

攀枝花大田地区康定群咱里组变质杂岩 $P-T-t$ 轨迹及其构造意义



张宝玲¹⁾, 陈友良^{1,2)}, 欧何琼¹⁾, 付于真¹⁾, 殷桂芹¹⁾, 顾孟娟¹⁾

1) 成都理工大学地球科学学院, 成都, 610059;

2) 成都理工大学地学与核技术四川省重点实验室, 成都, 610059

内容提要: 扬子板块西缘的康定杂岩为一套由侵入岩和变质岩共同组成的岩浆—变质混合杂岩, 是研究罗迪尼亚超大陆裂解的重要窗口。长期以来对康定杂岩中的岩浆杂岩研究较多, 但对变质杂岩研究较为薄弱。为全面了解康定杂岩形成的构造背景及成因机制, 笔者等对扬子板块西缘的攀枝花大田地区康定群咱里组石榴夕线黑云斜长片麻岩进行了详细的岩相学、矿物地球化学、变质 $P-T$ 条件估算研究, 同时对同一层位的石榴二云片岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析。结果表明: 石榴夕线黑云斜长片麻岩可识别出三期变质矿物组合: 进变质阶段矿物组合 (M1) 为石榴子石变斑晶核部及其核部包裹体 (石榴子石核部+第一期黑云母+第一期夕线石+钛铁矿+石英), $P-T$ 条件为 609~690 °C—0.2~0.3 GPa; 峰期变质阶段矿物组合 (M2) 为石榴子石变斑晶幔部及变基质矿物 (石榴子石幔部+第二期黑云母+第二期夕线石+斜长石+石英), $P-T$ 条件为 643~732 °C—0.20~0.51 GPa; 退变质阶段矿物组合 (M3) 为石榴子石变斑晶边部及变基质矿物 (石榴子石边部+第二期黑云母+第二期夕线石+斜长石+石英), $P-T$ 条件为 602~687 °C—0.27~0.39 GPa。石榴夕线黑云斜长片麻岩记录了具近等压冷却型 (IBC) 的逆时针 $P-T$ 演化轨迹; 石榴二云片岩锆石 U-Pb 定年结果表明区内的变质时代为 842 ± 10 Ma, 综合分析表明: 扬子板块西缘的变质杂岩形成于拉张环境, 结合区内的同期岩浆活动特征, 认为区内新元古代变质事件可能与超级地幔柱引发的岩浆活动有关。

关键词: 大田地区; 康定群变质杂岩; 逆时针 $P-T$ 轨迹; 变质时代; 构造意义

在扬子板块西缘的四川康定—冕宁—攀枝花—云南元谋一带广泛分布着一套由侵入岩和变质岩共同组成的岩浆—变质混合杂岩带 (图 1), 即老一辈地质学家李春昱、程裕琪、黄汲清等于 20 世纪 30、40 年代研究过的“康定片麻岩” (胥德恩等, 1995), 后经张兆瑾于 1941 年改为康定杂岩 (辜学达等, 1997)。康定杂岩由北向南分别出露有彭灌杂岩、宝兴杂岩、狭义的康定杂岩 (指康定地区的变质混合杂岩系)、石棉杂岩、冕宁杂岩、米易—磨盘山杂岩、同德杂岩、攀枝花大田杂岩、元谋杂岩等杂岩体 (杨崇辉等, 2009)。各杂岩体多以独立的圈闭状态出露, 主要由变质杂岩 (康定群或直林群) 和花岗岩类岩石等组成, 局部包含角闪岩和麻粒岩, 在杂岩带中还广泛发育有混合岩、副片麻岩、片岩等, 岩性包括云母片岩、夕线石榴泥质片麻岩、大理岩、石英岩

等 (Zhou Meifu et al., 2002; 陈岳龙等, 2004; 杜利林等, 2006; 赵俊香等, 2006; 杨崇辉等, 2009)。

长期以来, 康定杂岩一直被认为代表扬子板块西缘的结晶基底 (徐先哲等, 1985), 但有关这套结晶基底的成因以及形成时代一直存在不同认识。袁海华等 (1986) 在同德与冕宁沙坝的混合片麻岩中分别获得了 2957 ± 304 Ma 的 Pb-Pb 和 2404 ± 189 Ma 的 Rb-Sr 等时线年龄, 认为这套结晶基底的形成时代应属太古宙—古元古代。从柏林 (1988) 在冕宁沙坝的麻粒岩和斜长角闪片麻岩中分别测得 Rb-Sr 等时线年龄为 1185.6 Ma 和 1088.8 ± 44.7 Ma, 同时计算得到麻粒岩的 Nd 模式年龄为 1462.8 Ma。胥德恩等 (1995) 利用单颗粒锆石 U-Pb 法获得康定杂岩的形成时代为新元古代, 并认为康定杂岩是由古元古代变质杂岩和晋宁—澄江期岩浆杂岩组成。近

注: 本文为国家自然科学基金资助项目 (编号: 42072096)、中国核工业地质局重点科研项目“康滇地轴铀成矿环境及选区研究” (编号: 202137-3) 和成都理工大学珠峰科技计划项目 (编号: 2021ZF11413) 的成果。

收稿日期: 2022-08-21; 改回日期: 2022-12-14; 网络首发: 2022-12-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.12.095

作者简介: 张宝玲, 男, 1996 年生, 硕士研究生, 地球化学专业; Email: baol_zhang@163.com。通讯作者: 陈友良, 男, 1965 年生, 教授, 博导, 主要从事成矿规律与前寒武纪地质研究; Email: chenyouliang09@cdut.cn。

20 年来,随着同位素定年技术的发展,大量的研究表明区内的岩浆杂岩形成于 860~750 Ma(赵俊香等,2006;郭春雨等,2007;杜利林等,2007),其形成时代属于新元古代。但有关这套岩浆杂岩的成因机制及构造背景仍是专家学者们争论的焦点,目前主要存在地幔柱模式(李献华等,2002;Li Zhengxiang et al., 2003;林广春等,2013;Yang Yijin et al., 2017)和岛弧模式(Zhou Meifu et al., 2002;杜利林等,2007;康欢等,2017)两大主流观点。前者认为扬子板块西缘新元古代时期岩浆岩的形成与 Rodinian 超级大陆裂解的地幔柱活动有关,康定杂岩形成于地幔柱时期的裂谷环境;后者则认为扬子板块西缘在新元古代时期为活动大陆边缘,康定杂岩形成于洋壳俯冲消减所形成的岩浆弧或被消减海洋岩石圈俯冲带包围的孤立陆块。

从前人的研究来看,对康定杂岩的成因和构造环境的判别大多是通过对区内花岗岩、苏雄组双峰式火山岩以及变质核杂岩中的花岗质片麻岩、片麻状花岗岩等岩石进行地球化学特征及年代学特征研究而来(郑玉文等,2021),而对区内变质杂岩的研究相对薄弱,这在一定程度上制约了我们对康定杂岩乃至整个扬子板块西缘构造演化的认识。笔者等以扬子板块西缘康定杂岩中的变质杂岩为研究对象,选取攀枝花大田地区康定群咱里组中的石榴夕线黑云斜长片麻岩和石榴二云片岩进行研究,通过详细的岩相学、矿物化学、热力学计算与年代学研究,建立了岩石变质作用的 $P-T-t$ 轨迹,并探讨了岩石可能形成的动力学机制,旨在为扬子板块西缘新元古代时期的构造演化增加新的依据。

1 地质背景与样品

邢无京(1989)将扬子板块西缘,北起米仓山,中经康定至川滇接壤一带出露的变质地层命名为康定群,自下而上划分为咱里组、冷竹关组和五马箐组,并通过区域地层对比将其层序置于会理群与河口群之下,认为其与鄂西地区的崆岭群相当,其时代应属太古宙—古元古代。卢民杰(1986)根据黑云母—石榴石、石榴石—角闪石及角闪石—斜长石等共生矿物对初步划分了康定群的变质相带,以角闪岩相为主,发育递增变质带,局部出现麻粒岩相,高绿片岩相、低绿片岩相,以低压相系为主,局部为中压相系。对于康定杂岩中呈包体或透镜体产出的基性麻粒岩,其围岩为角闪斜长片麻岩,主要矿物组成为紫苏辉石+单斜辉石+斜长石±角闪石±黑云母±石

英,被认为是扬子板块西缘变质程度最深、形成年代最古老的结晶基底(曾宪教等^①)。在变质温压条件研究方面,张儒瑗等(1987)研究认为四川米易地区的前寒武变质地体为一个典型的前寒武纪低压型前进变质地体,主要经历了绿片岩相和角闪岩相的变质作用,推断角闪岩相的变质温压条件为 600~700℃和 0.3~0.4 GPa。陆怀鹏等(1999)和孙海婷(2002)分别用二辉石和角闪石—斜长石温压计计算,获得坝头、同德、米易及沙坝等地区麻粒岩相的变质温度为 700~830℃和 900~960℃,变质压力为 0.73~0.8 GPa,属低压麻粒岩相。从前人的研究来

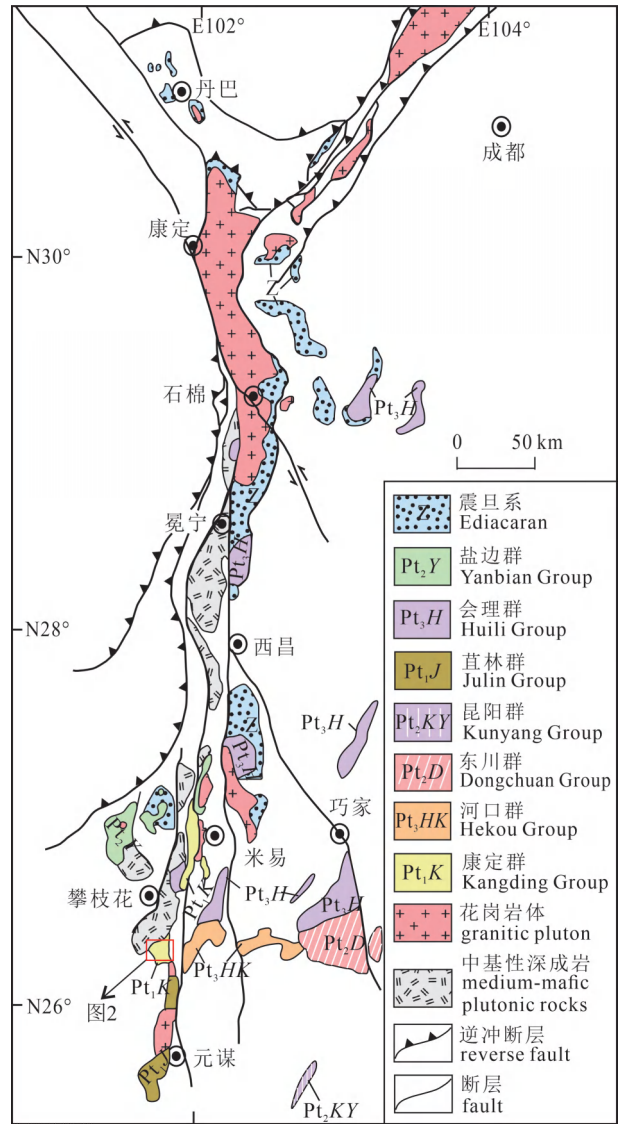


图 1 扬子板块西缘康定杂岩分布简图
(据 Zhou Meifu et al., 2002 修改)
Fig. 1 Brief geological map of the Kangding complex in the western margin of the Yangtze Plate (modified after Zhou Meifu et al. 2002)

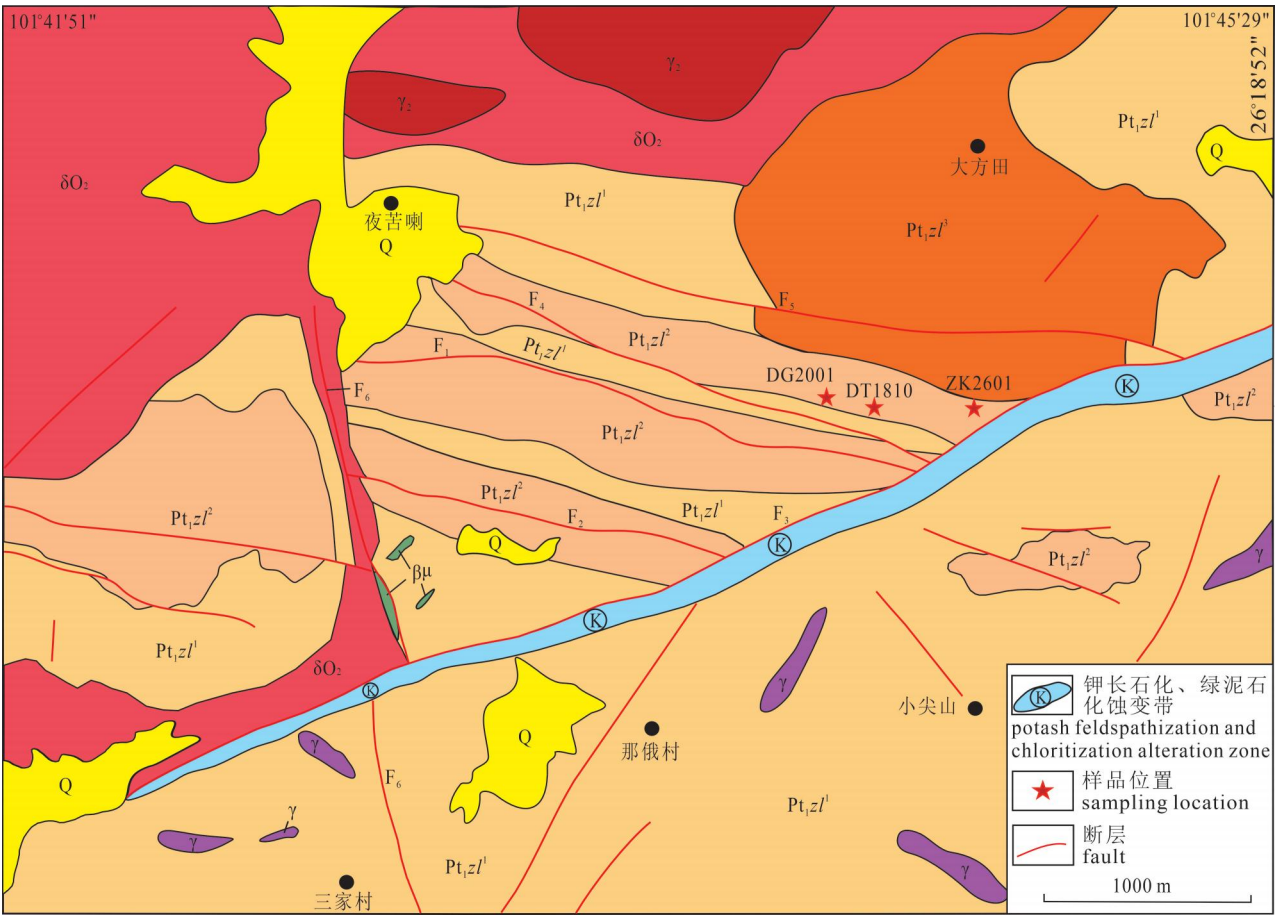


图 2 攀枝花大田地区地质简图

Fig. 2 Geological map of the Datian area, Panzhihua City

Q—第四系浮土;Pt₁zl³—咱里组三段;Pt₁zl²—咱里组二段;Pt₁zl¹—咱里组一段;δO₂—晋宁期石英闪长岩;
γ₂—晋宁期含角闪石黑云母花岗岩;γ—花岗岩脉;βμ—辉绿岩脉

Q—Quaternary regolith; Pt₁zl³—the 3rd Member of Zanli Formation; Pt₁zl²—the 2nd Member of Zanli Formation; Pt₁zl¹—the 1st Member of Zanli Formation; δO₂—quartz diorite of Jinning period; γ₂—Hornblende biotite granite of Jinning period; γ—granite vein; βμ—diabase vein

看,康定群的主体应为绿片岩相—角闪岩相的变质地体,仅局部存在呈基性包体或透镜体产出的麻粒岩,而有关这套主体变质岩的变质 $P-T-t$ 轨迹研究几近空白。

研究区位于攀枝花市大田镇西部,地处扬子板块西缘中部(图 1)。区内出露的地层主要为康定群咱里组,根据其原岩特征可划分为三个岩性段:一段(Pt₁zl¹)为一套斜长角闪片岩、角闪斜长片麻岩、混合岩化斜长角闪岩和含角闪石混合岩组合,原岩为基性火山岩;二段(Pt₁zl²)为一套含石墨黑云母片岩、石榴夕线黑云斜长片岩和片麻岩、条带状混合岩及含黑云母混合岩组合,原岩为沉积碎屑岩;三段(Pt₁zl³)为一套花岗片麻岩与眼球状混合片麻岩组合,原岩为酸性侵入岩(孙泽轩等,2020)。从咱里

组的岩性与岩石矿物组合来看,反映大田地区的变质岩经历了角闪岩相的变质作用。值得注意的是,目前有关康定群的地层时代仍存在较大争议(殷桂芹等,2022),笔者等曾在大田地区对侵入于石榴夕线黑云斜长片麻岩中的辉绿玢岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得其形成时代为 1093 ± 27 Ma(未刊资料),反映咱里组的地层时代至少应属中元古代或者更早。区内岩浆岩主要分布在西北部,出露有晋宁期石英闪长岩、含角闪石黑云母花岗岩。由于大田地区经历了多期次的构造变形与岩浆活动,区内构造较为复杂,脆—韧性断裂均较发育,总体上以 NE 向大断裂为主体构造,近 EW 向节理、裂隙带为次级构造(图 2)。

笔者等所研究的样品均采自大田地区康定群咱

里组二段,其中 2 个石榴夕线黑云斜长片麻岩样品(DT1803、DT1810)分别采自大田地区 ZK2601 钻孔岩芯(101°44′41″E,26°18′00″N)和地表新鲜露头(101°44′24″E,26°17′58″N),用于锆石定年的石榴二云片岩样品(DG2001)亦采自区内河沟处的地表新鲜基岩(101°44′12″E,26°17′52″N),与石榴夕线黑云斜长片麻岩样品属于同一层位。

2 分析方法

石榴夕线黑云斜长片麻岩的矿物化学成分分析在西南石油大学地球科学与技术学院电子探针实验

室完成,所用探针型号为 JEOLJXA-8230,配备有 4 道波谱仪。分析条件为:加速电压 15.0 kV,加速电流 20.0 nA,束斑直径 10 μm,大部分元素的测量时间为 10 s,分析精度优于±2%;同时测试了样品的石榴子石微区化学成分,并进行了 X-ray 扫面,相对误差优于 5%。

锆石分选工作由河北廊坊市(宇能)宇恒矿岩技术服务有限公司完成。锆石制靶、背散射和阴极发光(CL)图均由南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成,仪器型号 MIRA3FE-SEM。锆石的测试选点结合透射光、反射光和阴极发光图像综合选取。

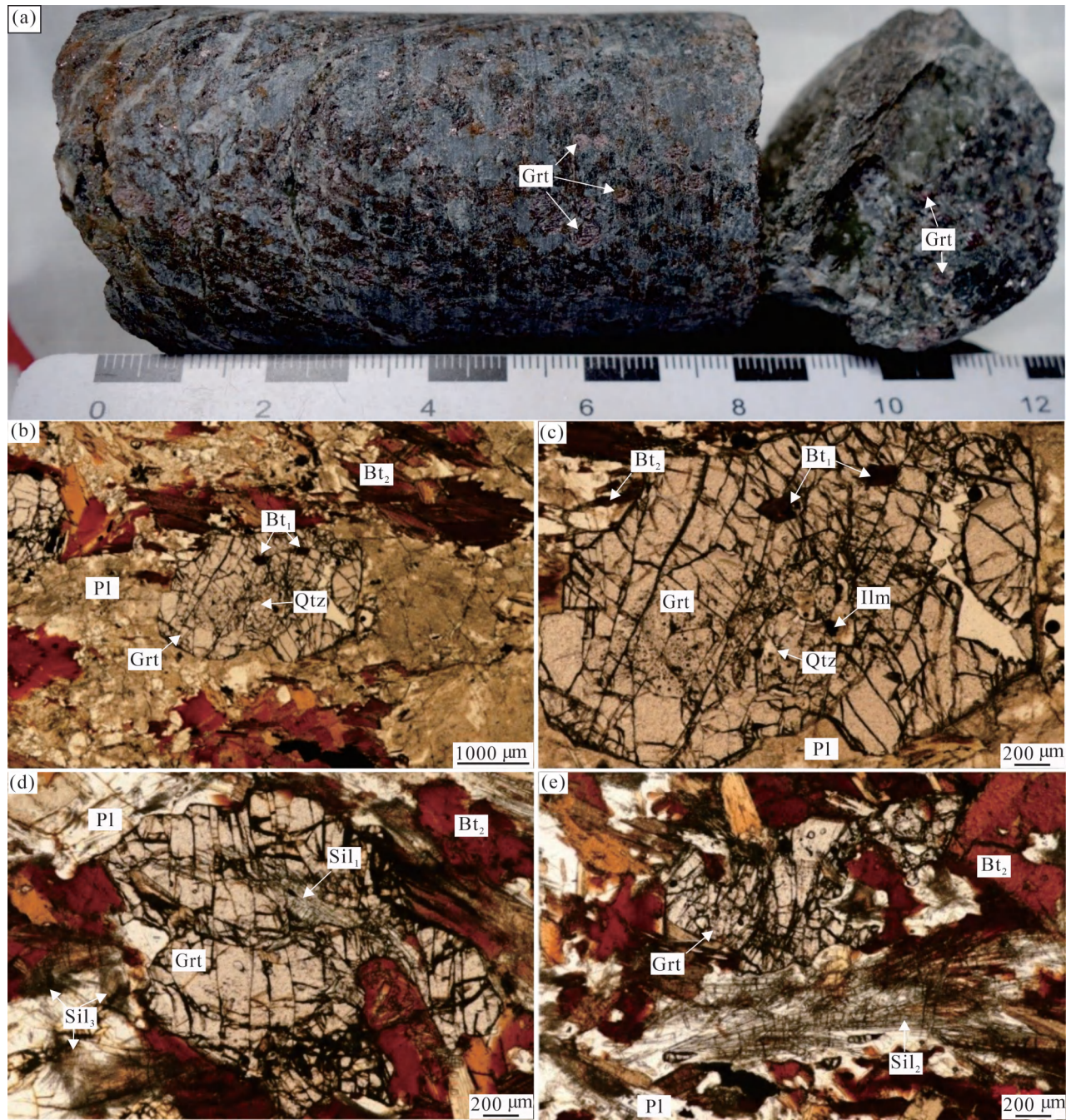


图 3 攀枝花大田地区康定群咱里组石榴夕线黑云斜长片麻岩岩芯(a)和镜下显微照片(b) — (e): (a)石榴夕线黑云斜长片麻岩岩芯中分布大量红色石榴子石;(b,c)石榴子石变斑晶 Grt 中包裹进变质阶段的黑云母 Bt_1 和钛铁矿 Ilm、石英 Qtz, 变基质中含有峰期和退变质阶段的黑云母 Bt_2 和斜长石 Pl;(d)石榴子石变斑晶 Grt 中包裹有进变质阶段的夕线石 Si_1 , 变基质中含有峰期和退变质阶段的黑云母 Bt_2 和斜长石 Pl 并可见热液作用形成的放射状夕线石 Si_3 ;(e)变基质中含有峰期和退变质阶段的黑云母 Bt_2 、夕线石 Si_2 和斜长石 Pl

Fig. 3 Rock core photo (a) and microphoto graphs (b) — (e) of the garnet—sillimanite—biotite—plagioclase gneiss from the Zanli Formation of the Kangding Group in Datian area, Panzhihua City: (a) Large amounts of red garnet can be seen in the rock core of garnet—sillimanite—biotite—plagioclase gneiss; (b, c) a garnet porphyritic contains biotite, ilmenite and quartz in prograde stage and biotite and plagioclase at peak and retrograde metamorphic stages were found in the matrix; (d) a garnet porphyritic contains fibrolite in prograde stage and biotite, plagioclase and radial fibrolite formed by hydrothermal action at peak and retrograde metamorphic stages were found in the matrix; (e) biotite, fibrolite and plagioclase at peak and retrograde metamorphic stages were found in the matrix

锆石原位 U-Pb 同位素定年测试由南京聚谱检测科技有限公司完成,测试所采用的激光剥蚀系统(LA)仪器型号为 AnalyteExcite,电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)型号为 Agilent7700x,剥蚀束斑直径为 $35\text{ }\mu\text{m}$ 。在测试定年中采用标准锆石 91500 作为外标进行同位素分馏与仪器质量歧视校正,每测试 7 个测点,交替测试 2 颗标准锆石(包括 91500、NISTSRM610、GJ-1),以标准锆石 GJ-1 为盲样检验 U-Pb 定年数据质量,以 NISTSRM610 为外标、以 ^{29}Si 为内标标定锆石中 Pb 的元素含量,以 NISTSRM610 为外标、以 Zr 为内标标定锆石中其余微量元素含

量。数据处理采用 ICPMSDataCal 软件完成(Liu Yongsheng et al., 2010a, 2010b),锆石的年龄谐和图绘制由 Isoplot4.15 完成,单点数据误差 1σ ,置信度 95%。

3 岩相学和变质阶段划分

在石榴夕线黑云斜长片麻岩岩芯中可见大量的红色石榴子石存在(图 3a),岩石具斑状变晶结构、片麻状构造。变斑晶为石榴子石,含量约 5%~10%,粒径 2~5mm,核部包含夕线石、黑云母、石英和少量钛铁矿包裹体(图 3b,c)。变基质主要由斜长石(50%~60%)、黑云母(30%~35%)和夕线石(约 5%),少量石英(约 5%)及绿泥石(<2%)组成,副矿物为钛铁矿、黄铁矿等。斜长石呈半自形板状—他形粒状与石英组成浅色的断续条带;黑云母呈浅褐—深褐色片状、片状集合体状断续定向排列,局部见白云母化、绢云母化蚀变。夕线石可分为三期,第一期呈针柱状赋存于石榴子石包裹体中,横纹清晰(图 3d);第二期为变基质,与黑云母、斜长石穿插共生,呈针柱状,束状,弱定向,横纹清晰(图 3e),其颗粒明显较包裹体中大;第三期呈毛发状、放射状覆于黑云母、斜长石之上(图 3d),无定向性,应与变质作用无关,属变质期后热液活动的产物;绿泥石主要发育于石榴子石裂隙中,或呈黑云母假象,为黑云母后期退变质而成。

为了较为准确地揭示矿物成分变化和确定变质阶段,本次对石榴子石进行了 X 射线扫面和成分剖面分析,发现石榴子石具有较为明显的 Mn 成分变化环带(图 4、图 5),表现为明显升高或下降的端元组分(图 6),可以将石榴子石细分为核、幔、边 3 个部分。根据岩相学观察和矿物化学成分的综合分

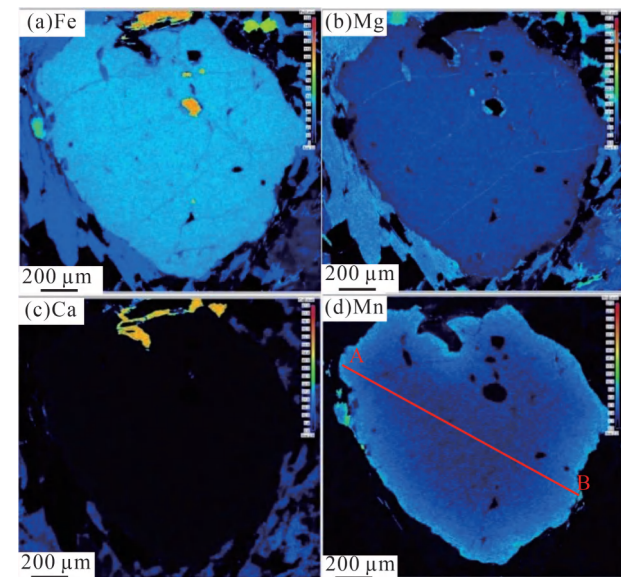


图 4 大田地区咱里组石榴夕线黑云斜长片麻岩(DT1803)中石榴子石 X 射线扫面图

Fig. 4 X-ray mapping of a garnet porphyroblast in the garnet—sillimanite—biotite—plagioclase gneiss (DT1803) from the Zanli Formation, Datian area

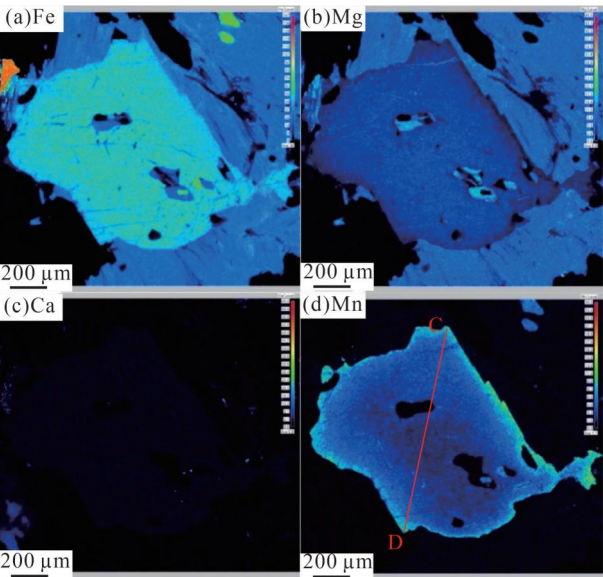


图 5 大田地区咱里组石榴夕线黑云斜长片麻岩 (DT1810) 中石榴子石 X 射线扫描图

Fig. 5 X-ray mapping of a garnet porphyroblast in the garnet—sillimanite—biotite—plagioclase gneiss (DT1810) from the Zanli Formation, Datian area

析,大田地区的石榴夕线黑云斜长片麻岩可划分出 3 个变质阶段:M1 进变质阶段:矿物组合由石榴子石核部及其核部包裹体组成,即石榴子石核部+第一期黑云母+第一期夕线石+钛铁矿+石英($\text{Grt}_c+\text{Bt}_1+\text{Sil}_1+\text{Ilm}+\text{Qtz}$);M2 峰期变质阶段:矿物组合由石榴

子石幔部(石榴子石核部到边缘之间无包裹体的过渡带)和变基质矿物组成,即石榴子石幔部+第二期黑云母+第二期夕线石+斜长石+石英($\text{Grt}_m+\text{Bt}_2+\text{Sil}_2+\text{Pl}+\text{Qtz}$);M3 退变质阶段:矿物组合由石榴子石边部和变基质矿物组成,即石榴子石边部+第二期黑云母+第二期夕线石+斜长石+石英($\text{Grt}_r+\text{Bt}_2+\text{Sil}_2+\text{Pl}+\text{Qtz}$)。

4 矿物化学特征

石榴子石变斑晶电子探针测试结果显示(表 1、表 2),石榴子石斑晶成分主要为铁铝榴石(Alm) = 73~80、镁铝榴石(Prp) = 9~15、锰铝榴石(Sps) = 3~13 和少量钙铝榴石(Grs) = 2~4。石榴子石斑晶成分环带较为明显,面扫描特征表现为细窄的 Mn 成分变化环带,可分为核、幔、边三部分。锰铝榴石组分核部较平缓,从幔部到边部迅速升高(4~13),铁铝榴石组分从核部到幔部缓慢降低(80~78),从幔部到边部降低明显(78~73),镁铝榴石组分核部较平缓,从幔部到边部降低明显(14~9)(图 4、图 5、图 6),记录了差异性的变质作用。

黑云母主要存在于石榴子石包裹体(Bt_1)和基质(Bt_2)中(图 3b),样品中不同颗粒与位置的黑云母电子探针分析结果显示(表 3、表 4),石榴子石包裹体中的黑云母 TFeO (全铁)含量为 18.62%~23.71%,平均 21.44%, MgO 含量为 5.88%~9.54%,平均 7.20%;变基质中黑云母的 TFeO 含量

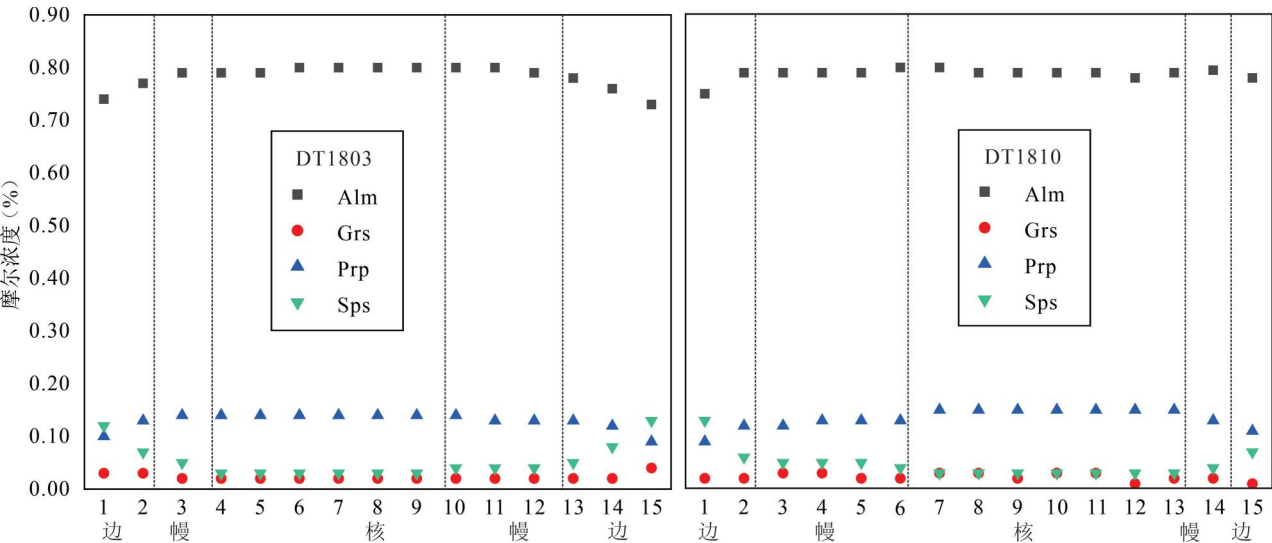


图 6 石榴子石成分剖面图

Fig. 6 The composition profile graph for a grain

剖面位置见图 4、图 5;Alm—铁铝榴石,Grs—钙铝榴石,Prp—镁铝榴石,Sps—锰铝榴石

The profile position is shown in Figure 3 and Figure 4; Alm—Almandine, Grs—Grossularite; Prp—Pyrope; Sps—Spessartine

表 1 攀枝花大田地区康定群咱里组石榴夕线黑云斜长片麻岩 (样品 DT1803) 中石榴子石电子探针分析结果 (%)

Table 1 Microprobe analyses (%) of garnet in garnet—sillimanite—biotite—plagioclase gneiss (sample DT1803) from the Zanzi Formation of the Kangding Group in Datian area, Panzhihua City

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
产状	边		幔	核						幔			边		
SiO ₂	37.02	37.34	37.16	37.59	37.40	37.58	37.45	37.55	37.55	37.17	37.57	37.26	37.41	37.66	37.58
TiO ₂	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	20.69	21.03	21.19	20.96	21.13	21.07	21.04	21.13	20.98	20.89	21.14	21.11	21.03	21.03	20.98
TFeO	32.80	34.17	35.06	35.21	35.65	35.72	35.74	36.01	35.77	35.33	35.57	35.23	34.93	33.94	32.27
MnO	5.19	3.29	1.98	1.53	1.57	1.48	1.49	1.45	1.50	1.54	1.57	1.63	2.38	3.66	5.77
MgO	2.56	3.18	3.39	3.39	3.49	3.49	3.47	3.54	3.54	3.39	3.28	3.37	3.26	3.08	2.24
CaO	1.25	0.92	0.88	0.89	0.86	0.74	0.84	0.84	0.76	0.80	0.80	0.91	0.89	0.90	1.22
Na ₂ O	0.04	0.01	0.02	0.04	0.04	0.03	0.01	0.03	0.02	0.04	0.05	0.06	0.00	0.02	0.03
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.02	0.02	0.00
Cr ₂ O ₃	0.04	0.04	0.02	0.04	0.07	0.01	0.01	0.00	0.04	0.03	0.05	0.05	0.06	0.06	0.00
总和	99.61	100.02	99.70	99.64	100.20	100.11	100.04	100.55	100.16	99.23	100.02	99.66	99.98	100.37	100.10
O	12														
Si	3.01	3.01	3.00	3.03	3.03	3.02	3.01	3.00	3.01	3.01	3.02	3.00	3.01	3.02	3.03
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	0.00
Al	1.98	2.00	2.01	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	2.00	2.01	2.00	1.99	1.99
Fe ³⁺	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	2.22	2.30	2.36	2.37	2.37	2.40	2.40	2.40	2.40	2.39	2.39	2.38	2.35	2.28	2.18
Mn	0.36	0.22	0.14	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.16	0.25	0.39
Mg	0.31	0.38	0.41	0.41	0.41	0.42	0.42	0.42	0.42	0.41	0.39	0.41	0.39	0.37	0.27
Ca	0.11	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.11
Na	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
K	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
Alm	0.74	0.77	0.79	0.79	0.79	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.79	0.78	0.76	0.73
Grs	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04
Prp	0.10	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.12	0.09
Sps	0.12	0.07	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.08	0.13

表 2 大田地区康定群咱里组石榴夕线黑云斜长片麻岩 (样品 DT1810) 中石榴子石电子探针分析结果 (%)

Table 2 Microprobe analyses (%) of garnet in garnet—sillimanite—biotite—plagioclase gneiss (sample DT1810) from the Zanzi Formation of the Kangding Group in Datian area

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
产状	边		幔				核						幔		边
SiO ₂	37.13	37.28	37.56	37.46	37.54	37.38	37.94	37.94	37.74	37.98	37.83	37.29	37.58	37.44	36.78
TiO ₂	0.03	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.01	0.02	0.00
Al ₂ O ₃	21.00	20.81	21.04	20.89	20.84	20.85	20.99	20.88	21.13	21.25	21.05	20.91	21.08	20.89	20.59
TFeO	33.27	35.43	35.52	35.35	35.44	35.58	35.91	35.72	35.82	35.63	35.36	35.38	35.81	35.83	35.52
MnO	5.91	2.86	2.39	2.40	2.25	1.88	1.43	1.23	1.31	1.27	1.35	1.39	1.37	1.75	3.18
MgO	2.19	2.96	3.10	3.17	3.24	3.35	3.76	3.87	3.87	3.90	3.83	3.85	3.72	3.35	2.79
CaO	0.93	0.95	0.97	1.00	0.99	0.96	0.96	0.96	0.99	1.03	1.06	1.05	1.04	1.01	1.01
Na ₂ O	0.04	0.01	0.01	0.01	0.06	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	0.01
Cr ₂ O ₃	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.06	0.01	0.04	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02
总和	100.54	100.28	100.59	100.31	100.38	100.04	101.01	100.66	100.90	101.13	100.54	99.95	100.66	100.33	99.91
O	12														
Si	3.00	3.01	3.01	3.01	3.01	3.01	3.02	3.02	3.00	3.01	3.02	3.00	3.00	3.01	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	0.00
Al	2.00	1.98	1.99	1.98	1.97	1.98	1.97	1.96	1.98	1.99	1.98	1.98	1.98	1.98	1.97
Fe ³⁺	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03	0.02	0.02	0.08
Fe ²⁺	2.24	2.37	2.38	2.38	2.37	2.39	2.39	2.38	2.36	2.36	2.36	2.35	2.37	2.39	2.34

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Mn	0.40	0.20	0.16	0.16	0.15	0.13	0.10	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.12	0.22
Mg	0.26	0.36	0.37	0.38	0.39	0.40	0.45	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.44	0.40	0.34
Ca	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
Na	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	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
Alm	0.75	0.79	0.79	0.79	0.79	0.80	0.80	0.79	0.79	0.79	0.79	0.78	0.79	0.80	0.78
Grs	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01
Prp	0.09	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.13	0.11
Sps	0.13	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07

为 18.97% ~ 22.33%, 平均 20.96%, MgO 含量为 5.70% ~ 8.37%, 平均 6.91%。Bt₁ 的 TFeO、MgO 含量略高于 Bt₂, 但总体上两者均有富铁低镁的特征, 属于铁质黑云母。黑云母的 Ti 含量从包体中 0.09 ~ 0.21 (a. p. f. u., 即单位分子中的原子数; atoms per formula unit) 略微升高到变基质中 0.11 ~ 0.21 (a. p. f. u.); X_{Mg} [= Mg / (Mg + Fe²⁺)] 值从包体中 0.31 ~ 0.48 略微降低到变基质中 0.32 ~ 0.42, 从

Ti—X_{Mg} 图(图 7) 来看, 总体上反映包体中的黑云母与基质中的黑云母具有一定的成分差别, 可能反映了差异性的变质作用。

长石主要为基质矿物, 对其微区化学成分进行测试, 结果显示(表 5), 其成分主要为斜长石, Ab (钠长石) 值一般为 64.9 ~ 78.2, An (钙长石) 值为 20.6 ~ 34.8, 主要为更长石和中长石, 仅有 1 个测点 (DT1810-5) 的 Or (钾长石) 值为 89.1, 表明样品中含有极少量钾长石。

5 变质 P—T 条件计算

根据岩相学观察和矿物化学成分分析, 大田地区的石榴夕线黑云斜长片麻岩共划分出 3 个变质阶段。依据各变质阶段的矿物组合特征, 利用传统地质温压计对各变质阶段进行了 P—T 条件计算, 计算结果见表 6。

进变质阶段 (M1) 矿物组合为: Grt_c + Bt₁ + Sil₁ + Ilm + Qtz。利用 Grt—Bt 温度计 (Holdaway, 2000) 计算其温度条件, 根据矿物共生组合估算压力条件, 得到进变质阶段 P—T 条件为: 609 ~ 690 °C—0.2 ~ 0.3 GPa, 均值为 661 °C—0.25 GPa。

峰期变质阶段 (M2) 矿物组合为: Grt_m + Bt₂ + Sil₂ + Pl + Qtz。利用 Grt—Bt 温度计 (Holdaway, 2000) 和 Grt—Bt—Pl—Qtz 压力计 (Wu Chunming et al., 2004) 计算其温压条件, 得到峰期阶段 P—T 条件为: 643 ~ 732 °C—0.20 ~ 0.51 GPa, 均值为 682 °C—0.35 GPa。其最大计算温压为 732 °C—0.51 GPa, 指示大田地区达到了角闪岩相变质

表 3 大田地区康定群咱里组石榴夕线黑云斜长片麻岩(样品 DT1803) 中黑云母电子探针分析结果 (%)

Table 3 Microprobe analyses (%) of biotite in garnet—sillimanite—biotite—plagioclase gneiss (sample DT1803) from the Zanli Formation of the Kangding Group in Datan area

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
产状	Bt ₂	Bt ₂	Bt ₂	Bt ₂	Bt ₂	Bt ₂	Bt ₂	Bt ₂	Bt ₂	Bt ₂
SiO ₂	34.67	34.39	33.31	33.98	33.55	34.67	34.49	34.29	33.75	34.81
TiO ₂	2.65	3.10	2.85	2.71	2.55	3.11	3.09	2.98	2.80	2.75
Al ₂ O ₃	19.49	19.20	17.98	18.98	19.40	19.77	19.09	18.79	18.84	18.90
TFeO	20.59	19.15	22.32	19.84	20.38	18.97	21.01	21.45	20.61	20.51
MnO	0.17	0.19	0.19	0.14	0.18	0.16	0.16	0.24	0.28	0.18
MgO	7.67	7.38	7.11	7.57	7.45	7.41	7.43	7.27	8.37	7.97
CaO	0.00	0.02	0.08	0.07	0.03	0.00	0.01	0.06	0.21	0.00
Na ₂ O	0.19	0.34	0.23	0.31	0.30	0.46	0.30	0.20	0.28	0.23
K ₂ O	9.43	9.25	8.66	8.91	9.08	9.23	8.84	9.16	7.28	9.43
Cr ₂ O ₃	0.11	0.24	0.61	0.37	0.13	0.18	0.13	0.37	0.42	0.07
总和	94.97	93.25	93.34	92.87	93.05	93.96	94.56	94.80	92.83	94.84
O	11									
Si	2.669	2.681	2.642	2.669	2.640	2.675	2.667	2.660	2.640	2.684
Ti	0.153	0.182	0.170	0.160	0.151	0.180	0.180	0.174	0.165	0.159
Al	1.768	1.764	1.681	1.756	1.799	1.798	1.740	1.717	1.737	1.717
Al ^{IV}	1.331	1.319	1.358	1.331	1.360	1.325	1.333	1.340	1.360	1.316
Al ^{VI}	0.437	0.446	0.323	0.425	0.439	0.473	0.407	0.378	0.378	0.401
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	1.326	1.248	1.481	1.303	1.341	1.224	1.359	1.391	1.348	1.323
Mn	0.011	0.012	0.013	0.009	0.012	0.010	0.010	0.016	0.018	0.012
Mg	0.880	0.857	0.841	0.887	0.874	0.853	0.856	0.841	0.976	0.916
Ca	0.000	0.001	0.007	0.006	0.003	0.000	0.000	0.005	0.018	0.000
Na	0.028	0.051	0.036	0.046	0.045	0.069	0.045	0.031	0.043	0.034
K	0.926	0.920	0.876	0.893	0.912	0.909	0.872	0.906	0.727	0.927

表 4 大田地区康定群咱里组石榴夕线黑云斜长片麻岩(样品 DT1810)中黑云母电子探针分析结果(%)

Table 4 Microprobe analyses (%) of biotite in garnet—sillimanite—biotite—plagioclase gneiss (sample DT1810) from the Zanli Formation of the Kangding Group in Datian area

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
产状	Bt ₁	Bt ₁	Bt ₁	Bt ₁	Bt ₁	Bt ₁	Bt ₁	Bt ₁	Bt ₂	Bt ₂	Bt ₂	Bt ₂	Bt ₂	Bt ₂	Bt ₂	Bt ₂	Bt ₂
SiO ₂	34.19	33.44	33.94	34.80	33.99	33.82	34.44	33.91	35.09	34.27	34.45	34.32	33.58	34.21	34.07	33.71	34.52
TiO ₂	1.72	1.69	1.45	2.05	2.44	1.90	3.63	3.00	2.88	3.14	3.20	2.95	1.86	3.46	3.38	3.49	3.18
Al ₂ O ₃	20.14	19.81	19.91	19.66	18.78	19.64	18.64	18.26	20.88	19.58	19.63	19.66	19.77	18.93	18.97	19.12	19.59
TFeO	20.97	22.10	23.71	19.92	18.62	22.10	21.69	22.46	20.07	21.81	22.33	21.29	21.23	21.86	21.71	21.78	21.41
MnO	0.19	0.24	0.26	0.09	0.10	0.26	0.23	0.25	0.20	0.19	0.18	0.19	0.22	0.17	0.23	0.20	0.22
MgO	6.14	6.46	5.88	8.79	9.54	6.62	6.58	7.59	5.70	6.06	6.19	6.35	7.69	5.94	6.13	5.70	5.89
CaO	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
Na ₂ O	0.17	0.13	0.08	0.31	0.16	0.16	0.29	0.17	0.17	0.24	0.21	0.22	0.13	0.23	0.25	0.16	0.20
K ₂ O	8.97	9.39	9.36	8.46	8.90	7.12	9.32	8.42	8.50	9.54	9.28	9.43	8.85	9.64	9.46	9.45	9.44
Cr ₂ O ₃	0.06	0.18	0.14	0.13	0.12	0.54	0.16	0.27	0.45	0.05	0.11	0.04	0.02	0.11	0.44	0.04	0.12
总和	92.54	93.44	94.72	94.19	92.64	92.16	94.98	94.32	94.00	94.88	95.57	94.43	93.34	94.56	94.64	93.66	94.58
O	11																
Si	2.699	2.644	2.661	2.675	2.658	2.674	2.670	2.650	2.698	2.661	2.655	2.667	2.637	2.671	2.657	2.657	2.680
Ti	0.102	0.100	0.086	0.118	0.143	0.113	0.212	0.176	0.166	0.183	0.185	0.172	0.110	0.203	0.198	0.207	0.186
Al	1.873	1.846	1.840	1.781	1.731	1.830	1.703	1.682	1.892	1.791	1.783	1.801	1.829	1.742	1.744	1.776	1.792
Al ^{IV}	1.301	1.356	1.339	1.325	1.342	1.326	1.330	1.350	1.302	1.339	1.345	1.333	1.363	1.329	1.343	1.343	1.320
Al ^{VI}	0.572	0.491	0.501	0.456	0.388	0.504	0.374	0.331	0.590	0.452	0.438	0.468	0.466	0.413	0.401	0.433	0.472
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	1.384	1.461	1.555	1.280	1.217	1.461	1.407	1.468	1.291	1.416	1.439	1.384	1.394	1.427	1.416	1.435	1.390
Mn	0.013	0.016	0.017	0.006	0.007	0.017	0.015	0.017	0.013	0.012	0.012	0.012	0.015	0.011	0.015	0.013	0.014
Mg	0.722	0.762	0.687	1.007	1.112	0.780	0.761	0.884	0.653	0.702	0.711	0.735	0.900	0.691	0.713	0.670	0.682
Ca	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
Na	0.026	0.020	0.012	0.045	0.024	0.025	0.043	0.026	0.025	0.037	0.032	0.032	0.019	0.035	0.037	0.025	0.030
K	0.903	0.947	0.936	0.829	0.887	0.719	0.922	0.840	0.834	0.945	0.912	0.935	0.887	0.960	0.941	0.950	0.935

表 5 大田地区康定群咱里组石榴夕线黑云斜长片麻岩(样品 DT1810、DT1803)中长石电子探针分析结果(%)

Table 5 Microprobe analyses(%) of feldspar in garnet—sillimanite—biotite—plagioclase gneiss (sample DT1810 and LDT1803) from the Zanli Formation of the Kangding Group in Datian area

测点号	DT1810					DT1803						
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7
产状	变基质											
SiO ₂	62.480	63.300	63.160	62.630	64.720	60.230	60.810	61.370	61.580	61.040	60.690	59.830
TiO ₂	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.040	0.000	0.030	0.010	0.040
Al ₂ O ₃	23.720	23.520	23.850	24.150	18.680	25.040	25.110	24.840	25.060	25.030	25.320	25.710
TFeO	0.030	0.010	0.020	0.010	0.010	0.090	0.100	0.030	0.030	0.120	0.040	0.090
MnO	0.000	0.000	0.020	0.010	0.010	0.010	0.030	0.000	0.000	0.000	0.030	0.010
MgO	0.010	0.000	0.000	0.020	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000
CaO	4.800	4.480	4.790	5.050	0.000	6.790	6.220	6.120	6.310	6.350	6.550	7.450
Na ₂ O	9.040	9.400	9.160	8.900	1.230	8.000	8.370	8.370	8.490	8.460	7.880	7.690
K ₂ O	0.210	0.220	0.190	0.200	15.250	0.120	0.120	0.150	0.140	0.120	0.140	0.060
Cr ₂ O ₃	0.000	0.010	0.000	0.040	0.020	0.010	0.000	0.030	0.000	0.010	0.000	0.020
总和	100.290	100.950	101.170	101.000	99.910	100.280	100.770	100.940	101.620	101.170	100.660	100.890
O	8											
Si	2.762	2.779	2.767	2.750	2.986	2.678	2.688	2.705	2.698	2.689	2.683	2.648
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001
Al	1.236	1.217	1.231	1.250	1.015	1.312	1.308	1.290	1.294	1.300	1.319	1.341
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.003	0.004	0.001	0.001	0.005	0.002	0.003
Mn	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000

测点号	DT1810					DT1803						
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7
Mg	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Ca	0.227	0.210	0.225	0.238	0.000	0.323	0.295	0.289	0.296	0.300	0.310	0.353
Na	0.774	0.800	0.778	0.758	0.110	0.690	0.717	0.715	0.721	0.723	0.675	0.660
K	0.012	0.012	0.010	0.011	0.897	0.007	0.007	0.008	0.008	0.007	0.008	0.003
Ab	0.764	0.782	0.768	0.753	0.109	0.676	0.704	0.706	0.703	0.702	0.679	0.649
An	0.224	0.206	0.222	0.236	0.000	0.317	0.289	0.285	0.289	0.291	0.312	0.348
Or	0.012	0.012	0.010	0.011	0.891	0.007	0.007	0.008	0.008	0.006	0.008	0.003

表 6 大田地区康定群咱里组石榴夕线黑云斜长片麻岩各变质阶段矿物组合及 P — T 条件

Table 6 Mineral assemblages and P — T conditions of the different metamorphic stages of the garnet—sillimanite—biotite—plagioclase gneiss from the Zanli Formation of the Kangding Group in Datian area

变质阶段	矿物组合	$t(^{\circ}\text{C})$	$\bar{t}(^{\circ}\text{C})$	$P(\text{GPa})$	$\bar{P}(\text{GPa})$	计算方法
M1	$\text{Grt}_c + \text{Bt}_1 + \text{Sil}_1 + \text{Plm} + \text{Qtz}$	609~690	661	0.20~0.30	0.25	Grt—Bt 温度计 (Holdaway, 2000)
M2	$\text{Grt}_m + \text{Bt}_2 + \text{Sil}_2 + \text{Pl} + \text{Qtz}$	643~732	682	0.20~0.51	0.35	Grt—Bt 温度计 (Holdaway, 2000); Grt—Bt—
M3	$\text{Grt}_r + \text{Bt}_2 + \text{Sil}_2 + \text{Pl} + \text{Qtz}$	602~687	636	0.27~0.39	0.33	Pl—Qtz 压力计 (Wu Chunming et al., 2004)

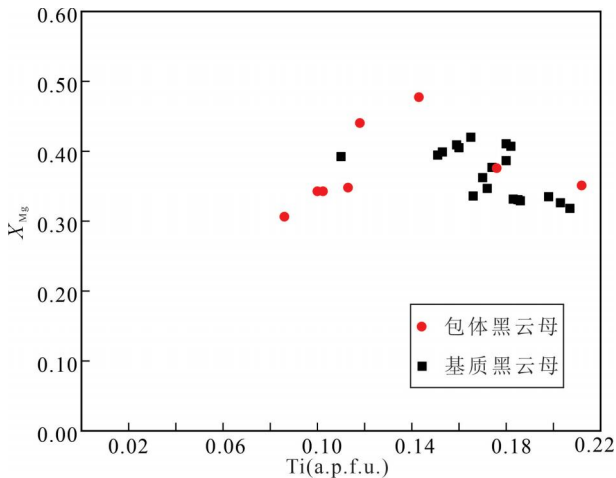


图 7 包体和基质中黑云母的 Ti — X_{Mg} 图

Fig. 7 The Ti — X_{Mg} graph in biotite of the inclusion and matrix

作用。

退变质阶段 (M3) 矿物组合为： $\text{Grt}_r + \text{Bt}_2 + \text{Sil}_2 + \text{Pl} + \text{Qtz}$ 。采用与峰期阶段相同的温压计来计算温度压力，得到退变质阶段 P — T 条件为：602~687 $^{\circ}\text{C}$ —0.27~0.39 GPa，均值为 636 $^{\circ}\text{C}$ —0.33 GPa。

6 锆石 U-Pb 定年

本次对大田地区石榴二云片岩 (DG2001) 样品进行了锆石 U-Pb 定年，岩石具斑状变晶结构、片状构造。变斑晶为石榴子石，含量约 13%，粒径 2~4 mm。变基质主要为黑云母、石英、斜长石、绢云母和白云母，黑云母含量约 27%，白云母含量约 10%，两

种云母呈片状定向排列；石英呈它形晶粒状分布，含量约 18%；斜长石呈板柱状、透镜状分布，含量约 15%；绢云母呈显微鳞片状分布，含量约 15%；另外还有少量氧化铁质的不透明矿物，含量约 2%。

通常情况下，变质成因锆石因受变质流体影响而 Th/U 比值较低 (<0.1) 且呈无分带或弱分带结构；而岩浆成因锆石一般具有较高的 Th/U 比值 (>0.1) 和典型的岩浆振荡环带结构 (Hoskin et al., 2003；吴元保等, 2004)。本次研究在石榴二云片岩 (DG2001) 样品中选取了 39 颗锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年，获得了 39 组有效的 U-Pb 同位素数据，从中选取出 20 颗 Th/U 值介于 0.01~0.07 (均值为 0.05)，CL 图像 (图 8) 具云雾状分带、弱分带或均一化程度较高的无分带结构的锆石，应属较为典型的变质锆石，其 U-Pb 同位素数据如表 7 所示。对 20 颗变质锆石构建 U-Pb 谐和图如图 9a 所示，可以看出样品虽不能获得不一致线的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 与 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 交点谐和年龄值，但都集中分布于谐和线附近，去掉偏离谐和线和远离锆石群的测点后，得到 10 颗变质锆石的加权平均年龄为 $842 \pm 10 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 2.6, n = 10$) (图 9b)，这一年龄比较准确地反映了该地区角闪岩相变质作用的时间。

7 讨论

7.1 变质时代

耿元生等 (2008) 通过对扬子板块西缘五马箐组夕线红柱石榴黑云片岩和冷竹关组夕线石榴堇青黑云片岩的独居石锆石 U-Pb 定年，获得约 750 Ma

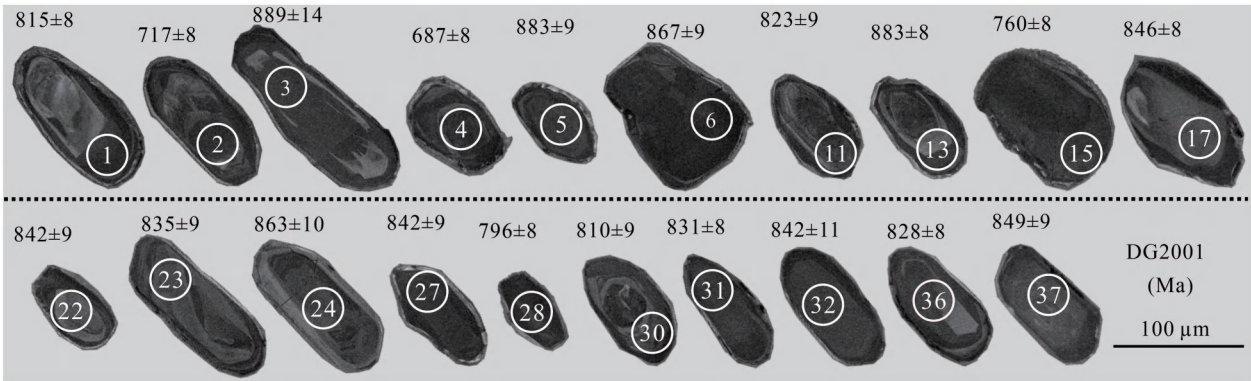


图 8 大田地区咱里组石榴二云片岩变质锆石阴极发光图像

Fig. 8 The cathodoluminescence images of metamorphic zircon for garnet—mica schist from the Zanli Formation, Datian area

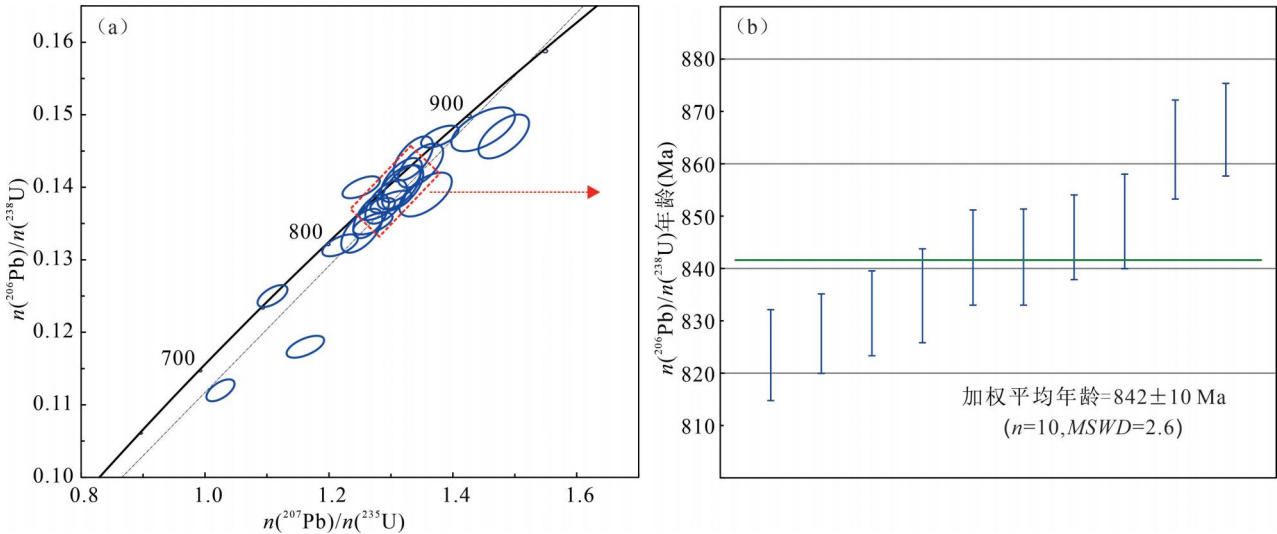


图 9 大田地区咱里组石榴二云片岩变质锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 9 U-Pb concordia graph of metamorphic zircon for garnet—mica schist from the Zanli Formation, Datian area

的变质年龄;Zhou Meifu 等 (2014) 利用 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年法获得扬子板块西缘不同群(大红山、东川群等)中多个铁铜矿床的黑云母、角闪石、石英单矿物变质年龄为 850~780 Ma;杨红等 (2012) 对扬子地台西缘大红山群石榴斜长角闪岩的变质锆石 U-Pb 定年,获得变质年龄为 $849\pm12\text{ Ma}$,次年又对大红山群石榴白云母—长石石英片岩中的白云母进行了 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 测年,获得变质年龄为 845~837 Ma(杨红等,2013);金廷福等 (2017) 对扬子地台西缘变质辉长岩进行变质锆石 U-Pb 定年,获得变质年龄为 $748.9\pm5.7\text{ Ma}$ 。本次在扬子板块西缘康定群咱里组石榴二云片岩中进行的变质锆石 U-Pb 年代学研究,测得变质锆石加权平均年龄为 $842\pm10\text{ Ma}$,与上述前人对扬子板块西缘地质体变质年代学的研究结

果大体一致。区内不同定年方法、不同取样位置与不同岩性均获得较为一致的变质年龄数据,确定了扬子板块西缘经历了新元古代(850~750 Ma)的变质作用。此外,前人的大量研究表明,扬子板块西缘在 860~750 Ma 期间发育强烈的岩浆活动(李献华等,2001;2002;赵俊香等,2006;郑玉文等,2021),反映区内新元古代变质作用很可能与同期岩浆活动有关,这也是区内康定杂岩中变质杂岩与岩浆杂岩在空间上紧密伴随的原因所在。

7.2 变质 $P-T$ 轨迹及构造意义

变质 $P-T$ 轨迹对于重现造山带和地质体的形成机制,揭示其地球动力学背景具有重要意义(Ernst, 1988),变质 $P-T$ 轨迹分顺时针和逆时针两种形式,前者一般形成于挤压背景下,反映的是一

表 7 攀枝花大田地区康定群咱里组石榴二云片岩(样品 DG2001)变质锆石 U-Pb 同位素测试数据
Table 7 U-Pb isotopic data of metamorphic zircons from garnet—mica schist(sample DG2001) of the Zanli Formation, Kangding Group, in Datian area, Panzhihua City

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度 (%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$				
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ					
DG-2001-01	120.1	40.55	882.5	0.046	0.0679	0.0010	1.271	0.0211	0.1348	0.0014	864.8	30.7	832.8	9.5	815.0	7.9	99
DG-2001-02	194.8	56.59	1537	0.037	0.0710	0.0010	1.162	0.0199	0.1177	0.0013	966.7	28.6	782.7	9.3	717.1	7.7	98
DG-2001-03	139.1	41.23	936.3	0.044	0.0700	0.0010	1.449	0.0343	0.1479	0.0024	929.3	29.3	909.6	14.2	889.1	13.6	93
DG-2001-04	334.6	37.53	2757	0.014	0.0657	0.0008	1.025	0.0151	0.1124	0.0013	794.4	25.2	716.6	7.6	686.9	7.4	91
DG-2001-05	158.2	73.61	1027	0.072	0.0726	0.0011	1.482	0.0266	0.1467	0.0016	1003	31	923.0	10.9	882.5	9.0	98
DG-2001-06	256.3	21.13	1749	0.012	0.0667	0.0008	1.336	0.0211	0.1439	0.0016	829.3	173.2	861.4	9.2	866.5	8.9	99
DG-2001-11	253.5	85.12	1760	0.048	0.0670	0.0009	1.268	0.0194	0.1363	0.0015	838.9	27.0	831.3	8.7	823.4	8.7	98
DG-2001-13	136.3	62.27	876.6	0.071	0.0677	0.0009	1.379	0.0199	0.1468	0.0014	857.4	26.7	880.1	8.5	882.8	7.9	98
DG-2001-15	465.0	157.0	3469	0.045	0.0639	0.0008	1.109	0.0159	0.1251	0.0013	738.9	21.3	757.9	7.7	759.6	7.7	95
DG-2001-17	155.1	46.65	1034	0.045	0.0643	0.0009	1.252	0.0195	0.1402	0.0014	753.7	29.6	824.4	8.8	846.0	8.1	98
DG-2001-22	123.2	17.17	825.2	0.021	0.0677	0.0010	1.313	0.0232	0.1395	0.0016	861.1	34.3	851.4	10.2	842.1	9.1	99
DG-2001-23	133.3	46.05	925.2	0.050	0.0673	0.0010	1.292	0.0222	0.1383	0.0016	850.0	29.6	842.2	9.8	834.8	9.0	98
DG-2001-24	173.0	17.85	1139	0.016	0.0678	0.0010	1.348	0.0245	0.1432	0.0017	861.1	31.5	866.7	10.6	862.7	9.5	99
DG-2001-27	143.6	70.30	960.1	0.073	0.0682	0.0009	1.319	0.0221	0.1396	0.0016	875.9	23.2	854.2	9.7	842.2	9.2	96
DG-2001-28	188.4	57.79	1341	0.043	0.0669	0.0009	1.218	0.0190	0.1315	0.0014	835.2	27.8	809.1	8.7	796.4	7.8	99
DG-2001-30	112.7	49.16	813.1	0.060	0.0677	0.0010	1.253	0.0216	0.1339	0.0016	861.1	35.3	825.0	9.7	810.2	9.2	98
DG-2001-31	121.3	52.50	829.0	0.063	0.0682	0.0010	1.300	0.0217	0.1377	0.0014	875.9	30.7	845.7	9.6	831.4	8.1	96
DG-2001-32	106.0	50.95	724.2	0.070	0.0700	0.0011	1.356	0.0284	0.1395	0.0019	927.8	32.6	870.0	12.3	841.6	10.6	99
DG-2001-36	147.0	64.59	1004	0.064	0.0673	0.0009	1.278	0.0193	0.1370	0.0013	855.6	27.0	835.8	8.6	827.6	7.6	95
DG-2001-37	163.3	52.46	1093	0.048	0.0674	0.0009	1.317	0.0220	0.1408	0.0016	851.5	23.2	853.2	9.6	849.0	9.0	99

种俯冲—碰撞的造山过程 (Ernst, 1988; Harley, 1989); 后者一般形成于拉张背景下, 比如陆内裂谷、弧后盆地或地幔柱构造环境 (Sandiford et al., 1986; Bohlen, 1991; Zhao Guochun et al., 1998)。本次对大田地区康定群咱里组石榴夕线黑云斜长片麻岩的温压条件估算表明, 早期进变质阶段变质温压均值为 661 ℃ 和 0.25 GPa, 峰期变质阶段变质温压均值为 682 ℃ 和 0.35 GPa 和晚期退变质阶段变质温压均值为 636 ℃ 和 0.33 GPa, 得到一条具近等压冷却型 (IBC) 的逆时针 $P-T$ 演化轨迹 (图 10), 完整经历了早期增温增压的进变质过程、峰期变质及后期近等压降温退变质过程, 逆时针型 $P-T$ 轨迹表明了石榴夕线黑云斜长片麻岩形成于拉张背景下, 峰期变质条件显示大田地区达到了中高温低压角闪岩相变质。

扬子板块西缘在新元古代发生了强烈的岩浆活动, 但关于引发岩浆活动的机制却一直存在较大的争议, 目前主要分为“岛弧”和“地幔柱”两种主流观点。如 Zhou Meifu 等 (2002)、杜利林等 (2007)、康欢等 (2017) 分别通过对扬子板块西缘不同地区的花岗质片麻岩、斜长片麻岩、长英质岩石和铁镁质岩石研究, 认为新元古代扬子板块西缘的强烈岩浆活动可能形成于岛弧环境。而李献华等 (2001, 2002) 通过对川西苏雄组双峰式火山岩、冷碛辉长岩研究, 认为岩石形成于大陆裂谷环境, 岩浆活动与新元古代地幔柱有关。有研究表明, 大陆地壳的混染作用可以

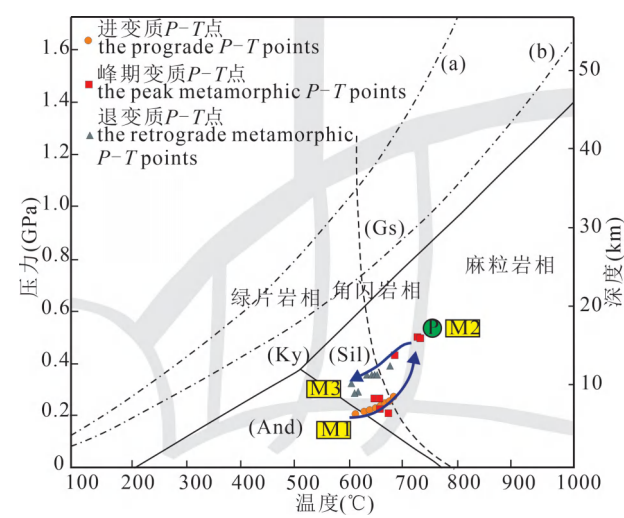


图 10 大田地区咱里组石榴夕线黑云斜长片麻岩 $P-T$ 轨迹图(底图据 Winter, 2009)

Fig. 10 The $P-T$ path graph for garnet—sillimanite—biotite—plagioclase gneiss from the Zanli Formation, Datian area (Base map according to Winter, 2009)

产生类似岛弧环境的地球化学特征,从而导致将受到混染的大陆玄武岩误判为岛弧玄武岩(夏林圻等,2007)。林广春等(2013)通过对康定—丹巴地区基性岩墙研究,认为岩石起源于亏损地幔源区,形成于板内裂谷环境,岩浆活动与新元古代地幔柱有关,并根据基性岩墙地球化学特征,提出扬子板块西缘新元古代岩浆上侵过程受到初生岛弧地壳不同程度的混染,从而表现出岛弧环境特征。

前已述及,区内新元古代变质作用可能与同期岩浆活动有关,本次通过对大田地区康定群咱里组石榴夕线黑云斜长片麻岩进行研究,得到了一条具近等压冷却型(IBC)的逆时针 $P-T$ 演化轨迹,反映区内的变质杂岩形成于拉张环境,与地幔柱活动引发的伸展构造环境一致,结合前述同期岩浆活动特征,笔者等更倾向于认为扬子板块西缘新元古代发生的变质作用与地幔柱引发的岩浆活动有关,并对扬子板块西缘新元古代变质岩形成的构造环境提出以下设想:即地幔柱底侵向上热传递,导致地壳增温变质,同时部分地幔柱岩浆以岩床形式加入到地壳中或以溢流的方式喷发到地表,导致地壳增厚(赵国春等,2021),形成进变质阶段(M1)增温、增压的特征;随着地幔柱继续向上加热地壳,导致峰期阶段(M2)温压达到峰值,继而发生角闪岩相变质作用;最后,随着地幔柱热流活动的终止,加热的地壳进入了近等压冷却阶段(M3),形成一个升温升压后再近

等压降温的变质过程。

8 结论

笔者等选取攀枝花大田地区康定群咱里组石榴夕线黑云斜长片麻岩为对象进行了详细的岩相学、矿物地球化学、变质 $P-T$ 条件估算,同时对石榴二云片岩进行了锆石 U-Pb 定年分析,对康定群新元古代变质演化取得了以下认识:

(1)大田地区康定群咱里组石榴夕线黑云斜长片麻岩完整记录了新元古代变质事件不同阶段的热历史,形成了不同阶段的矿物共生组合,早、中、晚三个阶段的变质温压条件分别为 $609\sim 690\text{ }^{\circ}\text{C}-0.20\sim 0.30\text{ GPa}$; $643\sim 732\text{ }^{\circ}\text{C}-0.20\sim 0.51\text{ GPa}$ 和 $602\sim 687\text{ }^{\circ}\text{C}-0.27\sim 0.39\text{ GPa}$,反映出一个升温升压后再近等压降温的变质过程。

(2)大田地区康定群咱里组变质杂岩记录了具近等压冷却型(IBC)的逆时针 $P-T$ 轨迹,这是康定群变质杂岩首次构建出较完整的变质作用 $P-T$ 轨迹;同一层位的石榴二云片岩则记录了 $842\pm 10\text{ Ma}$ 的中高温低压角闪岩相变质的年龄。根据建立的 $P-T-t$ 轨迹特征,推测这一变质事件与区内新元古代超级地幔柱引发的岩浆活动有关。

致谢: 本文在成文过程中得到了成都理工大学沉积地质研究院王国芝教授的悉心指导,审稿专家提出了许多建设性意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

注 释 / Note

① 曾宪教,徐先哲,袁茜平. 1983. 四川冕宁沙坝地区康定杂岩中的麻粒岩岩石学和地球化学特征. 见:康滇大陆古裂谷带研究进展报告(攀枝花—西昌段):1~22.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

从柏林. 1988. 攀西古裂谷的形成与演化. 北京: 科学出版社: 1~96.

陈岳龙, 罗照华, 赵俊香, 李志红, 张宏飞. 2004. 从锆石 SHRIMP 年龄及岩石地球化学特征论四川冕宁康定杂岩的成因. 中国科学(D辑), 34(8): 687~697.

杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 任留东, 周喜文, 王彦斌, 杨铸生. 2006. 扬子地台西缘新元古代 TTG 的厘定及其意义. 岩石矿物学杂志, 25(4): 273~281.

杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 周喜文, 任留东, 王彦斌, 杨铸生. 2007. 扬子地台西缘康定群的再认识: 来自地球化学和年代学证据. 地质学报, 81(11): 1562~1577.

辜学达, 刘啸虎. 1997. 四川省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社

社: 155~199.

郭春丽, 王登红, 陈毓川, 赵支刚, 王彦斌, 付小方, 傅德明. 2007. 川西新元古代花岗质杂岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、元素和 Nd-Sr 同位素地球化学研究: 岩石成因与构造意义. 岩石学报, 23(10): 2457~2470.

耿元生, 杨崇辉, 王新社, 杜利林, 任留东, 周喜文. 2008. 扬子地台北缘变质基底演化. 北京: 地质出版社: 1~215.

金廷福, 李佑国, 费光春, 冯裕昌, 周恒, 沙小保, 吴愧. 2017. 扬子地台北西南缘大红山群红山组的锆石 U-Pb 年代学研究——对其原岩形成时代和变质时代的再限定. 地质论评, 63(4): 894~910.

康欢, 李大鹏, 陈岳龙, 胡国强, 邓伟兵. 2017. 康定杂岩成因和构造意义——来自 Hf 同位素的证据. 中国地质, 44(6): 1175~1189.

卢民杰. 1986. 川西——滇东地区早元古宙变质岩系及其区域变质作用与地壳演化. 长春地质学院学报, (3): 12~22.

陆怀鹏, 徐士进, 王汝成, 沈渭洲. 1999. 川西沙坝麻粒岩原岩特征及变质作用. 南京大学学报(自然科学), 35(3): 296~302.

李献华, 周汉文, 李正祥, 刘颖. 2001. 扬子块体西缘新元古代双峰式火山岩的锆石 U-Pb 年龄和岩石化学特征. 地球化学, 30(4): 315~322.

李献华, 李正祥, 周汉文, 刘颖, 梁细荣. 2002. 川西新元古代玄武质岩浆岩的锆石 U—Pb 年代学、元素和 Nd 同位素研究: 岩石成因与地球动力学意义. 地学前缘, 9(4): 329~338.

林广春, 董俊超. 2013. 川西康定——丹巴地区新元古代基性岩墙成因及源区性质. 中国地质, 40(6): 1793~1805.

孙海婷. 2002. 扬子西缘麻粒岩研究: 矿物学、岩石学与形成条件. 导师: 王汝成. 南京: 南京大学硕士学位论文: 1~74

孙泽轩, 陈友良, 姚建, 韩文文, 王凤岗, 张亮. 2020. 攀枝花大田铀矿床基本特征及成因. 地质论评, 66(4): 1005~1018.

吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589~1604.

徐先哲, 李卫, 杨七文. 1985. 康定杂岩特征及成因. 见张云湘等主编: 中国攀西裂谷文集(1). 北京: 地质出版社: 26~40.

邢无京. 1989. 康定群的地质特征及其在扬子地台北缘演化中的意义. 中国区域地质, (4): 347~356.

胥德恩, 陈友良, 张应全, 李文贤, 赵宝光. 1995. 康定杂岩时代及成因探讨. 地质论评, 41(2): 101~111.

夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩. 岩石矿物学杂志, 26(1): 77~89.

袁海华, 张树发, 张平. 1986. 康滇地轴结晶基底的时代归属. 成都地质学院学报, 13(4): 64~70.

杨崇辉, 耿元生, 杜利林, 任留东, 王新社, 周喜文, 杨铸生. 2009. 扬子地块西缘 Grenville 期花岗岩的厘定及其地质意义. 中国地质, 36(3): 647~657.

杨红, 刘福来, 杜利林, 刘平华, 王舫. 2012. 扬子地块西南缘大红山群老厂河组变质火山岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报, 28(9): 2994~3014.

杨红, 刘福来, 刘平华, 王舫. 2013. 扬子地块西南缘大红山群石榴白云母——长石石英片岩的白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年及其地质意义. 岩石学报, 29(6): 2107~2161.

殷桂芹, 陈友良, 张宝玲, 顾孟娟, 王勤, 姚建, 尹观. 2022. 四川米易垭口地区前震旦纪五马箐组与其侵入岩体的锆石 U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素特征及其地质意义. 岩石学报, 38(4): 1126~1148.

赵俊香, 陈岳龙, 李志红. 2006. 康定杂岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 现代地质, 20(3): 378~385.

赵国春, 张国伟. 2021. 大陆的起源. 地质学报, 95(1): 1~19.

张儒瑗, 从柏林, 王明坤. 1987. 四川米易前寒武纪低压变质地体的初步研究. 岩石学报, (3): 3~12.

郑玉文, 陈友良, 彭渤洋, 胡漾, 郭锐, 邓舟. 2021. 攀枝花大田地区前震旦纪斜长角闪岩地球化学特征及构造意义. 地球科学, 46(1): 59~72.

Bohlen S R. 1991. On the formation of granulites. Journal of Metamorphic Geology, 9(3): 223~229.

Cong Bolin. 1988#. Formation and Evolution of Panxi Ancient Rift Valley. Beijing: Science Press: 1~96.

Chen Yuelong, Luo Zhaohua, Zhao Junxiang, Li Zhihong, Zhang Hongfei. 2004#. Petrogenesis of Kangding complex: Evidence from zircon SHRIMP U-Pb age and lithogeochemistry. Science in China (Series D), 34(8): 687~697.

Du Lilin, Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, Zhou Xiwen, Ren Liudong, Wang Yanbin, Yang Zhusheng. 2006#. The stipulation of Neoproterozoic TTG in Western Yangtze block and its significance. Acta Petrologica et Mineralogica, 25(4): 273~281.

Du Lilin, Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, Ren Liudong, Zhou Xiwen, Wang Yanbin, Yang Zhusheng. 2007#. New understanding on Kangding Group on Western margin of Yangtze Block: Evidence from geochemistry and chronology. Acta Geologica Sinica, 81(11): 1562~1577.

Ernst W G. 1988. Tectonic history of subduction zones inferred from retrograde blueschist *P—T* paths. Geology, 16(12): 1081~1084.

Gu Xueda, Liu Xiaohu. 1997#. Stratigraphy (lithostratic) of Sichuan Province. Wuhan: China University of Geosciences Press: 155~199.

Guo Chunli, Wang Denghong, Chen Yuchuan, Zhao Zhigang, Wang Yanbin, Fu Xiaofang, Fu Deming. 2007#. SHRIMP U-Pb zircon ages and major element, trace element and Nd—Sr isotope geochemical studies of a Neoproterozoic granitic complex in Western Sichuan: Petrogenesis and tectonic significance. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2457~2470.

Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, Du Lilin, Ren Liudong, Zhou Xiwen. 2008#. Metamorphic Basement Evolution in Western Margin of Yangtze Block. Beijing: Geological Publishing House: 1~215.

Harley S L. 1989. The origins of granulites: a metamorphic perspective. Geological Magazine, 126(3): 215~247.

Holdaway M J. 2000. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet—biotite geothermometer. American Mineralogist, 85(7~8): 881~892.

Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 27~62.

Jin Tinfu, Li Youguo, Fei Guangchun, Feng Yuchang, Zhou Heng, Sha Xiaobao, Wu Kui. 2017#. Geochronology of zircon U-Pb from Hongshan Formation in the Dahongshan Group in the Southwest Yangtze Block for the redefinitions of the forming age of the protolith and metamorphic age. Geological Review, 63(4): 894~910.

Kang Huan, Li Dapeng, Chen Yuelong, Hu Guoqiang, Deng Weibing. 2017#. Origin and tectonic implications of Kangding intrusive complexes in Sichuan Province: Evidence from zircon Hf isotope. Geology in China, 44(6): 1175~1189.

Lu Minjie. 1986#. Early proterozoic metamorphic rock series, West Sichuan and East Yunnan, China: Metamorphism and crustal evolution. Journal of Changchun University of Earth Sciences, (3): 12~22.

Lu Huaipeng, Xu Shijin, Wang Rucheng, Shen Weizhou. 1999#.

- Metamorphism of the Shaba granulites in Western Sichuan. *Journal of Nanjing University: Natural Science*, 35(3): 296~302.
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Li Zhengxiang, Liu Ying. 2001&. Zircon U-Pb age and petrochemical characteristics of the Neoproterozoic bimodal volcanics from Western Yangtze Block. *Geochimica*, 30(4): 315~322.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, Liu Ying, Liang Xirong. 2002&. U-Pb zircon geochronological, geochemical and Nd isotopic study of Neoproterozoic basaltic magmatism in Western Sichuan: petrogenesis and geodynamic implications. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 329~338.
- Li Zhengxiang, Li Xianhua, Kinny P D, Wang Jian, Zhang Shihong, Zhou Hong. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precambrian Research*, 122(1~4): 85~109.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbing. 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt—peridotite interactions in the trans-north China orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1~2): 537~571.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, Gao Changgui, Gao Shan, Xu Juan, Chen HaiHong. 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535~1546.
- Lin Guangchun, Dong Junchao. 2013&. Petrogenesis and source characteristics of Neoproterozoic mafic dykes in Kangding—Danba area, Western Sichuan. *Geology in China*, 40(6): 1793~1805.
- Sandiford M, Powell R. 1986. Deep crustal metamorphism during continental extension: modern and ancient examples. *Earth & Planetary Science Letters*, 79(1~2): 151~158.
- Sun Haiting. 2002&. Studies on granulites in the Western margin of the Yangtze: mineralogy, petrology and formation conditions. Instructor; Wang Rucheng. Nanjing: Master's thesis, Nanjing University: 1~74.
- Sun Zexuan, Chen Youliang, Yao Jian, Han Wenwen, Wang Fenggang, Zhang Liang. 2020&. Basic characteristics and genesis of the Datian uranium deposit in Panzhihua area, Western Sichuan. *Geological Review*, 66(4): 1005~1018.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004&. Genetic mineralogy of zircon and its constraints on U-Pb age interpretation. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589~1604.
- Wu Chunming, Zhang Jian, Ren Liudong. 2004. Empirical garnet—biotite—plagioclase—quartz (GBPQ) geobarometry in medium- to high-grademetapelites. *Journal of Petrology*, 45(9): 1907~1921.
- Winter J D. 2009. Principles of Igneous and Metamorphic Petrology. Upper Saddle River; Prentice Hall Press: 1~720.
- Xu Xianzhe, Li Wei, Yang Qiwen. 1985. The Characteristics and Genesis of Kangding complex, From Anthology of Panxi Rift valley in China(1). Beijing: Geological Publishing House: 26~40.
- Xing Wujing. 1989&. The characteristics of the Kangding Group and its implication for the evolution of the Yangtze Plat form basement. *Regional Geology of China*, (4): 347~356.
- Xu Deen, Chen Youliang, Zhang Yingquan, Li Wenxian, Zhao Baoguang. 1995&. The study on the age and origin of the Kangding complex. *Geological Review*, 41(2): 101~111.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping. 2007&. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77~89.
- Yuan Haihua, Zhang Shufa, Zhang Ping. 1986&. Geochronological belonging of the crystalline basement of the Kang-Dian Geaxis. *Journal of Chengdu College of Geology*, 13(4): 64~70.
- Yang Chonghui, Geng Yuansheng, Du Lilin, Ren Liudong, Wang Xinshe, Zhou Xiwen, Yang Zhusheng. 2009&. The identification of the Grenvillian granite on the Western margin of the Yangtze Block and its geological implications. *Geology in China*, 36(3): 647~657.
- Yang Hong, Liu Fulai, Du Lilin, Liu Pinghua, Wang Fang. 2012&. Zircon U-Pb dating for metavolcanites in the Laochanghe Formation of the Dahongshan Group in Southwestern Yangtze Block, and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2994~3014.
- Yang Hong, Liu Fulai, Liu Pinghua, Wang Fang. 2013&. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating for muscovite in garnet muscovite—felsic schists of the Dahongshan Group in Southwestern Yangtze Block and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2161~2170.
- Yang Yijin, Zhu Weiguang, Bai Zhongjie, Zhong Hong, Ye Xiantao, Fan Hongpeng. 2017. Petrogenesis and tectonic implications of the Neoproterozoic Datian mafic—ultramafic dykes in the Panzhihua Area, Western Yangtze Block, SW China. *International Journal of Earth Sciences*, 106(1): 185~213.
- Yin Guiqin, Chen Youliang, Zhang Baoling, Gu Mengjuan, Wang Qin, Yao Jian, Yin Guan. 2022&. Zircon U-Pb chronology and Lu-Hf isotopic characteristics of the Pre-Sinian Wumaqing Formation and its intrusions in Yakou Area, Miyi County, Sichuan Province, and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 38(4): 1126~1148.
- Zhao Guochun, Wilde S A, Cawood P A, Lu Liangzhao. 1998. Thermal evolution of the archaean basement rocks from the Eastern part of the North China Craton and its bearing on tectonic setting. *International Geology Review*, 40(8): 706~721.
- Zhao Guochun, Zhang Guowei. 2021&. Origin of continents. *Acta Geologica Sinica*, 95(1): 1~19.
- Zhao Junxiang, Chen Yuelong, Li Zhihong. 2006&. Zircon U-Pb SHRIMP dating for the Kangding complex and its geological significance. *Geoscience*, 20(3): 378~385.
- Zhou Meifu, Yan Danping, Kennedy Allen K, Li Yunqian, Ding Jun. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the Western margin of the Yangtze Block, South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1~2): 51~67.
- Zhou Meifu, Zhao Xinfu, Chen Wei Terry, Li Xiaochun, Wang Wei, Yan Danping, Qiu Huaning. 2014. Proterozoic Fe—Cu metallogeny and supercontinental cycles of the Southwestern Yangtze Block, Southern China and Northern Vietnam. *Earth-Science Reviews*, 139(1): 59~82.
- Zhang Ruyuan, Cong Bolin, Wang Mingkun. 1987&. A preliminary research on Precambrian low-pressure metamorphic terrain in the Miyi, Sichuan Province. *Acta Petrologica Sinica*, (3): 3~12.
- Zheng Yuwen, Chen Youliang, Peng Boyang, Hu Yang, Guo Rui, Deng Zhou. 2021&. Geochemical characteristics and tectonic significance of the Neoproterozoic amphibolites from Datian Area, Panzhihua City. *Earth Science*, 46(1): 59~72.

The P — T — t path and its tectonic significance for metamorphic complex of the Zanli Formation, Kangding Group, in Datian area, Panzhihua City

ZHANG Baoling¹⁾, CHEN Youliang^{1, 2)}, OU Heqiong¹⁾, FU Yuzhen¹⁾, YIN Guiqin¹⁾, GU Mengjuan¹⁾

1) College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059;

2) Sichuan Key Laboratory of Applied Nuclear Techniques in Geosciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059

Abstract: The Kangding complex in the western margin of the Yangtze Plate is a set of magmatic—metamorphic complex composed of intrusive rock and metamorphic rock, which are important window for studying the disintegration of the Rodinian supercontinent. Although numbers of studies focused on magmatic complex, metamorphic rocks within the complex were weakly understood. To comprehensively understand the tectonic setting and genetic mechanism of Kangding complex, this paper selected Zanli Formation of the Kangding Group in Datian of the Panzhihua area, aimed to apply petrological, mineralogical and geochemistry analysis, date garnet—mica schist using zircon U-Pb method and estimating metamorphic P — T condition for garnet—sillimanite—biotite—plagioclase gneiss. Three metamorphic generations indicated by metamorphic mineral assemblages were identified from garnet—sillimanite—biotite—plagioclase gneiss. The prograde mineral assemblage M1 in the core of porphyroblastic garnet has mineral assemblage of garnet (core) + biotite + fibrolite + ilmenite + quartz, which has P — T condition of 609 ~ 690 °C—0.2 ~ 0.3 GPa. The peak metamorphic mineral assemblage M2 is dominantly composed of porphyroblastic garnet (mantle) and the matrix minerals biotite + fibrolite + plagioclase + quartz, revealing P — T condition of 643 ~ 732 °C—0.20 ~ 0.51 GPa. The retrograde metamorphic mineral assemblage M3 is dominantly composed of porphyroblastic garnet (rim) and the matrix minerals biotite + fibrolite + plagioclase + quartz, which has P — T condition of 602 ~ 687 °C—0.27 ~ 0.39 GPa. Thus an anticlockwise P — T path with nearly isobaric cooling (IBC) type was recorded in the garnet—sillimanite—biotite—plagioclase gneiss. Zircons separated from garnet—mica schist were dated at 842 ± 10 Ma, indicating the metamorphic ages in the region. The comprehensive analysis shows that the metamorphic complex in the western margin of the Yangtze Plate was formed in the extensional environment and combined with the characteristics of contemporaneous magmatic activity in the area, it is suggested the Neoproterozoic metamorphic events in the western margin of the Yangtze Plate may be related to magmatic activities caused by the superplume.

Keywords: Datian area; metamorphic complex of the Kangding Group; anticlockwise P — T path; metamorphic ages; tectonic significance

Acknowledgements: This study was supported by the Natural Science Foundation of China(No. 42072096), the major research project of China Nuclear Geology——“study on uranium metallogenic environment and selection area in Kangdian axis”(No. 202137-3)and the Everest Science and Technology Project of Chengdu University of Technology(No. 2021ZF11413)

First author: ZHANG Baoling, male, master student; Email: baol_zhang@163.com

Corresponding author: CHEN Youliang, male, professor, doctoral tutor, mainly working on metallogenic regularity and Precambrian geology research; Email: chenyouliang09@cdut.cn

Manuscript received on: 2022-08-21; Accepted on: 2022-12-14; Published online on: 2022-12-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.12.095

Edited by: ZHANG Yuxu