

俄罗斯白海活动带 Uzkaya Salma 地区含绿纤石榴辉岩的岩石学特征及其变质演化

齐云飞, 张立飞, 余黄露

(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: 俄罗斯白海活动带 Uzkaya Salma 地区榴辉岩中发现的绿纤石形成于榴辉岩化早期亚绿片岩相阶段。该绿纤石多以包体形式存在于退变榴辉岩的变斑晶石榴石矿物中, 并与榍石、金红石、单斜辉石、绿泥石、绿帘石、石英等矿物伴生, 极少量单颗粒绿纤石包裹在基质单斜辉石(透辉石)矿物中, 呈浑圆状。绿纤石成分上属于铝绿纤石和铁绿纤石, 其中以铝绿纤石为主。在详细的岩相学研究基础上, 通过相平衡计算, 结合矿物温压计计算结果, 发现含绿纤石榴辉岩共经历了4阶段的变质演化: I 早期进变质阶段, 以石榴石中的绿纤石+绿泥石+绿帘石+石英等矿物包裹体为特征, 依据实验岩石学研究的矿物组合绿纤石+绿泥石+石英和铁绿纤石+绿帘石稳定域, 估算该变质阶段温压条件 $t = 160 \sim 320\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 0.2 \sim 0.8\text{ GPa}$; II 峰期榴辉岩相阶段, 矿物组合为石榴石+Di-Pl 后成合晶推测的绿辉石+金红石±角闪石+石英, 石榴石核部镁等值线和绿辉石硬玉分子等值线限定其峰期温压条件为 $t = 725 \sim 740\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 1.4 \sim 1.5\text{ GPa}$; III 高压麻粒岩相退变质阶段, 矿物组合为石榴石+透辉石+角闪石+斜长石+石英, 石榴石-单斜辉石温度计和后成合晶中斜长石钙等值线限定该阶段的温压条件 $t = 725 \sim 750\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 1.1 \sim 1.3\text{ GPa}$; IV 晚期角闪岩相退变质阶段, 矿物组合角闪石+斜长石±黑云母+石英, 相平衡计算和角闪石-斜长石温度计限定温压条件为 $t = 670 \sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 0.7 \sim 0.9\text{ GPa}$ 。综上, 确定了俄罗斯白海活动带 Uzkaya Salma 地区含绿纤石榴辉岩具有顺时针的 p - T 演化轨迹, 峰期对应的地温梯度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 俯冲进变质阶段经历了绿纤石-绿帘石相变质, 由峰期榴辉岩相到退变质高压麻粒岩相具近等温降压的特征。研究表明, 板块的“冷”俯冲作用在地球演化早期太古宙时期就可能出现了。

关键词: 含绿纤石榴辉岩; 岩石学特征; 变质演化; Uzkaya Salma 地区; 白海活动带

中图分类号: P588.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)01-0052-13

Petrographic features and metamorphic evolution of pumpellyite-bearing eclogite in Uzkaya Salma area of the Belomorian mobile belt, Russia

QI Yun-fei, ZHANG Li-fei and YU Huang-lu

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

Abstract: The pumpellyite in the eclogites from Uzkaya Salma area of the Belomorian mobile belt, Russia, was formed at the pre-eclogite stage under the condition of sub-greenschist facies. Pumpellyite occurs as inclusions in garnet porphyroblasts and is associated with titanite, rutile, clinopyroxene, chlorite, epidote and quartz. In addition, rare granulous pumpellyite occurs as isolated inclusions in the matrix diopside. According to the composition features of pumpellyite, pumpellyite mostly belongs to pumpellyite-(Al) and rarely belongs to pumpellyite-(Fe). According to the petrographic features and the calculation of phase equilibrium and mineral geothermobarometers, the authors divide the metamorphic evolution of pumpellyite-bearing eclogite into four stages: Stage

收稿日期: 2015-02-15; 接受日期: 2015-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(40821002)

作者简介: 齐云飞(1989-), 女, 满族, 硕士研究生, 变质岩石学专业, E-mail: qiyunfei@pku.edu.cn

网络优先出版时间: 2015-05-28; 网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20150528.1628.001.html>

I, which is the pre-peak prograde metamorphic stage characterized by pumpellyite, chlorite, epidote, quartz inclusions within the garnet porphyroblasts, with p - T conditions being $t = 160 \sim 320^\circ\text{C}$, $p = 0.2 \sim 0.8$ GPa according to the stable field of mineral assemblages of pumpellyite + chlorite + quartz and pumpellyite-(Fe) + epidote, based on experimental petrologic study. Stage II, the peak eclogite-facies metamorphic stage, which is characterized by the mineral assemblage of garnet + omphacite (the symplectite of diopside and plagioclase) + rutile $\pm$ hornblende + quartz; the isopleths in garnet core and the Jd isopleths in omphacite reflect the metamorphic peak condition of $725 \sim 740^\circ\text{C}$ at $1.4 \sim 1.5$ GPa for the rock. Stage III, during which the initial decompressional retrogression began at the high granulite-facies stage characterized by garnet + diopside + hornblende + plagioclase + quartz; the garnet-clinopyroxene thermometer and An isopleths in plagioclase indicate that the p - T conditions $t = 725 \sim 750^\circ\text{C}$ and $p = 1.1 \sim 1.3$ GPa. Stage IV, which is late retrogression under the condition of amphibolites-facies and is characterized by the mineral assemblage of hornblende + plagioclase $\pm$ biotite + quartz, with p - T conditions $t = 670 \sim 700^\circ\text{C}$ and $p = 0.7 \sim 0.9$ GPa according to the calculation of phase equilibrium and hornblende-plagioclase thermometer. In conclusion, the pumpellyite-bearing eclogite in Uzkaya Salma area of the Belomorian mobile belt, Russia, shows a clockwise p - T path and the corresponding geothermal gradient in the peak eclogite-facies metamorphic stage is $15^\circ\text{C}/\text{km}$. The initial pre-eclogite metamorphic evolution began under the condition of pumpellyite-epidote facies during subduction. The pumpellyite-bearing eclogite is characterized by isothermal decompression from the peak eclogite-facies to the high granulite-facies. The results obtained by the authors show that "cold" subduction of the plate might have occurred at the early stage of the evolution of the earth during Archean.

Key words: pumpellyite-bearing eclogite; petrographic features; metamorphic evolution; Uzkaya Salma area; Belomorian mobile belt

Fund support: National Natural Science Foundation of China (40821002)

绿纤石 (Palache and Vassar, 1925; Burbank, 1927; Passaglia and Gottardi, 1973) 是葡萄石-绿纤石相的特征变质矿物, 在低温条件下可以稳定于较宽的压力范围内 (Nitsch, 1971; Schiffman and Liou, 1980)。在蓝片岩相中, 绿纤石与硬柱石、绿泥石、绿帘石、蓝闪石、阳起石、钠质斜长石和石英等矿物共生 (Irving *et al.*, 1932; Switzer, 1945; Brothers, 1954; Borg, 1956; Bloxam, 1959; Davis and Pabst, 1960; Penniston-Dorland *et al.*, 2012; Ukar and Cloos, 2013); 在绿片岩相中, 绿纤石与绿帘石、阳起石等矿物共生。绿纤石在榴辉岩中几乎很少出现, 目前发现的含绿纤石榴辉岩最早是 Tsujimori 等 (2006) 报道的在危地马拉地区早白垩世硬柱石榴辉岩中发现了绿纤石矿物, 该矿物包裹在硬柱石矿物中, 二者以包体形式存在于石榴石核部。该绿纤石为峰期榴辉岩相之前早期进变质阶段矿物, 可以指示早期榴辉岩化的温压条件: $t \sim 300^\circ\text{C}$, $p > 1.1$ GPa。近年来 Konilov (2008)、Konilov 等 (2011) 在俄罗斯白海活动带 Uzkaya Salma 地区首次发现绿纤石以包体形式存在于退变榴辉岩变斑晶石榴石矿物

中, 与阳起石、钠长石、绿泥石等低温低压矿物伴生, 被认为是峰期榴辉岩相之前进变质阶段绿纤石-阳起石相的残留矿物, 可以此估算早期榴辉岩化的温压条件。随后, 在俄罗斯白海活动带 Chalm 榴辉岩区 (Kuru-Vaara 矿区) 的榴辉岩中, 也发现了绿纤石矿物与石英伴生, 包裹在石榴石矿物中。与 Uzkaya Salma 地区榴辉岩中的绿纤石相比, 它成分上更富镁 (Shchipansky, 2012), 这种镁绿纤石可以指示绿纤石-阳起石相变质程度较高的部分 (Coombs *et al.*, 1976; Nakajima, 1982)。目前仅在上述两地的榴辉岩中发现早期榴辉岩化阶段的绿纤石矿物残留, 而其他地区的榴辉岩或退变榴辉岩中, 尚且未有含绿纤石榴辉岩的报道。榴辉岩中低温矿物绿纤石、绿泥石等矿物的存在, 可能指示榴辉岩的原岩物质与洋壳有关, 该榴辉岩为洋壳快速俯冲过程中, 相对低温高压变质作用下的产物。

俄罗斯白海活动带是研究太古宙榴辉岩的一个典型区域, 可以划分出 Gridino 和 Salma 两大榴辉岩区 (Mints *et al.*, 2010a), 分别有太古宙年龄 2.72 Ga (Volodichev *et al.*, 2004) 和 2.87 Ga (Mints *et*

al., 2010b) 的榴辉岩出露。前人对该活动带榴辉岩的岩相学、年代学等方面做了许多研究(Mints *et al.*, 2010a, 2010b, 2014; Konilov, 2011; Shchipansky *et al.*, 2012), 李小犁等(2013)很好地总结了近年来白海榴辉岩区的研究成果。但前人主要利用矿物温压计和矿物间的变质反应来估算各变质阶段的温压条件, 有关该地区榴辉岩的 p - T 轨迹及成因类型的研究还不够完善。以往研究认为, Salma 榴辉岩峰期温度约 700℃, 压力在 1.4~1.5 GPa, 早期经历了绿纤石-阳起石相变质(Mints *et al.*, 2010b, 2014)。

本文在前人研究基础上, 对 Uzkaya Salma 地区含绿纤石榴辉岩的岩石学和矿物学特征进行了详细研究, 重点论述该岩石中低温矿物绿纤石的产出形式和矿物成分特征, 并结合早期榴辉岩化进变质阶段的矿物组合, 利用相平衡方法和矿物对温压计计算了含绿纤石榴辉岩峰期和退变阶段的温压条件, 从而恢复其变质 p - T 轨迹。

1 区域地质背景

白海构造活动带位于芬诺斯干地亚(Fennoscandian)地盾东北部太古宙陆核, 呈北西走向, 该活动带受新太古代和古元古代构造变形和中高压变质作用的影响强烈(Mints *et al.*, 2009)。其北东侧为科拉(Kola)半岛大陆; 西南侧为卡累利阿(Karelia)花岗岩-绿岩克拉通, 二者均被认为是太古宙微陆块。科拉(Kola)半岛大陆南部活动边缘为克瑞特(Keret)构造推覆体, 主要由新太古代-古元古代的 TTG 片麻岩和绿岩组成, 其与白海活动带间为一条白海中部的绿岩缝合带(Kusky *et al.*, 2001; Fumes *et al.*, 2007), 是一套约 2.88~2.85 Ga 的基性-超基性系列岩石(Bibikova *et al.*, 1999; Slabunov *et al.*, 2006)。在该白海活动碰撞增生带中, 出露元古宙-太古宙榴辉岩, 称为白海榴辉岩区, 主要包括 Gridino 榴辉岩区和 Salma 榴辉岩区(图 1)。

Salma 榴辉岩区由 TTG 片麻岩和不同产状(层状、块状、布丁状)的暗色岩体组成, 通常主要包括 Shirokaya Salma 和 Uzkaya Salma, 此外, 也认为 Chalma 榴辉岩区(或 Kuru-Vaara 矿区)隶属 Salma 榴辉岩区。Chalma 榴辉岩区, 可划分出两类不同的榴辉岩: 一类退变强烈, 发生了部分熔融, 岩石具粗粒结构; 另一类保存较好无部分熔融现象, 具细粒结

构。两类榴辉岩均属角闪榴辉岩相, 由钠质单斜辉石中有石英片晶出溶等现象推测该区榴辉岩可能经历了超高压变质作用(Konilov *et al.*, 2011; Shchipansky *et al.*, 2012)。Shirokaya Salma 榴辉岩区以铁镁榴辉岩和铁钛榴辉岩为主, 榴辉岩的退变程度较高, 发生强烈的角闪岩化, 原岩为低钾拉斑玄武岩(Kaulina *et al.*, 2010; Shchipansky *et al.*, 2012)。Uzkaya Salma 榴辉岩区有目前整个白海榴辉岩区中最大的榴辉岩露头, 榴辉岩角闪岩化现象普遍, 与 Shriokaya Salma 榴辉岩区相比, 榴辉岩内部具有明显的不均衡性(Mints *et al.*, 2010a; Konilov *et al.*, 2011), 正常型、高镁型、铁钛型榴辉岩、石榴石岩互层交织分布(Kaulina *et al.*, 2010; Konilov *et al.*, 2011; Shchipansky *et al.*, 2012; Mints *et al.*, 2014)(图 1c)。

本文主要研究样品为 Uzkaya Salma 地区含绿纤石的退变榴辉岩(图 1b、1c), 峰期矿物组合保存较少, 主要呈透镜状产在周围的 TTG 片麻岩中。

2 样品分析方法

对研究区含绿纤石榴辉岩样品的探针片进行了系统的室内岩相学观察与矿物相转变结构分析, 实验均在北京大学地球与空间科学学院北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。

通过光学显微镜观察岩石薄片并利用拉曼光谱测试作为辅助手段进行岩相学特征观察与定性分析, 以便从宏观上明确岩石的结构特征、所包含的矿物种类、各个矿物之间的接触关系及包裹在某些矿物中小包体的矿物种类等。拉曼仪器型号为 Reinshaw-RM1000, 光源为 Ar^+ 等离子激光, 波长 514.5 mm, 强度 25 mW, 光谱分辨率为 $\pm 1\text{ cm}^{-1}$, 激光束斑为 1~2 μm , 信号采集时间为 5~10 s, 用单晶硅片进行校正。利用扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)对每件样品的矿物结构构造、相互间转变关系以及矿物成分变化特征进行初步测试分析。选择典型的矿物进行化学成分分析, 矿物化学成分测试在 JXA-8100 型电子探针上进行, 测试条件: 加速电压 15 kV, 束流 10 nA, 束斑 2 μm , 修正方法 PRZ, 标准样品采用美国 SPI 公司的 53 种标准矿物。绿纤石采用电价平衡计算化学式, 并标准化为 16 个阳离子, 其余矿物分子式均采用 AX 软件计算(Holland; <http://www.esc.cam.ac.uk/astaff/holland/ax.html>)。

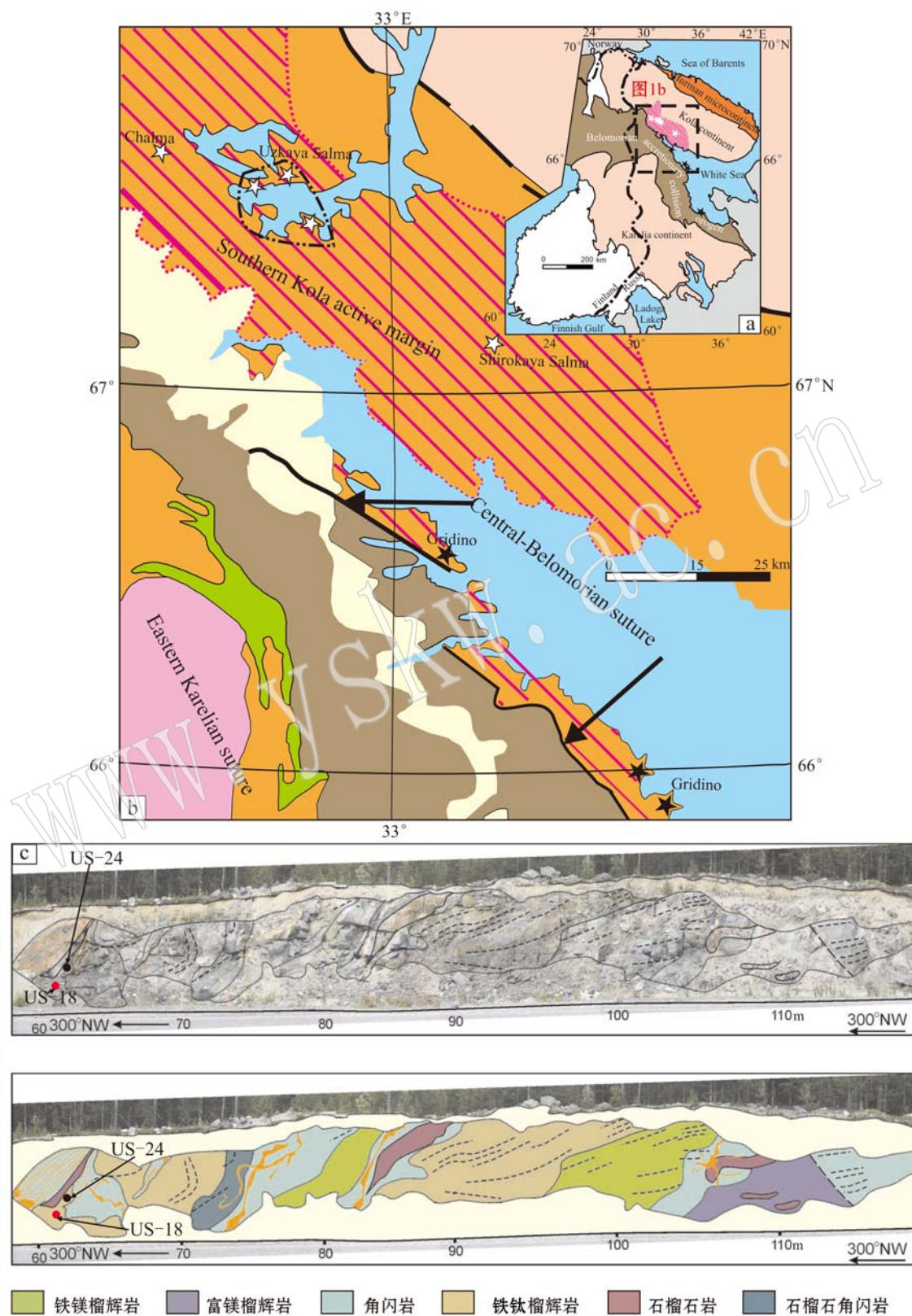


图 1 俄罗斯白海活动带大地构造位置(a)、白海活动带榴辉岩区地质构造示意图(b)及 Uzkaya Salma 榴辉岩区局部的产状剖面图和样品采样位置(c)[据李小型等(2013)和 Mints 等(2010a, 2014)修改]

Fig. 1 Tectonic location (a), geological scheme of eclogite province in the Belomorian mobile belt (b), Uzkaya Salma eclogite complex with partial cross-section scheme and sampling sites (c) (modified after Li Xiaoli *et al.*, 2013 and Mints *et al.*, 2010a, 2014)

3 岩相学及矿物化学

Uzkaya Salma 地区榴辉岩后期退变现象强烈, 可达麻粒岩相, 部分样品甚至退变为石榴石角闪岩。本文研究的样品均为退变的榴辉岩, 绿辉石几乎完全分解为单斜辉石-斜长石后成合晶。样品 US-18、US-24(图 1c 具体采样位置)为本文重点研究对象, 二者均为含绿纤石退变榴辉岩。代表性矿物电子探针成分见表 1、表 2。

该类岩石矿物组合为石榴石(30%, 体积分数, 下同)、单斜辉石(25%)、角闪石(20%)、斜长石(10%)和石英(5%)以及少量绿纤石、绿帘石、金红石、钛铁矿、磷灰石、锆石、黄铁矿和镍黄铁矿等副矿物。单斜辉石-斜长石形成的后成合晶结构发育, 石榴石颗粒外缘由斜长石围绕, 形成所谓的石榴石白眼圈结构(图 2a)。样品 US-24 与样品 US-18 相比, 除含有上述矿物外, 在基质中还有大量的方柱石(图 2c)和少量黑云母和绿帘石, 表明前者退变程度较高, 方柱石的出现说明后期有热事件叠加。

石榴石呈他形或椭圆状, 直径 1~2 mm, 裂隙发育, 较为破碎(图 2a), 其中的包体有石英、单斜辉石(透辉石)、金红石、磷灰石、绿帘石, 此外还包裹有少量斜长石、角闪石、绿纤石、绿泥石。石榴石主要成分为铁铝榴石(Alm)45~54、镁铝榴石(Prp)20~26、钙铝榴石(Grs)24~30 和少量的锰铝榴石(Sps)1~2。Uzkaya Salma 榴辉岩区石榴石成分与白海活动带其他榴辉岩区相比, 镁铝榴石含量较低, 钙铝榴石含量相对较高(图 3b), 由于石榴石受后期退变影响强烈, 成分环带不明显, 极少较自形的石榴石略微表现出进变质环带的特征(图 2b、图 3d)。

单斜辉石成分较单一, 为透辉石(图 4b、表 1), 主要以两种形式存在: ① 石榴石中的包体(图 2e、2f、2g、2h), 多与石榴石中的斜长石包体共生; ② 基质中的单斜辉石(图 2a、2b、2c), 与斜长石共生, 与绿辉石降压分解有关, 镁值为 0.72~0.78, 没有明显环带。样品 US-18 中辉石的 Na_2O 含量在 1.75%~0.58%, 明显高于样品 US-24 中辉石的 Na_2O 含量(0.50%~0.92%)。

角闪石属于单斜角闪石(钙角闪石), 成分上包括韭闪石、铁韭闪石、浅闪石、镁角闪石、镁角闪石(Leake *et al.*, 1997)。其中, 样品(US-18)中角闪石

以镁角闪石为主, 少量浅闪石和韭闪石, 而样品(US-24)中角闪石以韭闪石和铁韭闪石为主, 少量铁角闪石(图 4a)。在两个样品中角闪石存在形式主要有: ① 以包体形式存在于石榴石中(图 2b); ② 存在于基质中, 粒度较大, 0.5~1 mm(图 2c); ③ 与斜长石共生形成石榴石的退变质产物; ④ 蠕虫状, 叠加在单斜辉石和斜长石组成的后成合晶上, 表示角闪岩相叠加(图 2a)。

绿纤石主要与绿泥石、绿帘石、单斜辉石、石英、金红石、角闪石、榍石等矿物伴生包裹在石榴石颗粒中。样品 US-18 中, 绿纤石仅以包体形式存在于石榴石颗粒中, 并与其他矿物相伴生: ① 与石英、绿帘石、绿泥石伴生(图 2f), 根据矿物结构关系可以推测存在绿纤石+绿泥石-1+石英→绿帘石+绿泥石-2; ② 与单斜辉石、金红石、榍石、石英伴生(图 2h), 根据矿物结构关系可以推测存在绿纤石+石英→单斜辉石这一进变反应。而在样品 US-24 中, 大多数绿纤石与其他矿物伴生分布在石榴石颗粒中, 与其伴生的矿物主要有石英、角闪石、钛铁矿等; 少量绿纤石以单晶形式包裹在石榴石中, 呈他形不规则状; 极少单晶绿纤石包裹于基质单斜辉石(透辉石)颗粒中, 呈他形粒状(图 2c、2d), 指示绿纤石的形成不晚于单斜辉石(透辉石), 此外在 US-24 中的铁绿纤石仅与石英伴生。

绿纤石化学式 $\text{W}_4\text{X}_2\text{Y}_4\text{Z}_6\text{O}_{(20+x')}\text{OH}_{(8-x')}$, 其中, $\text{W} = \text{Ca}, \text{Mn}$; $\text{X} = (\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn})_{(2-x')}$, $(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})_{x'}$; $\text{Y} = \text{Al}, \text{Fe}^{3+}$; $\text{Z} = \text{Si}, \text{Al}$ (Coombs *et al.*, 1976)。X 位置的 $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn})$ 和 $(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})$ 原子个数不是固定数值, 变化范围分别为 0.71~1.55 和 1.29~0.45(Passaglia and Gottardi, 1973)。本文采用该化学式, 并基于 16 个阳离子数来计算绿纤石的分子式(表 2)。按照绿纤石的分类依据(Passaglia and Gottardi, 1973), 样品 US-18 中的绿纤石属于铝绿纤石(图 4c), 样品 US-24 中多数绿纤石属于铝绿纤石, 极少数绿纤石铁含量相对较高, 为铁绿纤石, 通常与石英、方解石矿物伴生。

绿纤石成分上无明显变化(表 2), 其中, Fe^* (全铁)含量与 Al 、 Mg 含量均呈反相关性, MgO 含量变化范围 1.51%~2.58%, Al_2O_3 含量 23.01%~26.45%, 表明绿纤石中 Fe^{3+} - Al 替代与 Fe^{2+} - Mg 替代相比, 前者占主导地位。

表 1 Uzkaya Salma 地区含绿纤石榴辉岩的代表性矿物电子探针成分
Table 1 Representative electron microprobe analyses of pumpellyite-bearing eclogite from Uzkaya Salma area

w_B/%

矿物	Grt(C)	Grt(M)	Grt(R)	Amp	Amp	Amp	Amp	Pl	Pl	Pl	Pl	Cpx	Cpx	Ep	Ep
SiO ₂	39.10	38.76	38.72	48.51	45.91	42.23	38.06	61.82	57.65	49.91	53.43	52.79	39.83	39.54	39.54
TiO ₂	0.13	0.05	0.04	1.27	1.16	1.12	0.09	0.02	0.05	0.01	0.19	0.20	0.09	0.26	0.26
Al ₂ O ₃	22.06	21.05	21.21	9.44	10.96	14.68	15.21	24.37	27.05	31.97	2.63	3.47	32.64	27.70	27.70
Cr ₂ O ₃	0.02	0.00	0.02	0.00	0.04	0.05	0.00	0.00	0.04	0.10	0.00	0.12	0.00	0.60	0.60
FeO	22.87	22.45	22.40	8.71	12.94	14.17	27.99	0.15	0.27	0.43	6.38	8.00	2.27	5.89	5.89
MnO	0.62	0.53	0.38	0.06	0.06	0.06	0.09	0.05	0.00	0.00	0.02	0.18	0.00	0.02	0.02
MgO	6.23	6.74	6.89	15.60	12.97	10.92	1.96	0.00	0.01	0.02	13.80	12.56	0.05	0.19	0.19
CaO	9.56	10.28	10.30	11.92	11.65	11.33	11.12	5.69	8.83	14.47	22.52	23.09	24.51	22.98	22.98
Na ₂ O	0.05	0.00	0.06	1.61	2.10	1.74	2.14	8.79	6.92	3.10	1.08	0.50	0.00	0.01	0.01
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.05	0.03	0.70	1.48	0.01	0.05	0.02	0.01	0.00	0.01	0.03	0.03
NiO	0.06	0.00	0.00	0.09	0.09	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07	0.00	0.00	0.00
Total	100.69	99.86	100.03	97.26	97.91	97.05	98.19	100.90	100.86	100.02	100.06	100.97	99.39	97.22	97.22
O	12.00	12.00	12.00	23.00	23.00	23.00	23.00	8.00	8.00	8.00	6.00	6.00	12.50	12.50	12.50
Si	2.993	2.984	2.971	6.932	6.648	6.239	6.024	2.723	2.565	2.274	1.964	1.944	2.987	3.076	3.076
Ti	0.007	0.003	0.002	0.137	0.126	0.124	0.011	0.001	0.002	0.000	0.005	0.006	0.005	0.015	0.015
Al	1.991	1.911	1.919	1.590	1.871	2.557	2.838	1.266	1.419	1.717	0.114	0.151	2.886	2.541	2.541
Cr	0.001	0.000	0.001	0.000	0.005	0.006	0.000	0.000	0.001	0.004	0.000	0.003	0.000	0.037	0.037
Fe3	0.014	0.115	0.143	0.106	0.107	0.313	0.257	0.006	0.010	0.016	0.026	0.000	0.141	0.253	0.253
Fe2	1.451	1.331	1.294	0.935	1.567	1.438	3.448	0.000	0.000	0.000	0.171	0.246	0.001	0.130	0.130
Mn	0.040	0.035	0.025	0.007	0.007	0.008	0.012	0.002	0.000	0.000	0.001	0.006	0.000	0.001	0.001
Mg	0.711	0.773	0.788	3.322	2.799	2.404	0.462	0.000	0.001	0.001	0.756	0.689	0.005	0.022	0.022
Ca	0.784	0.848	0.847	1.825	1.808	1.794	1.886	0.269	0.421	0.706	0.887	0.911	1.969	1.916	1.916
Na	0.007	0.000	0.009	0.446	0.590	0.498	0.657	0.751	0.597	0.274	0.077	0.036	0.000	0.002	0.002
K	0.000	0.000	0.001	0.009	0.006	0.132	0.299	0.001	0.003	0.001	0.000	0.000	0.001	0.003	0.003
Sum	8.000	8.000	8.000	15.346	15.533	15.620	15.985	5.016	5.018	4.994	4.000	3.991	7.995	7.996	7.996

注：C—核部，M—幔部，R—边部。

$w_B/\%$

表 2 绿帘石电子探针成分

Table 2 Representative electron microprobe analyses of pumpellyite

样品号	US-18						US-24						$w_B/\%$
	Pump-(Al)	Pump-(Al)	Pump-(Al)	Pump-(Al)	Pump-(Al)	Pump-(Al)	Pump-(Al)	Pump-(Al)	Pump-(Al)	Pump-(Fe)	Pump-(Fe)	Pump-(Fe)	
SiO ₂	37.93	38.65	37.25	37.39	37.33	38.37	36.73	37.50	36.65	37.68	37.48	37.48	
TiO ₂	0.06	0.06	0.02	0.07	0.07	0.00	0.11	0.00	0.08	0.05	0.03	0.03	
Al ₂ O ₃	26.04	26.45	25.10	25.32	25.87	25.86	25.56	26.24	23.01	24.55	23.49	23.49	
Cr ₂ O ₃	0.02	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.04	
FeO	3.92	4.99	4.97	3.75	5.30	4.72	5.14	3.89	7.88	6.74	7.21	7.21	
MnO	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.08	0.03	0.03	
MgO	2.14	1.51	1.74	2.20	1.95	2.58	1.69	1.85	1.71	1.80	1.96	1.96	
CaO	22.65	22.80	22.56	22.99	22.72	22.15	22.58	22.53	22.31	21.78	22.01	22.01	
Na ₂ O	0.03	0.06	0.09	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.08	0.09	0.05	0.05	
K ₂ O	0.00	0.03	0.00	0.01	0.03	0.00	0.02	0.00	0.03	0.02	0.02	0.02	
NiO	0.063	0	0	0.05	0.00	0.18	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.03	
Total	92.85	94.58	91.75	91.79	93.27	93.87	91.85	92.07	91.80	92.79	92.35	92.35	
原子百分数, 总阳离子数 = 16.00													
Si	6.10	6.13	6.08	6.08	6.00	6.12	6.00	6.08	6.04	6.12	6.13	6.13	
Al(Z)	—	—	—	—	0.00	0.00	0.00	—	—	—	—	—	
Al(Y)	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	
Al(X)	0.94	0.94	0.83	0.85	0.89	0.86	0.92	1.01	0.47	0.70	0.52	0.52	
Ti	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	
Fe	0.53	0.66	0.68	0.51	0.71	0.63	0.70	0.53	1.09	0.91	0.99	0.99	
Mg	0.51	0.36	0.42	0.53	0.47	0.61	0.41	0.45	0.42	0.44	0.48	0.48	
ΣX	1.98	1.97	1.94	1.91	2.08	2.10	2.04	1.99	1.98	2.05	1.99	1.99	
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	
Ca	3.90	3.87	3.95	4.01	3.91	3.78	3.95	3.91	3.94	3.79	3.85	3.85	
Na	0.01	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02	
K	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	
ΣW	3.91	3.90	3.98	4.01	3.92	3.78	3.96	3.93	3.97	3.83	3.88	3.88	

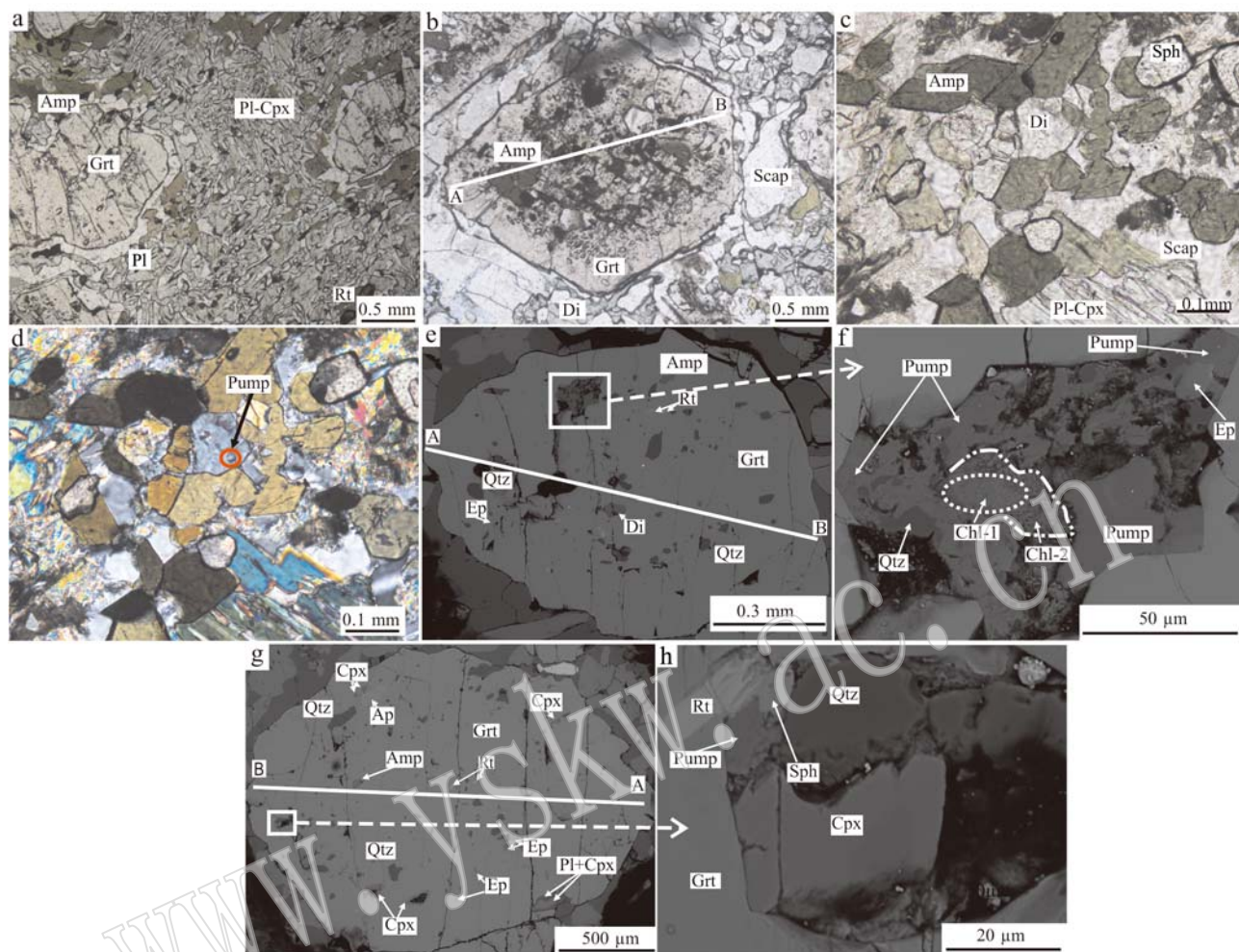


图 2 俄罗斯白海活动带 Uzkaya Salma 地区含绿帘石榴辉岩的显微照片和背散射照片

Fig. 2 Optical and electron microphotographs of textures in pumpellyite-bearing eclogite from Uzkaya Salma area

a—单斜辉石和斜长石后成合晶(Pl-Cpx),石榴石(Grt)的斜长石(Pl)反应边; b—较自形的石榴石,白色实线 A—B 表示图 3d 石榴石成分剖面图的位置; c、d—基质透辉石(Di)中的绿帘石(Pump)包体和方柱石(Scap); e、g—石榴石中含绿帘石包体的背散射照片,白色实线 A—B 分别表示图 3a、3c 中石榴石成分剖面图的位置,白色矩形区域分别为图 2f、2h 背散射照片所表示的区域; f—绿帘石与绿帘石(Chl)、绿帘石(Ep)、石英(Qtz)矿物伴生; h—绿帘石与单斜辉石(Cpx)、金红石(Rt)、榍石(Sph)、石英矿物伴生

a—Cpx + Pl symplectite, a xenomorphic garnet (Grt) crystal with a plagioclase (Pl) corona; b—subhedral garnet, the white solid line A—B shows the location of the zoning profile shown in Fig. 3d; c—optical micrograph (plainlight) of pumpellyite (Pump) inclusion in Di and scapolite (Scap); d—optical micrograph (crossed nicols) of pumpellyite inclusion in Di; e, g—BSE images showing the xenomorphic garnet crystal with pumpellyite and other mineral inclusions, the white solid lines A—B show the locations of the zoning profile shown in Fig. 3a, 3c, respectively, the white rectangles showing the locations of the BSE images in Fig. 2f, 2h, respectively; f—pumpellyite with chlorite (Chl), epidote (Ep) and quartz (Qtz); h—pumpellyite with clinopyroxene (Cpx), rutile (Rt), sphene (Sph) and quartz

斜长石成分为更长石、拉长石和培长石,其中样品 US-24 以拉长石和培长石为主,而样品 US-18 以更长石为主,主要存在形式:① 在石榴石域中,与绿色韭闪石共生,形成石榴石的退变质产物;② 与单斜辉石共生,呈蠕虫状,其 An 值在 0.25~0.27,与绿辉石的降压分解有关。

绿帘石在样品 US-18 中,呈他形粒状,以包体形式存在于石榴石中, $Ps[Fe/(Fe + Al)] = 0.04 \sim 0.16$ 。

而在样品 US-24 中,绿帘石不仅存在于石榴石中,部分呈板状或棒状,分布在基质中, $Ps = 0.05 \sim 0.14$ 。

石英分布在基质中或以包体形式分布在石榴石矿物中,呈他形不规则状或浑圆状。

其他副矿物还有金红石、榍石、钛铁矿、磷灰石、锆石。

根据矿物组合与结构,可以识别出 4 期变质矿物组合:早期的亚绿片岩相/绿片岩相矿物组合为绿

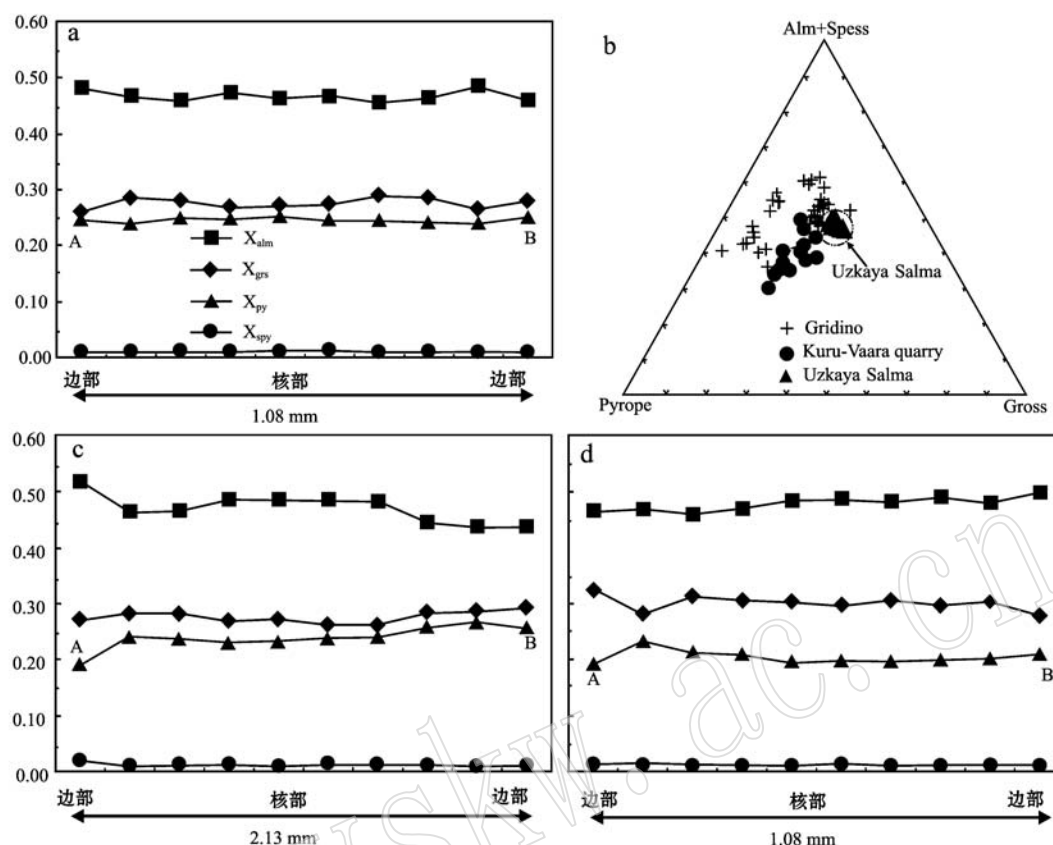


图 3 Uzkaya Salma 地区含绿纤石榴辉岩石榴石的成分剖面图及分类对比图

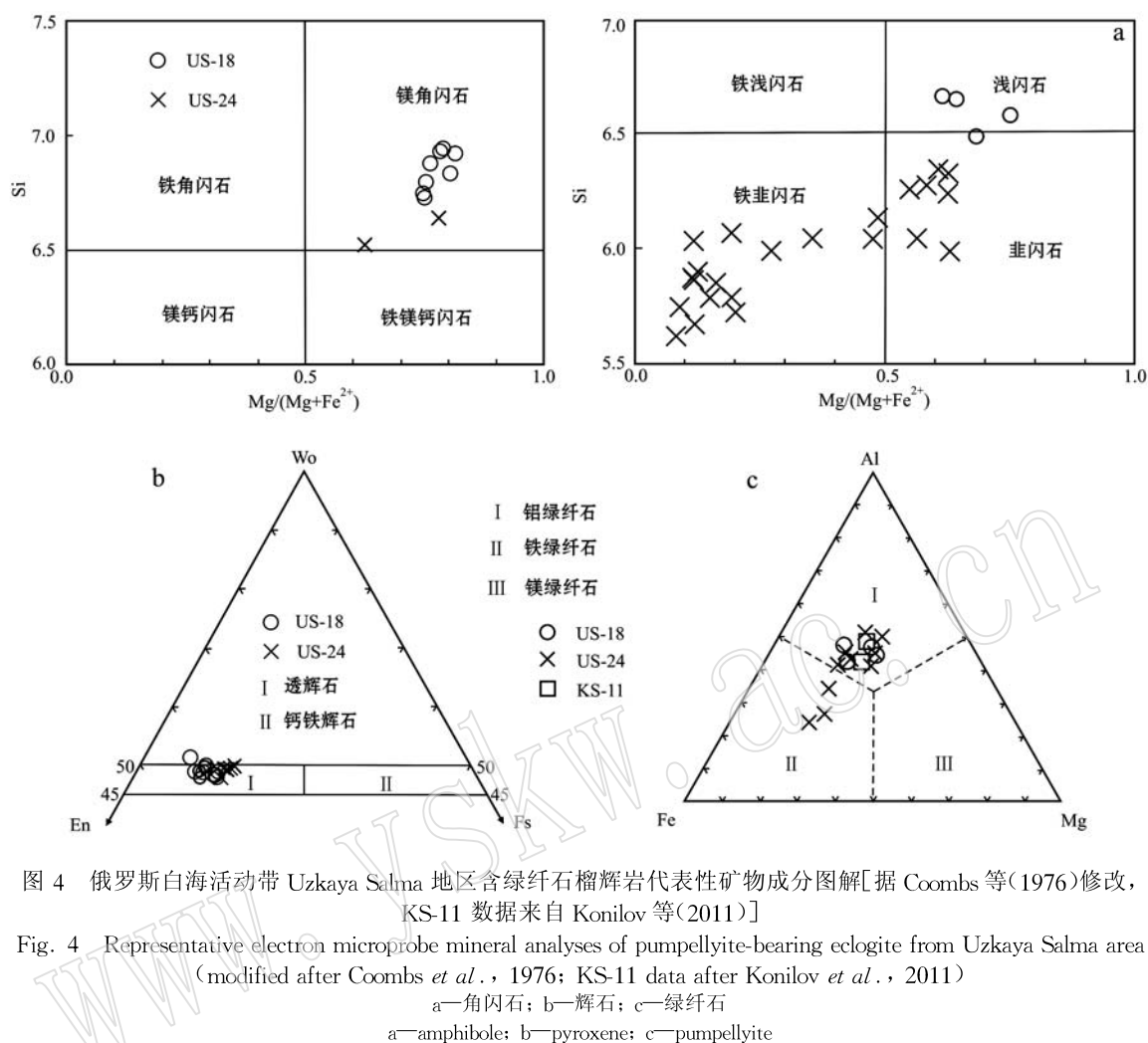
Fig. 3 Zoning profiles and composition contrast for garnets in pumpellyite-bearing eclogite from Uzkaya Salma area
Kuru-Vaara quarry 石榴石成分数据来自 Shchipansky 等(2012); Gridino 石榴石成分数据来自 Volodichev 等(2004)和 Travin 等(2009)
The composition of garnet for Kuru-Vaara quarry and Gridino cited after Shchipansky *et al.*, 2012 and Volodichev *et al.*, 2004, Travin *et al.*, 2009, respectively

纤石(Pump) + 绿泥石(Chl) + 绿帘石(Ep) + 石英(Qtz); 峰期榴辉岩相矿物组合为石榴石(Grt) + 透辉石(Di) - 斜长石(Pl) 的后成合晶推测的绿辉石(Omp) + 金红石(Rt) ± 角闪石(Amp) + 石英(Qtz); 退变质高压麻粒岩相矿物组合为石榴石(Grt) + 透辉石(Di) + 角闪石(Amp) + 斜长石(Pl) + 石英(Qtz); 退变质角闪岩相矿物组合为角闪石(Amp) + 斜长石(Pl) ± 黑云母(Bi) + 石英(Qtz)。

4 含绿纤石榴辉岩的变质演化

选取白海活动带 Uzkaya Salma 含绿纤石榴辉岩(样品 US-18)进行了相平衡模拟研究。该绿纤石榴辉岩成分(质量分数)由 XRF 分析得出: SiO₂ 46.21%, Al₂O₃ 12.27%, TFe₂O₃ 16.94%, CaO 11.92%, K₂O 0.02%, Na₂O 2.11%, MgO 8.63%, MnO 0.225%, TiO₂ 0.867%, P₂O₅ 0.059%。考虑

到 TiO₂ 和 P₂O₅ 主要形成副矿物金红石和磷灰石, K₂O 主要形成钾长石、云母, MnO 主要进入石榴石成分端员锰铝石榴石中,二者在全岩成分中含量低,并且在样品中未见钾长石和云母矿物,石榴石的电子探针成分中,锰铝石榴石含量极低,忽略这 4 个组分,选择在 Na₂O-CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O (Fe₂O₃)(NCFMASHO)体系中模拟岩石的变质作用过程,并假设流体成分 H₂O 过量,其中三价铁含量根据所有主要矿物中三价铁的含量和各自在全岩中的比例计算得出。计算相图时采用的有效全岩成分(mol%)为 SiO₂ 54.34%, Al₂O₃ 8.63%, CaO 11.94%, MgO 11.99%, FeO 10.68%, Na₂O 1.69%, O 0.73%, 使用 THERMOCALC3.33 程序(Powell *et al.*, 1998; 2009 年 7 月升级),数据库选择 Holland and Powell(1998)2003 年 11 月的升级版(tcfs55.txt)。所涉及矿物相的活度-成分关系为:角闪石(Diener *et al.*, 2007)、绿帘石(Holland and Powell, 1998)、石榴石



(White *et al.*, 2007)、单斜辉石 (Green *et al.*, 2007)、斜长石 (Holland and Powell, 2003), 石英为端员组分。

Uzkaya Salma 含绿纤石榴辉岩的 p - T 视剖面图见图 5。在 $550 \sim 800^\circ\text{C}$ 、 $0.5 \sim 2.0$ GPa 的温压范围内, 四矿物组合稳定域所占范围最大, 三矿物组合和五矿物组合稳定域次之。由于全岩成分中 SiO_2 含量低, 在相对低温高压部分 ($t < 610^\circ\text{C}$, $p > 1.0$ GPa) 和相对低压部分 ($t > 550^\circ\text{C}$, $p < 1.0$ GPa) 均有石英消失的线。含水矿物绿帘石稳定在低温部分, 角闪石稳定的温压范围较广, 在高温高压部分 ($t > 680^\circ\text{C}$, $p > 1.5$ GPa) 才消失。石榴石-单斜辉石组合稳定于整个温度范围, 只是高温部分稳定压力明显高于低温部分。

p - T 视剖面图上, 峰期榴辉岩相矿物组合 $\text{Grt} + \text{Omp} + \text{Rt} \pm \text{Amp} + \text{Qtz}$ 稳定的温压范围为 $t > 610^\circ\text{C}$ 、 $p > 1.2$ GPa, 在五变域四矿物组合 $\text{Grt} + \text{Di}$

+ $\text{Amp} + \text{Qtz}$, 硬玉分子等值线斜率较平缓, 随压力的增高而增大, 而石榴石中镁铝榴石组分 $x(\text{g}) = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Ca} + \text{Fe}^{2+})$ 等值线斜率较陡, 随温度的升高而增大。根据后成合晶中斜长石和透辉石的电子探针成分及各自所占的百分含量, 可以估算出降压前绿帘石的成分, 从而计算出硬玉分子 $\text{jd} = 0.26 \sim 0.27$ 。由绿辉石的硬玉分子含量 ($\text{jd} = 0.26 \sim 0.27$) 与实测的石榴石核部成分计算出的 $x(\text{g}) = 0.23 \sim 0.24$, 再结合石榴石-单斜辉石 (绿辉石) 温度计, 可以大致限定出峰期榴辉岩相的温压条件为 $725 \sim 740^\circ\text{C}$ 、 $1.4 \sim 1.5$ GPa, 地温梯度约 $15^\circ\text{C}/\text{km}$ 。

退变质高压麻粒岩相矿物组合 $\text{Grt} + \text{Di} + \text{Amp} + \text{Pl} + \text{Qtz}$ 的稳定温压范围为 $t > 680^\circ\text{C}$ 、 $p = 0.8 \sim 1.5$ GPa (图 5), 斜长石 $\text{An}[(\text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Na}))]$ 等值线在该矿物组合稳定域内斜率较平缓, 随压力升高 An 值降低。基质后成合晶中斜长石实测 An 值为 $0.25 \sim 0.27$, 投影在视剖面图上可以限定出压力范围在

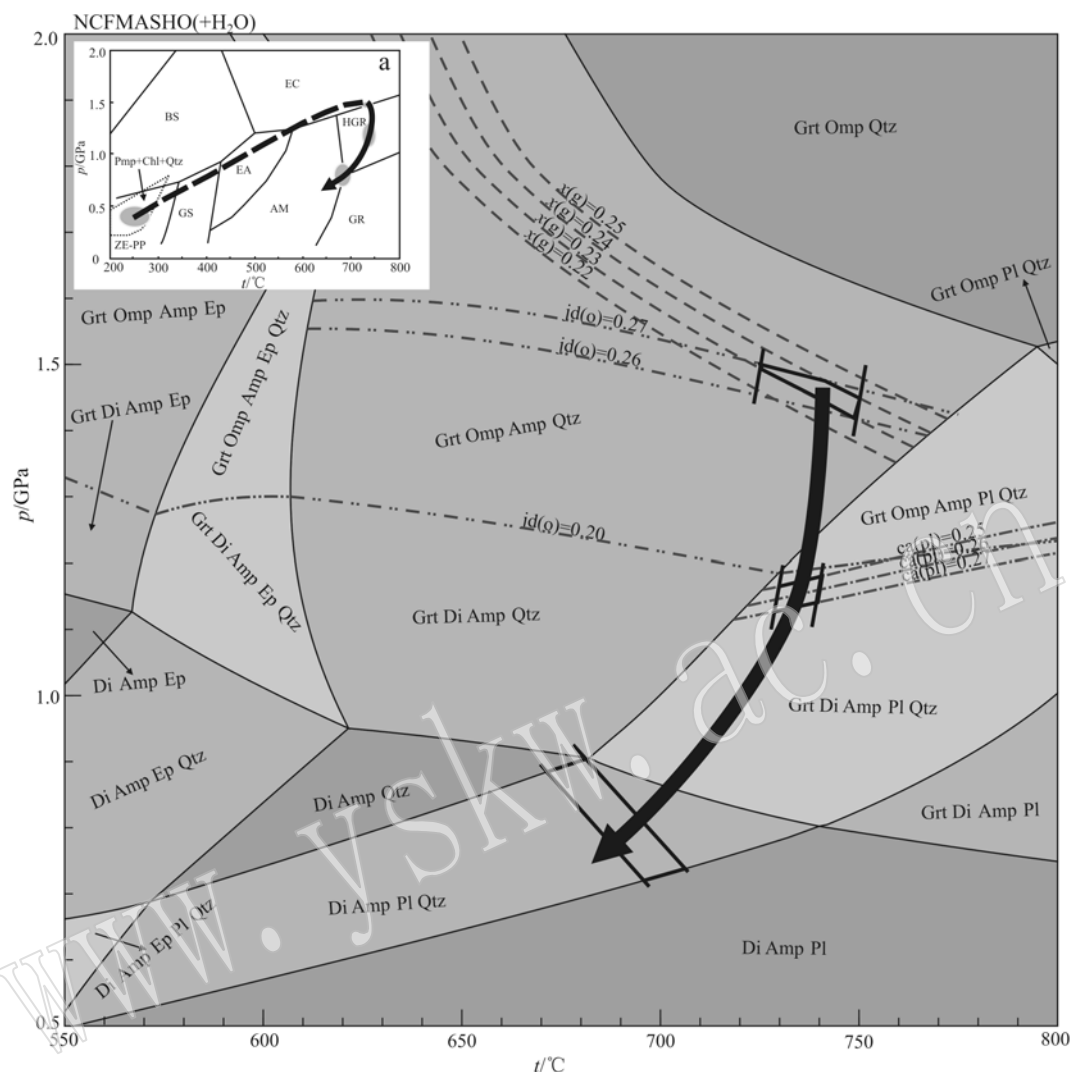


图 5 含绿帘石榴辉岩(样品 US-18)的视剖面图(详细说明参考文字部分)

Fig. 5 p - T pseudosection for the pumpellyite-bearing eclogite (sample US-18) from Uzkaya Salma (see text for details)
 a—含绿帘石榴辉岩的变质演化 p - T 轨迹示意图, Pump + Chl + Qtz 为绿帘石 + 绿泥石 + 石英的稳定域 (Frey *et al.*, 1991); ZE—沸石相;
 PP—葡萄石-绿帘石相; BS—蓝片岩相; GS—绿片岩相; EA—绿帘角闪岩相; AM—角闪岩相; GR—麻粒岩相; HGR—高压麻粒岩相;
 EC—榴辉岩相
 a— p - T path for the metamorphic evolution of the pumpellyite-bearing eclogite, Pump + Chl + Qtz—the stable field of pumpellyite + chlorite + quartz (Frey *et al.*, 1991); ZE—zeolite facies; PP—prehnite pumpellyite facies; BS—blueschist facies; GS—greenschist facies; EA—epidote amphibolite facies; AM—amphibolite facies; GR—granulite facies; HGR—high granulite facies; EC—eclogite facies

1.1~1.3 GPa, 应用石榴石-单斜辉石(透辉石)Fe-Mg 温度计 (Krogh, 1988), 结合实测石榴石和透辉石电子探针成分, 可以计算出温度区间 725~750℃。由此, 基于相平衡模拟和石榴石-单斜辉石温度计, 可以限定出样品在退变质高压麻粒岩相阶段所经历的温压条件为 725~750℃ 和 1.1~1.3 GPa。退变质高角闪岩相矿物组合 Amp + Pl + Qtz, 稳定的温压范围为 550~740℃、0.5~0.9 GPa (图 5), 结合角

闪石-斜长石温度计 (Blundy and Holland, 1990), 可以较好地限定出样品在退变质高角闪岩相阶段所经历的温压条件为 670~700℃、0.7~0.9 GPa。

此外, 一些低温矿物绿帘石、绿泥石、绿帘石包裹在样品 US-18 的石榴石中, 这些矿物应该是峰期榴辉岩相前进变质阶段矿物相的残留。在 Na_2O - CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O 体系下, 矿物组合绿帘石 + 绿泥石 + 石英稳定的温压条件为 160~320℃、0.2

~0.8 GPa (Frey *et al.*, 1991), 这可能是榴辉岩化初级阶段, 而后温压升高进入绿纤石-阳起石相, 温压条件为 340 ~ 380°C、0.6 ~ 0.9 GPa (Konilov, 2008; Mints *et al.*, 2010b, 2014)。

综上所述, 可以推测, 含绿纤石榴辉岩的原岩早期经历了亚绿片岩相变质, 随温度和压力升高依次经历绿片岩相、绿帘-角闪岩相进变质, 最后达到峰期角闪榴辉岩相, 由于后期构造抬升, 榴辉岩在快速抬升折返过程中, 又经历了高压麻粒岩相和角闪岩相退变质作用(图5)。

俄罗斯白海活动带的榴辉岩是目前发现的时代最为古老的太古宙榴辉岩 (Volodichev *et al.*, 2004; Mints *et al.*, 2010a, 2010b, 2014), 它表明板块构造在太古宙时期就开始出现了。本文确定了俄罗斯白海 Salma 榴辉岩中含绿纤石榴辉岩经历了早期进变质过程中绿纤石相变质阶段, 进一步表明太古宙板块可能存在“冷”俯冲变质过程, 这对于探讨早期地壳演化具有重要意义。

5 结论

(1) Uzkaya Salma 地区退变榴辉岩中的低温绿纤石矿物以包体形式存在于变斑晶石榴石和基质单斜辉石矿物中, 这种矿物结构关系表明, 该矿物为早期榴辉岩化阶段亚绿片岩相的残留矿物。

(2) Uzkaya Salma 地区含绿纤石榴辉岩的变质演化 p - T 轨迹, 具有顺时针型、近等温降压的特点, 揭示 Uzkaya Salma 地区含绿纤石榴辉岩经历了快速抬升折返的过程, 中间经历了高压麻粒岩相和角闪岩相退变质阶段。石榴石核部镁等值线和透辉石-斜长石后成合晶推测的绿辉石的硬玉分子等值线限定其峰期温压条件为 $t = 725 \sim 740^\circ\text{C}$ 、 $p = 1.4 \sim 1.5$ GPa。

References

- Burbank W S. 1927. Additional data on the properties of pumpellyite and its occurrence in the Republic of Haiti, West Indies [J]. *American Mineralogist*, 12: 421~424.
- Brothers R N. 1954. Glaucophane-schists from the north Berkeley Hills, California [J]. *American Journal of Science*, 252(10): 614~626.
- Borg I Y. 1956. Glaucophane schists and eclogites near Healdsburg, California [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 67(12): 1563~1584.
- Bloxam T W. 1959. Glaucophane-schists and associated rocks near Valley Ford, California [J]. *American Journal of Science*, 257(2): 95~112.
- Bibikova E V, Slabunov A I and Bogdanova S V, *et al.* 1999. Early magmatism of the Belomorian Mobile Belt: lateral zoning and isotope age [J]. *Petrology*, 7 (2): 115~140.
- Blundy J D and Holland T J B. 1990. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104(2): 208~224.
- Coombs D J, Nakamura Y and Vuagnat M. 1976. Pumpellyite-actinolite facies schists of the Taveyanne Formation near Loèche, Vatais, Switzerland [J]. *Journal of Petrology*, 17(4): 440~471.
- Davis G A and Pabst A. 1960. Lawsonite and pumpellyite in glaucophane schist, North Berkeley Hills, California, with notes on the X-ray crystallography of lawsonite [J]. *American Journal of Science*, 258(10): 689~704.
- Diener J F A, Powell R, White R W, *et al.* 2007. A new thermodynamic model for clino- and orthoamphiboles in $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{O}$ [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(6): 631~656.
- Frey M, Decapitani C and Liou J G. 1991. A new petrogenetic grid for low-grade metabasites [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 9 (4): 497~509.
- Fumes H, de Wit M, Staudigel H, *et al.* 2007. A vestage of Earth's oldest ophiolite [J]. *Science*, 315: 1704~1707.
- Green E C R, Holland T J B and Powell R. 2007. An order-disorder model for omphacitic pyroxenes in the system jadeite-diopside-hedenbergite-acmite, with applications to eclogite rocks [J]. *American Mineralogist*, 92(7): 1181~1189.
- Holland T J B and Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(3): 309~343.
- Holland T J B and Powell R. 2003. Activity-composition relations for phases in petrological calculations: an asymmetric multicomponent formulation [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145 (4): 492~501.
- Irving J, Vonsen M and Gonyer F A. 1932. Pumpellyite from California [J]. *American Mineralogist*, 17: 338~342.
- Kaulina T V, Yapaskurt V O, Presnyakov S L, *et al.* 2010. Metamorphic Evolution of the Archean Eclogite-Like Rocks of the Shirokaya and Uzkaya Salma Area (Kola Peninsula): Geochemical Features of Zircon, Composition of Inclusions, and Age [J]. *Geochemistry International*, 48(9): 871~890.
- Krogh E J. 1988. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer-a reinterpretation of existing experimental data [J]. *Contributions to*

- Mineralogy and Petrology, 99(1): 44~48.
- Konilov A. 2008. Prograde history of the Archean Salma eclogites and piclogites, Belomorian eclogite province[A]. MPN-02 Metamorphism and Metamorphic Processes[C]. Oslo, Norway, 33rd International Geological Congress (CD-ROM).
- Konilov A N, Shchipansky A A, Mints M V, *et al.* 2011. The Salma eclogites of the Belomorian Province, Russia: evidence for HP/UHP metamorphism through the subduction of the Mesoarchean oceanic crust[A]. Dobrzhinetskaya L F, Faryad S W, Wallis S, *et al.* Ultrahigh-Pressure Metamorphism: 25 Years after the Discovery of Coesite and Diamond [C]. Burlington, USA: Elsevier, 19: 623~670.
- Kusky T M, Li Jiang-Hai and Tucker R D. 2001. The Archean Dongwanzhi Ophiolite Complex, North China Craton: 2.505-Billion-Year-Old Oceanic Crust and Mantle[J]. Science, 292: 1142~1145.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C, *et al.*, 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names[J]. Mineralogical Magazine, 61: 295~321.
- Li Xiaoli, Zhang Lifei, Wei Chunjing. 2013. Archean eclogites from Belomorian Mobile Belt, Russia[J]. Earth Science Frontiers, 20(2): 172~185(in Chinese with English abstract).
- Mints M V, Belousova E A, Konilov A N, *et al.* 2010b. Mesoarchean subduction processes: 2.87 Ga eclogites from the Kola Peninsula, Russia[J]. Geology, 38(8): 739~742.
- Mints M V, Konilov A N and Dokukina K A. 2010a. The Belomorian Eclogite Province: Unique Evidence of Meso-Neoproterozoic Subduction and Collision [J]. Doklady Earth Sciences, 434(2): 1311~1316.
- Mints M V, Dokukina K A and Konilov A N. 2014. The Meso-Neoproterozoic Belomorian eclogite province: Tectonic position and geodynamic evolution [J]. Gondwana Research, 25(2): 561~584.
- Mints M, Suleimanov A, Zamozhniya N, *et al.* 2009. A three-dimensional model of the Early Precambrian crust under the southeastern Fennoscandian Shield: Karelia craton and Belomorian tectonic province[J]. Tectonophysics, 472(1~4): 323~339.
- Nakajima T. 1982. Phase relations of pumpellyite-actinolite facies metabasalts in Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan[J]. Lithos, 15(4): 267~280.
- Nitsch K H. 1971. Stabilit tsbeziehungen von Prehnit- und Pumpellyithaltigen Paragenesen[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 30: 240~260.
- Palache C and Vassar H E. 1925. Some minerals of the Keweenaw copper deposits: pumpellyite, a new mineral; sericite; saponite[J]. American Mineralogist, 10: 412~418.
- Passaglia E and Gottardi G. 1973. Chemistry and Nomenclature of Pumpellyites and Julgoldites[J]. Canadian Mineralogist, 12: 219~223.
- Penniston-Dorland S C, Walker R J, Pitcher L, *et al.* 2012. Mantle-crust interactions in a paleosubduction zone: Evidence from highly siderophile element systematic of eclogite and related rocks[J]. Earth and Planetary Science Letters, 319~320: 295~306.
- Powell R, Holland T and Worley B. 1998. Calculating phase diagram involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC[J]. Journal of Metamorphic Geology, 16(4): 577~588.
- Schiffman P and Liou J G. 1980. Synthesis and stability relations of Mg-Al pumpellyite, $\text{Ca}_4\text{Al}_5\text{MgSi}_6\text{O}_{21}(\text{OH})_7$ [J]. Journal of Petrology, 21(3): 441~474.
- Switzer G. 1945. Mineralogy of the California glaucophane schists[J]. American Journal of Science, 243(1): 1~8.
- Shchipansky A A, Khodorevskaya L I, Konilov A N, *et al.* 2012. Eclogites from the Belomorian Mobile Belt (Kola Peninsula): geology and petrology[J]. Russian Geology and Geophysics, 53: 1~21.
- Slabunov A I, Lobach-Zhuchenko S B, Bibikova E V, *et al.* 2006. The Archean of the Baltic Shield: geology, geochronology, and geodynamic settings[J]. Geotectonics, 40(6): 409~433.
- Tsujimori T, Sisson V B, Liou J G, *et al.* 2006. Petrologic characterization of Guatemalan lawsonite eclogite: eclogitization of subducted oceanic crust in a cold subduction zone[J]. Geological Society of America, 403: 147~168.
- Travin V V, Kozlova N E. 2009. Eclogitization of Basites in Early Proterozoic Shear Zones in the Area of the Village of Gridino, Western Belomorie[J]. Petrology, 17(7): 684~706.
- Ukar E and Cloos M. 2013. Actinolitic rinds on low-T mafic blueschist blocks in the Franciscan shale-matrix mélange near San Simeon: Implications for metasomatism and tectonic history[J]. Earth and Planetary Science Letters, 377~378: 155~168.
- Volodichev O I, Slabunov A I and Bibikova E V, *et al.* 2004. Archean Eclogites in the Belomorian Mobile Belt, Baltic Shield[J]. Petrology, 12(6): 540~560.
- White R W, Powell R and Holland T J B. 2007. Progress relating to calculation of partial melting equilibria for metapelites[J]. Journal of Metamorphic Geology, 25(5): 511~527.

附中文参考文献

- 李小平, 张立飞, 魏春景. 2013. 俄罗斯白海活动带中的太古宙榴辉岩[J]. 地学前缘, 20(2): 172~185.