蓝片岩相向榴辉岩相转变产生的进变质脉体, 而后者既可能是进变质脉体, 也可能是退变质脉体, 但其具体成因及共生流体的性质还有待深入研究。

目前普遍认为, 岛弧钙碱性岩浆作用是俯冲带流体在上升过程中交代上覆地幔楔, 使其发生部分熔融而产生 (Morris *et al.*, 1990; Peacock and Wang, 1999)。角闪石、硬柱石、滑石和绿帘石等是俯冲洋壳玄武质岩石中主要的储水矿物。实验岩石学表明, 角闪石通常在地表以下 65~90 km 的深度就已经全部分解, 远低于岛弧岩浆作用火山前缘与俯冲板片的距离 ( $128 \pm 38$  km 或者  $110 \pm 38$  km; Schmidt and Poli, 1998), 并且它的脱水作用只占总

水释放量的 5%~20% (Schmidt and Poli, 1998), 因而角闪石的脱水作用对岛弧岩浆作用的贡献可能相当低。基于相平衡模拟, Brovarone 等 (2011) 也认为发生在硬柱石稳定域的榴辉岩化 (角闪石转变为绿辉石) 脱水作用并不完全, 只有 1% 的水被释放出来, 而硬柱石仍然能保存了相当一部分水 (3%), 直到其在地幔深处 (最深约 270~300 km) 或抬升过程中发生分解。因而硬柱石可能代表了冷型深俯冲洋壳中的主要水储库, 并可能将至多 1% 的水带入到深度 200 km 的地幔 (Okamoto and Maruyama, 1999; Poli and Schmidt, 1995; Maruyama and Okamoto, 2007) 和 0.1%~0.3% 的水到达 ~300 km (Schmidt and Poli, 1998)。相对于这种受单一矿物控制的脱水模式, Schmidt 和 Poli (1998) 认为俯冲板片的脱水作用

实际上是受多种含水矿物控制的,在角闪石稳定深度以下,发生脱水作用的主要是硬柱石、绿帘石、滑石±白云母,总水的 15%~35% 在这一过程中脱出。Peacock 和 Wang(1999) 对比研究日本西南和东北部地震活动及岩浆特点也认为,洋壳的冷俯冲脱水作用导致岛弧岩浆作用,而洋壳的热俯冲脱水将导致板片自身的部分熔融,并可能产生埃达克岩。

## 5 硬柱石榴辉岩的折返

全球大多数硬柱石榴辉岩都以构造块体产出于蛇纹岩中(Tsujimori *et al.*, 2006a),这暗示了这些俯冲板上密度较轻的岩石类型对于硬柱石榴辉岩折返的重要作用。目前一般认为,浮力作用可能是俯冲板片在地幔深度折返的主要驱动力(图 6b 和 c)。Agard 等(2009)总结认为,~70 km 是俯冲带洋壳岩石折返的最大深度,在 70 km 以下的深度,由于没有足够的蛇纹岩,或者蛇纹岩不是足够轻,而无法折返。然而,西南天山洋壳俯冲超高压变质作用的发现(Lü *et al.*, 2008),说明俯冲带 100 km 左右深度的洋壳依然能够折返回地表。Wei 等(2009a)认为,西南天山包裹超高压榴辉岩的变质泥质岩石可能提供了洋壳折返足够的浮力作用。Chen 等通过模拟洋壳俯冲带岩石密度变化趋势,认为由于硬柱石等含水矿物的存在,冷俯冲榴辉岩在~120 km 深度上都具有比地幔更小的密度,因而将俯冲洋壳折返回地表的俯冲深度修改为~120 km(Chen *et al.*, 2013)。

## 6 结语

硬柱石榴辉岩是洋壳冷俯冲带中的典型代表性岩石,我国境内仅出露于北祁连-北阿尔金和西南天山低温高压超高压变质带中。尽管学者们很早就开展了对上述两个变质带中蓝片岩和榴辉岩的研究工作,但是硬柱石榴辉岩的发现却很晚,相比于大别山超高压变质带,对着两个变质带的研究程度也相当低。因而对上述两个硬柱石榴辉岩带的深入研究,特别是西南天山作为全球少有的经历超高压变质作用的 E 型硬柱石榴辉岩地体,必将丰富全球硬柱石榴辉岩地体的岩石学资料,完善榴辉岩中硬柱石的形成与保存机制,并揭示洋壳俯冲带深部流体作用。

致谢 感谢匿名评审人和编辑同志的认真审稿和修改!

## References

- Agard P, Yamato P and Jolivet L, *et al.* 2009. Exhumation of oceanic blueschists and eclogites in subduction zones: Timing and mechanisms[J]. *Earth-Science Reviews*, 92(1~2): 53~79.
- Balleve M, Pitra P and Bohn M. 2003. Lawsonite growth in the epidote blueschists from the Ile de Groix(Armorican Massif, France): a potential geobarometer[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 21(7): 723~735.
- Brovarone A V, Groppo C and Hetenyi G, *et al.* 2011. Coexistence of lawsonite-bearing eclogite and blueschist: phase equilibria modelling of Alpine Corsica metabasalts and petrological evolution of subducting slab[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(5): 583~600.
- Chen Y, Ye K and Wu T F, *et al.* 2013. Exhumation of oceanic eclogites: thermodynamic constraints on pressure, temperature, bulk composition and density[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 31(5): 549~570.
- Clarke G L, Powell R and Fitzherbert J A. 2006. The lawsonite paradox: a comparison of field evidence and mineral equilibria modelling[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 24(8): 715~725.
- Davis P B and Whitney D L. 2006. Petrogenesis of lawsonite and epidote eclogite and blueschist, Sivrihisar Massif, Turkey[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 24(9): 823~849.
- Du J X, Zhang L F and Lu Z, *et al.* 2011. Lawsonite-bearing chloritoid-glaucophane schist from SW Tianshan, China: Phase equilibria and P-T path[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(4S1): 684~693.
- Enami M, Nishiyama T and Mouri T. 2007. Laser Raman microspectrometry of metamorphic quartz: A simple method for comparison of metamorphic pressures[J]. *American Mineralogist*, 92(8~9): 1303.
- Endo S, Wallis S R and Tsuboi M, *et al.* 2012. Metamorphic evolution of lawsonite eclogites from the southern Motagua fault zone, Guatemala: insights from phase equilibria and Raman spectroscopy[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 30(2): 143~164.
- Gao J and Klemd R. 2001. Primary fluids entrapped at blueschist to eclogite transition: evidence from the Tianshan meta-subduction complex in northwestern China[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 142(1): 1~14.
- Gao J, John T and Klemd R, *et al.* 2007. Mobilization of Ti-Nb-Ta during subduction: Evidence from rutile-bearing dehydration seg-

- regations and veins hosted in eclogite, Tianshan, NW China [ J ]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 71(20): 4 974~4 996.
- Groppo C and Castelli D. 2010. Prograde P-T Evolution of a Lawsonite Eclogite from the Monviso Meta-ophiolite ( Western Alps ): Dehydration and Redox Reactions during Subduction of Oceanic Fe-Ti-oxide Gabbro [ J ]. *Journal of Petrology*, 51(12): 2 489~2 514.
- Guiraud M, Powell R and Rebay G. 2001. H<sub>2</sub>O in metamorphism and unexpected behaviour in the preservation of metamorphic mineral assemblages [ J ]. *Journal of Metamorphic Geology*, 19(4): 445~454.
- John T, Klemd R and Gao J, *et al.* 2008. Trace-element mobilization in slabs due to non steady-state fluid-rock interaction: Constraints from an eclogite-facies transport vein in blueschist ( Tianshan, China ) [ J ]. *Lithos*, 103(1~2): 1~24.
- Li Q L, Lin W and Su W, *et al.* 2011. SIMS U-Pb rutile age of low-temperature eclogites from southwestern Chinese Tianshan, NW China [ J ]. *Lithos*, 123(1~2): 76~86.
- Li X P, Li Y L and Shu G M. 2005. Breakdown of lawsonite subsequent to peak UHP metamorphism in the Dabie terrane and its implication for fluid activity [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 50(13): 1 366~1 372.
- Li X P, Zheng Y F and Wu Y B, *et al.* 2004. Low-T eclogite in the Dabie terrane of China: petrological and isotopic constraints on fluid activity and radiometric dating [ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(4): 443~470.
- Lin Yihui and Zhang Lifei. Petrology and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology of the lawsonite-bearing blueschist and eclogite from the Qingshuigou blueschist belt in North Qilian Mountains in NW China and their tectonic implication [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 86(09): 1 503~1 524 (in Chinese with English abstract).
- Lü Z, Zhang L F and Du J X, *et al.* 2008. Coesite inclusions in garnet from eclogitic rocks in western Tianshan, northwest China: Convincing proof of UHP metamorphism [ J ]. *American Mineralogist*, 93(11~12): 1 845~1 850.
- Lü Z, Zhang L F and Du J X, *et al.* 2009. Petrology of coesite-bearing eclogite from Habutengsu Valley, western Tianshan, NW China and its tectonometamorphic implication [ J ]. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(9): 773~787.
- Lü Z, Zhang L F and Du J X, *et al.* 2012. Petrology of HP metamorphic veins in coesite-bearing eclogite from western Tianshan, China: Fluid processes and elemental mobility during exhumation in a cold subduction zone [ J ]. *Lithos*, 136(S1): 168~186.
- Maruyama S and Okamoto K. 2007. Water transportation from the subducting slab into the mantle transition zone C-8288-2009 [ J ]. *Gondwana Research*, 11(1~2): 148~165.
- Morris J D, Leeman W P and Tera F. 1990. The subducted component in island-arc lavas: constraints from Be isotopes and B-Be systematics [ J ]. *Nature*, 344(6 261): 31~36.
- Okamoto K and Maruyama S. 1999. The high-pressure synthesis of lawsonite in the MORB + H<sub>2</sub>O system [ J ]. *American Mineralogist*, 84(3): 362~373.
- Pawley A R. 1994. The pressure and temperature stability limits of lawsonite: implications for H<sub>2</sub>O recycling in subduction zones [ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 118(1): 99~108.
- Peacock S M and Wang K. 1999. Seismic consequences of warm versus cool subduction metamorphism: Examples from southwest and northeast Japan [ J ]. *Science*, 286(5 441): 937~939.
- Poli S and Schmidt M W. 1995. H<sub>2</sub>O transport and release in subduction zones: Experimental constraints on basaltic and andesitic systems [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 100(B11): 22 222~22 299.
- Poli S, Franzolin E and Fumagalli P, *et al.* 2009. The transport of carbon and hydrogen in subducted oceanic crust: An experimental study to 5 GPa [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 278(3~4): 350~360.
- Powell R and Holland T J B. 2008. On thermobarometry [ J ]. *Journal of Metamorphic Geology*, 26(2): 155~179.
- Ravna E, Andersen T B and Jolivet L, *et al.* 2010. Cold subduction and the formation of lawsonite eclogite-constraints from prograde evolution of eclogitized pillow lava from Corsica [ J ]. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(4): 381~395.
- Rebay G, Powell R and Diener J F A. 2010. Calculated phase equilibria for a morb composition in a P-T range, 450-650°C and 18-28 kbar: the stability of eclogite [ J ]. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(6): 635~645.
- Schmidt M W. 1995. Lawsonite: Upper pressure stability and formation of higher density hydrous phases [ J ]. *American Mineralogist*, 80(11~12): 1 286~1 292.
- Schmidt M W and Poli S. 1998. Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 163(1~4): 361~379.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations [ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 490~500 (in Chinese with English abstract).
- Spandler C, Hermann J and Arculus R, *et al.* 2003. Redistribution of trace elements during prograde metamorphism from lawsonite blueschist to eclogite facies: implications for deep subduction-zone processes [ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 146(2): 205~222.
- Su W, Gao J, Klemd R, *et al.* 2010. U-Pb zircon geochronology of Tianshan eclogites in NW China: implication for the collision between the Yili and Tarim blocks of the southwestern Altai [ J ]. *European Journal of Mineralogy*, 22(4): 473~478.
- Tribuzio R, Messiga B and Vannucci R, *et al.* 1996. Rare earth ele-

- ment redistribution during high-pressure-low-temperature metamorphism in ophiolitic Fe-gabbros (Liguria, northwestern Italy): Implications for light REE mobility in subduction zones[J]. *Geology*, 24(8): 711~714.
- Tsujimori T, Sisson V B and Liou J G, *et al.* 2006a. Very-low-temperature record of the subduction process: A review of worldwide lawsonite eclogites[J]. *Lithos*, 92(3~4): 609~624.
- Tsujimori T, Sisson V B and Liou J G, *et al.* 2006b. Petrologic characterization of Guatemalan lawsonite eclogite: Eclogitization of subducted oceanic crust in a cold subduction zone[J]. *Ultrahigh-Pressure Metamorphism: Deep Continental Subduction*, 403: 147~168.
- Usui T, Nakamura E and Helmstaedt H. 2006. Petrology and geochemistry of eclogite xenoliths from the Colorado Plateau: Implications for the evolution of subducted oceanic crust[J]. *Journal of Petrology*, 47(5): 929~964.
- Usui T, Nakamura E and Kobayashi K, *et al.* 2003. Fate of the subducted Farallon plate inferred from eclogite xenoliths in the Colorado Plateau[J]. *Geology*, 31(7): 589~592.
- Wei C J and Clarke G L. 2011. Calculated phase equilibria for MORB compositions: a reappraisal of the metamorphic evolution of lawsonite eclogite[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(9): 939~952.
- Wei Chunjing and Cui Ying. Metamorphic evolution during subduction and exhumation of crust: Evidence from phase equilibria modelling for high-and ultrahigh-pressure eclogites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1067~1074 (in Chinese with English abstract).
- Wei C J, Li Y J and Yu Y, *et al.* 2010. Phase equilibria and metamorphic evolution of glaucophane-bearing UHP eclogites from the Western Dabieshan Terrane, Central China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(6): 647~666.
- Wei C J, Wang W and Clarke G L, *et al.* 2009a. Metamorphism of High/ultrahigh-pressure Pelitic-Felsic Schist in the South Tianshan Orogen, NW China: Phase Equilibria and P-T Path[J]. *Journal of Petrology*, 50(10): 1973~1991.
- Wei C J, Yang Y and Su X L, *et al.* 2009b. Metamorphic evolution of low-T eclogite from the North Qilian orogen, NW China: evidence from petrology and calculated phase equilibria in the system  $\text{Nckf-mash}$ [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(1): 55~70.
- Whitney D L and Davis P B. 2006. Why is lawsonite eclogite so rare? Metamorphism and preservation of lawsonite eclogite, Sivrihisar, Turkey[J]. *Geology*, 34(6): 473~476.
- Will T, Okrusch M and Schmadicke E, *et al.* 1998. Phase relations in the greenschist-blueschist-amphibolite-eclogite facies in the system  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  (NCFMASH), with application to metamorphic rocks from Samos, Greece[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132(1): 85~102.
- Zack T, Rivers T and Brumm R, *et al.* 2004. Cold subduction of oceanic crust: Implications from a lawsonite eclogite from the Dominican Republic[J]. *European Journal of Mineralogy*, 16(6): 909~916.
- Zhang J X and Meng F C. 2006. Lawsonite-bearing eclogites in the north Qilian and north Altyn Tagh: Evidence for cold subduction of oceanic crust[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(10): 1238~1244.
- Zhang L F, Ai Y L and Li X P, *et al.* 2007. Triassic collision of western Tianshan orogenic belt, China: Evidence from SHRIMP U-Pb dating of zircon from HP/UHP eclogitic rocks[J]. *Lithos*, 96(1~2): 266~280.
- Zhang L F, Gao J and Ekebair S, *et al.* 2001. Low temperature eclogite facies metamorphism in Western Tianshan, Xinjiang[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 44(1): 85~96.

## 附中文参考文献

- 林宜慧, 张立飞. 2012. 北祁连山清水沟蓝片岩带中含硬柱石蓝片岩和榴辉岩的岩石学 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及其意义[J]. *地质学报*, 86(9): 1503~1524.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 495~500.
- 魏春景, 崔莹. 2011. 地壳俯冲与折返过程的变质作用演化: 来自高压-超高压榴辉岩相平衡模拟的证据[J]. *岩石学报*, 27(4): 1067~1074.