扎河坝石榴辉石岩中超硅-超钛石榴子石的发现及其地质意义

牛贺才 张海祥 单 强 于学元

(中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640. E-mail: niuhc@gig.ac.cn)

摘要 超硅石榴子石是一种典型的超高压矿物, 其稳定存在的压力 >5 GPa. 在新疆北部扎河坝-阿尔曼泰早古生代造山带扎河坝蛇绿岩岩块的石榴辉石岩中首次发现了超硅石榴子石及同样具有超高压特征的超钛石榴子石. 研究显示, 所发现的超硅石榴子石和超钛石榴子石的形成深度不小于 300 km, 它们的寄主岩石-石榴辉石岩是与洋壳超深俯冲有关的超高压变质岩. 研究同时显示, 扎河坝-阿尔曼泰早古生代造山带的形成与古亚洲洋洋壳超深俯冲有关.

关键词 扎河坝蛇绿岩 石榴辉石岩 超硅石榴子石 超钛石榴子石 超高压变质作用

超硅石榴子石的矿物化学特征是以 12 个氧为单位的结构式中 $\text{Si}(\text{pfu}) > 3.0$ ^[1~3], 而在实际研究中将 $\text{Si}(\text{pfu}) = 3.05$ 作为超硅石榴子石与一般石榴子石的界限^[4]. Ringwood和Major^[5~7]首先通过实验人工合成了超硅石榴子石的端元组分 $\text{Mg}_4\text{Si}_4\text{O}_{12}$ (majorite), 随后Smith和Mason^[1]在陨石中也发现了该矿物. 实验研究表明, 在超高压条件下各种辉石开始溶入石榴子石, 形成辉石-石榴子石固溶体. 同时, 辉石在石榴子石中的溶解度也随着压力的增加而增大^[2,8,9]. 由于石榴子石的 $\text{Si}:\text{O}$ 比为 1:4, 而辉石的 $\text{Si}:\text{O}$ 比为 1:3, 因此, 当辉石溶入石榴子石时, 部分 Si^{4+} 替代 Al^{3+} , Cr^{3+} , Fe^{3+} 等三价阳离子而进入八面体位置, 从而形成了 $\text{Si}(\text{pfu}) > 3.0$ 的超硅石榴子石, 其稳定存在的压力 >5 GPa, 是一个典型的超高压成因矿物.

Van Roermund等人^[10]在挪威加里东造山带的石榴子石橄榄岩中除了发现超硅石榴子石外, 还发现了含有钛铁矿和金红石出溶体的石榴子石. 他们认为这种含钛铁矿和金红石出溶体的石榴子石的原始矿物相与该岩石中的超硅石榴子石一样, 也是一个典型的超高压矿物, 并称其为超钛石榴子石(super-titanic garnet). Keshav等人^[11]在深源地幔包体中也发现了含钛铁矿出溶体的石榴子石, 并认为它是超高压条件下形成的超钛石榴子石在低压条件下分解所致. 目前, 在自然界造山带中尚未发现以单矿物形式

存在的超钛石榴子石.

最近, 研究者在新疆北部扎河坝-阿尔曼泰早古生代造山带的扎河坝地区石榴子石单斜辉石岩(以下简称石榴辉石岩)中发现了超硅石榴子石和超钛石榴子石, 这是首次在造山带中发现以单矿物形式存在的超硅和超钛石榴子石. 残余超硅石榴子石和超钛石榴子石的存在不仅证实了在扎河坝蛇绿岩岩块内存在超高压地质体, 而且也为人们探究扎河坝-阿尔曼泰早古生代造山带形成机制及其动力学过程提供了独特的窗口.

1 地质背景及样品特征

扎河坝-阿尔曼泰蛇绿岩带位于准噶尔盆地的东北缘(图 1), 总长约 130 km, 宽约 3~5 km, 蛇绿岩岩块呈北西西向断续产出, 它是中亚造山带的重要组成部分^[12~15]. 该蛇绿混杂岩带主要由蛇纹石化方辉橄榄岩、蛇纹石化纯橄榄岩、蛇纹石化二辉橄榄岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩、斜长岩和硅质岩等组成, 同时含有石榴辉石岩和石英菱镁岩等岩石的透镜体. 本研究用样品取自扎河坝蛇绿岩体的石榴辉石岩.

石榴辉石岩呈 $3\text{ m} \times 0.3\text{ m} \sim 5\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 的透镜体产在蛇纹石化二辉橄榄岩中, 透镜体在寄主岩石中的分布没有明显的方向性, 主要受蛇纹石化二辉橄榄岩内的断裂控制. 石榴辉石岩为致密块状, 主要由单斜辉石(35 vol%)¹⁾、石榴子石(35 vol%)、绿泥石

2007-03-13 收稿, 2007-07-18 接受

国家自然科学基金(批准号: 40673036)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KZCX2-YW-107)和中国科学院知识创新工程前沿领域项目(批准号: GIGCX-04-03)资助

1) vol%为体积分数, 下同

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2007-52-18-2169>

图1 新疆北部地质简图

1. 西伯利亚板块, 2. 哈萨克斯坦-准噶尔板块, 3. 古生代造山带,
4. 蛇绿混杂岩, 5. 断裂, 6. 国界

(27 vol%)和钛铁矿(3 vol%)组成。其中绿泥石是后期蚀变的产物。单斜辉石和石榴子石为半自形粒状, 粒径分别为0.3~1和0.2~0.8 mm。钛铁矿主要呈(0.1~0.5 mm)颗粒分布在辉石和石榴子石的矿物粒间。

在扎河坝石榴辉石岩中, 超硅石榴子石或呈细粒分布在单斜辉石中(见图2), 或与细粒的单斜辉石共生, 图3为该类超硅石榴子石的激光拉曼谱图。在扎河坝石榴辉石岩中超钛石榴子石有两种产状: 一种呈细小的单矿物(矿物颗粒大小为10~100 μm)分布在单斜辉石中(见图4), 图5为该类超钛石榴子石的激光拉曼谱图。在矿物化学组成特征方面, 扎河坝超钛石榴子石单矿物与Zhang等人[16]在5~15 GPa条件下人工合成的超钛石榴子石相似, 其 $[\text{Si}+\text{Ti}](\text{pfu})$

均大于3.05。另一种超钛石榴子石与Van Roermund等人[10]和Keshav等人[11]所报道的超钛石榴子石相同, 它是由正常石榴子石+钛铁矿出溶体组成, 出溶的钛铁矿在石榴子石颗粒内呈定向分布, 其含量在6%左右(见图6)。这种超钛石榴子石呈大颗粒产出, 与单斜辉石共生。

2 超硅石榴子石和超钛石榴子石的化学组成特征

利用南京大学内生矿床国家重点实验 JEOL-JXA 8800M 电子探针测定了超硅石榴子石和包裹在单斜辉石中的独立超钛石榴子石的化学组成。实验条件为: 加速电压为15 kV, 电流为20 nA, 电子束直径为1 μm ; 背散射电子像则采用中国科学广州地球化学研究所 JEOL-JXA 8100 电子探针拍摄。

2.1 超硅石榴子石

电子探针分析结果显示, 扎河坝石榴辉石岩内超硅石榴子石化学组成除了 SiO_2 含量偏高外, 还明显富 FeO_T 和 CaO , 特别是根据电价平衡计算得出的 Fe_2O_3 含量较高, 但它的 Al_2O_3 含量较低(见表1)。以12个氧为基础进行的晶体化学计算显示, 扎河坝超硅石榴子石的 $\text{Si}(\text{pfu})$ 介于3.19~3.29。在所分析的样品中, 超硅石榴子石的 $\text{Si}^{4+}+\text{Ti}^{4+}$ 与 M^{2+} ($\text{M}^{2+} = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Mn} + \text{Fe}^{2+}$) 均超过3, 且两者十分相近, 说明在扎河坝超硅石榴子石八面体位置中的四价离子($\text{Si}^{4+}+\text{Ti}^{4+}$)与八面体位置中二价离子的数量相等, 它应属典型的超硅石榴子石。

2.2 超钛石榴子石

电子探针分析结果显示, 扎河坝石榴辉石岩内

图2 超硅石榴子石分布在单斜辉石中

<https://doi.org/10.1360/18-2169> (a) 单偏光, (b) 正交偏光, 全消光矿物为超硅石榴子石

图 3 超硅石榴子石的激光拉曼谱图

图 5 超钛石榴子石的激光拉曼谱图

图 4 超钛石榴子石单矿物分布在单斜辉石中背散射电子像. 浅色颗粒为超钛石榴子石

图 6 钛铁矿晶体在石榴子石内定向分布背散射电子像. 白色针状及细小圆点为钛铁矿

超钛石榴子石单矿物 SiO_2 含量为 33.50~36.54 wt%¹⁾, TiO_2 含量为 5.66~8.21 wt%, FeO_T 和 CaO 含量与超硅石榴子石的相近, 计算得出的 Fe_2O_3 含量较高, 但 Al_2O_3 含量也较低(见表 1). 晶体化学计算显示, 在分析样品中超钛石榴子石的 $\text{Si}^{4+}+\text{Ti}^{4+}$ 与 M^{2+} ($\text{M}^{2+} = \text{Ca}+\text{Mg}+\text{Mn}+\text{Fe}^{2+}$) 均超过 3, 且两者十分相近, 这同样说明在超钛石榴子石八面体位置中存在着二价离子和四价离子之间的偶合类质同相置换.

3 讨论

超硅石榴子石一般出现在陨石、地幔包体和金刚石包体中 [1,2,4,17,18], Van Roermund 等人 [19] 在挪威加里东造山带的石榴子石橄榄岩中发现由出溶单斜辉石、斜方辉石和主晶石榴子石组成的显微结构, 它是超硅石榴子石低压分解的产物, 这种显微结构的存在是岩石经历了超高压变质作用的直接矿物学证据.

Ye 等人 [20] 在中国东部苏-鲁超高压变质岩带中也发现了超硅石榴子石, 并据此认为陆壳物质可能会俯冲到 >200 km 的地幔深度. Song 等人 [21] 和刘良等人 [22] 也分别在柴达木北缘超高压变质带的石榴子石橄榄岩和阿尔金超高压片麻状(含)钾长石榴辉石岩中发现了超硅石榴子石, 其形成压力分别 >5 和 7 GPa. 目前自然界已发现的超硅石榴子石有两种存在形式: 一种是结构中仍保持高硅($\text{Si}(\text{pfu}) > 3.0$)的石榴子石单矿物, 如在 Malaita 岛的地幔包体和 Yakutia 金伯利岩的金刚石中发现的超硅石榴子石, 它们分别含有 >3.20 和 >3.07 的 $\text{Si}(\text{pfu})$ [23,24], 另一种则已经分解为含有石英、辉石等富硅矿物出溶体的石榴子石, 如在一些造山带的石榴子石橄榄岩和榴辉岩中就存在这种超硅石榴子石 [12~15]. 已有的研究资料显示, 超硅石榴子石是一种典型的超高压矿物, 它的形成压

1) wt% 为质量分数, 下同

表1 石榴辉石岩中超硅石榴子石、超钛石榴子石化学组成特征^{a)}

	超硅石榴子石					超钛石榴子石					
	21-20	21-21	21-22	21-30	21-35	21-1	21-2	21-3	21-4	21-5	21-6
SiO ₂	39.96	40.96	40.52	41.24	40.33	36.54	35.53	35.14	35.90	35.71	33.50
TiO ₂	0.50	1.01	0.18	0.54	0.85	6.51	6.07	5.66	6.63	6.95	8.21
Al ₂ O ₃	7.45	7.13	8.12	7.25	7.72	7.07	6.82	9.20	7.11	8.30	3.65
Cr ₂ O ₃	0.00	0.35	0.04	0.37	0.02	—	—	—	—	—	—
Fe ₂ O ₃	13.34	9.88	13.34	11.42	13.30	12.98	15.52	12.64	12.79	11.46	18.27
FeO	4.78	8.50	5.26	6.89	5.46	0.00	0.76	1.14	2.72	0.00	0.49
MnO	0.04	0.04	0.02	0.04	0.05	0.05	0.01	0.02	0.00	0.05	0.00
MgO	0.06	0.19	0.05	0.06	0.08	2.74	0.38	0.72	0.44	2.00	0.16
CaO	33.79	32.00	33.78	32.97	33.78	34.76	36.28	34.86	35.45	35.65	36.33
Na ₂ O	0.01	0.01	0.00	0.12	0.02	0.05	0.01	0.01	0.00	0.03	0.03
总量	99.93	100.07	101.31	100.90	101.61	100.70	101.37	99.39	101.04	100.15	100.64
	O=12					O=12					
Si ⁴⁺	3.21	3.29	3.21	3.28	3.19	2.89	2.85	2.84	2.88	2.84	2.75
Ti ⁴⁺	0.03	0.06	0.01	0.03	0.05	0.39	0.37	0.35	0.40	0.40	0.51
Al ³⁺	0.70	0.68	0.76	0.68	0.72	0.66	0.64	0.87	0.67	0.78	0.35
Fe ³⁺	0.81	0.59	0.80	0.68	0.79	0.77	0.94	0.77	0.77	0.69	1.13
Cr ³⁺	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	—	—	—	—	—	—
Fe ²⁺	0.32	0.57	0.35	0.46	0.36	0.00	0.05	0.08	0.18	0.00	0.03
Mg ²⁺	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.32	0.05	0.09	0.05	0.24	0.02
Mn ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca ²⁺	2.91	2.76	2.87	2.81	2.86	2.95	3.11	3.01	3.05	3.04	3.20
Na ⁺	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Si ⁴⁺ +Ti ⁴⁺	3.24	3.35	3.22	3.31	3.24	3.28	3.22	3.19	3.28	3.24	3.26
Al ³⁺ +Fe ³⁺ +Cr ³⁺	1.51	1.29	1.56	1.38	1.51	1.43	1.58	1.64	1.44	1.47	1.48
M ²⁺ b)	3.24	3.35	3.23	3.27	3.23	3.27	3.21	3.18	3.28	3.28	3.25
总量	7.99	7.99	8.01	7.98	7.98	7.99	8.01	8.01	8.00	8.00	8.00

a) 电子探针分析的是 FeO_T, 根据电价平衡计算出 Fe₂O₃ 和 FeO 值; b) M²⁺=Fe²⁺+Mg²⁺+Mn²⁺+Ca²⁺

力比柯石英和金刚石的形成压力更大, 其稳定存在的压力>5 GPa^[4,12,25].

超钛石榴子石中钛与硅的含量呈明显的负相关. Dingwell等人^[26]认为Ti⁴⁺代替Si⁴⁺首先进入石榴子石晶体四面体位置, 多余的Ti⁴⁺与二价阳离子一起替代晶体中的三价阳离子进入八面体位置. 杨家喜和刘良^[27]认为, 在超高压条件下石榴子石晶体内存在着Si⁴⁺+M²⁺=Al³⁺+Al³⁺或Ti⁴⁺+M²⁺=Al³⁺+Al³⁺偶合类质同象置换(其中M为Ca, Mg, Mn和Fe等二价阳离子; Al³⁺有时被Cr³⁺和Fe³⁺等三价阳离子替代). Zhang等人^[16]通过实验研究证实, 在超高压条件下高钛石榴子石内存在着Ti⁴⁺+M²⁺=Al³⁺+Al³⁺(其中M²⁺为Ca²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺和Fe²⁺等二价阳离子; Al³⁺有时被Cr³⁺和Fe³⁺等三价阳离子替代)偶合类质同象置换^[16].

由于超硅石榴子石是在>5 GPa 条件下稳定存在, 因此超硅石榴子石和超钛石榴子石的发现说明, 扎

河坝石榴辉石岩曾经历了>5 GPa 超高压地质作用. 显然, 以单矿物形式存在的超硅石榴子石和超钛石榴子石是退变质减压作用的残余矿物, 如果体系处于平衡状态, 它们在低压条件下应分解成石榴子石+辉石和石榴子石+钛铁矿(金红石)两种矿物组合, 扎河坝石榴辉石岩中含钛铁矿出溶体的石榴子石就是超钛石榴子石低压分解的产物.

在超硅石榴子石八面体位置中Si的含量随着压力的增大而增加, Van Roermund等人^[19]据此认为硅在石榴子石中的含量是一个很有潜力的地质压力计. Collerson等人^[23]也依据实验岩石学资料, 总结出了2个超硅石榴子石形成压力的经验公式. Tappert等人^[4]根据超硅石榴子石的组成特征探讨了南非Jagersfontein金伯利岩中金刚石的形成深度. 将扎河坝超硅石榴子石组成投影到Tappert等人^[4]的图解中, 发现它们的形成深度在340~420 km范围内, 其中一个样品的投

影点落在了地幔转换带区域内(图 7). 针对扎河坝石榴辉石岩中超硅石榴子石和超钛石榴子石均富含钛和铁, 本文对Tappert等人 [4] 的图解进行了修改, 其纵坐标增加了 Fe^{3+} , 横坐标增加了 Ti^{4+} . 尽管在石榴子石中钛的溶解度主要受压力的控制, 但温度对其也有一定的影响 [16], 因此本文估算出的超钛石榴子石形成压力只是一个近似值. 投影显示, 超钛石榴子石的形成深度为 300~390 km, 与超硅石榴子石的形成深度相近(图 7). 考虑到温度效应, 本文认为扎河坝超钛石榴子石的形成最大深度应不小于 300 km.

图 7 扎河坝超硅石榴子石和超钛石榴子石的 $\text{Al} + \text{Cr} + \text{Fe}^{3+} - \text{Si}^{4+} + \text{Ti}^{4+}$ 图解

据Tappert等人 [4] 修改. 空心圆为金刚石内超硅石榴子石, 实心圆为扎河坝超钛石榴子石, 方框为扎河坝超硅石榴子石

扎河坝石榴辉石岩化学组成为: SiO_2 36.20 wt%, TiO_2 1.92 wt%, Al_2O_3 9.12 wt%, CaO 29.40 wt%, Fe_2O_3 14.09 wt%, MgO 6.63 wt%, MnO 0.16 wt%, CO_2 0.65 wt%, H_2O 1.95 wt%. 具有富钙, 贫硅、铝和镁的特征. 在化学组成特征上, 扎河坝石榴辉石岩与地幔岩有明显的差别, 很难将它与深部来源的超高压地幔岩相联系. Joswig 等人 [28] 根据在金刚石中发现的由 perovskite(CaSiO_3), β -larnite(Ca_2SiO_4)和 CaSi_2O_5 -titanite组成的富钙硅酸盐包体认为, 下地幔是不均匀的, 存在着富钙源区. Brenker 等人 [29] 的研究确认在 >300 km 深的地幔确实存在着富钙源区, 它是由于钙交代的大洋岩石圈或者其上沉积的钙质碳酸盐俯冲到深部并保存所致.

扎河坝石榴辉石岩稀土元素总量为 10.08 $\mu\text{g/g}$, $(\text{LREE}/\text{HREE})_{\text{N}}$ 和 δEu 分别为 0.66 和 1.60, 与大洋中

脊玄武岩具有相同的稀土元素特征. 石榴辉石岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值分别为 0.5133 和 0.7020, 具有亏损地幔源区特征.

石榴辉石岩的岩石化学、稀土元素及同位素地球化学特征显示, 扎河坝超高压石榴辉石岩是钙交代或(和)其上覆盖有钙质沉积物的洋壳俯冲到地幔深部经超高压变质后再折返至地表的产物. 由于超高压的石榴辉石岩与蛇纹石化二辉橄榄岩呈断层接触, 因此不能简单地推测蛇纹石化二辉橄榄岩也经历了超高压变质过程. 但研究者在蛇纹石化二辉橄榄岩某些块体的新鲜橄榄石内发现了富铁金属矿物的出溶体. Zhang 等人 [30] 在大别山超高压变质带内发现了含有磁铁矿出溶体的橄榄石, 并认为这种橄榄石的形成压力非常大. 虽然由于出溶体很小, 研究区橄榄石内发现的富铁金属矿物的出溶体的物质组成及与主矿物——橄榄石的空间拓扑关系尚不清楚, 有待深入研究. 但含富铁金属矿物出溶体的橄榄石很可能也形成于超高压条件下, 也就是说至少有一部分蛇纹石化二辉橄榄岩可能与超高压过程有关.

综上所述, 具有超高压特征的石榴辉石岩的发现表明, 在扎河坝-阿尔曼泰早古生代造山带内存在超高压的岩石块体, 它的形成与洋壳的超深俯冲作用有关.

4 结论

() 在扎河坝蛇绿岩的石榴辉石岩内存在着超高压条件下稳定的超硅石榴子石和超钛石榴子石. 它形成的深度应大于 300 km. 超硅石榴子石和超钛石榴的寄主岩石-石榴辉石岩是与洋壳超深俯冲有关的超高压变质岩.

() 扎河坝蛇绿岩体内超高压石榴辉石岩的厘定表明, 在扎河坝-阿尔曼泰早古生代造山带内存在超高压成因的岩石, 它很可能是钙交代的洋壳或(和)覆盖有钙质沉积物洋壳的超深俯冲作用有关, 它的发现为新疆北部早古生代造山带形成动力学的研究提供了独特的窗口.

致谢 感谢两位匿名审稿人和特邀编辑对本文提出的宝贵修改建议.

参 考 文 献

- 1 Smith J V, Mason B. Pyroxene-garnet transformation in Coorara meteorite. Science, 1970, 168: 823—833
- 2 Akaogi M, Akimoto S. Pyroxene-garnet solid-solution equilibria in

- the systems $\text{Mg}_4\text{Si}_4\text{O}_{12}$ - $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ and $\text{Fe}_4\text{Si}_4\text{O}_{12}$ - $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ at high pressure and temperature. *Phys Earth Planet Int*, 1977, 15: 90—106
- 3 Irifune T. An experimental investigation of the pyroxene-garnet transformation in a pyrolite composition and its bearing on the constitution of the mantle. *Phys Earth Planet Int*, 1987, 45: 324—336[DOI]
- 4 Tappert R, Stachel T, Harris J W, et al. Subducting oceanic crust: The source of deep diamonds. *Geology*, 2005, 33(7): 565—568[DOI]
- 5 Ringwood A E, Major A. High pressure transformations in pyroxenes. *Earth Planet Sci Lett*, 1966, 1: 351
- 6 Ringwood A E, Major A. Some high pressure transformations of geophysical interest. *Earth Planet Sci Lett*, 1967, 2: 106
- 7 Ringwood A E, Major A. Synthesis of majorite and other high pressure garnet and perovskites. *Earth Planet Sci Lett*, 1971, 12: 411—418
- 8 Gasparik T. Transformation of enstatite-diopside-jadeite pyroxene to garnet. *Contrib Mineral Petrol*, 1989, 102: 389—405[DOI]
- 9 Ono S, Yasuda A. Compositional change of majoritic garnet in a MORB composition from 7 to 17 GPa and 1400 to 1600 . *Phys Earth Planet Int*, 1996, 96: 171—179[DOI]
- 10 Van Roermund H L M. Non-silicate inclusions in garnet from an ultra-deep orogenic peridotite. *Geol J*, 2001, 35(3-4): 209—229[DOI]
- 11 Keshav S, Sowerby J R, Sen G. Ilmenite exsolution in Xenolithic garnet from the Hawaiian Hot Spot: Evidence for the existence of high-titanium garnet in Earth's Mantle. *Am Geophys Union, Fall Meeting*, 2001, Abstract
- 12 何国琦, 李茂松, 贾进斗, 等. 论新疆东准噶尔蛇绿岩的时代及其意义. *北京大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(6): 852—858
- 13 李锦轶. 新疆东准噶尔蛇绿岩的主要特征及其侵位历史. *岩石学报*, 1995, 11(增刊): 73—84
- 14 李锦轶. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变. *地质论评*, 2004, 50(3): 304—322
- 15 何国琦, 李茂松. 中国新疆北部奥陶-志留系岩石组合的古构造、古地理意义. *北京大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(1): 99—110
- 16 Zhang R Y, Zhai S M, Fei Y W, et al. Titanium solubility in coexisting garnet and clinopyroxene at very high pressure: The significance of exsolved rutile in garnet. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 216: 591—501[DOI]
- 17 Sautter V, Haggerty S E, Field F. Ultradeep (>300 kilometers) ultramafic xenoliths: Petrological evidence from the transition zone. *Science*, 1991, 252: 827—830[DOI]
- 18 Moore R O, Gurney J J. Pyroxene solid solution in garnet included in diamond. *Nature*, 1985, 318: 553—555[DOI]
- 19 Van Roermund H L M, Drury M R, Barnhoorn A, et al. Super-silicic garnet microstructures from an orogenic garnet peridotite, evidence for an ultra-deep (>6 GPa) origin. *J Metamor Geol*, 2000, 18: 135—147[DOI]
- 20 Ye K, Cong B, Ye D L. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km. *Nature*, 2000, 407: 734—736[DOI]
- 21 Song S, Zhang L, Niu Y. Ultra-deep origin of garnet peridotite from the North Qaidam ultrahigh-pressure belt, Northern Tibetan Plateau, NW China. *Am Mineral*, 2004, 89:1330—1336
- 22 刘良, 陈丹玲, 张安达, 等. 阿尔金超高压(>7 GPa)片麻状(含)钾长石榴辉石岩——石榴子石出溶单斜辉石的证据. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(2): 105—114
- 23 Collerson K D, Hapugoda S, Kamber B S, et al. Rocks from the mantle transition zone: Majorite-bearing xenoliths from Malaita, Southwest Pacific. *Science*, 2000, 288: 1215—1223[DOI]
- 24 Sobolev N V, Logvinova A M, Zedgenizov D A, et al. Mineral inclusions in microdiamonds and macrodiamonds from kimberlites of Yakutia: A comparative study. *Lithos*, 2004, 77: 225—242[DOI]
- 25 Chopin C. Ultrahigh-pressure metamorphism: Tracing continental crust into the mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 212: 1—14[DOI]
- 26 Dingwell D B, Brearley M. Mineral chemistry of igneous melanite garnet from analcite-bearing volcanic rocks, Alberta, Canada. *Contrib Mineral Petrol*, 1985, 90: 29—35[DOI]
- 27 杨家喜, 刘良. 超硅石榴子石的偶合类质同象置换及辉石、金红石、磷灰石和石英的出溶. *科学通报*, 2003, 48: 2374—2379
- 28 Joswig W, Stachel T, Harris W, et al. New Ca-silicate inclusions in diamonds-tracers from the lower mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 173: 1—6[DOI]
- 29 Brenker F E, Vincze L, Vekemans B, et al. Detection of a Ca-rich lithology in the Earth's deep (>300 km) convecting mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 236: 579—587[DOI]
- 30 Zhang R Y, Shu J F, Mao H K, et al. Magnetite lamellae in olivine and clinohumite from Dabie UHP ultramafic rock, Central China. *Am Mineral*, 1999, 84: 564—569