

新疆库鲁克塔格兴地塔格群中石榴石的矿物学特征研究

刘春花¹ 杨林^{2,3} 尹京武¹ 蔡佳⁴ 杨海涛¹ 邵兴坤¹ 徐海明⁵ 王军⁵

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 地质实验中心, 北京 100083; 2. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059; 3. 国土资源部 贵阳矿产资源监督检测中心, 贵州 贵阳 550004; 4. 中国地质大学 珠宝学院, 北京 100083; 5. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 通过电子探针测试和 X 射线粉晶衍射分析, 对新疆库鲁克塔格兴地塔格群中红色石榴石样品的矿物学特征进行了研究。电子探针测试结果显示, 不同变质期次形成的石榴石, 铁铝石榴石端员组分均由核部到边部逐渐增加, 锰铝石榴石均由核部向边缘逐渐减少, 镁铝石榴石由核部到边部逐渐增加, 钙质系列石榴石总含量很低且变化稳定。研究表明, 兴地塔格群石榴石由核部至边缘生长温度整体上升, 形成压力基本稳定, 石榴石形成环境的变质程度逐渐提高。根据 X 射线粉晶衍射数据计算出石榴石的晶胞参数较理论值大, 是由 Ca^{2+} 、 Mn^{2+} 两种大半径离子对 Fe^{2+} 的置换数目多于小半径 Mg^{2+} 对 Fe^{2+} 的置换引起的。

关键词: 库鲁克塔格; 兴地塔格群; 石榴石; 包裹体; 端员组分

中图分类号: P578.94⁺7

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)02-0234-09

Mineralogical characteristics of garnets from Xingditage Group of Kuruk Tag, Xinjiang

LIU Chun-hua¹, YANG Lin^{2,3}, YIN Jing-wu¹, CAI Jia⁴, YANG Hai-tao¹, SHAO Xing-kun¹, XU Hai-ming⁵ and WANG Jun⁵

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Geosciences and Testing Center, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. MLR Guiyang Supervision and Testing Center for Mineral Resources, Guiyang 550004, China; 4. School of Gemology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 5. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The mineralogical characteristics of garnets from Xingditage Group, Kuruk Tag, Xinjiang, have been rarely discussed by former researchers. In this paper, the mineralogical features of the red garnets produced in this area were investigated by using hydrostatic methods, refractometer, spectroscopy, electron microprobe analysis and X-ray powder diffraction analysis. The crystal forms of garnets are mainly rhombic dodecahedron, icositetrahedron and their combination form. The garnets are bright red to dark red in color, and have abundant fractures and internal crystal inclusions, causing the tremendous decrease of the hosts' transparency. The relatively light elements Ca^{2+} , Mg^{2+} and Mn^{2+} substitute for Fe^{2+} so that the density of the garnets is lower than the average value of almandine. The strong bands in optical spectra of almandine indicate that Mg^{2+} rarely replaces Fe^{2+} . With regard to garnets formed in different metamorphic stages, the results of EPMA show that from the garnet's core to rim, the amount of almandine end-member tends to increase, namely the mole fractions of the almandine end-members of samples Garnet 1, Garnet 2, Garnet 3 and Garnet 4 are 63.906% ~

72.408%, 65.663% ~ 71.880%, 64.689% ~ 71.711% and 50.011% ~ 71.780% respectively. Moreover, the content of spessartine end-member shows a trend of decrease from the garnet's core to rim, that is, the mole fractions of spessartine end-members of samples Garnet1 to Garnet4 are 23.417% ~ 12.900%, 20.211% ~ 12.258%, 21.124% ~ 13.297% and 41.943% ~ 18.523% respectively. In addition, the pyrope end-member increases in content from core to rim in which the mole fractions from sample Garnet1 to sample Garnet4 are 8.963% ~ 11.880%, 10.200% ~ 12.681%, 11.170% ~ 12.500% and 5.411% ~ 7.302%. However, the calcium series of garnets are relatively low in amount and relatively stable. The calcium series consists of grossularite, andradite and uvarovite, in which the mole fractions from sample Garnet1 to sample Garnet4 are 2.662% ~ 4.320%, 3.066% ~ 3.695%, 2.484% ~ 3.406% and 2.395% ~ 4.222%. The chemical composition of garnets acts as an indicator of the metamorphic grade, namely the content of Fe^{2+} , Mg^{2+} increases and that of Mn^{2+} , Ca^{2+} decreases as metamorphism progressed. The content of spessartine end-member in garnet is higher in lower metamorphic grade, and with the increase of metamorphic grade, the stability of Mn^{2+} becomes lower, due to which the amount of Mn^{2+} decreases under the increasing pressure, Fe^{2+} substitutes for Mn^{2+} by entering the crystal structure of the garnet, due to which the amount of almandine increases subsequently. The content of pyrope end-member in garnets contained in metamorphic rocks indicates a higher metamorphic temperature. The content of calcium series garnet end-member reflects the forming pressure of a garnet. This suggests that the formation temperature generally increases from core to rim, implying that the metamorphic grade is getting higher; however, the pressure remains basically stable. X-ray powder diffraction analyses show that almandine and a small amount of quartz are contained in the garnet specimens. The refined cell parameter is 1.153 5 nm and the standard deviation is 0.000 48, which is within the numbers 0.000 1 and 0.009 9. The cell parameter is higher than that of the theoretical value 1.152 6 nm, because there are more larger ions like Ca^{2+} , Mn^{2+} than smaller ions like Mg^{2+} in replacing Fe^{2+} .

Key words: Kuruk Tag; Xingditage Group; garnet; inclusion; end-member composition

新疆库鲁克塔格兴地塔格群是塔里木地台前寒武纪变质岩系重要组成部分。兴地塔格群自下而上划分为卡尔布拉克组、图努尔布拉克组、白鱼盆地组及辛格乐组 4 个组。前人(李伟等, 2009)对于兴地塔格群的研究主要集中在变质变形作用特征及构造演化方面,对于作为划分变质岩相带的重要标志的石榴石的矿物学研究尚少,鉴于此,本文对兴地塔格群石榴石的矿物学特征进行了研究。

1 样品选择

兴地塔格群中产出的石榴石晶体较自形,颗粒较大,颜色为红色到紫红色,裂隙发育,内含包裹体丰富。本文研究的石榴石样品采自图努尔布拉克组的石榴石二云母石英片岩和白鱼盆地组的石榴石二云母片岩中。选取内含不同特征包裹体的 4 粒石榴石单晶样品进行测试分析,编号分别为 Garnet 1、Garnet 2、Garnet 3 和 Garnet 4。特征包裹体的不同表示石榴石形成时的温度和压力存在差异,反映

Garnet 1~Garnet 4 是不同期次变质作用的产物。

2 石榴石物理性质

2.1 形态

库鲁克塔格兴地塔格群产出的石榴石晶粒大小为 6~10 mm,晶体形态以菱形十二面体 {110} 与四角三八面体 {211} 和二者聚形为主,一般形成顺序是 {110} → {211} → {110} + {211} → {210} (尹京武等, 2000)。菱形十二面体晶面上常有平行四边形长对角线的聚形纹。

2.2 颜色及透明度

兴地塔格群产出的石榴石颜色为鲜红至深红色,透明至半透明,石榴石内部裂隙发育且常被杂质充填,同时由于应力造成裂隙周围破碎成细粒集合体,影响了石榴石透明度(余晓艳, 1999)。石榴石内含包裹体丰富,各种包裹体对光线也有不同程度的反射和吸收,亦导致石榴石的透明度降低。

2.3 密度

用静水力学法对4个样品的碎样进行密度测试,平均密度分别为3.884、3.889、3.904、3.900 g/cm³,比一般铁铝榴石的密度4.05 g/cm³偏小。

2.4 折射率

铁铝榴石的折射率一般在1.760~1.810之间,采用折射型折射仪点测法对4个样品的抛光面进行测试,结果显示石榴石折射率均大于1.78。

2.5 吸收光谱(定性分析)

铁铝榴石的可见光吸收光谱由Fe²⁺造成,用分光镜对石榴石样品观察可见,在黄区有较窄的吸收带,绿区中部有一较宽的吸收带,蓝绿区处有强吸收带,具典型的“铁铝榴石窗”吸收特征。铁铝榴石吸收谱带的强弱与Mg²⁺的类质同像替代有关,Mg²⁺取代Fe²⁺越多,吸收越弱(张蓓莉,2006)。研究区石榴石吸收谱带较强,表明Mg²⁺对Fe²⁺的类质同像替代较少。

3 石榴石化学成分

石榴石族矿物是岛状硅酸盐矿物,其化学通式为A₃B₂(SiO₄)₃,其中A为Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺、Mn²⁺等二价阳离子,B为Al³⁺、Fe³⁺、Cr³⁺等三价阳离子。石榴石可以分成两个系列、6个主要矿物种:铝质系列(镁铝榴石、铁铝榴石、锰铝榴石)和钙质系列(钙铬榴石、钙铝榴石、钙铁榴石)(赵珊茸等,2004)。由于类质同像替代广泛,因而以端员组分形式出现的石榴石极少。铝系石榴石A₃Al₂(SiO₄)₃中A占据三角十二面体位置,具八次配位,可以任意比例混合,形成类质同像系列;Al³⁺占据八面体位置,具六次配位,可以被少量Cr³⁺、Fe³⁺部分置换;Si⁴⁺占据四面体位置,具四次配位,可以被少量Ti⁴⁺部分置换(杨家喜等,2003)。

利用中国地质大学(北京)电子探针室的日本岛津公司EPMA-1600的电子探针仪对4个样品进行了成分分析,测试条件:定量加速电压15 kV,束流2×10⁻⁸ A,束斑直径1 μm,标准样品分别为:Fe(铁铝榴石)、Na(钠长石)、Ca(方解石)、Si、Al(斜长石)、Ti(金红石)、Mn(蔷薇辉石)、K(透长石)、Mg(橄榄石)、Cr(铬铁矿),结果见表1~表4。通过电子探针背散射(BSE)图像放大观察,避开石榴石内部包裹体,分别选取一条直线,4个样品均从核部到边缘依次取点。Garnet 1间隔为500 μm,共取14个点;

Garnet 2间隔50 μm,共取130个点;Garnet 3间隔100 μm,共取60个点;Garnet 4间隔500 μm,共取12个点。对于样品Garnet 2、Garnet 3,表2、表3中数据为每5个点一组的平均值。

电子探针分析的是FeO_T含量,为计算石榴石的结构式,先根据电价平衡计算出Fe₂O₃和FeO值(董振信,1994),采用阳离子法对石榴石的化学式进行计算,并分别计算了石榴石的端员组分含量,以矿物摩尔分数表示, $x(\text{Alm}) = n(\text{Fe}^{2+}) / n(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Mn} + \text{Ca})$, $x(\text{Sps}) = n(\text{Mn}) / n(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Mn} + \text{Ca})$, $x(\text{Prp}) = n(\text{Mg}) / n(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Mn} + \text{Ca})$, $x(\text{Ga}^*) = n(\text{Ca}) / n(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Mn} + \text{Ca})$,结果见表1~表4。4个样品的端员组分变化趋势见图1。

3.1 Garnet 1 化学成分特征

库鲁克塔格石榴石主要为铁铝榴石,锰铝榴石次之。Garnet 1(表1)中铁铝榴石摩尔分数核部最低为63.906%,经核部向边缘整体呈升高趋势(图1a),边缘最高达72.408%,平均67.273%。锰铝榴石由核部向边缘则呈逐渐降低的趋势。由核部23.417%降低至12.900%,平均18.999%。镁铝榴石由核部到边缘整体升高,核部到边缘含量为8.963%至11.880%,平均为10.434%。钙质系列石榴石为钙铝榴石+钙铁榴石+钙铬榴石,总量很低,在2.662%~4.320%之间,平均3.294%,无太大变化。

3.2 Garnet 2 化学成分特征

Garnet 2(表2、图1b)与Garnet 1中端员组分变化趋势一致,含量存在差异。Garnet 2中铁铝榴石摩尔分数核部65.663%升至边缘71.880%,平均70.281%。锰铝榴石由核部20.211%降至边缘12.258%,平均18.522%。镁铝榴石由核部10.200%升至边缘12.681%,平均11.502%。

3.3 Garnet 3 化学成分特征

Garnet 3(表3、图1c)与Garnet 1中端员组分变化趋势一致,含量存在差异。Garnet 3铁铝榴石摩尔分数核部64.689%升至边缘71.711%,平均68.084%。锰铝榴石由核部21.124%降至边缘13.297%,平均17.555%。镁铝榴石由核部11.170%至边缘12.500%,幔部略有降低,平均11.502%。钙质系列石榴石平均2.859%。

3.4 Garnet 4 化学成分特征

Garnet 4(表4)中铁铝榴石摩尔分数核部最低为50.011%,经幔部向边缘整体呈升高趋势(图1d),且

表 1 石榴石样品 Garnet 1 的化学成分
Table 1 Chemical composition of Garnet 1

 $w_B/\%$

样号	核部													边缘
	Ga-1	Ga-2	Ga-3	Ga-4	Ga-5	Ga-6	Ga-7	Ga-8	Ga-9	Ga-10	Ga-11	Ga-12	Ga-13	
SiO ₂	35.16	35.27	35.01	34.46	35.46	34.56	35.40	35.25	34.82	35.42	34.88	35.37	35.53	35.10
TiO ₂	0.16	0.00	0.10	0.00	0.05	0.08	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.09
Al ₂ O ₃	19.64	19.68	20.11	19.70	19.50	20.14	19.45	19.59	19.70	20.14	20.33	19.99	19.70	19.76
Cr ₂ O ₃	0.09	0.22	0.00	0.03	0.15	0.26	0.00	0.09	0.00	0.10	0.00	0.01	0.00	0.06
FeO _T	32.20	31.79	31.80	32.26	33.09	32.87	32.55	32.99	33.76	33.29	34.40	34.34	34.24	35.67
MnO	9.28	9.43	8.91	8.90	7.92	7.72	8.47	7.74	7.92	7.15	6.91	6.85	6.39	5.32
MgO	2.29	2.14	2.07	2.20	2.57	2.52	2.66	2.37	2.25	2.47	2.39	2.60	2.68	2.78
CaO	0.98	1.04	0.98	1.37	1.11	0.85	1.04	1.06	1.11	1.21	1.18	0.98	1.10	0.92
Na ₂ O	0.00	0.29	0.10	0.11	0.01	0.00	0.18	0.00	0.08	0.29	0.00	0.25	0.05	0.07
K ₂ O	0.00	0.02	0.08	0.00	0.00	0.12	0.00	0.04	0.02	0.00	0.03	0.11	0.00	0.00
∑ ₁	99.80	99.88	99.16	99.03	99.86	99.12	99.93	99.13	99.66	100.07	100.12	100.50	99.77	99.77
Fe ₂ O ₃	5.27	6.33	5.04	6.99	5.22	5.84	6.12	4.89	6.68	6.02	6.13	6.98	5.06	6.05
FeO	27.45	26.08	27.28	26.01	28.38	27.64	27.01	28.61	27.75	27.82	28.85	27.98	29.67	30.21
∑ ₂	100.32	100.50	99.68	99.77	100.37	99.73	100.51	99.64	100.33	100.62	100.70	101.12	100.26	100.36
Si	2.878	2.876	2.877	2.836	2.894	2.837	2.882	2.898	2.851	2.873	2.839	2.860	2.897	2.863
Al(T)	0.122	0.124	0.123	0.164	0.106	0.163	0.118	0.102	0.149	0.127	0.161	0.140	0.103	0.137
Al(O)	1.772	1.767	1.824	1.747	1.770	1.786	1.749	1.797	1.752	1.798	1.789	1.765	1.790	1.762
Ti	0.010	0.000	0.006	0.000	0.003	0.005	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.006
Cr	0.007	0.016	0.000	0.002	0.011	0.019	0.000	0.007	0.000	0.007	0.000	0.001	0.000	0.004
Fe ³⁺	0.325	0.388	0.312	0.433	0.321	0.361	0.375	0.303	0.412	0.367	0.375	0.425	0.310	0.371
Fe ²⁺	1.879	1.778	1.874	1.790	1.937	1.897	1.839	1.967	1.901	1.887	1.963	1.892	2.023	2.060
Mn	0.643	0.651	0.620	0.620	0.547	0.537	0.584	0.539	0.549	0.491	0.476	0.469	0.441	0.367
Mg	0.279	0.260	0.254	0.270	0.313	0.308	0.323	0.291	0.275	0.299	0.290	0.313	0.326	0.338
Ca	0.086	0.091	0.086	0.121	0.097	0.075	0.091	0.093	0.097	0.105	0.103	0.085	0.096	0.080
Na	0.000	0.046	0.016	0.018	0.002	0.000	0.028	0.000	0.013	0.046	0.000	0.039	0.008	0.011
K	0.000	0.002	0.008	0.000	0.000	0.013	0.000	0.004	0.002	0.000	0.003	0.011	0.000	0.000
∑	8.001	7.999	8.000	8.001	8.001	8.001	8.000	8.001	8.001	8.000	7.999	8.000	7.999	7.999
Alm	65.085	63.957	66.126	63.906	66.932	67.341	64.822	68.062	67.364	67.829	69.315	68.576	70.097	72.408
Prp	9.664	9.353	8.963	9.639	10.815	10.934	11.385	10.069	9.745	10.748	10.240	11.345	11.296	11.880
Sps	22.272	23.417	21.877	22.135	18.901	19.063	20.585	18.651	19.454	17.649	16.808	16.999	15.281	12.900
Ga*	2.979	3.273	3.035	4.320	3.352	2.662	3.208	3.218	3.437	3.774	3.637	3.081	3.326	2.812

Alm—铁铝榴石; Prp—镁铝榴石; Sps—锰铝榴石; Ga* 为 Grs(钙铝榴石)+ Ad(钙铁榴石)+ Uv(钙铬榴石), 下表同。

升高趋势极其明显, 边缘最高为 71.780%。锰铝榴石由核部向边缘明显降低。由核部 41.943% 降低至边缘 18.523%。镁铝榴石由核部到边缘整体升高, 核部到边缘含量在 5.411% 至 7.302%。钙质系列总含量很低, 在 2.395%~4.222% 之间。

4 X 射线粉晶衍射

为研究区域内产出的石榴石物相组成及其结构特征, 由高翔采用中国地质大学(北京)X 射线粉晶衍射实验室的日本理学 Rigaku 公司 D/Max-RC 的仪器对研制成细粉末的 Garnet 1 样品进行 X 射线粉晶衍射分析, 实验条件: Cu 靶, 50 kV, 60 mA, 连续扫描速度 8°/min, 狭缝 DS=SS=10RS=0.15 mm。

表 5 为 X 射线粉晶衍射图数据。经与标准图谱和 JCPDS 数据库卡片对比, 确定样品的物相为铁铝榴石, 含少量石英。运用“jade 5.0”程序对所测的库鲁克塔格兴地塔格群石榴石 Garnet 1 的衍射峰进行指标化, 并计算出 Garnet 1 的晶胞参数。精修后的晶胞参数为 1.1535 nm, 标准偏差 S=0.00048, 标准偏差在 0.0001~0.0099 之间, 符合此仪器精度, 表明此次指标化较成功。理论晶胞参数为 1.1526 nm。

5 讨论

5.1 石榴石化学成分

国内外大量研究表明, 石榴石的成分特征可以反映变质程度, 是变质强度的指示标志。部分研究

表 2 石榴石样品 Garnet 2 的化学成分

Table 2 Chemical composition of Garnet 2

样号	核部														边缘													
	Ca-1	Ca-2	Ca-3	Ca-4	Ca-5	Ca-6	Ca-7	Ca-8	Ca-9	Ca-10	Ca-11	Ca-12	Ca-13	Ca-14	Ca-15	Ca-16	Ca-17	Ca-18	Ca-19	Ca-20	Ca-21	Ca-22	Ca-23	Ca-24	Ca-25	Ca-26		
SiO ₂	35.34	35.28	34.87	35.23	34.96	34.56	35.07	35.13	34.82	35.20	34.72	35.22	34.81	34.86	34.41	34.61	34.67	34.59	34.55	34.22	34.25	34.50	34.40	34.40	34.75	34.70	34.69	
TiO ₂	0.09	0.12	0.05	0.04	0.01	0.02	0.04	0.05	0.04	0.07	0.10	0.12	0.01	0.08	0.06	0.07	0.01	0.01	0.03	0.17	0.09	0.10	0.09	0.10	0.08	0.03	0.05	
Al ₂ O ₃	19.61	19.21	19.43	19.65	19.59	19.50	19.78	19.60	19.60	19.40	19.74	19.39	19.50	19.63	19.45	19.20	19.27	19.41	19.62	19.28	19.50	19.55	19.25	19.35	19.31	19.38		
Cr ₂ O ₃	0.07	0.16	0.05	0.10	0.14	0.15	0.15	0.10	0.12	0.12	0.20	0.11	0.28	0.10	0.12	0.13	0.21	0.17	0.16	0.06	0.09	0.20	0.27	0.11	0.11	0.02		
FeO _T	32.80	32.76	33.09	33.07	33.18	33.68	33.36	33.69	33.48	33.49	33.56	33.80	33.73	33.51	34.42	34.51	34.30	34.43	34.24	34.57	35.33	34.57	35.45	35.66	35.97	36.45		
MnO	7.98	8.22	8.22	7.76	8.13	7.89	7.53	7.38	7.33	7.35	7.81	7.76	7.81	7.70	7.46	7.28	7.18	7.27	7.58	7.17	7.13	6.82	6.53	5.90	5.44	4.96		
MgO	2.52	2.36	2.36	2.51	2.44	2.42	2.52	2.55	2.54	2.47	2.50	2.41	2.49	2.47	2.30	2.42	2.63	2.56	2.53	2.64	2.49	2.54	2.65	2.78	2.69	2.92		
CaO	1.00	1.05	1.08	1.16	1.16	1.06	1.16	1.20	1.15	1.14	1.12	1.09	1.08	1.02	0.94	1.18	1.18	1.11	1.14	1.10	1.06	1.06	1.05	0.95	1.09	1.02		
Na ₂ O	0.15	0.21	0.21	0.05	0.13	0.04	0.24	0.07	0.13	0.15	0.11	0.09	0.04	0.19	0.36	0.33	0.22	0.28	0.11	0.15	0.10	0.19	0.04	0.15	0.17	0.10		
K ₂ O	0.01	0.04	0.04	0.01	0.08	0.08	0.04	0.01	0.01	0.07	0.03	0.05	0.05	0.10	0.04	0.04	0.10	0.07	0.02	0.04	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02		
Σ ₁	99.57	99.43	99.42	99.57	99.81	99.39	99.90	99.78	99.24	99.46	99.89	100.04	99.78	99.67	99.55	99.79	99.76	99.90	100.00	99.40	100.05	99.55	99.74	99.76	99.52	99.62		
Fe ₂ O ₃	5.59	6.06	7.09	5.55	6.95	7.15	6.88	6.16	6.53	6.19	7.03	6.31	6.81	7.15	8.73	8.78	8.44	8.76	7.90	8.56	8.63	7.72	7.93	7.72	7.76	7.74		
FeO	27.77	27.31	26.72	28.07	26.90	27.26	27.13	28.13	27.62	27.93	27.21	28.10	27.59	27.06	26.57	26.59	26.68	26.50	27.10	26.89	27.55	27.62	28.31	28.69	28.98	29.47		
Σ ₂	100.13	100.03	100.13	100.12	100.48	100.12	100.55	100.38	99.90	100.08	100.57	100.65	100.46	100.37	100.43	100.65	100.57	100.74	100.76	100.28	100.90	100.32	100.54	100.50	100.29	100.38		
Si	2.888	2.891	2.857	2.881	2.853	2.837	2.854	2.868	2.855	2.881	2.833	2.873	2.846	2.847	2.816	2.826	2.829	2.818	2.817	2.806	2.796	2.823	2.816	2.837	2.839	2.834		
Ti	0.005	0.008	0.003	0.002	0.000	0.001	0.003	0.003	0.003	0.004	0.006	0.007	0.001	0.005	0.003	0.004	0.000	0.000	0.002	0.010	0.006	0.006	0.006	0.005	0.002	0.003		
Al(T)	0.112	0.109	0.143	0.119	0.147	0.163	0.146	0.132	0.145	0.119	0.167	0.127	0.154	0.153	0.184	0.174	0.171	0.182	0.183	0.194	0.204	0.177	0.184	0.163	0.161	0.166		
Al(O)	1.777	1.747	1.733	1.775	1.738	1.723	1.751	1.753	1.749	1.752	1.730	1.737	1.725	2.369	2.172	2.190	2.339	2.254	2.239	2.322	2.344	2.361	2.288	2.337	2.251	2.324		
Cr	0.005	0.012	0.004	0.007	0.010	0.011	0.011	0.007	0.009	0.009	0.014	0.008	0.020	0.008	0.009	0.010	0.015	0.013	0.011	0.004	0.006	0.015	0.019	0.008	0.008	0.002		
Fe ³⁺	0.344	0.374	0.457	0.342	0.427	0.442	0.421	0.378	0.403	0.381	0.432	0.387	0.419	0.439	0.538	0.539	0.518	0.537	0.485	0.528	0.530	0.475	0.488	0.474	0.478	0.476		
Fe ²⁺	1.898	1.871	1.831	1.920	1.836	1.871	1.846	1.920	1.894	1.912	1.856	1.917	1.886	1.848	1.818	1.815	1.820	1.806	1.848	1.843	1.881	1.890	1.938	1.959	1.983	2.013		
Mn	0.552	0.570	0.571	0.537	0.562	0.548	0.519	0.510	0.509	0.509	0.540	0.536	0.541	0.533	0.517	0.503	0.496	0.502	0.524	0.498	0.493	0.473	0.452	0.408	0.377	0.343		
Mg	0.307	0.288	0.289	0.306	0.296	0.296	0.305	0.310	0.310	0.302	0.304	0.293	0.303	0.301	0.281	0.295	0.320	0.311	0.308	0.323	0.303	0.310	0.323	0.339	0.328	0.355		
Ca	0.087	0.092	0.095	0.102	0.102	0.093	0.101	0.105	0.101	0.100	0.098	0.095	0.094	0.089	0.082	0.104	0.103	0.097	0.100	0.096	0.093	0.092	0.083	0.096	0.089			
Na	0.024	0.034	0.033	0.008	0.021	0.006	0.038	0.011	0.021	0.024	0.018	0.015	0.006	0.030	0.056	0.052	0.035	0.045	0.018	0.024	0.015	0.030	0.006	0.023	0.028	0.016		
K	0.001	0.004	0.004	0.001	0.008	0.008	0.004	0.001	0.001	0.008	0.003	0.005	0.005	0.010	0.004	0.004	0.010	0.007	0.002	0.004	0.001	0.001	0.002	0.003	0.001	0.002		
Σ	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000		
Alm	66.712	66.316	65.730	67.007	65.663	66.608	66.608	67.485	67.295	67.720	66.343	67.457	66.778	66.697	67.375	66.812	66.467	66.501	66.486	66.783	67.901	68.344	69.078	70.243	71.239	71.880		
Prp	10.802	10.200	10.368	10.682	10.602	10.551	11.013	10.898	11.025	10.686	10.868	10.323	10.745	10.863	10.407	10.850	11.673	11.436	11.084	11.690	10.941	11.206	11.511	12.144	11.772	12.681		
Sps	19.421	20.211	20.485	18.757	20.095	19.516	18.729	17.922	18.078	18.040	19.297	18.868	19.141	19.232	19.164	18.527	18.107	18.488	18.840	18.040	17.798	17.102	16.128	14.621	13.549	12.258		
Grs*	3.066	3.273	3.416	3.554	3.640	3.325	3.649	3.695	3.602	3.554	3.492	3.352	3.337	3.208	3.054	3.812	3.754	3.575	3.590	3.487	3.360	3.348	3.283	2.993	3.439	3.181		

表 3 石榴石样品 Garnet 3 的化学成分

 $w_B/\%$

Table 3 Chemical composition of Garnet 3

样号	核部											边缘
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
SiO ₂	34.66	34.93	34.73	34.69	34.71	34.45	34.85	34.57	34.84	34.62	35.05	34.62
TiO ₂	0.14	0.03	0.02	0.09	0.09	0.07	0.14	0.05	0.10	0.15	0.06	0.05
Al ₂ O ₃	19.03	19.33	19.41	19.34	19.62	19.56	19.43	19.52	19.77	19.46	19.75	19.42
Cr ₂ O ₃	0.10	0.07	0.03	0.07	0.08	0.14	0.04	0.13	0.13	0.10	0.04	0.09
FeO _T	33.32	34.34	34.69	34.76	33.92	33.68	33.62	34.08	34.31	35.04	34.92	35.98
MnO	8.50	7.30	6.73	6.88	7.67	7.89	7.65	7.57	6.99	6.53	5.97	5.17
MgO	2.55	2.69	2.86	2.49	2.50	2.36	2.60	2.62	2.56	2.77	2.83	2.76
CaO	0.96	0.80	0.90	0.86	1.00	1.06	0.91	1.08	0.95	0.82	0.80	0.77
Na ₂ O	0.17	0.17	0.02	0.08	0.15	0.21	0.04	0.15	0.14	0.14	0.12	0.41
K ₂ O	0.02	0.01	0.03	0.03	0.08	0.06	0.03	0.05	0.04	0.06	0.02	0.06
∑ ₁	99.45	99.68	99.44	99.29	99.83	99.47	99.31	99.81	99.84	99.68	99.56	99.32
Fe ₂ O ₃	7.73	7.28	7.13	6.87	7.53	7.95	6.29	8.02	6.84	7.72	6.29	8.58
FeO	26.37	27.78	28.28	28.60	27.12	26.54	27.98	26.84	28.13	28.08	29.25	28.25
∑ ₂	100.24	100.40	100.15	100.00	100.56	100.28	99.96	100.59	100.50	100.44	100.17	100.17
Si	2.843	2.855	2.845	2.851	2.833	2.822	2.861	2.822	2.842	2.828	2.862	2.829
Ti	0.009	0.002	0.001	0.006	0.006	0.004	0.009	0.003	0.006	0.009	0.003	0.003
Al(T)	0.157	0.145	0.155	0.149	0.167	0.178	0.139	0.178	0.158	0.172	0.138	0.171
Al(O)	1.683	1.716	1.718	1.724	1.720	1.710	1.740	1.699	1.742	1.701	1.763	1.700
Cr	0.008	0.005	0.002	0.005	0.006	0.010	0.003	0.009	0.010	0.007	0.003	0.006
Fe ³⁺	0.477	0.448	0.439	0.425	0.463	0.490	0.389	0.493	0.420	0.475	0.386	0.528
Fe ²⁺	1.809	1.898	1.937	1.965	1.851	1.818	1.921	1.832	1.919	1.918	1.997	1.931
Mn	0.591	0.506	0.467	0.479	0.530	0.547	0.532	0.523	0.483	0.452	0.413	0.358
Mg	0.312	0.327	0.349	0.305	0.304	0.288	0.318	0.319	0.311	0.337	0.344	0.337
Ca	0.084	0.070	0.079	0.076	0.088	0.093	0.080	0.094	0.083	0.072	0.070	0.067
Na	0.026	0.027	0.004	0.013	0.024	0.034	0.006	0.023	0.022	0.022	0.018	0.064
K	0.002	0.001	0.003	0.003	0.009	0.006	0.003	0.005	0.004	0.006	0.002	0.006
∑	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Alm	64.689	67.770	68.390	69.578	66.749	66.201	67.356	66.187	68.632	69.022	70.723	71.711
Prp	11.170	11.682	12.331	10.800	10.961	10.478	11.168	11.510	11.118	12.122	12.182	12.500
Sps	21.124	18.047	16.484	16.947	19.130	19.933	18.657	18.897	17.268	16.267	14.610	13.297
Ga*	3.017	2.500	2.795	2.674	3.160	3.388	2.819	3.406	2.982	2.589	2.484	2.491

者(Sturt, 1962; Banno, 1964; Atherton, 1968; Brown, 1969)认为,随变质强度的加深,石榴石中 Fe²⁺、Mg²⁺ 增加, Mn²⁺、Ca²⁺ 降低,在低级变质时,石榴石中锰铝榴石分子较高,随变质强度的增加, Mn²⁺ 在石榴石中的稳定性降低,含量减少, Fe²⁺ 进入石榴石晶格而使铁铝榴石代替锰铝榴石。Miyashiro(1973)认为,变质岩中石榴石的 Mn²⁺/Fe²⁺ 比值可作温度计,变质越深,比值越小,而石榴石的 Mn²⁺ 含量则与变质作用时的压力有关,随压力增大而减少,故石榴石中的 Mn²⁺ 含量可作为地质压力计。胡恭任(2007)认为变质岩中石榴石的 $x(\text{Prp}) = n(\text{Mg})/n(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Mn} + \text{Ca})$ 一方面受寄主岩石化学成分的影响,另一方面受变质温度高低所控制。 $x(\text{Prp})$ 值越高,反映其变质温度越高; x

(Ca) = $n(\text{Ca})/n(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg} + \text{Mn} + \text{Ca})$ 反映形成时的压力。综合前人研究结果,结合表 1~表 4 及图 1 的数据,笔者认为 Garnet 1、Garnet 2 及 Garnet 4 石榴石由核部至边部生长温度呈整体上升趋势,形成压力基本稳定。Garnet 3(表 3、图 1c)石榴石核部及边缘生长温度较幔部生长温度高,压力基本稳定。这反映了石榴石形成环境的变质程度在提高。

镜下观察 4 个石榴石样品没有环带现象,从电子探针分析结果上看,由核部向边缘 FeO、MgO 质量分数逐渐增加,而 MnO 质量分数逐渐减少,这说明在石榴石的组成元素之间 Mg²⁺ 对 Fe²⁺ 的替换逐渐增加, Mn²⁺ 对 Fe²⁺ 的替换逐渐减少,但 Mg²⁺、Mn²⁺ 总体对 Fe²⁺ 的替换仍然在减少,从 Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 转换以后的数据也可看出 Fe²⁺ 含量在逐渐增加。与

表 4 石榴石样品 Garnet 4 的化学成分
Table 4 Chemical composition of Garnet 4

 $\omega_B/\%$

样号	核部											边缘
	GA-1	GA-2	GA-3	GA-4	GA-5	GA-6	GA-7	GA-8	GA-9	GA-10	GA-11	
SiO ₂	34.09	34.51	35.23	34.58	34.10	32.88	34.09	35.29	34.69	34.96	34.99	34.76
TiO ₂	0.00	0.00	0.14	0.11	0.00	0.00	0.02	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	19.74	19.54	18.88	19.40	19.54	19.07	19.32	19.76	19.12	19.59	19.84	19.26
Cr ₂ O ₃	0.08	0.11	0.03	0.09	0.22	2.28	0.03	0.17	0.22	0.03	0.12	0.20
FeO _T	32.93	33.03	33.27	33.45	33.88	33.05	34.80	33.93	35.43	36.10	36.51	37.13
MgO	2.13	2.26	2.21	2.28	2.25	2.62	2.59	2.75	2.58	2.64	2.51	2.97
MnO	9.38	9.08	8.75	8.57	8.58	7.76	7.21	6.99	6.18	4.92	4.68	4.28
CaO	0.82	1.34	1.17	1.23	1.08	1.11	1.04	1.12	1.02	0.98	1.08	0.77
Na ₂ O	0.16	0.13	0.14	0.20	0.00	0.60	0.00	0.05	0.14	0.15	0.12	0.08
K ₂ O	0.05	0.00	0.00	0.00	0.08	0.04	0.11	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00
Σ_1	99.38	100.00	99.82	99.91	99.73	99.41	99.21	100.16	99.45	99.37	99.85	99.45
Fe ₂ O ₃	14.43	13.95	12.22	13.43	13.67	16.16	12.40	9.50	10.83	8.54	8.32	8.40
FeO	19.94	20.47	22.27	21.36	21.58	18.51	23.64	25.38	25.68	28.41	29.02	29.57
Σ_2	100.82	101.39	101.04	101.25	101.10	101.03	100.45	101.11	100.53	100.22	100.68	100.29
Si	2.674	2.696	2.767	2.713	2.685	2.599	2.722	2.789	2.778	2.820	2.813	2.821
Ti	0.000	0.000	0.008	0.006	0.000	0.000	0.001	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
Al(T)	0.326	0.304	0.233	0.287	0.315	0.401	0.278	0.211	0.222	0.180	0.187	0.179
Al(O)	1.498	1.496	1.514	1.506	1.498	1.376	1.540	1.630	1.583	1.683	1.693	1.664
Cr	0.006	0.008	0.002	0.006	0.015	0.159	0.002	0.012	0.016	0.002	0.009	0.014
Fe ³⁺	0.852	0.820	0.722	0.793	0.810	0.961	0.745	0.565	0.653	0.518	0.503	0.513
Fe ²⁺	1.308	1.337	1.462	1.401	1.421	1.224	1.578	1.677	1.720	1.916	1.951	2.007
Mg	0.141	0.150	0.147	0.151	0.150	0.175	0.175	0.184	0.175	0.180	0.171	0.204
Mn	1.097	1.058	1.024	1.002	1.007	0.915	0.858	0.824	0.738	0.592	0.561	0.518
Ca	0.069	0.112	0.098	0.103	0.091	0.094	0.089	0.095	0.088	0.085	0.093	0.067
Na	0.024	0.020	0.021	0.030	0.000	0.092	0.000	0.008	0.022	0.023	0.019	0.013
K	0.005	0.000	0.000	0.000	0.008	0.004	0.011	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000
Σ	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Alm	50.011	50.339	53.524	52.709	53.232	50.822	58.442	60.339	63.223	69.105	70.284	71.780
Prp	5.411	5.629	5.380	5.698	5.621	7.286	6.485	6.622	6.433	6.504	6.157	7.302
Sps	41.943	39.810	37.494	37.704	37.734	37.987	31.779	29.628	27.126	21.337	20.208	18.523
Ga*	2.635	4.222	3.603	3.889	3.413	3.905	3.294	3.411	3.217	3.054	3.351	2.395

表 5 Garnet 1 石榴石的 X 射线粉晶衍射数据
Table 5 X-ray powder diffraction data of Garnet 1

衍射峰序号	2θ	d	I/I_0	衍射峰序号	2θ	d	I/I_0
1	18.9	4.692	5	16	60	1.541	34
2	20.96	4.235	2	17	63.48	1.464	1
3	21.88	4.059	2	18	64.66	1.44	9
4	29.04	3.072	3	19	65.78	1.419	2
5	31.04	2.879	34	20	73.38	1.289	7
6	34.82	2.574	100	21	75.5	1.258	18
7	36.6	2.453	6	22	77.6	1.229	6
8	38.26	2.351	23	23	82.8	1.165	4
9	39.88	2.259	13	24	85.86	1.131	4
10	42.98	2.103	21	25	91.98	1.071	11
11	44.48	2.035	5	26	94.02	1.053	10
12	48.68	1.869	23	27	97.12	1.028	2
13	55.18	1.663	17	28	98.16	1.019	12
14	57.62	1.598	29	29	106.5	0.961	3
15	58.82	1.569	4	30	108.66	0.948	5

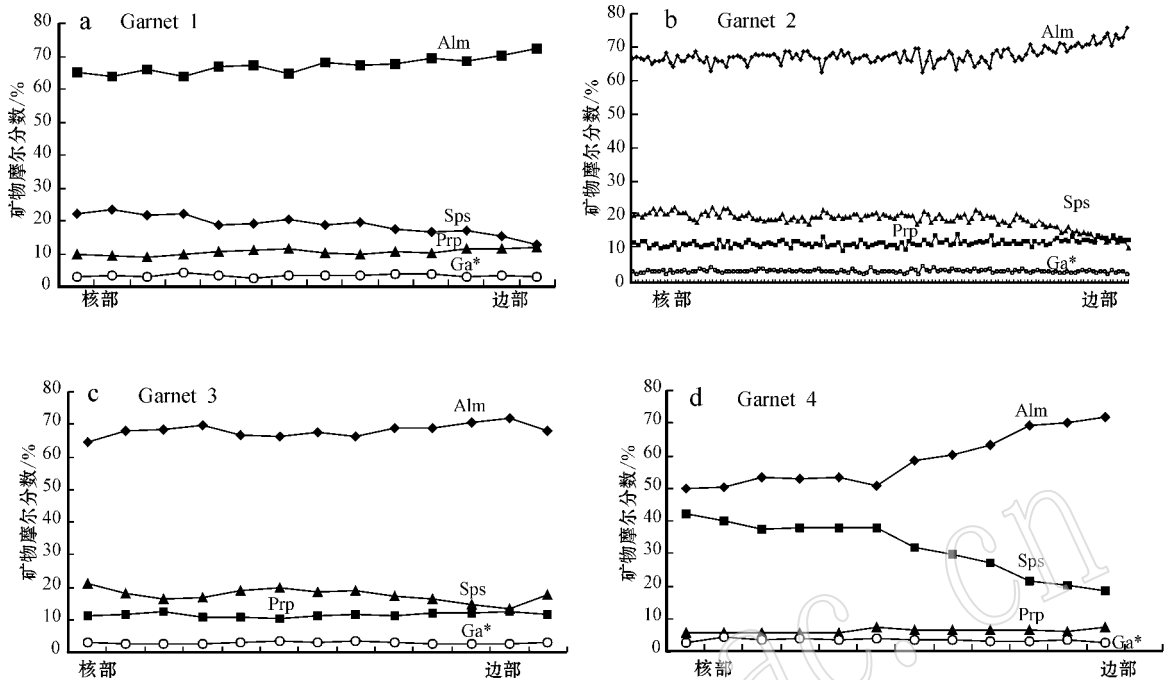


图 1 石榴石从核部到边缘端员组分变化图解

Fig. 1 Variation pattern of end-member compositions in garnet from core to rim

其他 3 个样品相比, Garnet 4 铁铝榴石与锰铝榴石含量变化很大,核部含量分别达到 50.011% 和 41.943%,原因是其 FeO_r 的变化范围为 32.93% ~ 37.13%,比 Garnet 1 的 31.79% ~ 35.67%、Garnet 2 的 32.76% ~ 36.45%、Garnet 3 的 33.32% ~ 35.98% 都大。 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 转换以后,其 Fe^{3+} 含量明显较其他 3 个样品高, Fe^{2+} 含量相应明显降低,核部表现尤其明显,而 MnO 、 MgO 、 CaO 含量较其他 3 个样品并无太大变化,因而 Garnet 4 核部端员组分变化极其显著。

5.2 X 射线粉晶衍射

兴地塔格群铁铝榴石并不是以端员组分 $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$ 的形式存在的,而是发生了 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 对 Fe^{2+} 离子的类质同像替代以及 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 对 Al^{3+} 的类质同像替代。而 Ca^{2+} (0.098 nm)、 Mn^{2+} (0.096 nm)、 Fe^{2+} (0.092 nm)、 Mg^{2+} (0.089 nm) 等二价阳离子的离子半径依次递减。由探针测定结果及计算出的石榴石化学式可以看出 Ca^{2+} 、 Mn^{2+} 两种大半径离子对 Fe^{2+} 的置换数目多于小半径 Mg^{2+} 对 Fe^{2+} 的置换,因而在结构上表现为铁铝榴石的晶胞参数比理论值偏大。

6 结论

(1) 库鲁克塔格兴地塔格群石榴石晶体形态以菱形十二面体 {110} 与四角三八面体 {211} 和二者聚形为主,颜色为鲜红至深红色,裂隙及石榴石内部结晶质包裹体导致其透明度降低。分子量小的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 对 Fe^{2+} 的类质同像替代导致石榴石密度比一般的铁铝榴石的密度稍低。铁铝榴石吸收谱带较强表明 Mg^{2+} 对 Fe^{2+} 的类质同像替代较少。

(2) 不同变质期次形成的石榴石,铁铝榴石、镁铝榴石端员组分均由核部到边部逐渐增加,锰铝榴石均由核部向边缘逐渐减少,钙质系列石榴石总含量不高,从核部到边缘变化趋势不明显。这表明兴地塔格群石榴石生长温度由核部至边缘呈整体上升趋势,形成压力基本稳定,石榴石形成环境的变质程度在提高。

(3) 根据 X 射线粉晶衍射图数据计算出库鲁克塔格兴地塔格群石榴石的晶胞参数为 1.153 5 nm,标准偏差 $S=0.000 48$ 。

References

- Atherton M P. 1968. The variation in garnet, biotite and chlorite composition in medium grade pelitic rocks from the Dalradian, Scotland, with particular reference to the zonation in garnet [J]. *Contr. Mineral. Petrol.*, 18 : 347~371.
- Banno S. 1964. Petrologic studies on Sanbagawa crystalline schists in the Besshi-Inodistrict, central Sikoku, Japan [J]. *Tokyo Univ. Fac. Sci. J. Sec. II*, 15 : 203~319.
- Brown E H. 1969. Some zoned garnets from the greenschist facies [J]. *Am. Mineral.*, 54 : 1662~1677.
- Dong Zhenxin. 1994. *Natural Gemstones* [M]. Beijing : Geological Publishing House (in Chinese).
- Hu Gongren. 2007. The chemical composition, mineral evolution and the significance of garnet from the Zhoutan group in central Jiangxi province [J]. *J. Mineral. Petrol.*, 27(2) : 33~38 (in Chinese with English abstract).
- Li Wei and Chang Ling. 2009. Deterioration distortion function characteristic and structure evolution of the Xiditage Group of palaeoproterozoic, Horse racing mountains, Kuruktage [J]. *Xinjiang Geology*, 27(2) : 111~116 (in Chinese with English abstract).
- Miyashiro A. 1973. *Metamorphism and Metamorphic Belts* [M]. London : George Allen and Unwin.
- Sturt B A. 1962. The composition of garnets from pelitic schists in relation to the grade of regional metamorphism [J]. *J. Petrol.*, 3 : 181~191.
- Yang Jiayi and Zhao Yu. 2003. A Discussion on the mechanism of the exsolution of rutiles in garnets [J]. *Journal of Chang ' an University (Earth Science Edition)*, 25(4) : 40~43 (in Chinese with English abstract).
- Yin Jingwu, Li Xuanju, Cui Qingguo, *et al.* 2000. Characteristics of garnet in Shizhuyuan skarn deposit, Hunan province [J]. *Earth Science -Journal of China University of Geosciences*, 25(2) : 163~171 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xiaoyan. 1999. The gemological and mineralogical characteristics of sapphire in Shandong [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 18(1) : 41~45 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Beili. 2006. *Systematical Gemology* [M]. Beijing : Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhao Shanrong, Bian Qiujuan and Ling Qicong. 2004. *Crystallography and Mineralogy* [M]. Beijing : Higher Education Press (in Chinese).

附中文参考文献

- 董振信. 1994. *天然宝石* [M]. 北京 : 地质出版社.
- 胡恭任. 2007. 赣中周潭群变质岩中石榴石的演化史及其地质意义 [J]. *矿物岩石*, 27(2) : 33~38.
- 李伟, 常玲. 2009. 库鲁克塔格赛马山古元古代兴地塔格群变质变形作用特征及构造演化 [J]. *新疆地质*, 27(2) : 111~116.
- 杨家喜, 赵玉. 2003. 石榴石中金红石出溶机制探讨 [J]. *长安大学学报(地球科学版)*, 25(4) : 40~43.
- 尹京武, 李铨具, 崔庆国, 等. 2000. 湖南柿竹园矽卡岩矿床中石榴石特征 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(2) : 163~171.
- 余晓艳. 1999. 山东蓝宝石的宝石矿物学特征 [J]. *岩矿测试*, 18(1) : 41~45.
- 张蓓莉. 2006. *系统宝石学* [M]. 北京 : 地质出版社.
- 赵珊茸, 边秋娟, 凌其聪. 2004. *结晶学及矿物学* [J]. 北京 : 高等教育出版社.