

文章编号: 1000-6524(2004)04-0337-09

赣中周潭群石榴石、斜长石和黑云母微区 化学成分特征及其地球动力学意义

胡恭任^{1, 2, 3}, 刘丛强¹, 章邦桐³, 唐红峰¹, 于瑞莲²

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 华侨大学环境科学与工程系, 福建 泉州 362011;
3. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

摘要: 周潭群变质岩中石榴石、斜长石和黑云母微区化学成分变化明显, 石榴石变斑晶具典型的生长环带, 由晶体中心向两侧边缘 X_{Mg} 、 X_{Fe} 值以光滑曲线递增, X_{Ca} 、 X_{Mn} 值以光滑曲线递减, 反映其增温过程; 晶体最边缘的化学成分反映变质峰期的温度条件。通过石榴石变斑晶生长环带剖面分析, 应用 Grt_Bi 温度计和 GASP 压力计, 确定本区变质作用 pT 轨迹为顺时针形式, 发生于大陆碰撞造山带环境。

关键词: 石榴石; 斜长石; 黑云母; 微区化学成分; pT 轨迹; 地球动力学; 周潭群

中图分类号: P574.2; P594

文献标识码: A

Microarea chemical compositions of garnet, plagioclase and biotite from Zhoutan Group in central Jiangxi and its geological dynamic significance

HU Gong_ren^{1, 2, 3}, LIU Cong_qiang¹, ZHANG Bang_tong³, TANG Hong_feng¹ and Yu Rui_lian²

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362011, China; 3. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The microarea compositional variations of garnet, plagioclase and biotite in Zhoutan Group show obvious regularity. Garnet displays typical growth zoning, which reflects the crystallization and growing process of garnet. The contact edge compositions of the coexisting Grt, Bi and Pl should reflect the temperature and pressure of the peak metamorphic stage. On the basis of garnet zoning and Grt_Bi geothermometry as well as GASP barometry, it is known that the pattern of the metamorphic pT paths is of the clockwise type, and that metamorphism must have taken place in the tectonic environment of continental collision zone.

Key words: garnet; plagioclase; biotite; microarea composition; pT paths; geodynamics; Zhoutan Group

周潭群沿浙赣线南侧分布, 东从铅山鹅湖、弋阳周潭、慈竹, 西至余江马荃、乐安相山, 为一条带状高绿片岩相-低角闪岩相的变质岩系, 成近 NE 向展布, 长约 100 km, 宽约 2 km。其北部以断层与晚

元古代早期铁砂街群低绿片岩相浅变质岩系接触, 南部与震旦-寒武纪洪山群接触。洪山群为一具递进变质特征的变质岩系, 过去曾笼统认为它与周潭群为渐变接触关系, 两者是一套有序地层(余达淦

收稿日期: 2003-09-18; 修订日期: 2004-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40272038); 科技部攀登计划预选项目(95_预_39); 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室开放基金资助项目

作者简介: 胡恭任(1966-), 男, 副研究员, 主要从事资源环境与同位素地球化学方面的教学与科研工作。

等, 1993)。近年来的地质工作确认本区的周潭群、洪山群变质岩系存在两套变质、变形特征截然不同的岩系, 它们应是两个不同时代的构造地质体: 周潭群为结晶岩系, 属于结晶基底, 形成于中元古代; 其上的洪山群是震旦-寒武纪地层, 为低绿片岩相浅变质岩系, 构成本区褶皱基底(余达淦等, 1999; 胡恭任等, 1999, 2000)。周潭群变质岩系由片麻岩、十字石榴云母片岩、石榴云母片岩、硅线石云母片岩、变粒岩和斜长角闪岩组成, 岩系强烈构造置换和高度成分分异, 发育层间塑性流变, 原生变晶矿物分离和流体迁移明显, 长英质条带沿片麻理方向密集, 呈分层分布且极不稳定, 岩系广泛而强烈混合岩化。变质作用以角闪岩相为主, 它们经历了4幕变形(D₁-D₄)和3期变质作用(M₁-M₃) (胡恭任等, 1997, 2000)。

石榴石为中-高级变质岩中常见矿物, 其化学成分中蕴藏着丰富的变质作用成因信息。研究者们(靳是琴, 1986; 凌贤长等, 2000)经常利用石榴石中FeO、MgO、CaO和MnO的含量变化, 确定变质作用的温压条件。本文主要以石榴石、黑云母和斜长石成分特征为基础, 探讨其地质动力学意义。

1 共生石榴石、斜长石、十字石和黑云母的微区化学成分特征

样品由南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室测试, 分析仪器为JEOL_733型电子探针, 加速电压15 kV, 束流 2×10^{-8} A, 出射角40°, 修正方式为ZAF, 束斑直径1 μm, 分析方式为波谱, 分析标样为: Na、Al、Si为钠长石, Ca为硅灰石, Fe为Fe₂O₃, Ti为TiO₂, K、P为钽磷酸钾, Mg为尖晶石, Mn为红钛锰矿。

1.1 黑云母

分布极广, 几乎见于各类岩石中, 颜色随变质带和原岩成分不同而异, 主要为细鳞片状、片状或变斑状, 具浅棕-棕黄-浅黄色多色性, 长度为0.15~1.4 mm, 与石榴石、十字石、斜长石和石英平衡共生(图1a), 或在黑云母片岩中呈独立变斑晶产出。有较多的浑圆状石英包体, 微区化学成分有一定的变化。与石榴石相接触边缘的部位X_{Mg}值一般略高, X_{Fe}值略低于晶体中心(图2)。中心与边缘的X_{Mg}、X_{Fe}差值仅为0.07, 说明黑云母也存在弱的成分环带(表1)。

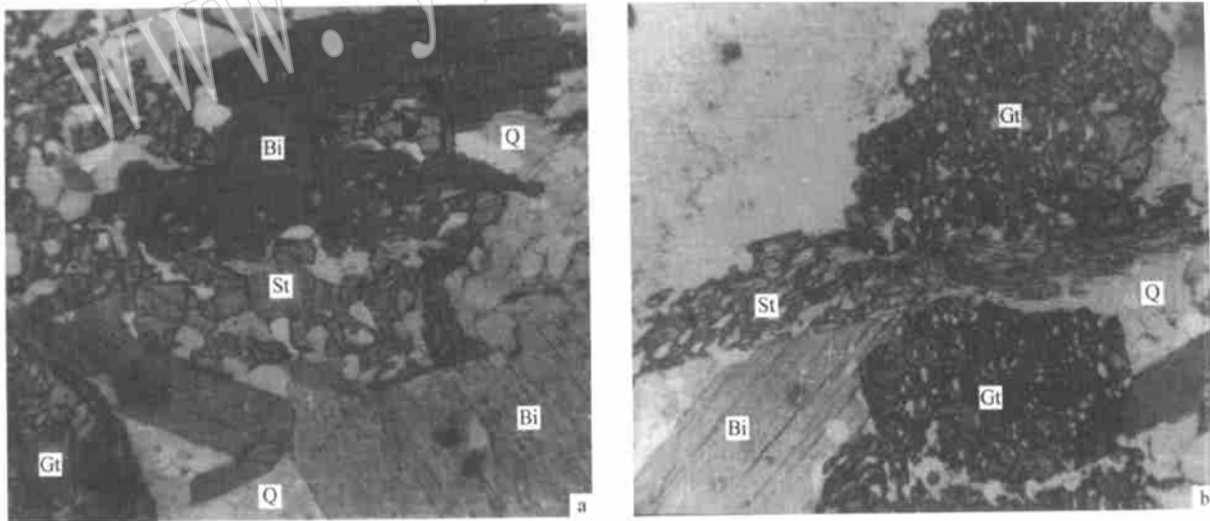


图1 周潭群变质岩中矿物的显微照片

Fig. 1 Microphotos of minerals from metamorphic rocks in Zhoutan Group

- a—片状黑云母(Bi)与粒状石榴石(Gt)、十字石(St)共生, 十字石中石英(Q)包体相当发育(X97)(+), 10×4; b—黑云母(Bi)与石榴石变斑晶(Gt)、十字石(St)共生, 十字石、石榴石富含浑圆状石英(Q)包体, 筛状变晶结构, 十字石处于由绿泥石向十字石转化的过渡阶段(X45)(+), 10×4
- a—schistose biotite exists with granular garnet and staurolite in paragenesis, quartz inclusions are developed in staurolite (X97)(+), 10×4; b—biotite exists with porphyroblastic garnet and staurolite in paragenesis, staurolite and garnet are rich in circular quartz inclusions, forming diablastic texture, staurolite changed from chlorite are in transitional state (X45)(+), 10×4

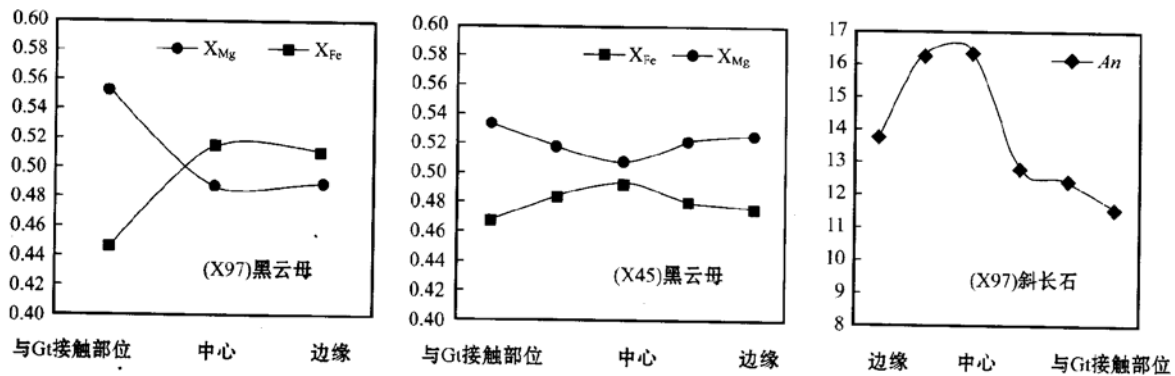


图 2 样品 X97 X45 中与石榴石直接接触的黑云母、斜长石成分剖面图

Fig. 2 Compositional profiles of biotite and plagioclase in Samples X97 and X45

表 1 黑云母微区化学成分

w_B/%

Table 1 Microarea composition of biotite

测点	样号	位置	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Σ	X _{Fe}	X _{Mg}	X _{FM}
1	X51	基质	35.64	1.21	19.79	22.08	0.03	9.30	0.01	0.15	6.75	94.96	0.592	0.399	0.597
2		边缘	36.21	2.16	20.51	18.58	0.01	9.81	0.01	0.17	7.97	95.43	0.554	0.446	0.555
3	X97	中心	35.04	1.11	19.82	18.07	0.00	10.72	0.01	0.43	8.02	93.21	0.486	0.514	0.486
4		接近 Gt	36.45	1.48	19.18	17.86	0.01	10.45	0.00	0.69	8.47	94.79	0.490	0.510	0.490
5		接近 Gt	35.05	1.65	19.98	20.68	0.03	9.44	0.00	0.12	8.98	95.93	0.552	0.448	0.552
6	X50	边缘	35.82	1.69	20.24	20.21	0.02	9.69	0.00	0.16	9.02	96.86	0.539	0.461	0.539
7	X50	边缘	34.92	1.46	19.70	19.59	0.02	9.45	0.01	0.17	8.46	93.77	0.537	0.463	0.537
8		边缘	34.17	1.47	19.45	19.52	0.02	9.27	0.00	0.08	8.36	92.36	0.542	0.458	0.542
9	X50	基质	35.29	1.90	19.05	21.45	0.00	8.95	0.00	0.11	8.15	94.90	0.574	0.426	0.574
10		中心	35.72	1.78	18.65	20.90	0.02	9.79	0.00	0.12	8.42	95.40	0.545	0.455	0.545
11	X50	边缘	35.67	1.75	19.40	20.40	0.01	9.61	0.00	0.10	9.61	95.72	0.535	0.465	0.535
12		接近 Gt	34.62	1.17	20.76	18.53	0.01	11.88	0.00	0.17	7.57	94.70	0.467	0.533	0.467
13		↑	35.60	1.23	20.00	17.88	0.01	10.74	0.00	0.37	8.21	94.13	0.483	0.517	0.483
14	X45	中心	36.56	1.55	19.58	17.10	0.00	10.48	0.00	0.77	8.40	95.42	0.492	0.508	0.492
15		↓	36.66	1.31	19.56	17.59	0.00	10.72	0.00	0.95	8.47	95.26	0.479	0.521	0.479
16		边缘	36.24	1.37	19.29	17.75	0.00	11.03	0.00	0.82	8.20	94.70	0.475	0.525	0.475
17	N1	中心	33.88	2.11	19.25	21.88	0.37	8.40	0.05	0.00	7.67	93.61	0.594	0.406	0.594
18	N1_3	中心	34.89	2.69	19.54	21.94	0.31	8.28	0.00	0.15	8.38	95.18	0.592	0.399	0.597
19	N7_2	中心	35.01	2.20	19.34	22.48	0.00	10.10	0.07	0.04	8.85	98.09	0.554	0.444	0.555
20	X89	中心	34.51	2.25	18.41	23.33	0.05	8.31	0.00	0.04	9.07	95.93	0.594	0.406	0.594
21		中心	34.30	2.43	19.75	22.43	0.09	8.92	0.00	0.25	8.11	97.12	0.585	0.415	0.585
22	Y9	边缘	35.14	2.69	19.54	21.94	0.31	8.28	0.00	0.15	8.38	96.09	0.585	0.415	0.585

X50 X51 为石榴云母石英片岩, X45 X97 为十字石榴云母石英片岩, X89 N7_2 为含石榴石长英质脉体, N1 为混合花岗岩, N1_3 为含硅线斜长云母变粒岩, Y9 为石榴硅线云母片岩; FeO 为全铁; X_{Mg} = Mg / (Mg + Fe + Ca + Mn), X_{Fe} = Fe / (Mg + Fe + Ca + Mn), X_{FM} = Fe / (Mg + Fe)。

1.2 斜长石

斜长石呈糖粒状、板状变晶, An 变化不大(11.5 ~ 18.2), 与石榴石、十字石、堇青石、黑云母共生, 化学成分及微区变化见表 2、图 2。

1.3 十字石

十字石仅出现在十字石带的十字石榴云母石英片岩和十字石榴堇青云母片岩中, 与石榴石、黑云

母、白云母、堇青石共生, 呈变斑晶或他形集合体产出, 结晶程度差, 呈灰白、灰黄色, 干涉色为 I 级灰白, 与绿泥石的颜色、干涉色相似, 石英包体相当发育。这些十字石尚处于由绿泥石向十字石转化的过渡阶段(图 1b), 部分十字石较大, 与石榴石、黑云母接触界面平直, 化学成分如表 3。这些十字石都具有低的 X_{Mg} 值, 比共生的石榴石低, 不含 Mn、Zn, 二价

表2 斜长石的微区化学成分

 $w_B/\%$

Table 2 Microarea composition of plagioclase

测点	样号	测试位置	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Σ	A _n
23		接近 Bi	66.80	0.00	22.90	0.29	0.00	0.00	2.66	9.00	0.03	101.74	13.8
24		↑	67.10	0.00	22.60	0.14	0.00	0.00	2.08	6.00	0.50	98.37	16.3
25	X97	中心	64.00	0.00	22.70	0.14	0.00	0.00	3.03	8.90	0.04	98.85	16.4
26		↓	64.90	0.00	22.60	0.12	0.00	0.17	2.48	9.60	0.06	99.95	12.8
27		↓	64.20	0.00	22.00	0.20	0.00	0.00	2.25	9.14	0.07	98.00	12.4
28		接近 Gt	63.40	0.00	22.90	0.11	0.00	0.00	2.37	9.70	0.03	98.49	11.5
29	X11b	中间	63.35	0.00	23.65	0.04	0.00	0.00	3.49	9.23	0.07	99.83	18.2
30	N7_2	中间	63.25	0.00	23.65	0.04	0.00	0.00	3.49	9.25	0.09	99.77	17.9
31		边缘	63.79	0.00	24.46	0.00	0.00	0.02	2.95	7.86	0.88	99.96	16.1

表3 十字石的微区化学成分

 $w_B/\%$

Table 3 Microarea composition of staurolite

测点	样号	测试位置	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Σ	X _{Mg}	X _{Fe}	X _{FM}
32	X97	接近 Gt	28.88	0.87	55.31	12.21	0.00	0.95	0.00	0.03	0.00	97.86	0.120	0.880	0.880
33		中间	28.72	0.88	54.97	12.03	0.02	1.56	0.00	0.02	0.00	97.98	0.175	0.825	0.825
34		接近 Gt	28.28	0.47	54.64	11.13	0.00	0.80	0.00	0.12	0.00	95.42	0.116	0.884	0.884
35		中间	28.04	0.40	54.41	11.52	0.00	1.12	0.00	0.15	0.00	95.64	0.146	0.854	0.854
36	X45	中心	26.62	0.47	53.63	11.92	0.02	1.76	0.00	0.04	0.01	94.48	0.207	0.793	0.793
37		中间	27.62	0.54	57.23	11.23	0.02	1.14	0.00	0.02	0.00	97.87	0.152	0.848	0.848
38		边缘	28.07	0.47	54.86	11.46	0.00	0.80	0.00	0.04	0.00	95.58	0.113	0.887	0.887
39		接近 Gt	28.24	0.44	54.55	11.61	0.01	0.78	0.00	0.07	0.01	95.61	0.105	0.895	0.895
40	X45	中间	27.81	0.52	53.82	12.14	0.02	1.13	0.00	0.15	0.00	95.59	0.144	0.856	0.856
41		中间	27.39	0.35	53.80	12.53	0.00	1.90	0.00	0.06	0.00	96.03	0.214	0.786	0.786
42		边缘	27.48	0.35	53.76	12.31	0.00	1.61	0.02	0.21	0.00	96.24	0.190	0.810	0.810
43		边缘	26.89	0.53	52.67	13.67	0.06	0.89	0.00	0.00	0.00	94.71	0.103	0.891	0.896
44		↑	27.79	0.38	54.26	13.25	0.06	1.12	0.02	0.00	0.00	96.68	0.131	0.864	0.869
45	X11b	中心	27.05	0.39	54.13	13.87	0.15	1.33	0.00	0.00	0.00	96.92	0.145	0.845	0.853
46		↓	27.51	0.52	53.24	13.05	0.22	0.83	0.00	0.00	0.00	95.37	0.102	0.881	0.896
47		接近 Gt	27.33	0.44	53.58	13.51	0.09	0.74	0.00	0.00	0.00	95.69	0.090	0.904	0.909

$X_{Mg} = Mg / (Mg + Fe + Ca + Mn)$, $X_{Fe} = Fe / (Mg + Fe + Ca + Mn)$, $X_{FM} = Fe / (Mg + Fe)$ 。

阳离子数的总和都小于2, 平均为1.66, 低的R²⁺表明其具有较高的(HO+ F)。同一颗粒无论与长英质矿物还是镁铁质矿物接触, 其成分变化特点一致, 从颗粒中心→颗粒边缘, X_{Fe}由低→高, X_{Mg}由高→低, 比相接触之石榴石的X_{Mg}、X_{Fe}变化大(图3), 说明十字石的生长是其结晶过程中的必然体现, 不受与之接触的石榴石、长英质矿物的影响。

1.4 石榴石

石榴石分布广泛, 主要见于云母片岩中, 少量见于变粒岩、长英质脉体、角闪片岩中, 以0.48~1.26 mm的粒状基质和1.5~3.96 mm的较自形变斑晶产出为主, 浅褐色, 富含浑圆状石英、少量片状黑云母包体, 筛状变晶结构(图1b), 与黑云母、白云母、十字石平衡共生。

(1) 样品X50中的石榴石

样品X50为石榴云母石英片岩, 石榴石颗粒较大, 粒径最大达3.56 mm, 浑圆状石英包体发育, 周围以石英、白云母等矿物为主, 含少量黑云母。电子探针测定的微区成分剖面见表4和图4。具有较对称的成分环带, 晶体内部的X_{Mg}值稳定于0.033~0.043之间, 由晶体中心向两侧边缘X_{Mg}值以光滑曲线递增, X_{Mn}递减, X_{Ca}开始递增, 后来又递减; X_{Fe}开始递增, 后来又递减, 最后到边缘又大幅度递增。这是典型的生长环带, 反映增温过程, 晶体最边缘的化学成分反映此峰期的温度条件。基质黑云母边缘的X_{Mg}值(0.465)也反映峰期温度。

(2) 样品X45中的石榴石

样品X45为十字石榴云母石英片岩, 石榴石颗

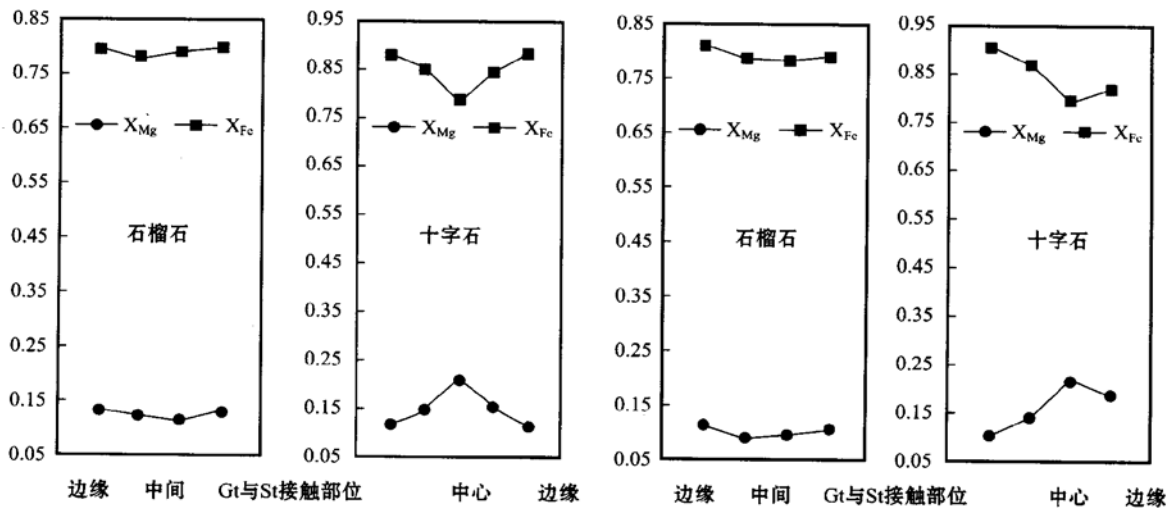


图 3 样品 X45 中直接接触的石榴石和十字石的成分剖面图
Fig. 3 Compositional profiles of garnet and staurolite in Sample X45

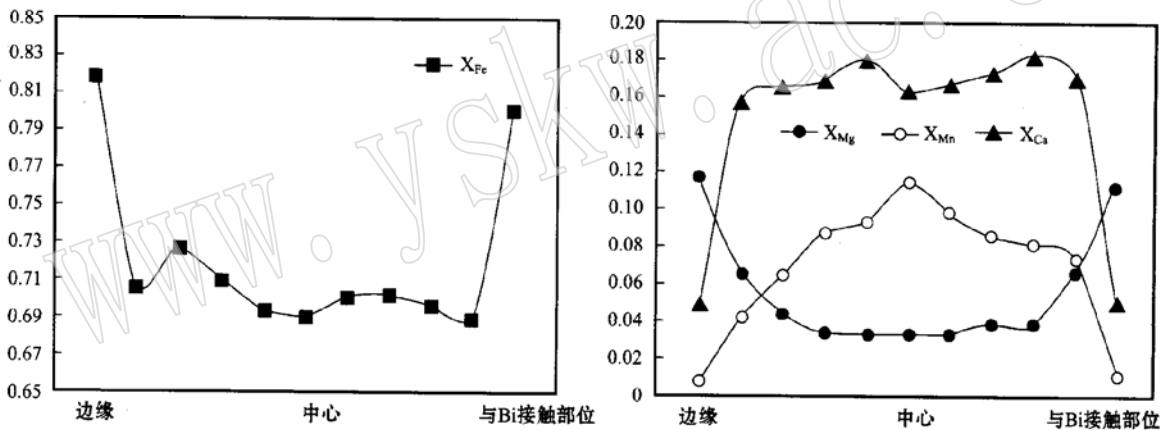


图 4 样品 X50 中的石榴石微区化学成分剖面图
Fig. 4 Microarea compositional profile of garnet in Sample X50

粒直径 1.56 mm, 与十字石、黑云母平衡共生, 浑圆状石英包体发育; 周围以石英、白云母等矿物为主, 少量黑云母、十字石, 颗粒一侧与黑云母接触, 另一侧与石英接触。微区成分剖面见表 4 和图 5, 具有较对称的成分环带, 由晶体中心向两侧边缘 X_{Mg} 、 X_{Fe} 值以光滑曲线递增, X_{Mn} 值以光滑曲线递减, X_{Ca} 呈波状起伏变化的曲线; 与黑云母直接接触的石榴石边缘, 其 X_{Mg} 、 X_{Fe} 、 X_{Mn} 、 X_{Ca} 值与该颗粒的另一边缘(与石英接触)相差很小, 差值分别为 0.001、0.004、0.004; 与十字石直接接触的石榴石边缘, 其 X_{Mg} 、 X_{Fe} 、 X_{Mn} 、 X_{Ca} 值与该颗粒的另一边缘(与石英接触)也相差很小, 差值分别为 0.007、0.021、0.014、0.017。

(3) 样品 X97 中的石榴石

样品 X97 为十字石榴云母石英片岩, 石榴石颗粒中间发育浑圆状石英、片板状斜长石包体, 颗粒边缘无包体, 粒径 3.96 mm, 一侧与铁镁矿物黑云母、十字石接触, 另一侧与斜长石、石英接触, 包体斜长石的 $An=30$, 与石榴石接触的斜长石的 $An=11.5$ 。微区成分剖面见表 4 和图 6。具有较对称的成分环带, 由晶体中心向两侧边缘 X_{Mg} 、 X_{Fe} 值以光滑曲线递增, X_{Ca} 、 X_{Mn} 值以光滑曲线递减; 与黑云母直接接触的石榴石边缘, 其 X_{Mg} 、 X_{Fe} 、 X_{Mn} 、 X_{Ca} 值与该颗粒的另一边缘(与白云母、长石、石英接触)相差很小, 差值分别为 0.013、0.021、0.006、0.012。

表4 石榴石的微区化学成分

 $w_B/\%$

Table 4 Microarea composition of garnet

测点	样号	测试位置	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Σ	X _{Mg}	X _{Fe}	X _{Mn}	X _{Ca}	X _{FM}
48		接近 Bi	37.16	0.02	22.50	33.86	0.77	2.86	3.09	0.04	0.00	100.29	0.117	0.776	0.090	0.017	0.869
49	X50	中心	36.59	0.08	21.95	28.82	5.52	1.56	4.79	0.03	0.00	99.34	0.065	0.663	0.143	0.129	0.911
50		边缘	36.82	0.09	22.18	34.30	1.12	2.98	2.00	0.05	0.00	99.54	0.123	0.791	0.058	0.027	0.865
51		边缘	36.60	0.01	22.04	34.90	0.72	2.98	2.40	0.05	0.00	99.70	0.121	0.791	0.071	0.017	0.867
52	X50	接近 Bi	36.65	0.00	22.26	34.26	0.72	3.00	2.09	0.03	0.00	99.01	0.124	0.797	0.062	0.017	0.865
53		边缘	37.63	0.01	21.47	36.65	0.32	2.92	1.76	0.01	0.01	100.78	0.117	0.819	0.007	0.050	0.875
54		↑	37.86	0.02	21.29	30.51	1.76	1.57	5.29	0.03	0.00	98.38	0.065	0.706	0.041	0.158	0.916
55		↑	37.69	0.07	21.20	29.91	2.71	0.97	5.26	0.11	0.00	98.02	0.043	0.727	0.064	0.166	0.944
56		↑	37.75	0.10	21.97	28.72	3.46	0.75	5.36	0.05	0.01	98.20	0.033	0.710	0.087	0.169	0.956
57		↑	37.61	0.14	21.93	28.18	3.79	0.71	5.78	0.10	0.00	98.21	0.033	0.694	0.093	0.180	0.955
58	X50	中心	37.62	0.08	21.41	27.89	4.61	0.70	5.21	0.12	0.00	98.00	0.033	0.690	0.114	0.163	0.955
59		↓	37.65	0.12	21.67	28.47	3.94	0.73	5.31	0.12	0.10	98.01	0.033	0.701	0.098	0.168	0.956
60		↓	37.71	0.07	21.29	28.54	3.40	0.82	5.41	0.13	0.01	98.02	0.038	0.703	0.086	0.173	0.949
61		↓	37.51	0.15	21.87	28.62	3.32	0.90	5.84	0.10	0.00	98.31	0.038	0.697	0.081	0.184	0.949
62		↓	37.40	0.16	21.03	29.36	2.97	1.66	5.63	0.08	0.00	98.80	0.067	0.689	0.073	0.171	0.911
63		接近 Bi	38.50	0.00	21.49	35.88	0.47	2.78	1.77	0.18	0.00	101.02	0.112	0.801	0.010	0.051	0.877
64		接近 Bi	38.27	0.02	21.65	35.28	0.17	3.44	2.26	0.33	0.00	101.42	0.137	0.795	0.003	0.065	0.853
65		↑	38.08	0.03	21.56	35.90	0.23	3.21	2.25	0.00	0.00	101.26	0.128	0.801	0.007	0.064	0.853
66		↑	37.56	0.01	21.29	33.54	1.05	2.47	2.68	0.17	0.00	98.78	0.105	0.791	0.024	0.080	0.883
67		↑	37.97	0.06	21.15	31.86	2.13	2.17	2.65	0.13	0.00	98.42	0.093	0.771	0.054	0.082	0.893
68		中心	37.33	0.04	21.16	31.21	2.32	2.07	2.11	0.20	0.00	98.45	0.091	0.768	0.059	0.070	0.896
69	X45	↓	37.84	0.04	21.33	31.54	2.32	2.09	2.51	0.32	0.00	98.00	0.092	0.773	0.058	0.079	0.895
70		↓	37.31	0.03	21.66	31.85	2.18	2.19	2.59	0.22	0.00	98.04	0.093	0.778	0.050	0.079	0.893
71		↓	37.20	0.06	21.32	32.96	1.43	2.31	2.72	0.16	0.00	98.18	0.098	0.783	0.035	0.084	0.889
72		↓	37.96	0.02	21.19	34.96	0.52	2.91	2.42	0.15	0.00	100.13	0.119	0.796	0.014	0.071	0.870
73		边缘	38.27	0.00	21.85	35.73	0.17	3.38	2.11	0.00	0.00	101.51	0.136	0.799	0.003	0.061	0.855
74		边缘	37.69	0.01	21.29	34.88	0.36	2.81	2.49	0.00	0.00	99.53	0.114	0.804	0.072	0.007	0.873
75		中间	38.08	0.02	21.24	31.16	2.50	2.06	1.92	0.12	0.00	98.09	0.093	0.780	0.066	0.060	0.893
76	X45	中间	38.44	0.00	21.21	31.49	2.54	2.19	1.98	0.12	0.00	98.00	0.098	0.776	0.066	0.060	0.888
77		接近 St	37.94	0.04	21.56	33.95	0.97	2.59	2.94	0.05	0.00	100.05	0.107	0.783	0.086	0.024	0.880
78		边缘	37.53	0.01	21.70	35.65	0.20	3.36	2.41	0.08	0.00	100.96	0.134	0.793	0.070	0.003	0.856
79		中间	37.22	0.00	21.91	32.19	0.98	2.80	2.43	0.46	0.01	98.00	0.124	0.780	0.022	0.075	0.863
80	X45	中间	37.56	0.05	21.49	33.22	0.84	2.74	2.46	0.04	0.01	98.42	0.116	0.789	0.074	0.021	0.872
81		接近 St	38.06	0.00	21.70	35.48	0.17	3.34	2.24	0.00	0.00	100.96	0.133	0.799	0.065	0.003	0.858
82		边缘	35.84	0.00	20.52	36.78	1.08	2.98	1.16	0.00	0.00	98.36	0.120	0.822	0.026	0.032	0.873
83		颗粒中心	35.47	0.11	20.47	26.94	9.26	0.97	4.73	0.10	0.00	98.05	0.039	0.612	0.137	0.212	0.940
84		↓	35.51	0.09	20.08	28.43	7.58	1.19	5.05	0.10	0.00	98.03	0.048	0.637	0.145	0.170	0.930
85		↓	36.08	0.08	20.72	32.05	5.86	1.62	4.05	0.11	0.00	100.57	0.064	0.696	0.112	0.128	0.916
86		↓	36.09	0.05	20.62	32.58	4.53	1.75	3.72	0.14	0.00	99.48	0.068	0.724	0.107	0.101	0.914
87		↓	35.70	0.00	20.41	32.84	4.04	1.87	3.39	0.12	0.00	98.37	0.071	0.737	0.097	0.091	0.908
88	X97	↓	35.65	0.04	20.57	33.84	3.55	2.00	3.29	0.00	0.00	98.94	0.080	0.745	0.093	0.080	0.903
89		↓	35.74	0.02	20.48	34.54	2.47	2.39	2.86	0.00	0.00	98.50	0.094	0.771	0.081	0.055	0.892
90		↓	35.82	0.00	20.37	34.97	1.51	2.73	2.60	0.00	0.00	98.00	0.110	0.781	0.074	0.031	0.877
91		↓	36.01	0.00	20.43	35.22	1.25	2.70	2.50	0.00	0.00	98.11	0.107	0.792	0.072	0.029	0.880
92		↓	35.84	0.00	20.52	36.78	1.08	2.98	1.16	0.00	0.00	98.36	0.120	0.822	0.033	0.026	0.873
93		接近 Pl	35.57	0.06	20.20	37.53	0.95	2.84	0.91	0.00	0.00	98.06	0.113	0.839	0.026	0.023	0.882
94		接近 Bi	35.84	0.00	21.98	35.85	0.97	3.13	1.15	0.03	0.00	98.95	0.126	0.818	0.020	0.035	0.866
95		颗粒中心	35.44	0.14	20.47	35.04	5.12	3.39	1.20	0.00	0.00	99.39	0.126	0.733	0.107	0.034	0.854
96	Y9	边缘	35.62	0.16	20.58	35.87	5.48	3.19	0.84	0.00	0.00	99.87	0.119	0.743	0.116	0.021	0.862

$X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe + Ca + Mn)$, $X_{Fe} = Fe/(Mg + Fe + Ca + Mn)$, $X_{Mn} = Mn/(Mg + Fe + Ca + Mn)$, $X_{Ca} = Ca/(Mg + Fe + Ca + Mn)$, $X_{FM} = Fe/(Mg + Fe)$.

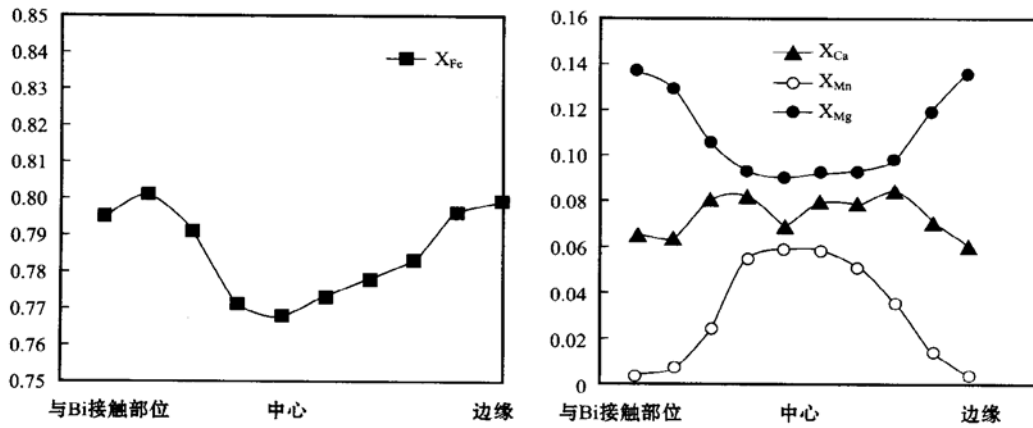


图 5 样品 X45 中的石榴石微区化学成分剖面图

Fig. 5 Microarea compositional profile of garnet in sample X45

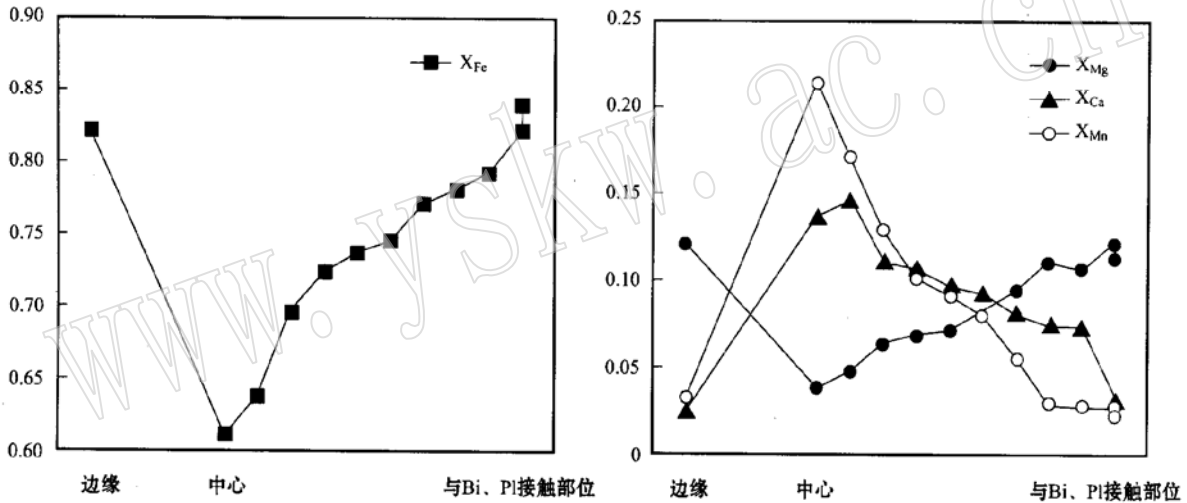


图 6 样品 X97 中的石榴石微区化学成分剖面图

Fig. 6 Microarea compositional profile of garnet in sample X97

X50 X45 X97 石榴石微区成分特征表明, 本区变质作用达到峰期阶段时, 结晶长大的石榴石、黑云母、十字石的接触部位已达到了边界平衡条件, 这种平衡条件一直保持到变质作用结束, 即在石榴石与黑云母、十字石接触部位不存在环带。很明显, 这种现象不可能是变质作用峰期后 Fe-Mg 交换反应和扩散作用造成的, 即不属于扩散环带, 而是由于绿泥石消耗石榴石呈现的曲型生长环带, 反映增温过程, 晶体最边缘的化学成分反映变质峰期的温度条件。

(4) 样品 Y9 中的石榴石

样品 Y9 为含榴硅线云母片岩, 石榴石呈直径 0.48 mm 的细粒, 自形, 浅粉红色, 颗粒中心与边缘成分较一致, MnO 含量较高, 晶体内无包体, 成分见

表 4。

2 石榴石、斜长石和黑云母微区成分变化的地质动力学意义

2.1 石榴石和黑云母微区铁镁含量变化特征及其成因意义

本区石榴石变斑晶具典型的生长环带, 由晶体中心向两侧边缘 X_{Mg}、X_{Fe} 值以光滑曲线递增, X_{Ca}、X_{Mn} 值以光滑曲线递减, 反映增温过程; 晶体最边缘的化学成分反映变质峰期的温度条件。

远离与石榴石接触带、孤立于长石石英之间的黑云母基质(如 X51)具有最低的 X_{Mg} 值, 表明其降温

过程中成分调整最轻微,应接近变质峰期成分,反映当时温度。

2.2 周潭群变质作用的 pTt 演化轨迹

从矿物组合、电子探针分析结果确定石榴石生长环带剖面,提出的相平衡解析式表达了一个热力学平衡体系。在外界温压条件下微量调整矿物成分相应改变的关系,利用这些解析式的联立方程组,可以求出矿物成分变化时相应的改变量,用矿物的成分环带计算出一系列的 p 、 T 值,在 $p-T$ 坐标图上的连线即为 pT 轨迹(Spear, 1982, 1986; Spear *et al.*, 1983)。利用样品 X97 中共生石榴子石环带得到 pT 轨迹的计算步骤为:

(1) 变质反应段的确定

样品 X97 由石榴石、黑云母、白云母、斜长石、十

字石和石英组成,根据石榴石的成分特点划分出的连续变质反应段由 H_2O 和 6 个矿物组成。视石榴石为 $Fe-Mg-Mn-Ca$ 四元固溶体,黑云母为 $Fe-Mg$ 二元固溶体,斜长石为 $Ca-Na$ 二元固溶体,十字石为 $Fe-Mg$ 二元固溶体,其余为纯相。这样独立相组分为 NP 为 13 个,选取体系组分为 $SiO_2-Al_2O_3-FeO-MgO-MnO-CaO-K_2O-Na_2O-H_2O(Nc=9)$,则有 $NP-Nc=4$ 个线性方程。再根据热力学关系及相组分微分方程,列出 9 个方程(石宏仁, 1987; 卢良兆, 1990; 甘晓春, 1991; Johnson and Vernon, 1995),方程中共有 12 个变量,自变量为 3,选取 dX_{Alm} 、 dX_{Sp} 、 dX_{Gro} 作为自变量可解得矩阵中其他变量(dT 、 dP 等)。

(2) 选取自变量变化值

石榴石的 dX_{Alm} 、 dX_{Sp} 、 dX_{Gro} 、 dX_{Pyr} 可通过成分

表 5 石榴石环带的 pT 轨迹定量计算结果

Table 5 Calculated results of pT paths of garnet zones

	石榴石				黑云母		斜长石		组分增量				$t/^\circ C$	p/GPa
	X_{Alm}	X_{Pyr}	X_{Sp}	X_{Gro}	X_{Phl}	X_{Ann}	X_{An}	X_{Ab}	dX_{Alm}	dX_{Pyr}	dX_{Gro}	dX_{An}		
中心 ↓ 边缘	0.612	0.039	0.212	0.137	0.514	0.486	0.164	0.836					382.4	0.234
	0.637	0.048	0.170	0.145					0.025	0.009	0.008	-0.0049	412.7	0.454
	0.695	0.064	0.128	0.112					0.058	0.016	-0.033	-0.0049	451.5	0.495
	0.724	0.068	0.101	0.107					0.029	0.004	-0.005	-0.0049	462.3	0.529
	0.737	0.075	0.091	0.097					0.013	0.007	-0.01	-0.0049	479.3	0.551
	0.747	0.080	0.080	0.093					0.010	0.005	-0.005	-0.0049	491.9	0.586
	0.771	0.094	0.055	0.081					0.024	0.014	-0.012	-0.0049	521.7	0.622
	0.781	0.110	0.035	0.074					0.010	0.016	-0.007	-0.0049	554.1	0.681
	0.792	0.108	0.029	0.072					0.011	-0.002	-0.002	-0.0049	553.5	0.689
	0.822	0.120	0.026	0.032					0.030	0.012	-0.04	-0.0049	571.0	0.581
边缘	0.839	0.113	0.023	0.026	0.554	0.446	0.115	0.885	0.017	-0.007	-0.006	-0.0049	559.6	0.498

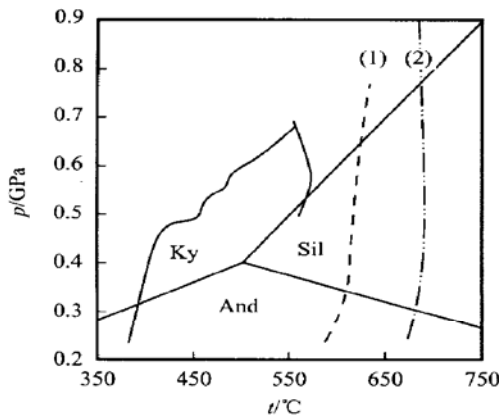


图 7 周潭群变质作用 pTt 轨迹

Fig. 7 Metamorphic pTt paths of Zhoutan Group Al_2SiO_5 相关系引自 Holdaway (1971): (1) $Ms+ Ab+ Q= Al_2SiO_5+ Kf+ H_2O$ (仿 Carmichael, 1978); (2) $St+ Q= Al_2SiO_5+ Gt+ H_2O$ (Richardson, 1968)

环带的计算得到,共生的黑云母、斜长石和十字石的成分变化不大,变化量可取其平均值。

(3) 确定初始温度和压力

计算自石榴石的环带中心开始,终点是石榴石环带边缘。与起点相对应的温度和压力条件由石榴石-黑云母温压计(Perchuk, 1981)计算得到,分别为 $382.4^\circ C$ 和 $0.234 GPa$,计算结果列于表 5。将各环节的温度、压力数据投在 $p-T$ 坐标图上并按先后顺序连结,得到 pT 轨迹(图 7)。

从图 7 可知:变质作用的增温部分、降压部分均位于蓝晶石区,且位于白云母斜长石石英分解反应的低温侧,虽然压力降低了近百兆帕,但温度变化却不大,具有顺时针形式,与大陆碰撞带的 pT 轨迹特征基本一致(Marc, 1987; Tuccillo and Mezger, 1992)。温度峰期滞后压力峰期,二者不同时出现,

即存在增温减压的热松弛过程, 峰期后出现减温减压过程, 说明该变质岩产于大陆碰撞带环境。

3 结论

通过上述研究, 本文得出如下结论:

(1) 本区石榴石变斑晶具典型的生长环带, 由晶体中心向两侧边缘, X_{Mg} 、 X_{Fe} 以光滑曲线递增, X_{Ca} 、 X_{Mn} 递减, 反映增温过程; 晶体最边缘的化学成分反映变质峰期的温度条件。

(2) 黑云母存在弱的成分环带, 而不同部位的斜长石 An 值变化不大(11.5~18.2)。

(3) 通过石榴石变斑晶生长环带剖面分析, 应用温压计确定本区变质作用 pT 轨迹为顺时针式, 发生于大陆碰撞环境。

References

- Gan Xiaochun. 1991. Recent development and heat simulation of metamorphism $p-T-t$ paths [J]. *Pre-cambrian Geology Abroad*, (3): 5~10 (in Chinese with English abstract).
- Hu Gongren, Liu Congqiang and Zhang Bangtong. 2000. Composition and structural metamorphism-deformation features of the central Jiangxi metamorphic zone [J]. *Regional Geology of China*, 19 (4): 375~381 (in Chinese with English abstract).
- Hu Gongren, Zhang Bangtong and Wang Changhua. 1997. First determination of the Neoproterozoic metamorphic rocks in Xiangshan, central Jiangxi Province [J]. *Regional Geology of China*, 16 (2): 222~224 (in Chinese with English abstract).
- Hu Gongren, Zhang Bangtong and Yu Ruilian. 1999. A Study on Sm-Nd and Rb-Sr isochron ages of the central Jiangxi metamorphic belt [J]. *Geological Review*, 45 (2): 129~134 (in Chinese with English abstract).
- Jin Shiqin. 1986. *Outline of Genetic Mineralogy* [M]. Changchun: Jilin University Press, 50~60 (in Chinese).
- Johnson S E and Vernon R H. 1995. Stepping stones and pitfalls in the determination of an anticlockwise $p-T-t$ deformation path: the low- p high- T Cooma Complex, Australia [J]. *J. Metamorphic Geol.*, 23: 165~183.
- Ling Xianzhang, Lu Liangzhao and Xu Xuechun. 2000. Characteristics and dynamic mechanism of eclogite metamorphism in Ludong (eastern Shandong) orogenic belt [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19 (2): 140~151 (in Chinese with English abstract).
- Lu Liangzhao. 1990. The Geological kinetics significance and metamorphism pTt paths [J]. *Pre-cambrian Geology Abroad*, (3): 4~19 (in Chinese with English abstract).
- Marc R S. 1987. Zoned Poikiloblastic Garnets: $p-T$ paths and syn-metamorphic uplift through 30 km of structural depth, Wopmay Orogen, Canada [J]. *Journal of Petrology*, 28 (1): 1~21.
- Perchuk L L. 1981. The effect of temperature and pressure on the equilibrium of natural iron-magnesium [J]. *Internation Geol. Review*, 882~884.
- Shi Hongren. 1987. The regional metamorphism $p-T-t$ paths and its application in studying metamorphism and orogenic zone [J]. *Geological Science and Technology Abroad*, (8): 30~36 (in Chinese with English abstract).
- Spear F S. 1982. Analytical formulation of phase equilibrium: The Gibbs Methods [A]. Ferry J M. *Characterization of Metamorphism through Mineral Equilibrium*[C]. *Min Soc Am. Reviews in Mineralogy*, 10: 105~152.
- Spear F S. 1986. $p-T$ path: A fortran program to calculation pressure-temperature paths from zoned metamorphic garnets [J]. *Computers and Geoscience*, 12 (3): 249~357.
- Spear F S and Selierstone J. 1983. Quantitative $p-T$ paths from zoned minerals: theory and tectonic applications [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 83 (3~4): 348~357.
- Tuccillo M E and Mezger K. 1992. Thermobarometry, geochronology and the interpretation of $p-T-t$ data in the Britt Domain Ontario Grenville Orogen Canada [J]. *Journal of Petrology*, 33 (6): 1225~1259.
- Yu Dagan, Ai Guigen, Huang Guofu, et al. 1999. Isotopic age features and their geological implication of the Zhoutan Group in Jiangxi [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 20 (2): 195~200 (in Chinese with English abstract).
- Yu Dagan, Guan Taiyang and Wang Guijin. 1993. The strata characteristics of Early Late Proterozoic Era in the border of Min, Zhe and Gan and its comparison with Banxi Group [J]. *Journal of East China Geological Institute*, 16 (4): 320~333 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 甘晓春. 1991. 变质作用 $p-T-t$ 轨迹的热模拟及其研究现状[J]. 国外前寒武纪地质, (3): 5~10.
- 胡恭任, 刘丛强, 章邦桐. 2000. 赣中变质岩带的组成及构造变形特征[J]. 中国区域地质, 19(4): 375~381.
- 胡恭任, 章邦桐, 王长华. 1997. 赣中相山新元古代变质岩的首次确定[J]. 中国区域地质, 16(2): 222~224.
- 胡恭任, 章邦桐, 于瑞莲. 1999. 赣中变质岩带的 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素年代研究[J]. 地质论评, 45(2): 129~134.
- 勒是琴. 1986. 成因矿物学概论[M](下册). 长春: 吉林大学出版社, 50~60.
- 凌贤长, 卢良兆, 徐学纯. 2000. 鲁东造山带榴辉岩变质作用特征及其动力学机制[J]. 岩石矿物学杂志, 19(2): 140~151.
- 卢良兆. 1990. 变质作用 pTt 轨迹及其地球动力学意义[J]. 国外前寒武纪地质, (3): 4~19.
- 石宏仁. 1987. 区域变质作用的压力-温度-时间(pTt)轨迹及其造山带构造和变质作用研究中的应用[J]. 国外地质科技, (8): 30~36.
- 余达淦, 艾桂根, 黄国夫, 等. 1999. 江西周潭群同位素年龄特征及其地质意义[J]. 地球学报, 20(2): 195~200.
- 余达淦, 管太阳, 王贵金. 1993. 闽、浙、赣边境晚元古代早期地层特征及与板溪群对比[J]. 华东地质学院学报, 16(4): 320~333.