

## 南非林波波带中央带 Sand River 地区 高压麻粒岩变质作用

张慧明, 郑常青, 徐学纯, 徐久磊, 韩晓萌, 周晓萍

(吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061)

**摘要:**南非林波波带中央带 Sand River 地区存在高压基性麻粒岩, 其峰期矿物组合为石榴石+单斜辉石+石英+钛铁矿+磁铁矿。岩石学研究表明, 该高压麻粒岩经历了两期退变质作用, 早期退变质阶段以斜方辉石和斜长石的出现为特征, 晚期退变质阶段以角闪石的出现为特征。传统温压计计算表明: 高压麻粒岩峰期变质温度为 820 °C~900 °C, 压力为 13.5~15.4 kbar; 早期退变质的形成温压为 800 °C~890 °C 和 8.8~11.2 kbar; 晚期退变质条件为 540 °C~650 °C 和 2.7~4.4 kbar。其退变质作用  $P$ - $T$  轨迹为顺时针型近等温降压到降温降压的过程。高压麻粒岩经历的这种顺时针  $P$ - $T$  轨迹通常发育在大陆碰撞环境, 指示其形成可能与津巴布韦克拉通、卡普瓦尔克拉通在碰撞后地壳快速剥露事件有关, 这对探讨林波波带中央带的构造演化具有重要意义。

**关键词:** 变质作用; 高压麻粒岩;  $P$ - $T$  轨迹; 林波波带; 大陆碰撞; Sand River 地区; 南非

**中图分类号:** P588.3

**文献标志码:** A

## Metamorphism of High-pressure Granulites in Sand River Area of the Central Zone of Limpopo Belt, South Africa

ZHANG Hui-ming, ZHENG Chang-qing, XU Xue-chun, XU Jiu-lei,

HAN Xiao-meng, ZHOU Xiao-ping

(College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China)

**Abstract:** High-pressure mafic granulite with a peak mineral assemblage of garnet+clinopyroxene+quartz+ilmenite+magnetite was found in Sand River area of the central zone of Limpopo Belt, South Africa. The high-pressure granulite experiences two stages of retrograde metamorphism. Early retrograde metamorphic stage is characterized by the appearance of orthopyroxene and plagioclase; late retrograde metamorphic stage is characterized by the appearance of amphibole.  $P$ - $T$  estimates suggests that the peak metamorphic conditions are 820 °C-900 °C and 13.5-15.4 kbar, which retrogress from the post-peak phase at 800 °C-890 °C and 8.8-11.2 kbar to the amphibolite facies at 540 °C-650 °C and 2.7-4.4 kbar. The three stages define a clockwise  $P$ - $T$  path with near-isothermal decompression and cooling following the peak high-pressure metamorphism. The granulites experience this clockwise  $P$ - $T$  paths, and usually develop in the continental collision setting. It means that the formation of high-pressure granulite relates to the crust fast stripping event after the collision of Zimbabwe craton and Kaapvaal craton. It is important for exploring the tectonic evolution in the central zone of Limpopo Belt.

收稿日期: 2016-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472164); 国土资源部公益性行业科研专项经费项目(201011083)

作者简介: 张慧明(1990-), 女, 辽宁沈阳人, 理学硕士研究生, E-mail: huiming9876@qq.com。

通讯作者: 郑常青(1962-), 男, 吉林榆树人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: zhengchangqing@jlu.edu.cn。

**Key words:** metamorphism; high-pressure granulite;  $P$ - $T$  path; Limpopo Belt; continental collision; Sand River area; South Africa

## 0 引言

南非林波波带(Limpopo Belt)是一个存在于津巴布韦克拉通与卡普瓦爾克拉通之间的太古代到元古代高级变质带<sup>[1-7]</sup>。林波波带作为位于两个太古代花岗岩—绿岩省之间(即津巴布韦克拉通与卡普瓦爾克拉通之间)高级变质带的独特例子,被普遍认为是卡普瓦爾克拉通与津巴布韦克拉通碰撞的产物<sup>[7-10]</sup>。林波波带3个分带的变质作用连同它们的岩浆作用和变形作用特征都归因于“林波波造山作用”——津巴布韦克拉通与卡普瓦爾克拉通安第斯—喜马拉雅型陆陆碰撞事件<sup>[2,11-12]</sup>。岩浆作用和变质作用的时间、类型和范围,近些年来许多学者都做了大量研究。他们已经做出了林波波带北边缘带、中央带及南边缘带不同的压力( $P$ )-温度( $T$ )-时间( $t$ )轨迹<sup>[6,13-23]</sup>,同时也引出了关于林波波带构造演化的许多争论。

中央带一般麻粒岩的减压事件已经被许多学者认可<sup>[13-14]</sup>,并且被认为是代表了津巴布韦克拉通与卡普瓦爾克拉通碰撞后地壳的快速剥露事件<sup>[13,24]</sup>。但对于中央带高压麻粒岩变质情况却鲜有报道。高压麻粒岩既可形成于汇聚型构造环境(如俯冲带、碰撞带等),也可形成于伸展型构造环境(如岛弧底部)<sup>[25-26]</sup>。研究高压麻粒岩的变质作用和 $P$ - $T$ - $t$ 轨迹已成为建立造山带演化构造模式的最重要途径之一。因此,研究大陆碰撞带内部的麻粒岩对认识区域大地构造演化具有重要意义。南非林波波带中央带 Sand River 地区高压麻粒岩为研究该区地壳演化的特殊性提供了良好条件。本文研究南非林波波带中央带 Sand River 地区存在的高压麻粒岩的岩石学、矿物学特征,通过温压计确定其各阶段的变质温压条件,并初步探讨其形成的大地构造背景。

## 1 区域地质背景

南非林波波带走向 NEE,延伸大约 700 km,宽度约 250 km<sup>[12]</sup>(图 1)。林波波带包含经过改造的太古代花岗岩—绿岩地体、早元古代盖层及经过褶皱和变质的基底<sup>[27]</sup>。林波波带根据其构造特征及岩性特征又可以进一步划分为:北边缘带(NMZ)、中央带(LCZ)及南边缘带(SMZ)。两条主要的剪切带和横推断层带将中央带和两个边缘带分隔开来

(图 1)。北边缘带、中央带及南边缘带呈对称构造,这是林波波带最具代表性的区域构造。中央带的构造方向和林波波带整体的构造方向斜交,北边缘带与南边缘带的构造方向和林波波带整体的构造方向大致平行。中央带与北边缘带的界限为三角剪切带(Triangle Shear Zone),与南边缘带的界限为帕拉拉剪切带(Palala Shear Zone)<sup>[2,7-10]</sup>。

中央带广泛存在深熔作用。中央带不管是在岩性特征还是构造特征上,与北边缘带和南边缘带都有很大区别。中央带具有经过多次变形变质的基底,存在林波波群,即具有经过强烈变质变形的盖层岩系,有斜长岩杂岩体;中央带的构造走向主要为 SN 向,构造形式与两个边缘带有明显区别<sup>[28]</sup>。

采样地点位于 Sand River 地区。Sand River 地区处于林波波带中央带穆西纳(Messina)东南部。Sand River 地区岩石类型以 Sand River 片麻岩为代表,Sand River 片麻岩由淡色片麻岩与灰色片麻岩组成[图 2(a)]。高压基性麻粒岩出露于 Sand River 淡色片麻岩之中[图 2(b)、(c)]。

## 2 岩相学及变质阶段划分

在野外露头上,南非林波波带 Sand River 地区高压麻粒岩呈灰绿至灰黑色,肉眼可见淡红色的石榴石[图 2(d)]。在偏光显微镜下,可见主要矿物有石榴石(Grt)、单斜辉石(Cpx)、斜方辉石(Opx)、斜长石(Pl)、石英(Qtz)、角闪石(Amph)、钛铁矿(Ilm)和磁铁矿(Mag)。其中大部分斜长石都发生了黝帘石化(图 3)。

石榴石呈自形—半自形,粒径为 3~6 mm,目估体积分数为 20%~22%。单斜辉石呈半自形—他形,粒径为 1~4 mm,体积分数为 15%~20%。斜方辉石呈半自形—他形,粒径为 1~3 mm,体积分数为 13%~15%。斜长石呈自形板状—他形,大部分斜长石已发生黝帘石化,体积分数为 20%~25%。角闪石呈柱状—他形粒状,粒径为 0.5~1.5 mm,体积分数为 2%~5%。部分辉石被角闪石替代。石英呈他形粒状,粒径为 1~6 mm,体积分数为 10%~15%。钛铁矿和磁铁矿为黑色不透明矿物,体积分数为 5%~8%。

根据南非林波波带中央带 Sand River 地区高压麻粒岩的矿物组合关系、结构特征,可划分出 3 个

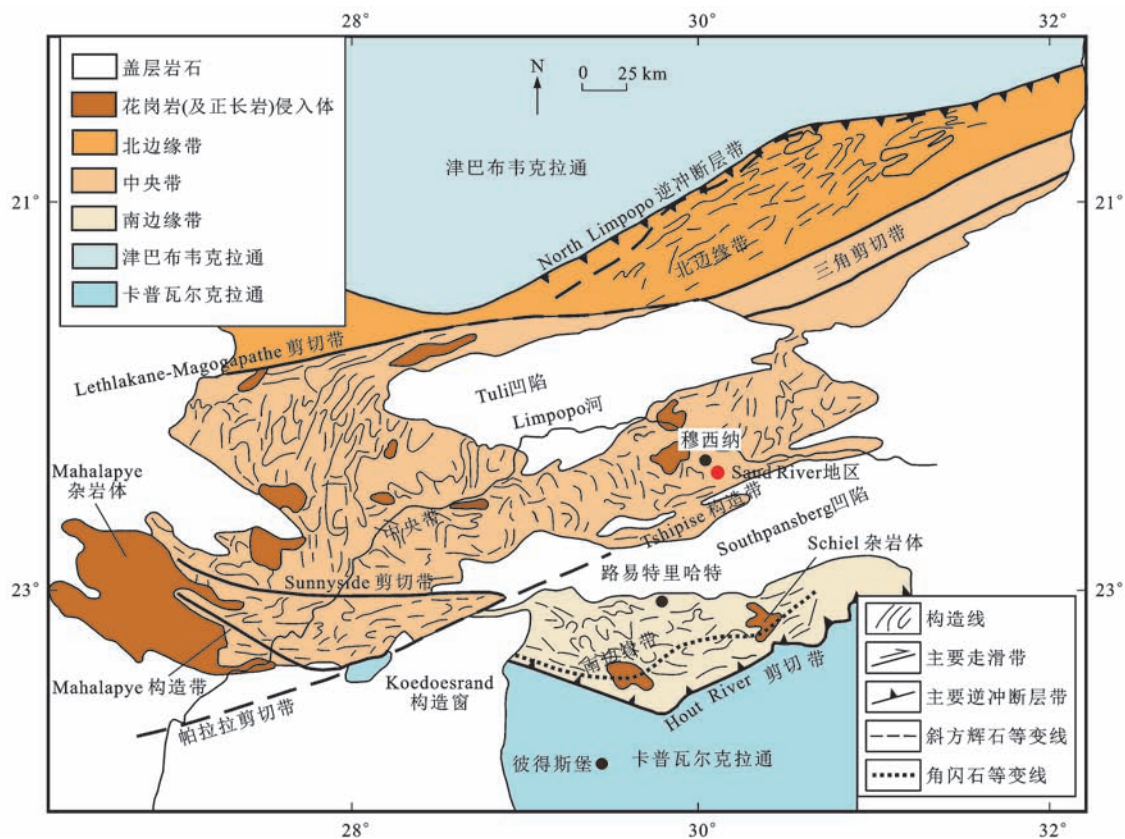


图1 南非林波波带地质图

Fig. 1 Geological Map of Limpopo Belt in South Africa



(a) Sand River片麻岩由淡色片麻岩与灰色片麻岩组成,并经历了多期次变形



(b) 高压基性麻粒岩I出露于Sand River淡色片麻岩之中



(c) 高压基性麻粒岩II出露于Sand River淡色片麻岩之中



(d) 高压麻粒岩呈灰绿至灰黑色,肉眼可见淡红色石榴石

图2 Sand River片麻岩及高压麻粒岩野外照片

Fig. 2 Field Images of Sand River Gneiss and High-pressure Granulites



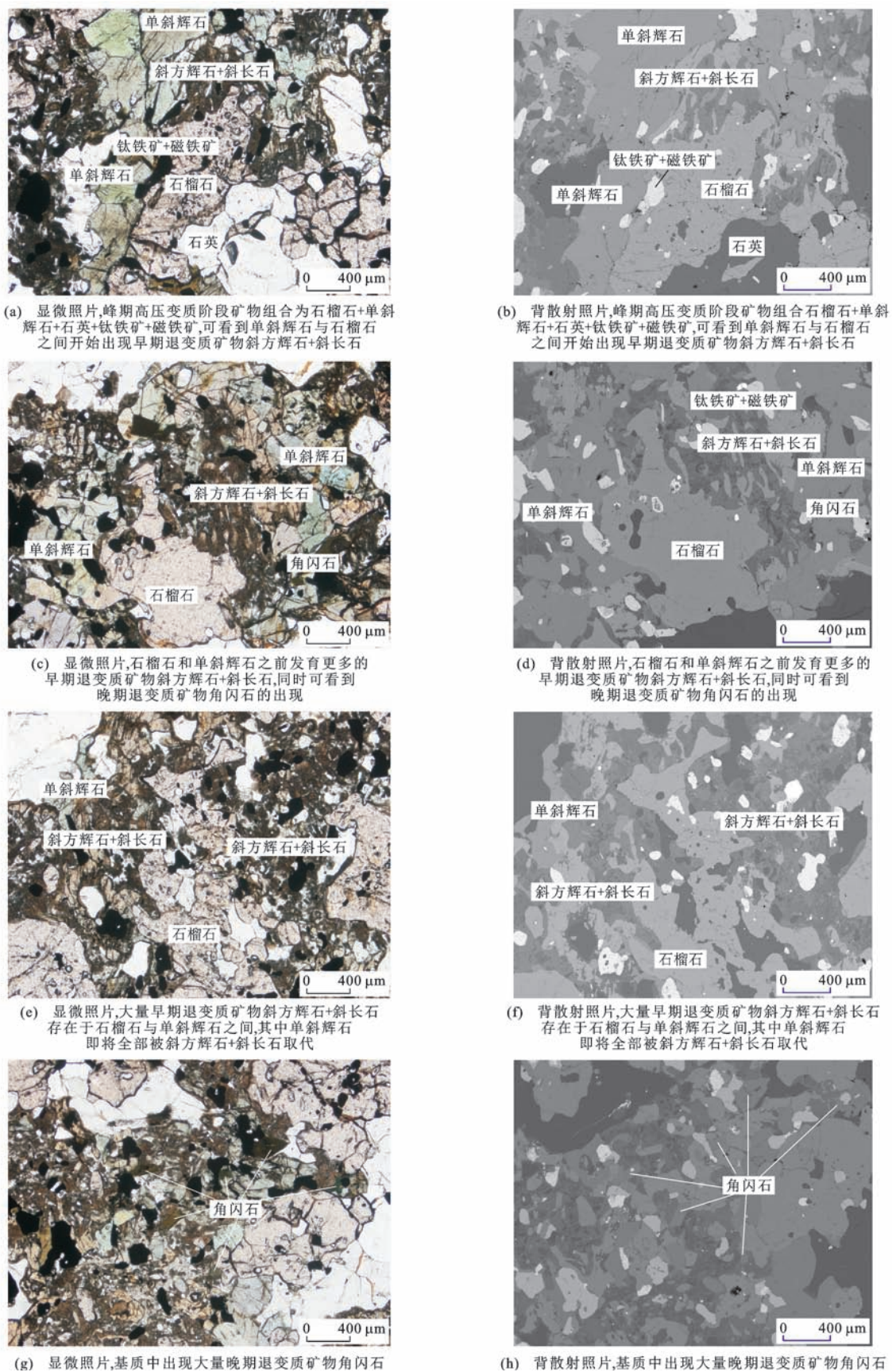


图 3 高压麻粒岩显微照片及背散射照片

Fig. 3 Photomicrographs and Back-scattered Electron Images of High-pressure Granulites

变质阶段。

(1) 峰期高压变质阶段(M1): 该阶段峰期矿物组合为石榴石+单斜辉石+石英+钛铁矿+磁铁矿。这一阶段可以看到石榴石、单斜辉石、石英、钛铁矿和磁铁矿共生, 是典型的高压麻粒岩相变质矿物组合, 表明其经历了高压麻粒岩相变质作用。

(2) 早期退变质阶段(M2): 该阶段以石榴石和单斜辉石之间发育的斜方辉石和大部分经历黝帘石化的斜长石为特征, 为过峰期退变质阶段。斜方辉石和黝帘石化斜长石已部分或全部取代了石榴石与单斜辉石。该阶段矿物组合为斜方辉石+斜长石+石榴石+单斜辉石+石英。从 M1 到 M2 阶段, 推测可能的变质反应是: 石榴石+单斜辉石+石英→斜方辉石+斜长石。

(3) 晚期退变质阶段(M3): 该阶段以基质中出现退变质角闪石为特征。该阶段矿物组合为角闪石+斜长石+斜方辉石+石榴石+单斜辉石+石英。从 M2 到 M3 阶段, 推测可能的变质反应是: 石榴石+单斜辉石+石英+H<sub>2</sub>O→角闪石+斜长石; 单斜辉石+H<sub>2</sub>O→角闪石。

### 3 矿物化学分析

矿物成分电子探针分析在吉林大学地球科学学院测试中心完成。所用仪器为日本 JEOL JXA-8230 型电子探针仪; 测试条件为加速电压 15 kV, 束流 10 nA, 束斑 1 μm; 标样为 SPI 53 硅酸盐或氧化物。矿物成分见表 1~3, 矿物端元组分计算使用 Geokit 及 AX 程序。

表 1 高压麻粒岩石榴石矿物成分的电子探针分析结果

Tab. 1 Electron Microprobe Analysis Results of Representative Compositions of Garnet from High-pressure Granulites

参数	核部	核部	核部	核部	幔部	幔部	幔部	幔部	幔部	边部	边部	边部	边部
w(SiO <sub>2</sub> )/%	37.92	37.84	37.88	38.46	38.37	37.82	37.84	38.19	37.51	37.66	37.74	37.95	37.85
w(TiO <sub>2</sub> )/%	0.000	0.006	0.117	0.059	0.012	0.046	0.074	0.036	0.080	0.000	0.014	0.044	0.000
w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%	21.38	21.31	21.47	20.73	21.56	21.46	20.48	20.25	20.24	21.27	20.94	20.40	20.49
w(Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%	0.019	0.008	0.008	0.000	0.022	0.000	0.043	0.054	0.000	0.000	0.035	0.000	0.099
w(FeO)/%	27.86	27.64	27.91	28.20	28.87	28.22	28.47	28.61	29.55	29.68	29.20	29.44	29.61
w(MnO)/%	0.541	0.583	0.577	0.570	0.599	0.579	0.671	0.585	0.720	0.818	0.662	0.692	0.741
w(MgO)/%	3.926	3.705	3.775	3.857	3.512	3.810	3.922	3.782	3.669	3.331	3.268	3.590	3.507
w(CaO)/%	8.436	8.265	8.220	8.430	7.925	8.320	8.176	7.731	7.464	7.288	7.548	7.381	7.269
w(Na <sub>2</sub> O)/%	0.000	0.030	0.037	0.027	0.004	0.011	0.000	0.002	0.000	0.000	0.011	0.002	0.005
w(K <sub>2</sub> O)/%	0.000	0.018	0.005	0.000	0.000	0.032	0.006	0.000	0.000	0.002	0.008	0.000	0.000
w <sub>total</sub> /%	100.10	99.41	100.00	100.30	100.90	100.30	99.68	99.23	99.23	100.00	99.43	99.50	99.56
Si 原子数	2.980	2.996	2.981	3.021	3.004	2.969	2.995	3.040	2.994	2.982	3.006	3.021	3.013
Ti 原子数	0.000	0.000	0.007	0.003	0.001	0.003	0.004	0.002	0.005	0.000	0.001	0.003	0.000
Al 原子数	1.981	1.989	1.993	1.919	1.989	1.987	1.912	1.901	1.904	1.986	1.966	1.915	1.923
Cr 原子数	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.003	0.003	0.000	0.000	0.002	0.000	0.006
Fe <sup>3+</sup> 原子数	0.057	0.025	0.036	0.035	0.001	0.075	0.087	0.011	0.097	0.050	0.020	0.039	0.046
Fe <sup>2+</sup> 原子数	1.774	1.806	1.801	1.817	1.889	1.778	1.797	1.894	1.875	1.915	1.925	1.921	1.925
Mn 原子数	0.036	0.039	0.038	0.038	0.040	0.039	0.045	0.039	0.049	0.055	0.045	0.047	0.050
Mg 原子数	0.460	0.437	0.443	0.452	0.410	0.446	0.463	0.449	0.436	0.393	0.388	0.426	0.416
Ca 原子数	0.710	0.701	0.693	0.710	0.665	0.700	0.693	0.660	0.638	0.618	0.644	0.630	0.620
Na 原子数	0.000	0.005	0.006	0.004	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001
K 原子数	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
原子数之和	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
Mg <sup>#</sup> 值	0.206	0.195	0.197	0.199	0.178	0.201	0.205	0.192	0.189	0.170	0.168	0.182	0.178
镁铝榴石含量/%	15.15	14.54	14.71	14.80	13.64	14.69	15.00	14.71	14.10	12.97	12.84	13.91	13.62
铁铝榴石含量/%	60.28	60.85	61.00	60.70	62.91	61.00	61.07	62.40	63.71	64.82	64.36	64.00	64.47
钙铝榴石含量/%	23.39	23.31	23.02	23.25	22.13	23.05	22.47	21.60	20.62	20.39	21.32	20.56	20.28
锰铝榴石含量/%	1.186	1.300	1.277	1.243	1.322	1.268	1.458	1.292	1.572	1.810	1.478	1.524	1.634

注: w(·) 为元素或化合物含量(质量分数, 下同); w<sub>total</sub> 为主量元素总含量。

表 2 高压麻粒岩单斜辉石、钛铁矿及磁铁矿矿物成分的电子探针分析结果

Tab. 2 Electron Microprobe Analysis Results of Representative Compositions of Clinopyroxene, Ilmenite and Magnetite from High-pressure Granulites

参数	单斜辉石	单斜辉石	单斜辉石	单斜辉石	单斜辉石	单斜辉石	单斜辉石	单斜辉石	单斜辉石	单斜辉石	钛铁矿	钛铁矿	磁铁矿
w(SiO <sub>2</sub> )/%	50.420	50.670	51.020	51.120	48.940	50.770	50.580	50.550	50.510	51.160	0.073	0.030	0.024
w(TiO <sub>2</sub> )/%	0.145	0.158	0.138	0.154	0.199	0.207	0.210	0.187	0.200	0.175	51.230	51.480	0.063
w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%	1.557	1.644	1.335	0.882	1.941	1.308	1.799	1.921	1.946	1.103	0.000	0.000	0.007
w(Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%	0.000	0.031	0.000	0.000	0.000	0.089	0.000	0.037	0.031	0.036	0.113	0.030	0.005
w(FeO)/%	15.65	16.83	16.60	15.97	21.47	15.23	16.29	17.01	15.87	15.12	49.32	47.45	75.35
w(MnO)/%	0.130	0.192	0.192	0.194	0.189	0.146	0.161	0.135	0.229	0.174	0.392	0.325	0.000
w(MgO)/%	9.313	9.691	9.762	9.704	9.335	9.809	9.131	9.299	9.178	9.828	0.019	0.000	0.013
w(CaO)/%	21.59	20.85	21.06	22.04	17.00	22.00	21.20	20.59	21.85	22.56	0.00	0.00	0.00
w(Na <sub>2</sub> O)/%	0.179	0.240	0.212	0.199	0.210	0.210	0.260	0.253	0.279	0.207	0.042	0.000	0.027
w(K <sub>2</sub> O)/%	0.037	0.000	0.039	0.013	0.018	0.000	0.000	0.023	0.009	0.000	0.004	0.000	0.000
w <sub>total</sub> /%	99.02	100.30	100.40	100.30	99.30	99.77	99.63	100.00	100.10	100.40	101.10	99.32	75.49
Si 原子数	1.962	1.952	1.962	1.968	1.931	1.959	1.958	1.952	1.947	1.963	0.002	0.001	0.001
Ti 原子数	0.004	0.005	0.004	0.004	0.006	0.006	0.006	0.005	0.006	0.005	0.959	0.983	0.002
Al 原子数	0.071	0.075	0.061	0.040	0.090	0.059	0.082	0.087	0.088	0.050	0.000	0.000	0.000
Cr 原子数	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000
Fe <sup>3+</sup> 原子数	0.018	0.045	0.037	0.045	0.079	0.036	0.014	0.024	0.038	0.043	0.075	0.031	1.992
Fe <sup>2+</sup> 原子数	0.490	0.495	0.495	0.468	0.625	0.454	0.513	0.525	0.472	0.441	0.952	0.977	1.002
Mn 原子数	0.004	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005	0.005	0.004	0.007	0.006	0.008	0.007	0.001
Mg 原子数	0.540	0.557	0.560	0.557	0.549	0.564	0.527	0.535	0.528	0.562	0.001	0.000	0.001
Ca 原子数	0.900	0.861	0.868	0.909	0.719	0.909	0.879	0.852	0.902	0.927	0.000	0.000	0.000
Na 原子数	0.014	0.018	0.016	0.015	0.016	0.016	0.020	0.019	0.021	0.015	0.002	0.000	0.003
K 原子数	0.002	0.000	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
原子数之和	4.005	4.013	4.011	4.013	4.022	4.011	4.004	4.007	4.011	4.013	2.001	2.000	3.002
Mg <sup>#</sup> 值	0.524	0.529	0.530	0.544	0.468	0.554	0.507	0.505	0.528	0.561			
硅灰石含量/%	45.76	43.44	43.79	45.47	36.05	45.84	44.91	43.49	45.84	46.51			
顽火辉石含量/%	27.47	28.09	28.25	27.85	27.54	28.44	26.92	27.33	26.80	28.20			
铁辉石含量/%	26.08	27.57	27.17	25.94	35.61	24.93	27.18	28.22	26.29	24.53			
锥辉石含量/%	0.687	0.905	0.798	0.743	0.806	0.792	0.997	0.967	1.060	0.772			

### 3.1 石榴石

石榴石成分剖面见图 4(b)。石榴石主要成分为铁铝榴石(Alm)、镁铝榴石(Prp)、钙铝榴石(Grs),含 1%~2%的锰铝榴石(Sps),具有轻微的退变质扩散环带,成分环带不明显。石榴石核部组分平均为 Prp<sub>15.1</sub> Alm<sub>60.3</sub> Grs<sub>23.4</sub> Sps<sub>1.2</sub>,Mg<sup>#</sup> 值为 0.17~0.21;边部组分平均为 Prp<sub>13.0</sub> Alm<sub>64.8</sub> Grs<sub>20.4</sub> Sps<sub>1.8</sub>,Mg<sup>#</sup> 值为 0.14~0.17。

石榴石与斜方辉石+斜长石接触部位,铁铝榴石含量升高,镁铝榴石与钙铝榴石含量降低。在退变质形成斜方辉石+斜长石的过程中,石榴石边部流失了 Mg 与 Ca,具有典型退变边特点。

### 3.2 单斜辉石

单斜辉石成分投图见图 4(a)。单斜辉石为次透辉石、铁次透辉石、普通辉石和铁普通辉石,Mg<sup>#</sup> 值为 0.47~0.57。

### 3.3 斜方辉石

斜方辉石形成于早期退变质阶段(M2)。斜方辉石的 Mg<sup>#</sup> 值为 0.36~0.41,顽火辉石(En)含量为 35.5%~38.8%,铁辉石(Fs)含量为 61.1%~64.4%。该斜方辉石为铁紫苏辉石。

### 3.4 角闪石

角闪石主要为铁镁钙闪石(Fts)和钙镁闪石(Ts),还有少量镁普通角闪石(Mg-Hbl)和绿钙闪石(Hs)。



表 3 高压麻粒岩斜方辉石、斜长石及角闪石矿物成分的电子探针分析结果

Tab. 3 Electron Microprobe Analysis Results of Representative Compositions of Orthopyroxene, Plagioclase and Amphibole from High-pressure Granulites

参数	斜方辉石	斜方辉石	斜方辉石	斜方辉石	斜方辉石	斜长石	斜长石	斜长石	斜长石	角闪石	角闪石	角闪石	角闪石
w(SiO <sub>2</sub> )/%	49.08	49.79	49.03	48.56	49.50	46.10	46.82	45.20	45.22	41.08	47.25	40.45	42.33
w(TiO <sub>2</sub> )/%	0.030	0.048	0.086	0.080	0.105	0.000	0.000	0.029	0.000	1.709	0.093	1.236	1.701
w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%	0.680	0.746	0.756	0.933	0.859	35.160	34.190	34.770	35.320	11.460	7.285	12.380	11.530
w(Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%	0.000	0.000	0.006	0.011	0.003	0.003	0.000	0.000	0.003	0.035	0.000	0.000	0.000
w(FeO)/%	36.590	35.010	36.380	36.740	36.260	0.225	0.223	0.250	0.501	21.690	20.400	22.140	18.740
w(MnO)/%	0.378	0.298	0.440	0.363	0.359	0.000	0.000	0.063	0.000	0.079	0.135	0.041	0.057
w(MgO)/%	12.090	12.590	12.120	11.640	11.380	0.006	0.004	0.000	0.000	7.054	9.608	6.658	8.843
w(CaO)/%	0.804	0.744	0.668	0.976	0.905	17.970	17.280	18.260	18.350	11.400	11.460	11.630	11.340
w(Na <sub>2</sub> O)/%	0.000	0.039	0.002	0.000	0.038	1.361	1.597	1.261	1.051	1.046	0.463	1.208	1.183
w(K <sub>2</sub> O)/%	0.000	0.023	0.002	0.000	0.012	0.074	0.044	0.011	0.035	1.492	0.468	1.416	1.219
w <sub>total</sub> /%	99.65	99.29	99.49	99.29	99.42	100.90	100.20	99.84	100.50	97.04	97.16	97.15	96.94
Si 原子数	1.974	1.990	1.973	1.964	1.976	2.104	2.147	2.089	2.076	6.311	7.028	6.227	6.392
Ti 原子数	0.001	0.001	0.003	0.002	0.003	0.000	0.000	0.001	0.000	0.197	0.010	0.143	0.193
Al 原子数	0.032	0.035	0.036	0.044	0.041	1.892	1.848	1.895	1.912	2.075	1.277	2.246	2.051
Cr 原子数	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000
Fe <sup>3+</sup> 原子数	0.028	0.000	0.020	0.032	0.007	0.009	0.009	0.010	0.019	0.546	0.772	0.539	0.529
Fe <sup>2+</sup> 原子数	1.199	1.172	1.202	1.207	1.228	0.000	0.000	0.000	0.000	2.240	1.764	2.311	1.838
Mn 原子数	0.013	0.010	0.015	0.012	0.012	0.000	0.000	0.002	0.000	0.010	0.017	0.005	0.007
Mg 原子数	0.725	0.750	0.727	0.702	0.691	0.000	0.000	0.000	0.000	1.616	2.131	1.528	1.991
Ca 原子数	0.035	0.032	0.029	0.042	0.040	0.879	0.849	0.904	0.903	1.877	1.825	1.918	1.835
Na 原子数	0.000	0.003	0.000	0.000	0.003	0.120	0.142	0.113	0.094	0.312	0.134	0.361	0.346
K 原子数	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.004	0.003	0.001	0.002	0.292	0.089	0.278	0.235
原子数之和	4.007	3.995	4.005	4.007	4.002	5.008	4.997	5.015	5.006	15.480	15.050	15.560	15.420
Mg <sup>#</sup> 值	0.377	0.390	0.377	0.368	0.360					0.419	0.547	0.398	0.520
硅灰石含量/%	1.732	1.619	1.445	2.119	1.994								
顽火辉石含量/%	36.24	38.13	36.48	35.16	34.89								
铁辉石含量/%	62.03	60.10	62.07	62.72	62.96								
锥辉石含量/%	0.000	0.154	0.008	0.000	0.152								
n(Ca)/(n(Ca)+n(Na))						0.879	0.857	0.889	0.906				
钙长石含量/%						87.57	85.45	88.83	90.42				
钠长石含量/%						12.00	14.29	11.10	9.373				
正长石含量/%						0.429	0.259	0.064	0.205				

注:n(·)为元素原子数。

3.5 斜长石

斜长石主要出现在石榴石边缘,退变质斜方辉石+斜长石后成合晶中,与辉石或角闪石相互交生。大部分斜长石已发生黝帘石化。钙长石含量为82.1%~90.4%,为培长石-钙长石。

4 高压基性麻粒岩变质作用演化

麻粒岩的岩相学特征、矿物成分特征表明,该岩

石经历了至少两阶段的退变质过程。根据矿物岩相学分析以及矿物化学数据,使用传统的矿物温压计对不同阶段的变质作用温压条件进行计算。

由于岩石中石英含量较高,岩石 SiO<sub>2</sub> 过饱和,可以采用 Green 等通过石英拉斑玄武岩成分试验得出的斜长石不稳定反应线<sup>[29]</sup> 限定高压麻粒岩的下限压力。Green 等根据岩石化学成分以及温压条件,确定了“石榴石出现”和“斜长石消失”反应分界

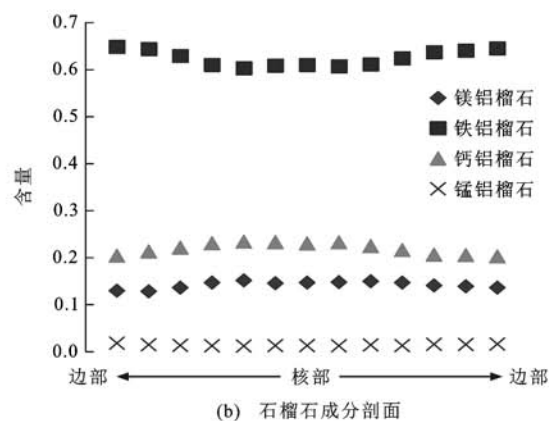
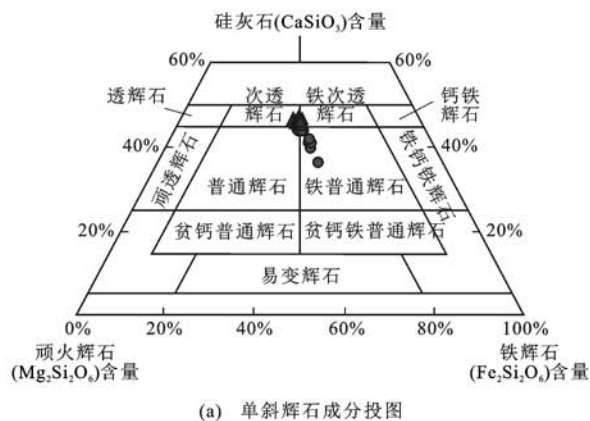


图4 单斜辉石成分投图及石榴石成分剖面

Fig. 4 Compositional Diagrams of Clinopyroxene and Garnet

线,并在  $P-T$  图中给出了“斜方辉石-单斜辉石-斜长石”、“石榴石-斜方辉石-单斜辉石-斜长石”和“石榴石-单斜辉石-石英”3个分区<sup>[29]</sup>。对于峰期高压变质阶段(M1)高压矿物组合石榴石-单斜辉石-石英,采用石榴石-单斜辉石的 Fe-Mg 交换地质温度计进行计算。利用石榴石的核部成分及单斜辉石成分,采用 Ravna 的石榴石-单斜辉石温度计<sup>[30]</sup>,得到峰期变质温度为  $820\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据斜长石的不稳定反应线,得到该温度范围相对应的压力为  $13.5\sim 15.4\text{ kbar}$ 。

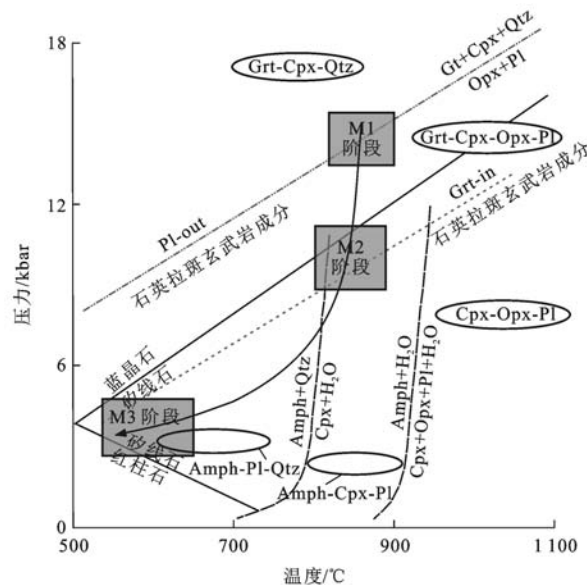
早期退变质阶段(M2)斜方辉石+斜长石的变质条件,使用石榴石的边部成分及相邻的斜方辉石+斜长石成分,采用石榴石-斜方辉石-斜长石-石英温压计来计算其形成条件。采用 Lal 的石榴石-斜方辉石-斜长石-石英温压计<sup>[31]</sup>、Bhattacharya 等的石榴石-斜方辉石-斜长石-石英温压计<sup>[32]</sup>,得到早期退变质阶段(M2)温压条件为  $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 890\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=8.8\sim 11.2\text{ kbar}$ 。该阶段变质温度与变质峰期的温度接近,但压力明显降低,属于典型的近等温降压(ITD型) $P-T$  轨迹。

对于晚期出现角闪石的温压条件计算,采用 Gerya 等的角闪石单矿物温压计<sup>[33]</sup>,得到晚期退变质阶段(M3)温压条件为  $T=540\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=2.7\sim 4.4\text{ kbar}$ 。与早期退变质阶段相比,该阶段温度、压力有明显下降。

以上3个变质阶段的温压条件计算结果表明,林波波带中央带 Sand River 地区高压基性麻粒岩记录了顺时针型退变质作用  $P-T$  轨迹,其中包含近等温降压、之后降温降压的两个阶段退变质过程(图5)。

## 5 高压基性麻粒岩形成时代及地质意义

区域变质高压麻粒岩形成于地壳加厚或热地壳



Pl-out 和 Grt-in 界线引自文献<sup>[29]</sup>;角闪石反应线及变质相划分引自文献<sup>[34]</sup>;图件引自文献<sup>[35]</sup>和<sup>[36]</sup>,有所修改

图5 高压麻粒岩变质作用  $P-T$  轨迹

Fig. 5 Metamorphism  $P-T$  Paths of High-pressure Granulite 俯冲进入岩石圈地幔等构造环境<sup>[37-38]</sup>。该麻粒岩可能形成于卡普瓦拉克拉通与津巴布韦克拉通的碰撞过程。林波波带中央带 Sand River 地区高压基性麻粒岩经历的这种顺时针近等温降压  $P-T$  轨迹与林波波带的陆陆碰撞构造体制是一致的。这种  $P-T$  轨迹的形成,通常与快速的剥蚀抬升或深大逆冲断裂上盘的快速抬升有关<sup>[39-42]</sup>。

目前,对卡普瓦拉克拉通和津巴布韦克拉通碰撞的时间存在很大争论。一种观点认为,地质年代学、构造以及变质证据表明,中央带在  $2.0\text{ Ga}$  经历了构造变质事件, $2.0\text{ Ga}$  变质事件以卡普瓦拉克拉通和津巴布韦克拉通碰撞的挤压造山为代表<sup>[6,17,43-44]</sup>;另一种观点认为,两个克拉通是在  $2.6\text{ Ga}$



碰撞的,而不是 2.0 Ga,2.0 Ga 变质事件与太古代剪切带的再活化有关<sup>[2,11-12,45]</sup>。2.0 Ga 变质事件的变质变形在北边缘带南部观察明显,而在南边缘带观察不到<sup>[46]</sup>。

尽管碰撞的时间存在争论,但中央带峰期变质情况和顺时针演化轨迹是被认可的。而随后的抬升冷却历史存在争论,中央带的退变质轨迹表明其是“弹出式”的近等温降压轨迹<sup>[13-14,16]</sup>,或者是受剥蚀作用控制的与折返作用有关的稳定降温降压轨迹<sup>[20-22]</sup>。

本文采集的中央带 Sand River 地区高压麻粒岩首先经历了近等温降压的过程,之后在中压条件下发生水化及冷却的降温降压过程。本文所研究的高压麻粒岩与 Ichihashi 等报道的 Beitbridge 附近麻粒岩的变质条件<sup>[47]</sup>相似,峰期变质条件为  $T=825\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P>10\text{ kbar}$ ,之后经历近等温降压变质过程,温压条件为  $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=3\sim 5\text{ kbar}$ 。Jaeckel 等通过 Messina 地区变质锆石的研究,认为文献<sup>[47]</sup>报道的麻粒岩相变质作用发生在 2.0 Ga<sup>[17]</sup>。

Jaeckel 等提出 Sand River 地区的 Sand River 片麻岩经历了 3 期变质变形事件,这 3 期变质变形事件分别发生在 3.24 Ga、2.61~2.64 Ga 和 2.01~2.03 Ga<sup>[17]</sup>。通过野外观察[图 2(d)],Sand River 片麻岩第 3 期变形事件(D3)与高压麻粒岩的形成应为同一时期(2.01~2.03 Ga)。Droop 认为中央带只经历一次麻粒岩相变质作用<sup>[14]</sup>,Jaeckel 等通过定年研究认为该麻粒岩相变质事件发生在 2.00~2.03 Ga<sup>[17]</sup>。综合前人研究,推断 Sand River 地区高压麻粒岩可能形成于 2.0 Ga,可能与陆陆碰撞过程中地壳加厚有关,岩体在经历地壳加厚及麻粒岩相变质之后,由于构造运动,被快速抬升到地壳浅部,发育了近等温降压的退变质作用  $P-T$  轨迹。在地壳浅部层位,岩体可能受到流体影响,经历了晚期的角闪岩相变质作用<sup>[48]</sup>。通过 Sand River 地区高压麻粒岩的研究并结合前人研究成果,笔者支持中央带的退变质轨迹为“弹出式”的近等温降压型。中央带在地壳加厚及麻粒岩相变质之后快速抬升冷却的变质条件与世界其他高级变质岩体的变质特征相类似。这也支持了最早提出的“林波波造山事件”(至少对于中央带来说)发生在大约 2.0 Ga 的观点<sup>[17]</sup>。

## 6 结 语

(1)南非林波波带中央带 Sand River 地区存在

高压基性麻粒岩。麻粒岩的峰期高压变质阶段矿物组合为石榴石+单斜辉石+石英+钛铁矿+磁铁矿,峰期变质温压条件为  $T=820\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=13.5\sim 15.4\text{ kbar}$ 。该高压麻粒岩经历了两期退变质作用:早期退变质阶段矿物组合为斜方辉石+斜长石+石榴石+单斜辉石+石英,早期退变质的形成温压为  $800\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 890\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $8.8\sim 11.2\text{ kbar}$ ;晚期退变质阶段矿物组合为角闪石+斜长石+斜方辉石+石榴石+单斜辉石+石英,晚期退变质条件为  $540\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $2.7\sim 4.4\text{ kbar}$ 。退变质作用  $P-T$  轨迹为顺时针型近等温降压到降温降压的过程。

(2)高压麻粒岩可能形成于 2.0 Ga,可能与陆陆碰撞过程中地壳加厚有关。岩体在经历地壳加厚及麻粒岩相变质之后,由于构造运动,被快速抬升到地壳浅部,发育了近等温降压的退变质作用  $P-T$  轨迹。在地壳浅部层位,岩体可能受到流体影响,经历了晚期的角闪岩相变质作用。

## 参考文献:

## References:

- [1] VAN REENEN D D, BARTON J M, ROERING C, et al. Deep Crystal Response to Continental Collision: The Limpopo Belt of Southern Africa[J]. *Geology*, 1987, 15(1): 11-14.
- [2] ROERING C, REENEN D D V, SMIT C A, et al. Tectonic Model for the Evolution of the Limpopo Belt[J]. *Precambrian Research*, 1992, 55 (1/2/3/4): 539-552.
- [3] ROLLINSON H, BLENKINSOP T. The Magmatic, Metamorphic and Tectonic Evolution of the Northern Marginal Zone of the Limpopo Belt in Zimbabwe[J]. *Journal of the Geological Society*, 1995, 152(1): 65-75.
- [4] KAMBER B S, BLENKINSOP T G, VILLA I M, et al. Proterozoic Transpressive Deformation in the Northern Marginal Zone, Limpopo Belt, Zimbabwe[J]. *The Journal of Geology*, 1995, 103(5): 493-508.
- [5] KAMBER B S, KRAMERS J D, NAPIER R, et al. The Triangle Shearzone, Zimbabwe, Revisited: New Data Document an Important Event at 2.0 Ga in the Limpopo Belt[J]. *Precambrian Research*, 1995, 70(3/4): 191-213.
- [6] HOLZER L, FREI R, BARTON J M, et al. Unravelling the Record of Successive High Grade Events in the Central Zone of the Limpopo Belt Using Pb Single Phase Dating of Metamorphic Minerals[J]. *Precambrian Research*, 1998, 87(1/2): 87-115.

- [7] HOLZER L, BARTON J M, PAYA B K, et al. Tectonothermal History of the Western Part of the Limpopo Belt; Tectonic Models and New Perspectives [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1999, 28(2): 383-402.
- [8] MCCOURI S, VEARNCOMBE J R. Shear Zones Bounding the Central Zone of the Limpopo Mobile Belt, Southern Africa [J]. *Journal of Structural Geology*, 1987, 9(2): 127-137.
- [9] MCCOURT S, VEARNCOMBE J R. Shear Zones of the Limpopo Belt and Adjacent Granitoid-greenstone Terranes; Implications for Late Archaean Collision Tectonics in Southern Africa [J]. *Precambrian Research*, 1992, 55(1/2/3/4): 553-570.
- [10] SCHALLER M, STEINER O, STUDER I, et al. Exhumation of Limpopo Central Zone Granulites and Dextral Continent-scale Transcurrent Movement at 2.0 Ga Along the Palala Shear Zone, Northern Province, South Africa [J]. *Precambrian Research*, 1999, 96(3/4): 263-288.
- [11] TRELOAR P J, COWARD M P, HARRIS N B W. Himalayan-Tibetan Analogies for the Evolution of the Zimbabwe Craton and Limpopo Belt [J]. *Precambrian Research*, 1992, 55(1/2/3/4): 571-587.
- [12] VAN REENEN D D, ROERING C, ASHWAL L D, et al. Regional Geological Setting of the Limpopo Belt [J]. *Precambrian Research*, 1992, 55(1/2/3/4): 1-5.
- [13] HARRIS N B W, HOLLAND T. The Significance of Cordierite-hypersthene Assemblages from the Beitbridge Region of the Central Limpopo Belt; Evidence for Rapid Decompression in the Archaean [J]. *American Mineralogist*, 1984, 69(11): 1036-1049.
- [14] DROOP G T R. Reaction History of Garnet-sapphirine Granulites and Conditions of Archaean High-pressure Granulite-facies Metamorphism in the Central Limpopo Mobile Belt, Zimbabwe [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1989, 7(3): 383-403.
- [15] STEVENS G, REENEN D V. Constraints on the Form of the *P-T* Loop in the Southern Marginal Zone of the Limpopo Belt, South Africa [J]. *Precambrian Research*, 1992, 55(1/2/3/4): 279-296.
- [16] HISADA K, MIYANO T. Petrology and Microthermometry of Aluminous Rocks in the Botswanan Limpopo Central Zone; Evidence for Isothermal Decompression and Isobaric Cooling [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1996, 14(2): 183-197.
- [17] JAECKEL P, KRONER A, KAMO S L, et al. Late Archaean to Early Proterozoic Granitoid Magmatism and High-grade Metamorphism in the Central Limpopo Belt, South Africa [J]. *Journal of the Geological Society*, 1997, 154(19): 25-44.
- [18] KROENER A, JAECKEL P, HOFMANN A, et al. Field Relationships and Age of Supracrustal Beit Bridge Complex and Associated Granitoid Gneisses in the Central Zone of the Limpopo Belt, South Africa [J]. *South African Journal of Geology*, 1998, 101(3): 201-213.
- [19] SMIT C A, VAN REENEN D D, GERYA T V, et al. *P-T* Conditions of Decompression of the Limpopo High-grade Terrane; Record from Shear Zones [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2001, 19(3): 249-268.
- [20] VAN REENEN D D, PERCHUK L L, SMIT C A, et al. Structural and *P-T* Evolution of a Major Cross Fold in the Central Zone of the Limpopo High-grade Terrain, South Africa [J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45(7): 1413-1439.
- [21] ZEH A, HOLLAND T J B, KLEMD R. Phase Relationships in Grunerite-garnet-bearing Amphibolites in the System CFMASH, with Applications to Metamorphic Rocks from the Central Zone of the Limpopo Belt, South Africa [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2005, 23(1): 1-17.
- [22] HISADA K, PERCHUK L L, GERYA T V, et al. *P-T*-fluid Evolution in the Mahalapye Complex, Limpopo High-grade Terrane, Eastern Botswana [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2005, 23(5): 313-334.
- [23] BOSHOFF R, VAN REENEN D D, SMIT C A, et al. Geologic History of the Central Zone of the Limpopo Complex; The West Alldays Area [J]. *The Journal of Geology*, 2006, 114(6): 699-716.
- [24] LIGHT M P R. The Limpopo Mobile Belt; A Result of Continental Collision [J]. *Tectonics*, 1982, 1(4): 325-342.
- [25] CARSWELL D A, O'BRIEN P J. Thermobarometry and Geotectonic Significance of High-pressure Granulites; Examples from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif in Lower Austria [J]. *Journal of Petrology*, 1993, 34(3): 427-459.
- [26] KRYZA R, PIN C, VIELZEUF D. High-pressure Granulites from the Sudetes (South-west Poland); Evidence of Crustal Subduction and Collisional Thickening in the Variscan Belt [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1996, 14(4): 531-546.
- [27] MASON R. The Limpopo Mobile Belt-southern Africa [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*:

- Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1973, 273: 463-485.
- [28] 吴素珍. 林波波带研究的一些进展[J]. 国外前寒武纪地质, 1996(1): 47-52.
- WU Su-zhen. Some Progress in the Study of Limpopo Belt[J]. Overseas Precambrian Geology, 1996(1): 47-52.
- [29] GREEN D H, RINGWOOD A E. An Experimental Investigation of the Gabbro to Eclogite Transformation and Its Petrological Applications[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1967, 31(5): 767-833.
- [30] RAVNA K. The Garnet-clinopyroxene  $\text{Fe}^{2+}$ -Mg Geothermometer: An Updated Calibration[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18(2): 211-219.
- [31] LAL R K. Internally Consistent Recalibrations of Mineral Equilibria for Geothermobarometry Involving Garnet-orthopyroxene-plagioclase-quartz Assemblages and Their Application to the South Indian Granulites [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1993, 11(6): 855-866.
- [32] BHATTACHARYA A, KRISHNAKUMAR K R, RAITH M, et al. An Improved Set of  $a$ -X Parameters for Fe-Mg-Ca Garnets and Refinements of the Orthopyroxene-garnet Thermometer and the Orthopyroxene-garnet-plagioclase-quartz Barometer [J]. Journal of Petrology, 1991, 32(3): 629-656.
- [33] GERYA T V, PERCHUK L L, TRIBOULET C, et al. Petrology of the Tumanshet Zonal Metamorphic Complex, Eastern Sayan[J]. Petrology, 1997, 5(6): 503-533.
- [34] SPEAR F S. Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-temperature-time Paths [M]. Washington DC: Mineralogical Society of America, 1995.
- [35] OSANAI Y, SAJEEV K, OWADA M, et al. Metamorphic Evolution of High-pressure and Ultrahigh-temperature Granulites from the Highland Complex, Sri Lanka[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 28(1): 20-37.
- [36] ZHANG X R, SHI R D, HUANG Q S, et al. Finding of High-pressure Mafic Granulites in the Amdo Basement, Central Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(32): 3694-3702.
- [37] O'BRIEN P J, ROTZLER J. High-pressure Granulites: Formation, Recovery of Peak Conditions and Implications for Tectonics[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2003, 21(1): 3-20.
- [38] BROWN M. Duality of Thermal Regimes is the Distinctive Characteristic of Plate Tectonics Since the Neoproterozoic[J]. Geology, 2006, 34(11): 961-964.
- [39] ENGLAND P C, THOMPSON A B. Pressure-temperature-time Paths of Regional Metamorphism I: Heat Transfer During the Evolution of Regions of Thickened Continental Crust[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 894-928.
- [40] BROWN M.  $P$ - $T$ - $t$  Evolution of Orogenic Belts and the Causes of Regional Metamorphism[J]. Geological Society, London, Memoirs, 1995, 16(1): 67-81.
- [41] ENGLAND P C, RICHARDSON S W. The Influence of Erosion upon the Mineral Fades of Rocks from Different Metamorphic Environments[J]. Journal of the Geological Society, 1977, 134(2): 201-213.
- [42] OXBURGH E R. Some Thermal Aspects of Granulite History[M] // VIELZEUF D, VIDAL P. Granulites and Crustal Evolution. Berlin, Springer, 1990: 569-580.
- [43] BARTON J M. Rb-Sr and U-Th-Pb Isotopic Studies of the Sand River Gneiss, Central Zone, Limpopo Mobile Belt[J]. Geological Society of South Africa, 1983, 8: 9-18.
- [44] BARTON J M, SERGEEV S. High Precision, U-Pb Analyses of Single Grains of Zircon from Quartzite in the Beit Bridge Group Yield a Discordia[J]. South African Journal of Geology, 1997, 100(1): 37-41.
- [45] MCCOURT S, ARMSTRONG R A. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of Granites from the Central Zone, Limpopo Belt, Southern Africa: Implications for the Age of the Limpopo Orogeny[J]. South African Journal of Geology, 1998, 101(4): 329-338.
- [46] RIGBY M, MOURI H, BRANDL G. A Review of the Pressure-temperature-time Evolution of the Limpopo Belt: Constraints for a Tectonic Model[J]. Journal of African Earth Sciences, 2008, 50(2/3/4): 120-132.
- [47] ICHIHASHI T, MIYANO T. An Unique  $P$ - $T$  Trajectory of the Limpopo Central Zone with Tectonic Setting Deeper to the Marginal Zones, Northeast Beitbridge, Zimbabwe[C] // Geological Society of South Africa. Centennial Geocongress Extended Abstracts. Johannesburg: Geological Society of South Africa, 1995: 178-180.
- [48] 张晓冉, 史仁灯, 黄启帅, 等. 青藏高原安多高压基性麻粒岩的发现及其地质意义[J]. 科学通报, 2010, 55(27/28): 2702-2711.
- ZHANG Xiao-ran, SHI Ren-deng, HUANG Qi-shuai, et al. Finding of High-pressure Mafic Granulites in the Amdo Basement, Central Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(27/28): 2702-2711.