

· 专题研究 ·

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2023.0201

扬子克拉通古元古代变质演化 ——来自黄陵穹窿石榴斜长角闪岩的证据

付 强¹, 魏君奇¹, 范堡程^{1,2}, 裴康达¹

(1. 西北大学 地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 中国地质调查局 西安矿产资源调查中心,
陕西 西安 710100)

摘要: 为探讨扬子克拉通古元古代变质作用特征及其形成的构造背景, 对黄陵穹窿北部石榴斜长角闪岩开展了岩相学、地球化学和年代学研究。结果表明, 石榴斜长角闪岩中主要矿物有石榴子石、斜长石、角闪石、单斜辉石、石英、钛铁矿等, 其中保留有3个阶段的不同变质期次的矿物组合, 进变质矿物组合为角闪石+斜长石+石英+钛铁矿, 峰期矿物组合为石榴子石+角闪石+斜长石+单斜辉石+石英+钛铁矿, 退变质矿物组合为石榴子石+角闪石+斜长石+石英+钛铁矿。石榴斜长角闪岩原岩为亚碱性玄武岩, 属于拉斑系列, $Mg^{\#}$ 较低, 表明其原岩经历了一定程度的分异作用。使用传统地质温压计计算不同变质阶段的温压条件分别为: 进变质阶段, $t=596\sim625^{\circ}\text{C}$, $p=0.70\sim0.82\text{ GPa}$; 峰期变质阶段, $t\approx760^{\circ}\text{C}$, $p\approx1.35\text{ GPa}$; 退变质阶段, $t=692\sim738^{\circ}\text{C}$, $p=0.68\sim0.74\text{ GPa}$, 并建立了一条顺时针的 $p-t$ 轨迹, 显示出先升温升压至峰期阶段, 随后发生近等温减压的过程。这一 $p-t$ 轨迹体现了汇聚板块边缘俯冲-碰撞的构造背景, 对石榴斜长角闪岩中的锆石进行 U-Pb 定年, 获得了 $2\,008\pm11\text{ Ma}$ 的谐和年龄, 并结合该地区已有的变质年龄, 共同揭示了扬子克拉通在古元古代参与了微陆块的拼接, 是 Columbia 超大陆聚合的响应。

关键词: 扬子克拉通; 黄陵穹窿; 石榴斜长角闪岩; 变质演化; 变质时代; $p-t$ 轨迹

中图分类号: P588.12⁺⁵

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)02-0173-18

Paleoproterozoic metamorphic evolution of the Yangtze Craton: Evidence from the Huangling Dome garnet-amphibolite

FU Qiang¹, WEI Jun-qi¹, FAN Bao-cheng^{1,2} and PEI Kang-da¹

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;
2. Xi'an Mineral Resources Investigation Center of China Geological Survey, Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of metamorphism and the tectonic setting in the Yangtze Craton, we carried out petrographic, geochemical and chronological studies on the garnet-amphibolite in the north of the Huangling Dome. The results show that the main minerals in the garnet-amphibolite are garnet, plagioclase, amphibole, clinopyroxene, quartz and ilmenite, in which the mineral assemblages of 3 different metamorphic stages are retained. The prograde metamorphic stage is characterized by the assemblage of amphibolite+plagioclase+quartz+ilmenite and the peak metamorphic stage consists of garnet+amphibole+plagioclase+clinopyroxene+quartz+ilmenite, while the retrograde assemblage contains garnet+amphibole+plagioclase+quartz+ilmenite. The garnet-amphibolite protolith belongs to subalkaline tholeiite with low $Mg^{\#}$, indicating that its protolith has experienced a degree of

收稿日期: 2022-10-13; 接受日期: 2023-02-04; 编辑: 尹淑萍

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572171)

作者简介: 付 强(1997-), 男, 汉族, 在读硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 443512784@qq.com; 通讯作者: 魏君奇(1964-), 男, 汉族, 博士, 研究员, 主要从事岩石学、地球化学等研究, E-mail: weijunqi01@163.com。

differentiation. By means of conventional geological thermometer, the temperature and pressure conditions of different metamorphic stages were calculated. We obtained the p - t conditions of 596~625°C and 0.70~0.82 GPa for the prograde metamorphic stage, 760°C and 1.35 GPa for the peak metamorphic stage, and 692~738°C and 0.68~0.74 GPa for the retrograde metamorphic stage. Meanwhile, a clockwise p - t path was represented from these p - t conditions, showing the process of warming and pressurization to the peak and then a near isothermal decompression. This p - t path reflects the tectonic setting of subduction-collision at the convergent plate margin. U-Pb dating of zircons in the garnet-amphibolite yields a harmonic age of $2\ 008 \pm 11$ Ma. Together with the existing metamorphic ages in the region, these ages reveal that the Yangtze Craton was involved in the splicing of microcontinental blocks during the Paleozoic, which might be a response of the Columbia supercontinent assembly.

Key words: Yangtze Craton; Huangling Dome; garnet-amphibolite; metamorphic evolution; metamorphic age; p - t path

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41572171)

扬子克拉通是中国最为古老的克拉通之一,克拉通往往记录着多次大陆碰撞以及裂解的过程,对前寒武纪地壳演化研究具有重要的意义。学者对华北克拉通中广泛出露的结晶基底进行了大量的研究,其年龄构架以及构造演化已经相对成熟并被广泛接受,而扬子克拉通由于被广泛的沉积地层所覆盖,出露的结晶基底相对较少,因此对该地区的研究还存在一定的困难和局限。仅在扬子克拉通黄陵穹窿发现太古宙基底岩石(高山等,1990; Zhang et al., 2006; Jiao et al., 2009; Guo et al., 2014),黄陵穹窿的核部也被认为出露着扬子克拉通最古老的杂岩体,即崆岭杂岩(崆岭群)。在过去几十年里国内外学者对扬子克拉通的年代学演化进行了约束,取得了大量的成果。近年来,2.3~1.8 Ga时代的构造-热事件逐渐成为该地区的研究重点,尤其是在大约2.0 Ga这一时间内发生的角闪岩相-麻粒岩相区域变质事件备受学者关注。这一构造热事件指示了碰撞挤压环境-碰撞后伸展环境的转变(郑永飞等,2007),此次古元古代变质事件也暗示了扬子克拉通与Columbia超大陆之间可能存在某种联系。然而,不难发现之前的学者大多将研究重点放在了年代学方面,对于该古元古代区域变质事件过程的研究相对较少,且较多是进行定性的分析,对于了解该区域的变质演化存在一定的局限性。因此,本次研究重点将放在这一区域变质作用上,通过对岩石样品进行测试和定量的分析计算,为揭示该地区古元古代变质演化以及地球动力学过程提供新的依据。

石榴斜长角闪岩具有典型的变质结构,如“白眼圈”结构代表着近等温减压的变质过程,这些结构对了解构造-热演化事件具有非常重要的作用(Bark-

er, 1990; Qian and Wei, 2016)。石榴斜长角闪岩可以代表进变质作用产物(Zhao et al., 1999; Qian and Wei, 2016),也可代表高温-高压状态下榴辉岩或麻粒岩退变质的产物(Eide and Liou, 2000; Lou et al., 2013; Liu et al., 2013),还可以是与幔源铁镁质岩浆底侵有关的变质岩石,此时就会形成逆时针的 p - t 轨迹(Wu et al., 2013)。

最近,笔者在湖北省宜昌市雾渡河镇坦荡河流域内发现了典型的石榴斜长角闪岩,它可以作为扬子克拉通古元古代变质作用良好的研究对象。因此,本文将以黄陵基底石榴石斜长角闪岩为重点进行研究,对其进行详细的岩相学、地球化学及年代学分析,划分样品中保留的不同变质期次的矿物组合关系,结合合适的温压计进行温压条件的计算,重建其变质演化的 p - t 轨迹,并结合锆石 U-Pb 定年的年代学数据,讨论其构造背景及演化历史。

1 区域地质背景

黄陵穹窿(黄陵基底)位于扬子克拉通的北部,是扬子克拉通出露面积最大的结晶基底(图 1a),在这里保存了扬子克拉通乃至华南地区最古老的太古宙 TTG 片麻岩、古元古代变质岩、中元古代末大洋岩石圈残片以及新元古代的冰川沉积记录,是了解扬子克拉通构造演化的一个重要“窗口”。黄陵穹窿出露着广泛的太古宙-古元古代的高级变质杂岩,前人将这套高级变质杂岩称之为崆岭杂岩,目前普遍认为崆岭杂岩是由下部基底片麻岩及覆盖在其上的表壳岩所组成(马大铨等,1997)。基底主要由太古宙 TTG(英云闪长质-奥长花岗质-花岗闪长质)片麻岩

所组成,以及侵入其中的古元古代花岗片麻岩、钾长花岗岩等(袁海华等, 1991; Xiong *et al.*, 2009),其次为一套由沉积岩系变质形成的表壳岩系,其中还包含少量的斜长角闪岩和麻粒岩等。变质表壳岩系

主要以变泥质岩为主,以岩石中多含富铝矿物为特征,共同形成了一套孔兹岩系(姜继圣, 1986; 高山等, 2001)(图 1b)。

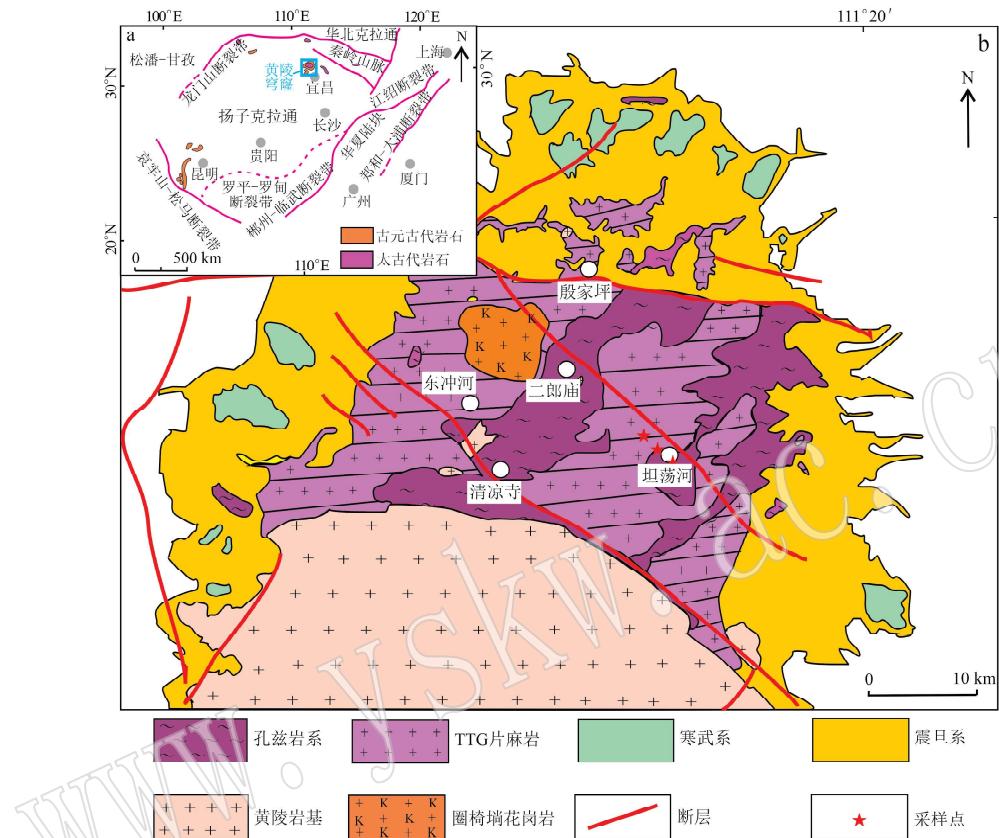


图 1 扬子克拉通地质图及太古宙和古元古代主要出露岩石(a, 据 Zhang and Zheng, 2007; Han *et al.*, 2017a)和黄陵穹窿北部地质简图(b, 据 Liu *et al.*, 2019)

Fig. 1 Geological map of Archean and Paleoproterozoic rocks in the Yangtze Craton (a, modified from Zhang and Zheng, 2007; Han *et al.*, 2017a) and geological sketch of northern Huangling Dome (b, modified from Liu *et al.*, 2019)

该区域至少发生过 3 次岩浆事件,相对应的年龄分别为 3.4~3.2 Ga、2.9~2.8 Ga 和 2.7~2.6 Ga (Jiao *et al.*, 2009; 魏君奇等, 2009; Chen *et al.*, 2013; Guo *et al.*, 2014, 2015; Li *et al.*, 2014; Han *et al.*, 2017b)。在大约 2.7 Ga TTG 中的包体遭受第 1 期角闪岩相变质作用的改造,在大约 2.5 Ga 经历了第 2 期角闪岩相变质作用,黄陵地区通过第 1 期和第 2 期变质事件的共同作用,将黄陵花岗岩-绿岩型地体转变为晚太古代的稳定陆块,并从此开始了长达 500 Ma 稳定的克拉通化(魏君奇等, 2012)。大约在 2.3~1.8 Ga, 地壳被重新激活,广泛的古元古代变质岩覆盖在太古宙的 TTG 片麻岩之上(Wu *et al.*, 2009)。

在过去的十多年里,崆岭群古元古代变质作用已经开始被一些学者所关注并对此展开了工作,获得了相应的变质温压条件和年代学数据。杨金春(2007)对孔兹岩进行变质作用的研究中获得 700°C、0.4 GPa 的变质峰期条件,达到了角闪岩相,峰期矿物组合为石榴子石+十字石+黑云母+夕线石+斜长石+石英;Wu 等(2009)研究孔兹岩获得 750~800°C、0.68~0.8 GPa 的峰期温压条件,达到了麻粒岩相,矿物组合为石榴子石+黑云母+夕线石+斜长石+石英;Yin 等(2013)对基性麻粒岩研究获得了>1.2 GPa、870°C 的峰期温压条件,矿物组合为石榴子石+单斜辉石+斜长石+石英,并获得了一条顺时针的 *p-t* 轨迹,由于其峰期变质条件具有高温高压的特征,因

此他认为该地区在 2.1~1.8 Ga 发生了陆陆碰撞事件,扬子板块是 Columbia 超大陆的一部分。此外,还有学者发现古元古代变质作用达到了榴辉岩相(韩庆森,2020),但这一结果还有待商榷。

2 样品采集及测试

研究的石榴斜长角闪岩样品采于雾渡河镇坦荡河流域内,起始坐标为 N31°11'59"、E111°10'36",由于野外风化严重,植被茂盛,只在坦荡河河床边发现一处出露较为完整的石榴斜长角闪岩露头,出露长度约 5 m 左右,发生混合岩化作用并且部分被 TTG 片麻岩侵入,在露头周围还可发现大量的石榴斜长角闪岩的落石(图 2)。

测试均在西北大学大陆动力学国家重点实验室中完成。利用日本 JEOL 公司电子探针仪(型号 JXA-8230)对石榴斜长角闪岩样品中的石榴子石、角

闪石、斜长石、单斜辉石等主要矿物进行主量元素测定,加速电压为 15 kV,束斑电流为 10 nA,束斑直径为 1 μm,采用 ZAF 法校正,精度优于 0.1%。利用 X 荧光光谱仪(XRF)进行全岩主量元素分析,一般精度优于 2%;微量元素和稀土元素分析利用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定,分析误差一般小于 10%。

锆石 CL 图像利用 MonoCL3(Gatan 公司)阴极荧光探测仪的电子显微扫描电镜完成,揭示锆石内部形态以便选取测试点位,之后利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(GeoLas Pro 和 Agilent 7500a)进行测定。采用国际标准锆石 91500 作为外标,锆石微量元素利用 NIST610 作为外标,²⁹Si 作为内标进行校准。采用 Glitter 4.0 对数据进行处理,利用 Isoplot 4.15 进行年龄的计算及成图。一般选择谐和度在 90%~110% 的锆石年龄,大于 1.0 Ga 的采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄。

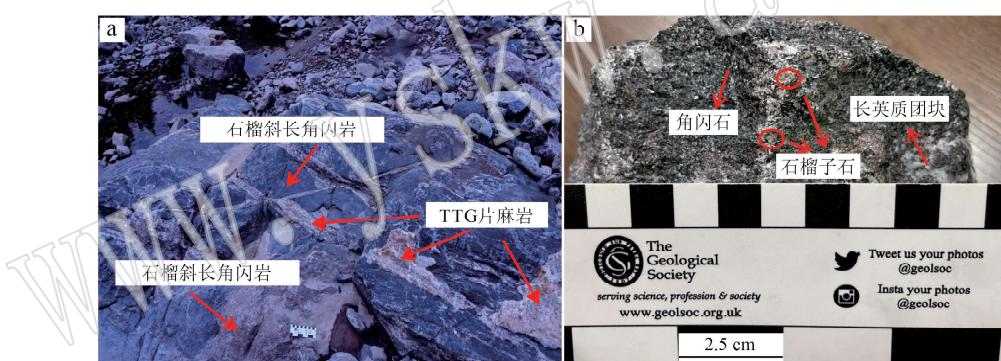


图 2 黄陵穹窿石榴斜长角闪岩露头及样品照片
Fig. 2 Photos of garnet-amphibolite from Huangling Dome

3 分析结果

3.1 岩相学特征

黄陵穹窿石榴斜长角闪岩手标本新鲜面呈深灰色-灰黑色,石榴子石以紫红色微颗粒分布其中,呈细粒-粗粒的粒状变晶结构,具有弱的片麻状构造及块状构造(图 2)。其主要矿物包括石榴子石(15%~20%,体积分数)、角闪石(35%~45%)、斜长石(25%~30%)以及单斜辉石(5%)、石英(5%),次要矿物有钛铁矿(<3%)、磷灰石和锆石(<1%)等。其中暗色矿物主要为角闪石,其含量达到 30% 以上。当发生强烈的退变质作用时,石榴子石可被转化为角闪石、斜长石、石英以及钛铁矿等矿物(刘平华等,2017)。

石榴子石变斑晶主要包括石榴子石变斑晶部分(图 3a)及其边部(图 3c、3d),少数石榴子石边部可见角闪石、斜长石和石英所组成的“白眼圈”结构(图 3b),基质部分主要由颗粒较大的斜长石与角闪石组成,还包含少量的单斜辉石、钛铁矿、石英等矿物(图 3e、3f)。根据其中的矿物存在方式、共生组合等特征可以将黄陵穹窿石榴斜长角闪岩的变质演化过程初步分为 3 个阶段:进变质阶段(M_1)、峰期变质阶段(M_2)以及峰期后退变质阶段(M_3)。

进变质阶段(M_1),由于受到峰期变质作用以及峰期后变质作用的改造,本次石榴斜长角闪岩样品中所保留峰期前的矿物组合较少,仅在个别保存较好的石榴子石颗粒中能发现角闪石、斜长石、石英以及钛铁矿等以包裹体形式存在的矿物,这些矿物包

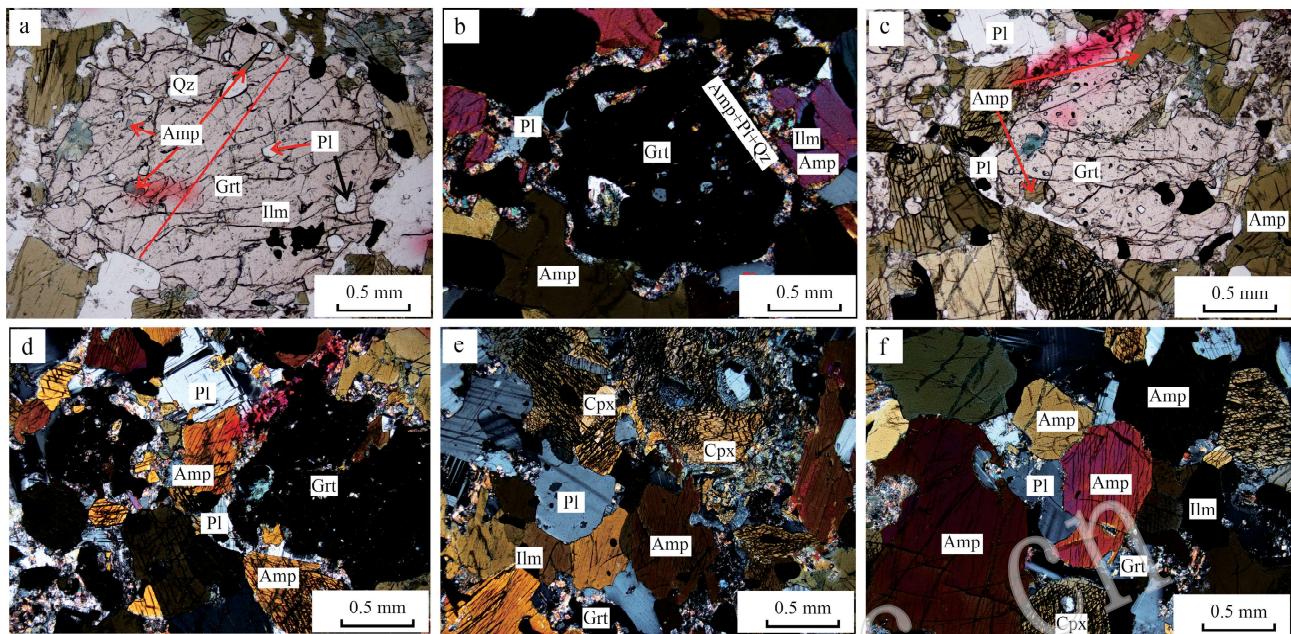


图3 黄陵穹窿石榴斜长角闪岩样品显微镜下照片

Fig. 3 Photomicrographs of garnet-amphibolite sample from Huangling Dome

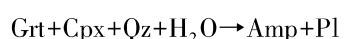
a—石榴子石变斑晶内包裹的角闪石+斜长石+石英+钛铁矿,单偏光; b—石榴子石变斑晶边部具有“白眼圈”结构特征,以及后成合晶矿物角闪石+斜长石+石英+钛铁矿,正交偏光; c,d—较小的石榴子石及其边部矿物组合,c为单偏光,d为正交偏光; e,f—基质中的典型矿物:角闪石+单斜辉石+斜长石+石英+钛铁矿,正交偏光; Grt—石榴子石; Amp—角闪石; Pl—斜长石; Cpx—单斜辉石; Qz—石英; Ilm—钛铁矿
a—amphibole+plagioclase+quartz+ilmenite wrapped in garnet phenocrysts, plane-polarized light; b—the edge of garnet phenocryst is characterized by “white eye ring” structure, and the post synthetic mineral amphibole+plagioclase+quartz+ilmenite, cross-polarized light; c, d—smaller garnet and its marginal mineral assemblage, c is plane-polarized light, d is cross-polarized light; e, f—typical minerals in the matrix: amphibole+clinopyroxene+plagioclase+quartz+ilmenite, cross-polarized light; Grt—garnet; Amp—amphibole; Pl—plagioclase; Cpx—clinopyroxene; Qz—quartz; Ilm—ilmenite

包裹体主要以细小的椭圆状或者短柱状存在于石榴子石中,不与石榴子石中的裂隙或缝隙相连接,表明它们不是次生包体,因此这些矿物可以代表进变质阶段的矿物组合:角闪石+斜长石+石英+钛铁矿(图3a)。这些矿物在变质过程中被石榴子石所包裹,所以在之后的变质阶段,未发生明显的变化而保留在石榴子石中。尽管石榴斜长角闪岩在之后发生了强烈的变质改造,但上述包裹体矿物在形状以及成分上仍然保存着进变质阶段的特征。

变质峰期阶段(M_2),在基质部分可以发现大量的中粒-粗粒的角闪石与斜长石共生,角闪石多呈绿色-黄褐色,常常具有辉石假像。单斜辉石在基质中含量较少,主要以钙铁辉石为主,呈浅棕色,且发生较大程度上的变形,可能是由于峰期后减压过程所导致,局部可以发现被斜长石所取代。石榴子石与石英在基质中以细粒形式存在,含量较少,基质中还包含少量的钛铁矿。这些矿物共同组成了最典型的峰期变质矿物组合:石榴子石+角闪石+斜长石+单

斜辉石+石英+钛铁矿(图3e,3f)。

退变质阶段(M_3),石榴子石边部发育角闪石、斜长石以及石英所组成的冠状体反应边,形成类似于“白眼圈”的结构(图3b),冠状体边部发育细粒角闪石,颜色为浅绿色-深绿色,较自形,呈块状,局部还保留有辉石式解理,可能是角闪石交代残留的单斜辉石所致(图3c,3d)。石榴斜长角闪岩样品峰期后退变质阶段矿物组合为:石榴子石+角闪石+斜长石+石英+钛铁矿。该阶段矿物相的转变可能发生了以下变质反应(Harley, 1989):



3.2 矿物化学

石榴子石变斑晶呈半自形-自形粒状,粒径大小介于0.5~3.0 mm之间。石榴子石剖面成分分析结果见表1和图4,化学组成上以低MnO为特征。其各端员组分由多至少依次为铁铝榴石(Alm 60.93%~64.78%)、钙铝榴石(Gro 17.73%~24.64%)、镁铝

表1 石榴斜长角闪岩中石榴子石主量元素成分
Table 1 Major element compositions of garnet in garnet-amphibolite

 $w_B/\%$

位置 编号	核														边	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	37.22	37.76	37.71	37.25	37.61	37.64	37.93	37.74	37.38	37.63	36.74	37.79	38.01	37.37	37.69	37.84
TiO ₂	0.01	0.05	0.04	0.04	0.05	0.06	0.00	0.02	0.06	0.01	0.05	0.08	0.07	0.01	0.09	0.00
Al ₂ O ₃	20.90	21.08	21.43	20.99	21.14	20.80	21.09	21.06	21.02	20.92	19.38	21.07	21.04	21.18	21.04	21.09
Cr ₂ O ₃	0.03	0.01	0.00	0.01	0.06	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02
FeO	29.79	28.59	28.40	28.74	28.60	28.60	28.27	28.22	28.86	28.62	28.61	29.10	28.46	28.49	28.32	29.12
MnO	0.62	0.57	0.54	0.54	0.48	0.53	0.67	0.64	0.53	0.63	0.62	0.60	0.67	0.50	0.65	0.70
MgO	2.64	2.80	2.77	2.78	2.68	2.72	2.69	2.73	2.82	2.80	2.86	2.95	3.00	2.98	2.99	3.07
CaO	7.95	8.61	8.89	9.09	9.02	9.01	9.04	9.13	9.03	8.75	8.31	8.57	8.79	8.57	8.46	8.37
Na ₂ O	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.17	99.52	99.81	99.44	99.64	99.37	99.74	99.56	99.69	99.37	96.64	100.21	100.13	99.11	99.34	100.26
O	用12个氧原子计算															
Si	2.98	3.01	2.99	2.97	2.99	3.00	3.01	3.00	2.97	3.00	3.02	2.99	3.01	2.98	3.00	2.99
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Al	1.96	1.98	2.00	1.94	1.98	1.96	1.97	1.97	1.94	1.97	1.88	1.96	1.96	1.98	1.98	1.96
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.05	0.00	0.01	0.09	0.03	0.03	0.00	0.02	0.08	0.03	0.07	0.05	0.02	0.04	0.00	0.05
Fe ²⁺	1.94	1.90	1.87	1.83	1.87	1.88	1.88	1.86	1.84	1.88	1.89	1.88	1.87	1.86	1.89	1.87
Mn	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05
Mg	0.32	0.33	0.33	0.33	0.32	0.32	0.32	0.32	0.33	0.33	0.35	0.35	0.35	0.35	0.36	0.36
Ca	0.68	0.74	0.76	0.78	0.77	0.77	0.77	0.78	0.77	0.75	0.74	0.73	0.75	0.73	0.72	0.71
Alm	64.78	63.56	62.40	60.93	62.48	62.61	62.79	61.93	61.20	62.63	63.48	62.62	62.36	62.08	62.96	62.44
Gro	19.99	23.20	24.64	21.47	24.09	23.28	24.05	24.56	21.52	23.20	17.73	21.82	22.61	22.44	22.70	21.00
Pyr	10.50	11.09	10.93	11.01	10.60	10.79	10.64	10.80	11.12	11.10	11.74	11.60	11.82	11.81	11.88	12.05
Spe	1.40	1.29	1.21	1.21	1.08	1.20	1.51	1.45	1.19	1.42	1.44	1.35	1.49	1.13	1.47	1.57

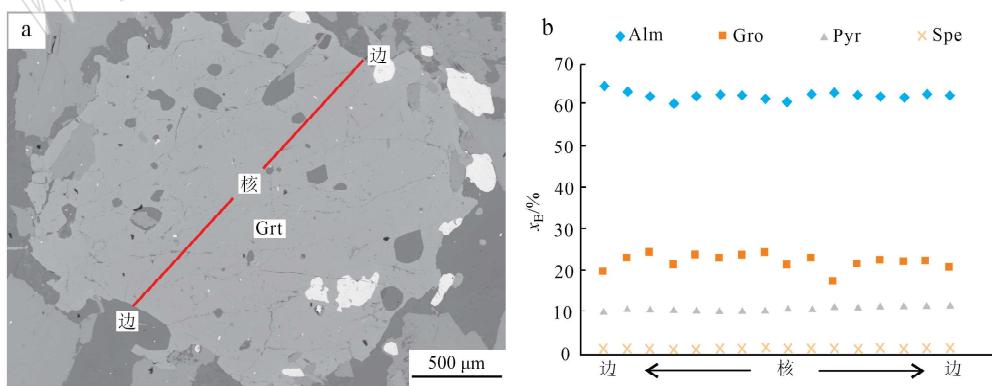


图4 石榴子石变斑晶背散射电子图像(a)和剖面成分变化图(b)

Fig. 4 Backscattered electron image of garnet phenocryst (a) and profile composition change of garnet phenocryst (b)

榴石(Pyr 10.5%~12.05%)和锰铝榴石(Spe 1.08%~1.57%)。铁铝榴石和镁铝榴石有少量增加,而钙铝榴石和锰铝榴石成分有轻微下降,但整体变化幅度都不大。这可能是由于石榴子石受到峰期后的退变质作用改造所致。

角闪石在样品中含量最多,由岩相学可知石榴斜长角闪岩中角闪石有3种赋存形式:第1种为早期包裹体角闪石,以细粒的椭圆状、片状或短柱状包裹体存在于石榴子石变斑晶中;第2种为基质角闪石,呈细粒-中粒的不规则粒状,常与粗粒的斜长石共

生; 第3种为石榴子石边部的晚期退变质后成合晶角闪石, 呈细粒不规则粒状, 常与细粒的斜长石和石英共生, 形成类似于石榴子石“白眼圈”的结构, 代表

了峰期后退变质过程。不同类型的角闪石化学成分见表2, 根据Leake等(1997)角闪石分类原则对各类角闪石进行了分类(图5a)。石榴子石变斑晶中的角

表2 石榴斜长角闪岩中角闪石和单斜辉石主量元素成分
Table 2 Major element compositions of amphibole and clinopyroxene in garnet-amphibolite

 $w_{\text{B}}/\%$

矿物	角闪石										单斜辉石				
	包裹体型					基质型					石榴子石边部				
类型	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5
编号															
SiO ₂	39.33	38.60	38.81	42.84	42.74	41.87	42.68	43.10	43.42	42.85	50.40	50.68	49.40	49.33	49.72
TiO ₂	0.26	0.19	0.12	1.60	1.29	1.38	1.37	1.53	1.38	1.18	0.16	0.20	0.21	0.13	0.30
Al ₂ O ₃	16.87	17.76	17.11	10.72	10.61	10.41	10.55	11.18	11.40	11.31	1.08	1.77	2.19	1.90	3.18
FeO	20.59	20.35	19.85	22.18	21.07	21.77	22.01	20.25	19.35	20.57	20.52	16.54	16.78	16.54	17.92
MnO	0.05	0.00	0.07	0.13	0.09	0.12	0.11	0.06	0.05	0.05	0.30	0.22	0.18	0.16	0.13
MgO	4.77	4.69	5.07	6.47	6.62	6.18	6.55	7.73	7.68	7.39	8.63	8.33	8.56	8.58	8.60
CaO	11.16	10.98	10.86	10.52	10.60	10.69	11.04	10.90	10.85	10.80	17.39	21.33	20.48	21.31	17.65
Na ₂ O	1.68	1.65	1.66	1.41	1.38	1.33	1.25	1.35	1.23	1.35	0.22	0.26	0.30	0.26	0.41
K ₂ O	0.62	0.49	0.50	0.45	0.50	0.44	0.49	0.46	0.43	0.46	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03
Total	95.32	94.75	94.16	96.37	94.92	94.29	96.15	96.61	95.80	96.00	99.72	99.34	99.12	98.27	99.00
O	用23个氧原子计算										用6个氧原子计算				
Si	6.13	6.03	6.09	6.61	6.69	6.62	6.61	6.57	6.65	6.58	1.99	1.97	1.95	1.95	1.95
Ti	0.03	0.02	0.01	0.19	0.15	0.17	0.16	0.18	0.16	0.14	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
Al	3.10	3.27	3.17	1.95	1.96	1.94	1.93	2.01	2.06	2.05	0.05	0.08	0.06	0.09	0.10
Fe ³⁺	0.09	0.20	0.19	0.21	0.09	0.18	0.23	0.24	0.11	0.27	0.00	0.00	0.02	0.05	0.00
Fe ²⁺	2.60	2.46	2.41	2.65	2.67	2.70	2.62	2.34	2.37	2.37	0.68	0.54	0.53	0.50	0.59
Mn	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Mg	1.11	1.09	1.19	1.49	1.54	1.46	1.51	1.76	1.75	1.69	0.51	0.48	0.50	0.50	0.50
Ca	1.86	1.84	1.83	1.74	1.78	1.81	1.83	1.78	1.78	1.78	0.74	0.89	0.87	0.90	0.74
Na	0.51	0.50	0.50	0.42	0.42	0.41	0.38	0.40	0.37	0.40	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
K	0.12	0.10	0.10	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09	0.08	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	15.00										4.00				
Wo											37.74				
En											26.05				
Fs											35.35				

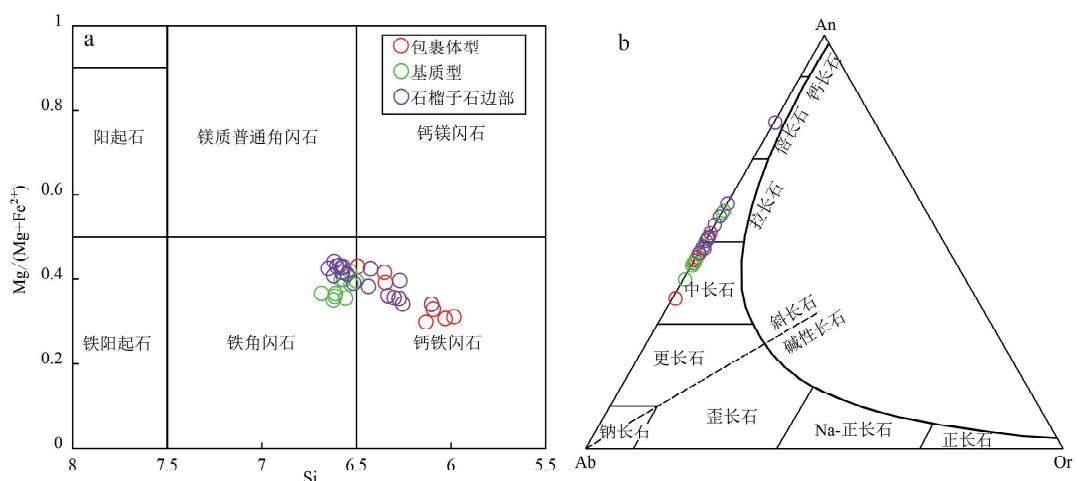


图5 角闪石(a, 据Leake et al., 1997)和斜长石(b, 据Deer et al., 1997)分类图解
Fig. 5 Classification diagram of amphibole (a, after Leake et al., 1997) and plagioclase (b, after Deer et al., 1997)

闪石主要为钙铁闪石,基质中角闪石颗粒以铁角闪石为主,而石榴子石边部的角闪石大多数以铁角闪石为主,部分为钙铁闪石。

斜长石在石榴斜长角闪岩样品中的存在形式也有3种:第1种为包体型斜长石,数量较少,颗粒形状较小;第2种为基质型斜长石,数量较多,与基质中角闪石颗粒大小类似;第3种为石榴子石边部的斜长石。斜长石的电子探针成分及分类见表3和图5b。不同成因的斜长石化学成分具有明显的差异,其An值介于36%~78%之间。其中,包体型斜长石

主要以中长石为主,基质型斜长石大多数以中长石为主,存在少数的拉长石,石榴子石边部的斜长石主要为中长石和拉长石,含有少量的倍长石。

除了上述主要的变质矿物以外,还存在少量单斜辉石,主要存在于基质颗粒中,成分上主要为钙铁辉石(表2)。石英和钛铁矿等矿物也很常见,石英主要以细粒浑圆状包体形式存在于石榴子石变斑晶中,在基质和石榴子石边部含量较少,钛铁矿主要以不规则状颗粒存在于基质矿物中。

表3 石榴斜长角闪岩中斜长石主量元素成分

Table 3 Major element compositions of plagioclase in garnet-amphibolite

类型 编号	石榴子石核部			基质				石榴子石边部			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	59.28	58.93	59.31	57.43	58.19	57.02	57.17	56.60	55.52	55.61	49.22
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.04
Al ₂ O ₃	25.68	26.03	25.83	26.83	26.37	27.00	26.71	27.68	27.86	27.97	32.22
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
FeO	0.29	0.26	0.28	0.00	0.03	0.06	0.03	0.10	0.16	0.14	0.12
MgO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
CaO	7.67	7.70	7.85	9.37	8.73	9.21	8.98	9.92	10.40	10.44	15.81
Na ₂ O	7.36	7.56	7.49	6.36	6.92	6.01	6.21	6.10	5.56	5.47	2.31
K ₂ O	0.12	0.15	0.11	0.03	0.07	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.05
Total	100.47	100.64	100.88	100.17	100.44	99.46	99.30	100.59	99.67	99.80	99.81
O	用8个氧原子计算										
Si	2.64	2.63	2.64	2.57	2.60	2.57	2.58	2.53	2.51	2.51	2.25
Al	1.35	1.37	1.35	1.42	1.39	1.43	1.42	1.46	1.49	1.49	1.74
Ca	0.37	0.37	0.37	0.45	0.42	0.44	0.43	0.48	0.50	0.51	0.78
Na	0.64	0.65	0.65	0.55	0.60	0.53	0.54	0.53	0.49	0.48	0.21
K	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	5.0										

3.3 变质温压条件

石榴子石剖面各端员组分的含量变化幅度均不大(图4b),这可能是由于在峰期变质作用的条件下,石榴子石内部元素达到了平衡,但由于后期退变质作用的叠加改造,边部石榴子石成分有一定变化。因此,石榴子石核部成分可能代表变质峰期阶段,边部成分代表峰期后退变质阶段。结合岩相学观察,进变质阶段温压条件可以采用角闪石-斜长石-石英温压计(Holland and Blundy, 1994; Bhadra and Bhattacharya, 2007)进行估算,分别选取包裹体中角闪石与斜长石核部的化学成分,计算出的温压条件为: $t=596\sim625^{\circ}\text{C}$ 、 $p=0.70\sim0.82\text{ GPa}$;峰期变质作用阶段的温压条件可以采用石榴子石-单斜辉石-斜长石

-石英温压计(Eckert *et al.*, 1991; Ravna, 2000)进行计算,选取石榴子石核部成分以及基质中单斜辉石和斜长石核部成分,估算出峰期变质温压条件为: $t\approx760^{\circ}\text{C}$ 、 $p\approx1.35\text{ GPa}$;对峰期后变质阶段而言,可以采用石榴子石-角闪石-斜长石-石英所组成的温压计(Holland and Blundy, 1994; Dale *et al.*, 2000)进行变质条件的估算,选取石榴子石边部以及石榴子石边部“白眼圈”中的细小的角闪石和斜长石颗粒成分,估算出峰期后变质阶段的温压条件为: $t=692\sim738^{\circ}\text{C}$ 、 $p=0.68\sim0.74\text{ GPa}$ 。

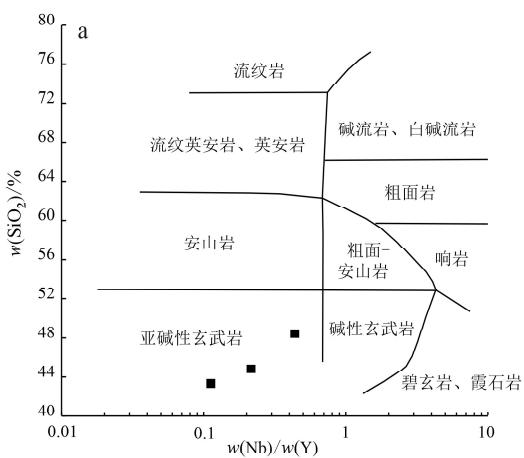
3.4 全岩地球化学

对石榴斜长角闪岩样品进行全岩主量、微量元素测定,结果见表4。结果显示,样品SiO₂含量偏低,

表 4 石榴斜长角闪岩主要($w_B/\%$)、微量($w_B/10^{-6}$)元素成分

Table 4 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) element compositions of garnet-amphibolite

样品号	1	2	3	样品号	1	2	3
SiO ₂	42.63	48.08	44.58	Nb	2.10	9.62	9.93
TiO ₂	0.90	1.65	2.23	Cs	0.81	1.50	0.46
Al ₂ O ₃	15.86	18.05	15.67	Ba	174	128	139
TFe ₂ O ₃	16.91	13.63	18.79	La	4.33	15.6	21.6
MnO	0.26	0.22	0.22	Ce	9.49	34.9	51.9
MgO	7.98	5.69	4.80	Pr	1.41	4.58	7.56
CaO	10.84	8.38	10.18	Nd	6.45	19.0	33.7
Na ₂ O	1.44	2.95	2.20	Sm	1.95	4.44	8.40
K ₂ O	1.45	0.49	0.42	Eu	0.74	1.60	2.42
P ₂ O ₅	0.11	0.22	0.32	Gd	2.36	4.43	8.01
LOI	1.42	0.30	0.45	Tb	0.44	0.71	1.29
Total	99.80	99.66	99.86	Dy	3.04	4.30	7.88
Mg [#]	48.35	45.30	33.63	Ho	0.67	0.87	1.63
Li	18.2	7.41	6.69	Er	2.09	2.47	4.68
Be	0.36	0.83	0.93	Tm	0.33	0.36	0.68
Sc	45.4	35.0	47.5	Yb	2.16	2.24	4.22
V	255	228	467	Lu	0.34	0.33	0.61
Cr	164	170	25.6	Hf	1.27	3.03	4.30
Co	100	107	119	Ta	0.26	0.72	0.69
Ni	136	181	132	Pb	6.95	13.6	4.65
Cu	141	90.6	138	Th	0.49	1.11	0.96
Zn	111	114	197	U	0.26	0.29	0.19
Ga	15.8	21.8	27.0	ΣREE	35.79	95.79	154.63
Ge	1.68	1.39	1.55	LREE	24.36	80.08	125.63
Rb	56.3	11.3	13.9	HREE	11.43	15.71	29.00
Sr	124	282	260	(La/Yb) _N	1.44	4.98	3.67
Y	18.7	24.9	46.1	δEu	1.06	1.09	0.99
Zr	48.0	120	165	δCe	0.94	1.00	0.99



介于 42.63%~48.08% 之间, Al_2O_3 含量为 15.67%~18.05%。样品中 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 的含量相对较高, 分别为 0.90%~2.23%、13.63%~18.79%、4.80%~7.98%、8.38%~10.84%。 Na_2O 含量介于 1.44%~2.95%。 $\text{Mg}^{\#}$ 值的变化介于 33.63~48.35 之间, 平均为 42.43, 与原生岩浆 ($\text{Mg}^{\#}=70$) 相比明显较低, 说明该石榴斜长角闪岩样品的原岩 (基性火山岩) 经历了一定程度的分异作用。在 $\text{SiO}_2-\text{Nb}/\text{Y}$ 判别图解中, 样品均具有亚碱性玄武岩特征 (图 6a), 利用 $\text{La}/\text{Yb}-\Sigma\text{REE}$ 图解进一步进行区分, 显示样品均位于玄武岩区域, 靠近大陆拉斑玄武岩的范围内 (图 6b)。

样品的稀土元素总量 (ΣREE) 值为 35.79×10^{-6} ~ 154.63×10^{-6} , 其中轻稀土元素 (LREE) 总量介于 24.36×10^{-6} ~ 125.63×10^{-6} 之间, 重稀土元素 (HREE) 总量介于 11.43×10^{-6} ~ 29.00×10^{-6} 之间, LREE/HREE 值为 2.13~5.10。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 1.44~4.98。此外 δEu 的值为 0.89~1.09, 平均 1.01, δCe 值为 0.94~1.00, 平均 0.98, 二者均显示无明显异常。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图 (图 7a) 中, 样品更具 E-MORB 的特征, 在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图 (图 7b) 中显示出 LREE 富集, HREE 亏损的特征, 更与 E-MORB 模式类似。

3.5 锆石 U-Pb 年代学

石榴斜长角闪岩样品中锆石晶体以无色透明的圆状或椭圆状为主, 少数为短柱状。晶体较大, 长轴约为 200 μm , 长宽比多为 1:1~2:1。对锆石阴极发

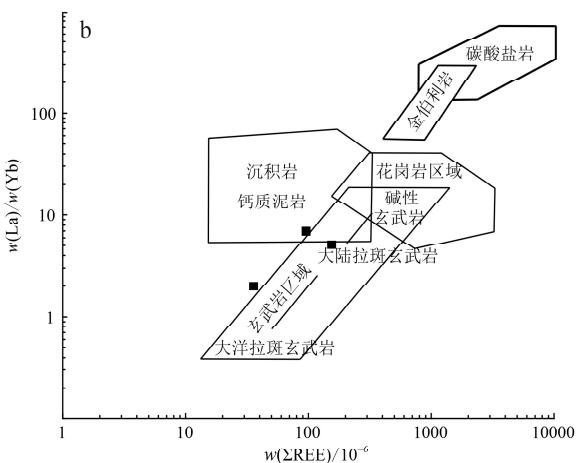


图 6 石榴斜长角闪岩 $\text{SiO}_2-\text{Nb}/\text{Y}$ (a) 及 $\text{La}/\text{Yb}-\Sigma\text{REE}$ (b) 图解 (据 Winchester and Floyd, 1977)

Fig. 6 Diagrams of $\text{SiO}_2-\text{Nb}/\text{Y}$ (a) and $\text{La}/\text{Yb}-\Sigma\text{REE}$ (b) for the garnet-amphibolite (according to Winchester and Floyd, 1977)

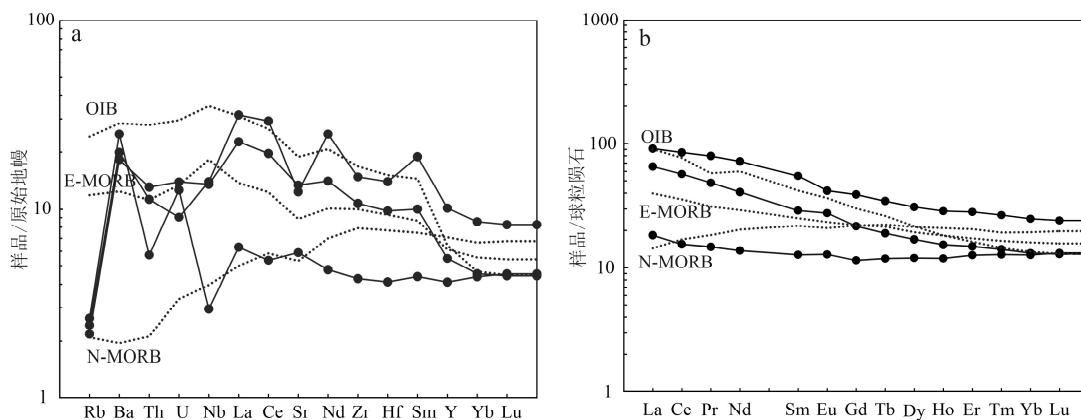


图7 石榴斜长角闪岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土元素配分图(b)[标准化值据 Sun and McDonough, 1989; N-MORB, E-MORB 数据据王金荣等(2017); OIB 数据据陈万峰等(2017)]

Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram (a) and chondrite-normalized of rare earth element distribution pattern of the garnet-amphibolite (b) (standardized value according to Sun and McDonough, 1989; N-MORB, E-MORB data according to Wang Jinrong *et al.*, 2017; OIB data according to Chen Wanfeng *et al.*, 2017)

光(CL)图像(图8a)观察可以看出,锆石发光强度较弱,多呈灰黑色,显示无分带-面状分带的特征,个别锆石发育有扇形分带,显示其为变质成因锆石。

石榴斜长角闪岩样品的LA-ICP-MS锆石U-Pb定年结果和微量元素结果见表5和表6。从表5可以看出,其Th含量变化范围在 $26.96 \times 10^{-6} \sim 99.03 \times 10^{-6}$, U含量变化范围在 $185.80 \times 10^{-6} \sim 661.42 \times 10^{-6}$, Th/U值介于0.04~0.17(<0.4),这一特征为典型的变质锆石的特征(Wu and Zheng, 2004)。其稀土总量ΣREE变化范围为 $108.14 \times 10^{-6} \sim 490.78 \times$

10^{-6} 。在球类陨石标准化稀土元素配分模式图上,可以观察到这些锆石显示HREE弱富集的特征,这可能是由于这些锆石是在较低的温度下形成的,因为锆石和石榴子石之间的HREE分配会随着温度的升高而减少(Rubatto and Hermann, 2007)。它们具有明显的Ce正异常($\delta\text{Ce}=1.75 \sim 13.66$)和Eu负异常($\delta\text{Eu}=0.11 \sim 0.68$)(图9)。

其U-Pb年龄定年结果(图8b、8c)显示了 $2008 \pm 11 \text{ Ma}$ (MSWD=0.32, n=20)的谐和年龄以及 $2003 \pm 5 \text{ Ma}$ 的加权平均年龄。

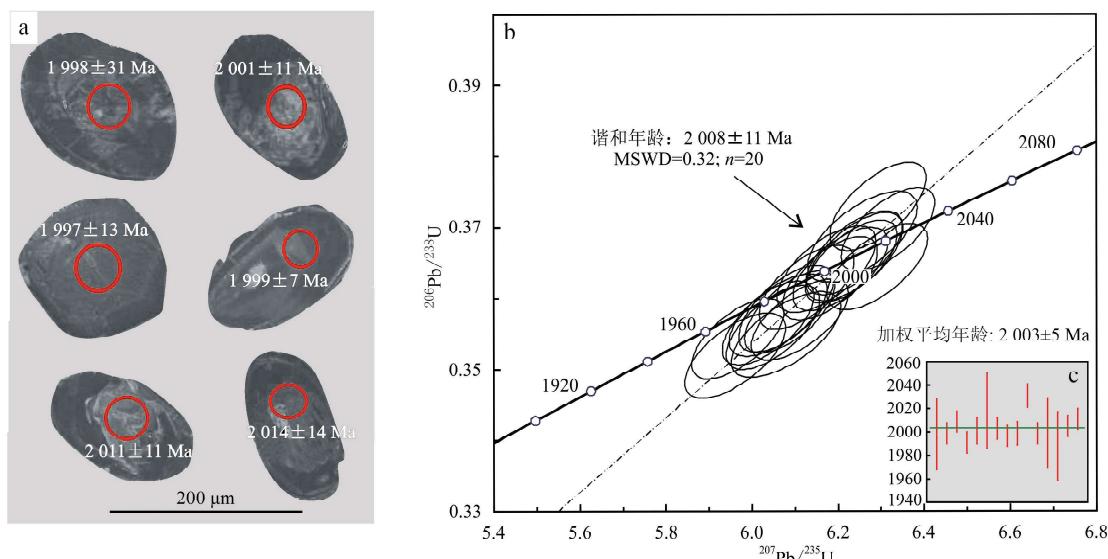


图8 石榴斜长角闪岩锆石CL图像(a)、U-Pb年龄谐和图(b)及加权平均年龄图(c)

Fig. 8 CL image of garnet-amphibolite zircon (a), U-Pb age concordia diagram (b) and weighted average age diagram (c)

表 5 石榴斜长角闪岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄
Table 5 LA-ICP-MS U-Pb ages of zircons from the garnet-amphibole

编号	同位素比值						年龄/Ma								
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ			
1	56.79	517.45	0.11	0.122 83	0.002 12	5.960 38	0.077 67	0.351 95	0.003 96	1.998	31	1.970	11	1.944	17
2	52.73	514.54	0.10	0.122 93	0.002 52	6.079 25	0.072 51	0.358 53	0.004 02	1.999	8	1.987	10	1.975	19
3	66.37	503.32	0.13	0.123 63	0.002 53	6.238 87	0.073 93	0.365 83	0.004 09	2.009	5	2.010	15	2.010	20
4	57.87	505.26	0.11	0.122 35	0.002 52	6.293 77	0.073 80	0.372 91	0.004 10	1.991	12	2.018	13	2.043	16
5	36.84	346.91	0.11	0.123 04	0.002 66	6.256 97	0.084 18	0.368 64	0.004 21	2.001	11	2.012	12	2.023	18
6	27.58	185.80	0.15	0.124 24	0.002 21	6.078 77	0.084 22	0.354 87	0.003 97	2.018	32	1.987	9	1.958	21
7	80.05	576.59	0.14	0.123 22	0.002 56	6.048 60	0.071 60	0.355 88	0.003 88	2.003	9	1.983	10	1.963	18
8	52.61	478.12	0.11	0.122 78	0.002 54	6.037 56	0.070 40	0.356 50	0.003 87	1.997	13	1.981	16	1.966	20
9	32.27	262.13	0.12	0.122 94	0.002 59	6.173 44	0.075 88	0.364 07	0.004 01	1.999	10	2.001	11	2.001	17
10	80.74	567.73	0.14	0.125 19	0.002 65	6.291 73	0.077 15	0.364 42	0.003 99	2.031	10	2.017	17	2.003	19
11	67.24	549.98	0.12	0.122 90	0.002 58	6.126 97	0.072 85	0.361 54	0.003 89	1.999	7	1.994	10	1.989	18
12	40.20	362.14	0.11	0.122 92	0.002 01	6.060 68	0.075 07	0.357 61	0.003 80	1.999	30	1.985	15	1.971	25
13	66.57	563.12	0.12	0.122 14	0.001 94	5.966 78	0.070 86	0.354 30	0.003 72	1.988	29	1.971	9	1.955	20
14	66.90	552.00	0.12	0.123 31	0.002 56	6.087 58	0.069 39	0.358 06	0.003 80	2.005	9	1.988	18	1.973	23
15	99.03	661.42	0.15	0.123 78	0.002 57	6.231 16	0.070 18	0.365 13	0.003 85	2.011	11	2.009	10	2.006	18
16	56.86	451.63	0.13	0.123 66	0.002 60	6.205 45	0.072 69	0.364 07	0.003 86	2.010	9	2.005	13	2.001	22
17	30.60	513.45	0.06	0.123 54	0.002 61	6.238 29	0.073 63	0.366 37	0.003 89	2.008	12	2.010	11	2.012	21
18	26.96	343.86	0.08	0.124 15	0.001 99	6.111 23	0.074 45	0.357 01	0.003 74	2.017	29	1.992	14	1.968	17
19	27.04	605.43	0.04	0.123 63	0.002 61	6.181 36	0.073 02	0.362 79	0.003 84	2.009	9	2.002	10	1.995	27
20	80.38	468.05	0.17	0.123 99	0.002 60	6.316 58	0.072 01	0.369 66	0.003 87	2.014	14	2.021	8	2.028	23

$w_{\text{b}}/10^{-6}$

表 6 石榴斜长角闪岩中锆石的稀土元素组成
Table 6 Rare earth element compositions of zircons in garnet-amphibolite

编号	Y	La	Ce	P _r	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	LREE	HREE	ΣREE	δEu	δCe
1	272.95	0.16	2.23	0.08	0.49	1.25	0.14	6.60	2.59	26.20	9.00	37.26	7.63	72.29	12.19	4.35	173.76	178.11	0.15	4.86
2	305.67	0.46	4.01	0.35	2.71	2.19	0.31	7.44	2.62	28.45	9.61	40.57	8.27	76.11	13.93	10.03	187.00	197.03	0.23	2.46
3	478.54	0.87	6.87	0.58	3.23	2.94	0.64	11.83	4.15	46.09	15.20	62.86	12.94	122.72	21.55	15.13	297.34	312.47	0.33	2.37
4	346.07	<0.06	0.98	<0.04	0.30	1.13	0.30	8.64	3.57	38.18	11.63	45.68	9.15	84.70	15.46	2.80	217.01	219.81	0.29	5.30
5	272.13	0.28	2.20	0.14	1.44	1.73	0.46	6.51	2.55	27.04	8.94	36.11	7.08	67.77	11.81	6.25	167.81	174.06	0.42	2.71
6	680.97	0.67	21.87	0.45	3.35	3.95	1.94	19.53	6.74	73.01	24.86	101.15	20.01	181.79	31.46	32.23	458.55	490.78	0.68	9.80
7	342.20	0.04	2.36	<0.05	0.43	1.18	0.15	7.40	2.77	30.91	11.38	50.09	10.93	107.32	18.92	4.20	239.72	243.92	0.15	13.66
8	289.39	0.19	2.57	0.15	1.22	1.54	0.26	6.89	2.46	27.81	9.65	40.20	8.55	81.08	14.48	5.94	191.12	197.06	0.25	3.73
9	204.85	0.08	5.42	0.53	1.48	2.45	0.58	4.08	2.87	28.45	24.72	52.04	12.55	116.79	14.08	10.54	255.58	266.12	0.56	6.49
10	327.28	0.60	4.78	0.48	3.91	2.76	0.42	9.67	3.07	32.68	10.72	44.14	8.77	79.43	13.61	12.95	202.09	215.04	0.25	2.19
11	303.28	0.10	2.33	0.07	0.52	1.17	0.31	7.44	2.72	29.19	10.02	41.86	8.69	82.82	14.21	4.50	196.95	201.45	0.32	6.67
12	195.80	0.43	2.76	0.19	1.19	1.23	0.17	4.80	1.69	18.64	6.54	26.44	5.40	52.38	9.03	5.97	124.92	130.89	0.21	2.38
13	294.13	<0.07	1.72	<0.04	0.42	1.41	0.12	7.55	2.80	29.62	9.78	37.85	7.81	70.66	12.00	3.79	178.07	181.86	0.11	7.67
14	255.21	0.15	2.39	0.18	1.51	1.61	0.35	6.61	2.28	24.65	8.70	35.56	7.33	69.34	11.67	6.19	166.14	172.33	0.33	3.61
15	364.35	<0.06	1.97	0.05	0.75	1.65	0.16	9.72	3.34	36.09	11.76	47.16	9.10	83.31	13.23	4.64	213.71	218.35	0.12	8.81
16	269.61	0.07	1.81	<0.06	0.69	1.24	0.15	6.42	2.43	25.55	8.69	36.29	7.21	69.88	11.67	4.02	168.14	172.16	0.16	6.80
17	196.50	0.11	1.22	0.09	0.56	0.97	0.13	5.76	2.07	19.86	6.41	24.44	5.15	49.53	8.46	3.08	121.68	124.76	0.17	3.04
18	286.73	0.32	1.99	0.24	1.80	1.15	0.56	6.72	2.71	30.75	9.25	33.83	6.44	58.70	9.10	6.06	157.50	163.56	0.61	1.75
19	187.31	0.18	1.25	0.12	0.86	1.25	0.15	6.58	2.17	20.26	6.02	21.17	4.06	37.79	6.28	3.81	104.33	108.14	0.16	2.09
20	246.57	<0.08	2.94	0.06	0.70	1.00	0.13	4.86	1.66	20.59	8.21	40.42	9.29	95.46	18.40	4.91	198.89	203.80	0.17	10.24

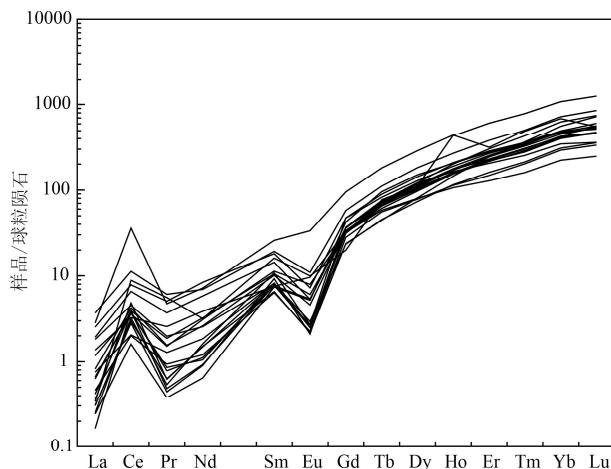


图9 石榴斜长角闪岩锆石球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 9 Distribution pattern of standardized rare earth elements of garnet plagioclase amphibolite zircon chondrite (standardized value according to Sun and McDonough, 1989)

4 讨论

4.1 变质时代

前人对扬子克拉通黄陵基底古元古代变质岩系进行了大量的年代学研究 (Zhang *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2009; Yin *et al.*, 2013), 并获得了许多变质年代学的数据。其中, Zhang 等 (2006) 对崆岭杂岩中变泥质岩以及角闪岩进行的 U-Pb 年代学以及 Hf 和 O 同位素研究当中, 对古元古代变质作用的时间进行了厘定, 依据锆石 CL 图像以及结合锆石微量元素特征识别出变质锆石, 并获得了 1.97 ± 0.03 Ga 的变质年龄。Wu 等 (2009) 也对变沉积岩和石榴斜长角闪岩进行了 U-Pb 年代学以及 Hf 同位素的研究, 获得了 2.010 ± 13 Ma 的加权平均年龄, 并通过与前人所得不同的年龄段进行对比, 将这一年龄解释为变质峰期作用时间, 且通过锆石 Ti 温度计估算此变质作用达到的高角闪岩相。Yin 等 (2013) 对铁镁质麻粒岩以及变泥质岩和大理岩的年代学及 Sm-Nd 同位素研究中, 也获得了大约 2.0 Ga 的变质峰期年龄, 并首次提出了扬子克拉通是 Columbia 超大陆的一部分。近年, 多数研究者对扬子克拉通古元古代角闪岩相-麻粒岩相变质作用进行了更进一步的年代学细划, 结果表明其变质时代主要集中在 $2.03 \sim 1.97$ Ga (邱啸飞等, 2017; Han *et al.*, 2017b; Liu *et al.*, 2019; Wei *et al.*, 2020; 陈超等, 2020; 韩庆森等, 2020)。

在本文的研究当中, 石榴斜长角闪岩样品的锆石也记录了 $1.97 \sim 2.03$ Ga 的变质年龄, 具体为 2.003 ± 5 Ma 的加权平均年龄, 对扬子克拉通这一古元古代变质作用发生的时间进行了很好的限定。但在变质锆石中未发现特征的矿物包体, 因此对于该年龄是否也代表着变质峰期作用的时间并不好进行确认, 在之后的工作当中, 需要对锆石 CL 图像进行更加细致的观察和研究。

4.2 变质作用 *p-t* 轨迹

对石榴斜长角闪岩样品进行了 *p-t* 条件的计算, 得到 3 个阶段的变质温压条件分别为: 进变质阶段, $t = 596 \sim 625^\circ\text{C}$, $p = 0.70 \sim 0.82$ GPa; 峰期变质阶段, $t \approx 760^\circ\text{C}$, $p \approx 1.35$ GPa; 峰期后变质阶段, $t = 692 \sim 738^\circ\text{C}$, $p = 0.68 \sim 0.74$ GPa, 并定义了一条顺时针的 *p-t* 演化轨迹(图 10)。将这 3 个阶段划分为两个演化过程, 过程 I 由进变质阶段到峰期变质阶段组成, 表现为升温升压的演化特征, 温度升高了 150°C 左右, 压力增大了约 0.6 GPa, 显示了岩体被带入到地下约 40 km 处, 由低角闪岩相向高角闪岩相至麻粒岩相发生转变; 过程 II 由峰期变质阶段到退变质阶段

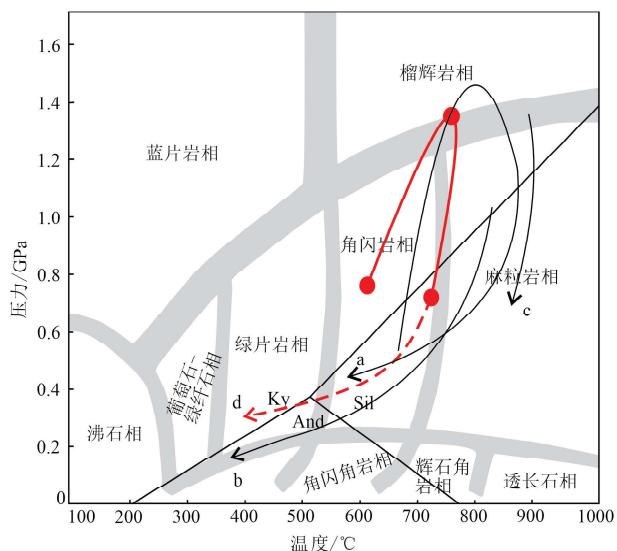


图10 黄陵穹窿石榴斜长角闪岩与该地区部分古元古代岩石的 *p-t* 轨迹图(底图修改自 Winter, 2001)

Fig. 10 *p-t* trace of garnet-amphibolite in Huangling Dome and some Paleoproterozoic rocks in the area (base map after Winter, 2001)

a—石榴斜长角闪岩 (Wu *et al.*, 2009); b—基性麻粒岩 (Liu *et al.*, 2019); c—高压铁镁质麻粒岩 (Yin *et al.*, 2013); d—石榴斜长角闪岩 (本文)
a—garnet-amphibolite (Wu *et al.*, 2009); b—mafic granulite (Liu *et al.*, 2019); c—high pressure mafic granulite (Yin *et al.*, 2013);
d—garnet-amphibolite (this study)

组成,表现为降温降压过程,温度降低约40℃,压力降低约0.65 GPa,与前者相比温度降低幅度不大,但压力大幅下降,展现出了近等温减压的特征。*p-t* 轨迹反映了岩石先经历了俯冲埋深加厚随后快速折返的过程,这一特征与俯冲-碰撞造山带内的岩体经历的变质演化模式类似,因此指示了它形成于陆-陆碰撞的环境。表7 汇总了部分前人对黄陵地区古元古代变质岩 *p-t* 条件及年代的研究结果,值得注意的

是,在以往的研究当中,只有Wu等(2009)对该地区的石榴斜长角闪岩进行了变质条件的初步研究,获得峰期变质条件为:温度约770℃、压力为1.48~1.31 GPa,得到了近似于顺时针的 *p-t* 轨迹(图10)。在Liu等(2019)对古元古代基性麻粒岩变质作用和Yin等(2013)对古元古代高压铁镁质麻粒岩的研究中,也得出在峰期变质阶段之后显示出了近等温减压的特征(图10)。

表7 黄陵地区部分前人对古元古代变质岩 *p-t* 条件及变质年龄研究结果汇总表

Table 7 Summary of research results on *p-t* condition and metamorphic age of Paleoproterozoic metamorphic rocks by some predecessors in Huangling area

岩石类型	峰期矿物组合	峰期温压条件	变质年龄	引用
变质沉积岩	石榴石+黑云母+夕线石+斜长石+石英	$p=0.68\sim0.8 \text{ GPa}, t=750\sim800^\circ\text{C}$	$2\ 003\pm10 \text{ Ma}$	Wu et al. (2009)
石榴斜长角闪岩	石榴石+角闪石+斜长石+石英	$p=1.31\sim1.48 \text{ GPa}, t\approx770^\circ\text{C}$	$2\ 015\pm9 \text{ Ma}$	Wu et al. (2009)
黑云斜长片麻岩	石榴石+黑云母+夕线石+钾长石+斜长石+石英	$p=0.54\sim0.76 \text{ GPa}, t=623\sim677^\circ\text{C}$	$1\ 990\pm16 \text{ Ma}$	岑洋(2013)
铁镁质麻粒岩	石榴石+单斜辉石+斜长石+石英	$p>1.2 \text{ GPa}, t>870^\circ\text{C}$	$2\ 009\pm7 \text{ Ma}$	Yin et al. (2013)
铁镁质麻粒岩	石榴石+斜方辉石+单斜辉石+斜长石	$p\approx1.1 \text{ GPa}, t=811\sim853^\circ\text{C}$	$1\ 999\pm41 \text{ Ma}$	Liu et al. (2019)
榴辉岩相变泥质岩	石榴石+蓝晶石+硬绿泥石+多硅白云母+金红石+石英	$p=1.92\pm0.25 \text{ GPa}, t=2.18\pm0.4 \text{ GPa}, t=571\pm16^\circ\text{C} \sim 576\pm11^\circ\text{C}$	$1\ 991\pm20 \text{ Ma}$	韩庆森等(2020)

将本文与前人研究结果对比可以发现,黄陵穹窿古元古代变质岩可分为两种类型,即低温高压型和高温低压型,其空间上具有自西北向东南的分布特征,显示出双变质带的特性,说明了古元古代板块是由西北向东南俯冲(韩庆森等,2020)。重要的是,本次获得的石榴斜长角闪岩的峰期压力约为1.35 GPa,与Wu等(2009)获得的石榴斜长角闪岩的峰期压力1.48 GPa以及韩庆森等(2020)获得的榴辉岩相变泥质岩的峰期压力2.18 GPa都显示出高压的特征,且具有相似的顺时针 *p-t* 轨迹,因此,这些研究结果为黄陵穹窿古元古代存在板块的俯冲-碰撞提供了有力的岩石学证据。

4.3 与 Columbia 超大陆的联系

全球前寒武构造演化都普遍发生在古元古代,大多数的碰撞造山事件都可能与Columbia超大陆的形成有关(Wu et al., 2012; Weller and St-Onge, 2017; Xu et al., 2018; Cawood, 2020; Zhao et al., 2020)。扬子克拉通的岩浆事件和构造演化对Columbia超大陆汇聚的响应以及其所在位置被越来越多学者所关注。Wang等(2015, 2016)报道了在2.3~2.1 Ga的岩浆事件以及约2.0 Ga与造山运动相关的花岗岩; Liu等(2019)报道了2.0 Ga的麻粒岩变质作用以及在1.85 Ga发现A型花岗岩及基性岩脉

(Peng et al., 2008, 2012; Xiong et al., 2009)。综合本文研究结果表明,扬子克拉通黄陵地区在古元古代经历了一次完整的造山运动,在2.3~2.1 Ga微陆块开始俯冲阶段,板块边缘形成岛弧岩浆,约2.0 Ga时俯冲停止,地壳加厚发生角闪岩相-麻粒岩相变质作用,之后又发生了快速的折返,在1.85 Ga进入伸展阶段,形成A型花岗岩及基性岩脉,标志着从碰撞挤压环境向碰撞后伸展环境的过渡。

Wang等(2016)在对扬子西南缘片麻岩的研究中提出,北美Rae和Laurentia克拉通在古元古代的时候具有关联性; Pehrsson等(2016)对Columbia超大陆的聚合过程进行了反演,并认为其在2.2~1.95 Ga就已经开始发生聚合;且在加拿大西北部的Thelon造山带普遍发育着2.02~1.96 Ga的麻粒岩相变质作用(Hoffman, 2014),因此认为Thelon造山带是Rae和Slave克拉通的缝合带,结合这些成果韩庆森(2017)还原了扬子克拉通在Columbia超大陆可能的位置。本文也为这一观点提供了证据,所报道的石榴斜长角闪岩经历了约2.0 Ga的变质作用并达到麻粒岩相,与Thelon造山带的形成时间和变质程度相呼应,表明在Columbia超大陆聚合时扬子克拉通可能参与了Rae和Slave克拉通微陆块之间的碰撞拼接过程,因此笔者推测扬子克拉通在空间上可

能与 Slave 与 Rae 克拉通具有一定的关联性。

综上, 岩体在古元古代约 2.0 Ga 经历了碰撞造山的过程, 经历了中高压变质, 反映了陆陆碰撞的造山环境, 暗示了其可能与 Columbia 超大陆的形成有关, 所获得的 $p-t$ 轨迹和变质年龄为之后进一步探索扬子克拉通古元古代变质作用及构造演化提供了新的资料。虽然在空间上扬子克拉通可能与 Rae 和 Slave 克拉通相关联, 但其在 Columbia 超大陆的具体位置还需进一步探索。

5 结论

(1) 通过岩相学观察, 扬子克拉通黄陵穹窿石榴斜长角闪岩保留有 3 期变质阶段的矿物组合特征。进变质阶段矿物组合为角闪石+斜长石+钛铁矿+石英, 峰期变质阶段矿物组合为石榴子石+角闪石+斜长石+单斜辉石+钛铁矿+石英, 退变质阶段矿物组合为石榴子石+角闪石+斜长石+钛铁矿+石英。

(2) 研究区石榴斜长角闪岩原岩(基性火山岩)为亚碱性玄武岩, 属于大陆拉斑玄武岩, 其原岩发生了一定程度的分异作用。对样品锆石进行 U-Pb 年代学测试获得 $2\ 003 \pm 5$ Ma 的加权平均年龄, 表明其原岩经历了约 2.0 Ga 时的角闪岩相-麻粒岩相的区域变质作用, 最终形成石榴斜长角闪岩。

(3) 通过使用合适的地质温压计, 计算出不同变质阶段的温压条件。进变质阶段 $t = 596 \sim 625^\circ\text{C}$ 、 $p = 0.70 \sim 0.82 \text{ GPa}$, 峰期变质阶段 $t \approx 760^\circ\text{C}$ 、 $p \approx 1.35 \text{ GPa}$, 退变质阶段 $t = 692 \sim 738^\circ\text{C}$ 、 $p = 0.68 \sim 0.74 \text{ GPa}$ 。定义了一条顺时针的 $p-t$ 轨迹, 峰期后显示出近等温减压的特征, 反映了碰撞造山的构造环境, 这可能是对 Columbia 超大陆聚合的响应。

致谢 电子探针实验和全岩主微量测试得到了大陆动力学国家重点实验室杨文强老师和王建其老师的帮助; 成文过程中得到了西北大学全来喜老师的帮助; 匿名审稿专家为本文提出了宝贵的意见和建议, 在此致以诚挚的感谢!

References

- Barker A J. 1990. Introduction to Metamorphic Textures and Microstructures [M]. The United Kingdom: Blackie, 1~260.
- Bhadra S and Bhattacharya A. 2007. The barometer tremolite+tscherma-kite+2 albite = 2 pargasite+8 quartz: Constraints from experimental data at unit silica activity, with application to garnet-free natural assemblages [J]. American Mineralogist, 92: 491~502.
- Cawood P A. 2020. Earth Matters: A tempo to our planet's evolution [J]. Geology, 48: 525~526.
- Cen Yang. 2013. The Petrology of Granulite Facies Metamorphism and Its Tectonic Implication of the Kongling Group, Northern Huangling Anticline [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1~54 (in Chinese with English abstract).
- Chen Chao, Wan Jinling, Guo Pan, et al. 2020. ~2. 0 Ga regional metamorphic event in Yangtze block and its heuristic significance to the geological differences evolutionary between north and south Huangling [J]. Geology in China, 47(4): 899~913 (in Chinese with English abstract).
- Chen K, Gao S, Wu Y B, et al. 2013. 2. 6~2. 7 Ga crustal growth in Yangtze craton. South China [J]. Precambrian Research, 224: 472~490.
- Chen Wanfeng, Wan Jinrong, Zhang Qi, et al. 2017. Data mining of ocean island basalt and ocean plateau basalt: Geochemical characteristics and comparison with MORB [J]. Acta Geologica Sinica, 91(11): 2 443~2 455 (in Chinese with English abstract).
- Dale J, Holland T and Powell R. 2000. Hornblende-garnet-plagioclase thermobarometry: A natural assemblage calibration of the thermodynamics of hornblende [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 140: 353~362.
- Deer W A, Howie R A and Zussman J. 1997. Rock-forming Minerals. 2nd Edition [M]. Washing D C: Geological Society Publishing House, 3~4.
- Eckert J O J, Newton R C and Kleppa O J. 1991. The ΔH of reaction and recalibration of garnet-pyroxene-plagioclase-quartz geobarometers in the CMAS system by solution calorimetry [J]. American Mineralogist, 76: 148~160.
- Eide E A and Liou J G. 2000. High-pressure blueschists and eclogites in Hong'an: A frame work for addressing the evolution of high-and ultra-high-pressure rocks in central China [J]. Lithos, 52(1~4): 1~22.
- Gao Shan, Qiu Y M, Ling Wenli, et al. 2001. SHRIMP U-Pb chronology of single grain zircon from Kongling high grade metamorphic terrain: Discovery of continental crust material of Yangtze Craton > 3. 2 Ga [J]. Science in China (Part D: Earth Science), 6(1): 27~35 (in Chinese with English abstract).
- Gao Shan and Zhang Benren. 1990. The discovery of Archean TTG gneiss in the Northern Yangtze platform and their significance [J]. Earth Science, 15(6): 675~679 (in Chinese with English abstract).
- Guo J L, Gao S, Wu Y B, et al. 2014. 3. 45 Ga granitic gneisses from

- the Yangtze Craton, South China: Implications for Early Archean crustal growth[J]. *Precambrian Research*, 242: 82~95.
- Guo J L, Wu Y B, Gao S, et al. 2015. Episodic Paleoarchean-Paleoproterozoic (3.3~2.0 Ga) granitoid magmatism in Yangtze Craton, South China: Implications for late Archean tectonics[J]. *Precambrian Research*, 270: 246~266.
- Han Qingsen. 2017. Genesis and Tectonic Significance of the Paleoproterozoic Ophiolitic Mélange in the Huangling Dome, Yangtze Craton [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1~140 (in Chinese with English abstract).
- Han Q S, Peng S B, Kusky T, et al. 2017b. A Paleoproterozoic ophiolitic melange, Yangtze Craton, South China: Evidence for Paleoproterozoic suturing and microcontinent amalgamation [J]. *Precambrian Research*, 293: 13~38.
- Han Q S, Peng S B, Polat A, et al. 2017a. A ca. 2.1 Ga Andean-type margin built on metasomatized lithosphere in the northern Yangtze craton, China: Evidence from high-Mg basalts and andesites [J]. *Precambrian Research*, 309: 309~324.
- Han Qingsen, Peng Songbai and Jiao Shujuan. 2020. Discovery and tectonic implications of Paleoproterozoic cold subduction low-temperature/high-pressure eclogitic metapelites, Yangtze Craton [J]. *Earth science*, 45(6): 1986~1998 (in Chinese with English abstract).
- Harley S L. 1989. The origins of granulites: A metamorphic perspective [J]. *Geological Magazine*, 126(3): 215~247.
- Hoffman P F. 2014. The origin of Laurentia: Rae craton as the backstop for Proto-Laurentian Amalgamation by slab suction[J]. *Geoscience Canada*, 41(3): 313~320.
- Holland T and Blundy J. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116: 433~447.
- Jiang Jisheng, 1986. Isotopic geochronology and crustal evolution in Huangling metamorphic terrain[J]. *Journal of Changchun Institute of Geology*, 31(3): 1~11 (in Chinese).
- Jiao W F, Wu Y B, Yang S H, et al. 2009. The oldest basement rock in the Yangtze Craton revealed by zircon U-Pb age and Hf isotope composition[J]. *Science in China(Series D: Earth Sciences)*, 52(9): 1393~1399.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, et al. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names[J]. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219~246.
- Li L M, Lin S F, Davis D W, et al. 2014. Geochronology and geochemistry of igneous rocks from the Kongling terrane: Implications for Mesoproterozoic to Paleoproterozoic crustal evolution of the Yangtze Block [J]. *Precambrian Research*, 255: 30~47.
- Liu P H, Liu F L, Liu C H, et al. 2013. Petrogenesis, *p-t-t* path, and tectonic significance of high-pressure mafic granulites from the Jiaobei terrane, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 233: 237~258.
- Liu B, Zhai M G, Zhao L, et al. 2019. Metamorphism, *p-t* path and zircon U-Pb dating of Paleoproterozoic mafic and felsic granulites from the Kongling terrane, South China [J]. *Precambrian Research*, 333: 105403.
- Liu Pinghua, Cai Jia and Zou Lei. 2017. Metamorphic *p-t-t* path and its geological implication of the Sanjiazi garnet amphibolites from the northern Liaodong Peninsula, Jiao-Liao-Ji belt: Constraints on phase equilibria and zircon U-Pb dating [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(9): 2649~2674 (in Chinese with English abstract).
- Lou Y X, Wei C J, Liu X C, et al. 2013. Metamorphic evolution of garnet amphibolite in the western Dabieshan eclogite belt, Central China: Evidence from petrography and phase equilibria modeling [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 63: 130~138.
- Ma Dashuan, Li Zhichang and Xiao Zhifa. 1997. Composition, age and geological evolution of Kongling complex in western Hubei [J]. *Journal of Earth Science*, 19(3): 10~18 (in Chinese).
- Peng M, Wu Y B, Wang J, et al. 2008. Paleoproterozoic mafic dyke from Kongling terrain in the Yangtze Craton and its implication [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(6): 1098~1104.
- Peng M, Wu Y B, Gao S, et al. 2012. Geochemistry, zircon U-Pb age and Hf isotope compositions of Paleoproterozoic aluminous A-type granites from the Kongling terrain, Yangtze Block: Constraints on petrogenesis and geologic implications [J]. *Gondwana Research*, 22(1): 140~151.
- Pehrsson S J, Eglington B M, Evans D A D, et al. 2016. Metallogeny and its link to orogenic style during the nuna supercontinent cycle [J]. *Geological Society London Special Publications*, 424(1): 83~94.
- Qian J H and Wei C J. 2016. *p-t-t*, evolution of garnet amphibolites in the Wutai-Hengshan area, north China craton: Insights from phase equilibria and geochronology [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 34(5): 423~446.
- Qiu Xiaofei, Zhao Xiaoming, Yang Hongmei, et al. 2017. Paleoproterozoic metamorphic event in the nucleus of the Yangtze craton: Evidence from U-Pb geochronology of the metamorphic zircons from the khondalite [J]. *Geological Bulletin of China*, 36(5): 706~714 (in Chinese with English abstract).

- Ravna E K. 2000. The garnet-clinopyroxene geothermometer—an updated calibration[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 211~219.
- Rubatto D and Hermann J. 2007. Experimental zircon/melt and zircon/garnet trace element partitioning and implications for the geochronology of crustal rocks[J]. *Chemical Geology*, 241: 38~61.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society London Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Wang Jinrong, Chen Wanfeng, Zhang Qi, et al. 2017. Preliminary research on data mining of NMORB and E-MORB: Discussion on method of the basalt discrimination diagrams and the character of MORB's mantle source[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 993~1 005 (in Chinese with English abstract).
- Wang X S, Gao J, Klemd R, et al. 2015. Early Neoproterozoic multiple arc-back-arc system formation during subduction-accretion processes between the Yangtze and Cathaysia blocks: New constraints from the supra-subduction zone NE Jiangxi ophiolite (South China) [J]. *Lithos*, 236: 90~105.
- Wang W, Cawood P A and Zhou M F. 2016. Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events link yangtze to northwest laurentia in the nuna supercontinent[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 433: 269~279.
- Wei J Q, Wei Y X, Wang J X, et al. 2020. Geochronological constraints on the formation and evolution of the Huangling basement in the Yangtze craton, South China[J]. *Precambrian Research*, 342: 105707.
- Wei Junqi, Wang Jianxiong, Wang Xiaodi, et al. 2009. Dating of mafic dikes from Kongling Group in Huangling Area and its implications [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39(3): 466~471 (in Chinese with English abstract).
- Wei Junqi and Wang Jianxiong. 2012. Zircon Age and Hf isotope compositions of amphibolite enclaves from the Kongling complex[J]. *Geological Journal of China Universities*, 18(4): 589~600 (in Chinese with English abstract).
- Weller O M and St-Onge M R. 2017. Record of modern-style plate tectonics in the Palaeoproterozoic Trans-Hudson orogen[J]. *Nature Geoscience*, 10: 305~311.
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20: 325~347.
- Winter J D. 2001. An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology [M]. New Jersey: Pearson Higher Isia Education, 410~635.
- Wu K K, Zhao G C, Sun M, et al. 2013. Metamorphism of the northern Liaoning Complex: Implications for the tectonic evolution of Neoarchean basement of the Eastern Block, North China Craton[J]. *Geoscience Frontiers*, 4(3): 305~320.
- Wu Y B, Gao S, Gong H J, et al. 2009. Zircon U-Pb age, trace element and Hf isotope composition of Kongling terrane in the Yangtze Craton: Refining the timing of Palaeoproterozoic high-grade metamorphism [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 27: 461~477.
- Wu Y B, Gao S, Zhang H F, et al. 2012. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of Paleoproterozoic arc related granitoid in the Northwestern Yangtze Block and its geological implications[J]. *Precambrian Research*, 200~203: 26~37.
- Wu Y B and Zheng Y F. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1 554~1 569.
- Xiong Q, Zheng J P, Yu C M, et al. 2009. Zircon U-Pb age and Hf isotope of Quanyishang A-type granite in Yichang: Signification for the Yangtze continental cratonization in Paleoproterozoic [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(3): 436~446.
- Xu C, Kynicky J, Song W L, et al. 2018. Cold deep subduction recorded by remnants of a Paleoproterozoic carbonated slab[J]. *Nature Communication*, 9: 2 790.
- Yang Jinxiang. 2007. Discussion on Khondalite lithology and metamorphism in the Huangling Area[J]. *Resources Environment and Engineering*, 21(3): 226~231 (in Chinese with English abstract).
- Yin C Q, Lin S F, Davis D W, et al. 2013. 2. 1~1. 85 Ga tectonic events in the Yangtze Block, South China: Petrological and geochronological evidence from the Kongling Complex and implications for the reconstruction of supercontinent Columbia[J]. *Lithos*, 182: 200~210.
- Yuan Haihua, Zhang Zhilan, Liu Wei, et al. 1997. Direct dating method of zircon grains by $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 12(2): 72~79 (in Chinese).
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. 2006. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze Craton of China[J]. *Precambrian Research*, 146(1): 16~34.
- Zhang S B and Zheng Y F. 2007. Growth and reworking of Yangtze continental nucleus: Evidence from zircon U-Pb ages and Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 393~402.
- Zhao G C and Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China[J]. *Precambrian Research*, 222: 13~54.
- Zhao G C, Cawood P A and Lu L Z. 1999. Petrology and *p-t* history of the Wutai amphibolites: Implications for tectonic evolution of the Wutai Complex, China[J]. *Precambrian Research*, 93(2): 181~199.

- Zhao T Y, Li J, Liu G C, et al. 2020. Petrogenesis of Archean TTGs and potassic granites in the southern Yangtze Block: Constraints on the early formation of the Yangtze Block [J]. Precambrian Research, 347: 105848.
- Zheng Yongfei and Zhang Shaobing. 2007. Formation and evolution of Precambrian continental crust in south China [J]. Chinese Science Bulletin, 58(1): 1~10 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 岑 洋. 2013. 鄂西黄陵背斜北部崆岭群麻粒岩相岩石学特征及其地质意义 [D]. 武汉: 中国地质大学, 1~54.
- 陈 超, 苑金玲, 郭 盼, 等. 2020. 扬子陆块 ~2.0 Ga 的区域变质事件对南北黄陵古元古代差异演化的启示 [J]. 中国地质, 47(4): 899~913.
- 陈万峰, 王金荣, 张 旗, 等. 2017. 洋岛和洋底高原玄武岩数据挖掘: 地球化学特征及其与 MORB 的对比 [J]. 地质学报, 91(11): 2 443~2 455.
- 马大铨, 李志昌, 肖志发. 1997. 鄂西崆岭杂岩的组成、时代及地质演化 [J]. 地球学报, 19(3): 10~18.
- 高 山, Qiu Y M, 凌文黎, 等. 2001. 崆岭高级变质地体单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究——扬子克拉通 >3.2 Ga 陆壳物质的发现 [J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 6(1): 27~35.
- 高 山, 张本仁. 1990. 扬子地台北部太古宙 TTG 片麻岩的发现及其意义 [J]. 地球科学, 15(6): 675~679.
- 韩庆森. 2017. 扬子克拉通黄陵穹窿古元古代蛇绿混杂岩成因及大地构造意义 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 1~140.
- 韩庆森, 彭松柏, 焦淑娟. 2020. 扬子克拉通古元古代冷俯冲低温-高压榴辉岩相变泥质岩的发现及其大地构造意义 [J]. 地球科学, 45(6): 1 986~1 998.
- 姜继圣. 1986. 黄陵变质地区的同位素地质年代及地壳演化 [J]. 长春地质学院学报, 31(3): 1~11.
- 刘平华, 蔡 佳, 邹 雷. 2017. 辽东半岛北部三家子石榴斜长角闪岩变质演化 p-t-t 轨迹及其地质意义: 来自相平衡模拟与锆石 U-Pb 定年的约束 [J]. 岩石学报, 33(9): 2 649~2 674.
- 邱啸飞, 赵小明, 杨红梅, 等. 2017. 扬子陆核古元古代变质事件——来自孔兹岩系变质锆石 U-Pb 同位素年龄的证据 [J]. 地质通报, 36(5): 706~714.
- 王金荣, 陈万峰, 张 旗, 等. 2017. N-MORB 和 E-MORB 数据挖掘——玄武岩判别图及洋中脊源区地幔性质的讨论 [J]. 岩石学报, 33(3): 993~1 005.
- 魏君奇, 王建雄. 2012. 崆岭杂岩中斜长角闪岩包体的锆石年龄和 Hf 同位素组成 [J]. 高校地质学报, 18(4): 589~600.
- 魏君奇, 王建雄, 王晓地, 等. 2009. 黄陵地区崆岭群中基性岩脉的定年及意义 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 39(3): 466~471.
- 杨金香. 2007. 黄陵地区孔兹岩系岩石学特征及变质作用探讨 [J]. 资源环境与工程, 21(3): 226~231.
- 袁海华, 张志兰, 刘 炜, 等. 1991. 直接测定颗粒锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的方法 [J]. 矿物岩石, 12(2): 72~79.
- 郑永飞, 张少兵. 2007. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化 [J]. 科学通报, 58(1): 1~10.