青海南山地区中压相系递增变质带初步研究

代雄,杨柳,贺光兴,李佳奇,易建,邓华波 四川省冶金地质勘查院,成都,610051

内容提要: 青海南山地区位于东昆仑与西秦岭的重要衔接处,首次发现一套递增变质带,变质带由中心往外,变 质强度逐渐递减,依次分别为:砂线石带、蓝晶石带、石榴子石带、黑云母带、绿泥石带。本文以石榴子石黑云母变粒 岩为研究对象,通过岩相学研究并结合电子探针成分分析,显示石榴子石变斑晶具有微弱的生长环带,黑云母以高 温铁质黑云母为主,利用石榴子石一黑云母温度计、石榴子石一黑云母一斜长石一石英压力计计算,获得石榴子石 带的变质 *P*−*T* 条件为 564℃,0.56GPa;蓝晶石带的变质 *P*−*T* 条件为 667 ~ 670℃,0.68 ~ 0.71GPa,属于中压相系。 应与印支期古特提斯洋闭合导致的地壳碰撞加厚有关。

关键词:递增变质带;中压相系;印支期;青海南山地区

青海省南山地区位于青藏高原东北部,地处中 央造山带西缘,东昆仑与西秦岭的衔接处,是我国西 北部地质构造格架研究中一个十分关键的节点,众 多学者对该区的构造属性(冯益民等,2003;张国伟 等,2004; 闫臻等,2012)、构造岩浆活动(张宏飞 等,2006; 强娟,2008; 李王晔,2008; 骆必继, 2013)、成矿规律(李俊民等,2006;于淼等,2013)等 问题进行了深入的讨论。但是,由于受到地理、交 通、人文、环境等多方面因素制约,针对该地区变质 作用的研究工作在很长一段时间内都处于一个很低 的程度,这就大大限制了人们对该区构造演化历程 的认识。笔者等通过综合区域地质填图、剖面测量 以及室内岩相学等研究,在该地区发现一套完整的 与地层走向近于垂直的递增变质相带,并进一步选 取其中的特征变质岩及其变质矿物,进行岩石学与 矿物学的系统研究,获得了变质 P-T 条件,并对该 区特征变质带的成因展开相应的探讨。

1 区域地质概况

研究区属于中央造山带西段的秦祁昆构造域, 所处位置为中央造山带多个块体(东昆仑、西秦岭、 祁连山、巴颜喀拉、柴达木块体、欧龙布鲁克块体) 交接转换的重要结点地区(图1)。研究区属于秦祁 昆造山系,二级构造单元属于秦岭弧盆系,三级构造 单元归属泽库前陆盆地(张雪亭等,2007)。该盆地 主要表现为一套碎屑岩夹少量碳酸盐组成的滨海环 境潮汐通道相沉积建造。区域上总体具有早期复理 石、晚期磨拉石的典型双幕式堆积序列,为较典型前 陆盆地充填序列。

区内有三组断裂构造发育,以北西—北西西向 断裂构造最为发育,次为北东一北东东向、还有南北 向次级构造断裂。出露地层相对单一,主体为一套 早一中三叠纪隆务河组复理石沉积(T₁₋₂l)和晚三 叠纪甘家组属浅海相沉积(P₃gi),二者呈断层接触 关系(孙崇仁,1997),另有大量不同成因类型的古 近系一新近系、第四系分布。研究区内岩浆活动强 烈,主要为中一下三叠世的大规模岩浆侵位活动,岩 性以中性侵入岩为主,超基性、基性、酸性侵入岩均 有零星分布,侵入岩主要出露于研究区北部的青海 湖南山的主山脊和青海湖南山北缘,侵入体规模大 小悬殊较大,产状包括中深成相的岩株、岩基以及少 量浅成相的岩枝、岩脉。同位素年代学证据表明,研 究区岩浆岩时间跨度较小,对应的锆石 U-Pb 年龄 为235 ±2Ma(张宏飞等,2006),应为印支晚期构造 活动的产物。区内出露的变质岩均为隆务河组与甘 家组变质成因,分布广泛,变质程度差异较大。

注:本文为中国地质调查局"青海省共和县文巴地地区 J47E021015、J47E021016、J47E022016、J47E022017 四幅 1:5 万区域地质矿产调查"项目(编号:12120113033019)的成果。

收稿日期:2016-03-29;改回日期:2016-08-21;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2016.05.008

作者简介:代雄,男,1989年生,硕士研究生。主要从事区域地质矿产调查工作。通讯地址:610051,四川省成都市成华区地勘路6号。 Email: dai890320@126.com。



图 1 青海南山地区地质简图(据张宏飞等,2006; 尹安,2001)

Fig. 1 The geological map of Nanshan area in Qinghai(Zhang Hongfei et al., 2006&; Yin An, 2001&)
Q-第四系;T₁₋₂*l*-下-中三叠统隆务河组;T₁₋₂*g*-下-中三叠统格曲组;T₃*e*-上三叠统鄂拉山组;P₃*gj*-上二叠统甘家组;γ₅-三叠纪一株罗纪花岗岩;γ₄-二叠纪一泥盆纪花岗岩;δ₁₅-三叠纪闪长岩;Σ₄-二叠纪超镁铁质岩
Q-Quaternary;T₁₋₂*l*-Lower-Middle Triassic Longwuhe Formation;T₁₋₂*g*-Lower-Middle Triassic Gequ Formation;T₃*e*-Upper Triassic Elashan Formation; P₃*gj*-Upper Permian Ganjia Formation; γ₅-Jurassic-Triassic Granite; γ₄- Permian-Devonian Granite; δ₅¹- Triassic Diorite;Σ₄- Permian Ultramafic rock

2 变质岩野外及岩相学特征

青海南山地区变质岩主要为一套浅一中高级变 质岩。岩性多样,其中浅变质岩占据研究区的绝大 多数部位,主要岩性有变砂岩、千枚岩、板岩等,变质 相主体为绿片岩相(仍保留了原始沉积构造及变余 砂状结构,主要变质矿物为变质重结晶所形成的绿 泥石、黑云母、白云母等)。区域中高级变质岩主要 分布于青海湖南山的主山脊及山北缘部分地区,岩 性可分为各类片岩、变粒岩及少量混合岩,变质程度 可达到角闪岩相(可见黑云母、石榴子石、蓝晶石、 矽线石等特征变质矿物)。部分岩石野外及岩相学 特征见图2。 图 2a 为石榴子石黑云母变粒岩手标本,粒状鳞 片状变晶结构,石榴子石变斑晶呈等轴粒状,深酱红 色,部分氧化成铁锈色,大小较均匀,2~4mm 为主, 含量约 15%,黑云母变斑晶呈片状,黑色,玻璃光泽 明显,大小约1×0.2 mm² 左右,含量约 20%。

图 2b 为蓝晶石矽线石片岩手标本,斑状变晶结构,蓝晶石为浅蓝色,柱状,长约 2~5mm,粗约 1~2mm,柱面解理发育,强烈定向排列,含量约 20%, 矽线石为白色,毛发状一针状,可见玻璃光泽,含量约 5%,蓝晶石与矽线石多彼此平直接触,无穿切或 交代现象,呈平衡共生关系。

图 2c 为石榴子石黑云母变粒岩,石榴子石内部 包裹体较少(以细粒石英、斜长石为主),黑云母显



图 2 青海南山地区特征岩石手标本、显微镜下照片 Fig. 2 Hand specimen and Photomicrographs of the typical textures of the Nanshan area in Qinghai Grt—石榴子石;Bt—黑云母;Pl—斜长石;Ky—蓝晶石;Sil—砂线石;Qtz—石英 Grt—Garnet;Bt—Biotite;Pl—Plagioclase;Ky—Kyanite;Sil—Sillimanite;Qtz—Quartz

示深棕红色多色性,斜长石表面绢云母化蚀变强烈, 黑云母与石榴子石相互毗邻,呈自形一半自形晶体 形态。

图 2d 为蓝晶石矽线石片岩,蓝晶石呈一级灰干 涉色,横截面上可见两组解理夹角近 70°,矽线石集 合体呈毛发状。

3 变质相带

笔者在青海南山北侧靠近山脊位置,开展野外 区域地质调查过程中,发现该区发育有一套相对典 型的递增变质带,变质带在空间上呈不规则的长菱 形顺构造线沿北西向展布(图3),通过实际地质剖 面测量(图4),我们以观察到标志变质矿物的首次 出现作为变质相带界线划分依据,另佐以不同类型 岩石中矿物的共生组合,将研究区划分为五个变质 相带,变质带由中心往外,变质强度逐渐递减,形成 一个相对完整的递增变质带,依次分别为:矽线石 带、蓝晶石带、石榴子石带、黑云母带、绿泥石带。

研究区内各个变质相带的特征分述如下:

3.1 绿泥石带(低绿片岩相)

分布区域最为广泛,常见的变质岩有:变砂岩、 板岩、千枚岩、绿泥片岩、绢云片岩、大理岩,在绿泥 石带中典型的矿物共生组合是:Ab+Q+Ser+Chl+ Ep;Ser+Cht+Q+Chl。

3.2 黑云母带(低绿片岩相)

典型矿物共生组合基本上与绿泥石带相同,差 别仅在于上述典型矿物组合中出现黑云母,部分地 区与绿泥石带界线较难区分。

3.3 铁铝榴石带(高绿片岩相)

呈不规则环带状分布,以石榴子石的首次出现



 $\delta_0 T_2$ — Quartz diorite; δT_2 — Diorite; νT_2 — Gabbro

作为判定依据,常见的变质岩石有石榴子石二云母 石英片岩、石榴子石黑云变粒岩、黑云斜长片麻岩 等。典型的矿物共生组合是:Pl+Q +Bi+Grt+ Ms。

3.4 蓝晶石带(低角闪岩相)

分布于递增变质带的中部,为长棱状,顺地层走

向呈北西向延伸,长9km,宽约1~2km,总面积 15km²。常见的变质岩石类型有云母片岩、云母石 英片岩、蓝晶石变粒岩、片麻岩、浅粒岩等。典型的 矿物共生组合是:Pl+Q+Bi+Grt+Ky±Ms。

3.5 矽线石带(高角闪岩相)

分布于递增变质带的中心部位,呈小透镜状沿



图 4 南山地区铁矿沟一带变质岩剖面示意图

Fig. 4 The schematic diagram showing the progressive metamorphic zones in Qinghai Nanshan area

Bt -Biotite zone; Grt -Garnet zone; Ky -Kyanite zone; Sil -Sillimanite zone

片理方向呈北东向展布,长7km,宽约1km,出露面 积达7km²。常见的变质岩石类型有矽线石变粒岩、 蓝晶石矽线石片岩、片麻岩、浅粒岩、石英岩等。典 型的矿物共生组合是:Sill+Bi+Pl+Q±Ms±Ky。

4 主要矿物的化学成分

为了获得准确的变质温压条件,本次研究选取 石榴子石、黑云母、斜长石、蓝晶石及砂线石进行电 子探针矿物化学成分测试。电子探针成分分析在中 国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点 实验室完成,利用配备4 道波谱仪的 JEOL JXA-8100 电子探针测试,工作条件为:加速电压 15kV, 加速电流 20nA,束斑直径 < 1μm,所有测试数据均 进行了 ZAF 校正处理。

本文采用阴离子法(氧原子法)计算石榴子石 的化学分子式及其端元组分,即按氧原子数为12进 行标准化处理,详细数据见表1。

石榴子石带样品 Y3 中,石榴子石成分为铁铝 榴石,蓝晶石带样品 Y4 中(图 5a、图 5b),石榴子石 成分表现为从核部至边部,镁含量逐渐降低,锰含量 有一定增高,钙含量除一个点以外,含量显示出平坦 的趋势,铁含量变化较大,从核部到边部总体升高, 在距离边缘约 100μm 附近达最高值,而在最边部明 显降低,石榴子石成分从内向外 Mg/Fe 比率明显下 降。

蓝晶石带样品 Y5 中(图 5c、图 5d),石榴子石 成分环带发育较弱,从核部到边部铁含量逐渐减少, 镁、钙、锰成分变化较小,可能为相对稳定 P—T 条 件下的产物,也可能为石榴子石成分随变质作用的 增强而扩散均一化了。 采用阴离子法(氧原子法)计算黑云母的化学 分子式,即以11个氧原子数为基础进行标准化处 理,详细数据见表2。

本区黑云母以深棕红色多色性为特征,矿物化 学成分变化较小,没有明显的成分环带。总体上,黑 云母的化学成分特征是 Fe 较高,而 Mg 较低,Ti 含 量为0.171~0.243。按 Foster(1960)的云母族矿物 分类方案(图6),本区黑云母以铁质黑云母为主。

选取与黑云母、石榴子石平衡共生的斜长石进 行测试。采用阴离子法(氧原子法)计算斜长石的 化学分子式,即按氧原子数为8对斜长石进行标准 化处理,详细数据见表2。本区斜长石成分变化不 大,An=0.14~0.17。本文采用阴离子法(氧原子 法)计算蓝晶石、矽线石的化学分子式,即以5个氧 原子数为基础进行标准化处理,详细数据见表2。

5 变质温压条件计算

变泥质岩对变质作用物化条件反应灵敏,容易 保存变质矿物反应结构,记录变质作用历史信息的 能力较强(吴春明等,2007)。因此,国内外学者针 对于这类岩性的矿物温度计一压力计做了大量的研 究工作,通过大量的岩石学相平衡实验校正,已经标 定了许多适用于变泥质岩的地质温压计。

本文利用适合泥质岩石的石榴子石—黑云母 (GB)温度计(Holdaway,2000)、石榴子石—黑云 母—斜长石—石英(GBPQ)压力计(Wu et al., 2004)计算石榴子石带和蓝晶石带的温度和压力, 计算时选择石榴子石边部成分及与之临近的黑云 母、斜长石颗粒的成分,得到石榴子石带样品 Y3 的 变质温度为564℃,压力为0.56GPa;蓝晶石带样品

Bt—黑云母带;Grt—石榴子石带;Ky—蓝晶石带;Sil—矽线石带

| 样品号 | Y | 3 | | | | Y2 | Ļ | | | | | | | ¥5 | | | |
|------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 点号 | 1 | 2 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| 矿物 | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt | Grt |
| 打点位置 | 核 | 边 | 边 | 边 | 幔 | 幔 | 核 | 幔 | 边 | 边 | 边 | 边 | 幔 | 核 | 幔 | 边 | 边 |
| SiO_2 | 37.47 | 37.32 | 37.12 | 37.59 | 37.60 | 37.67 | 37.16 | 37.38 | 38.04 | 37.52 | 37.72 | 37.98 | 38.39 | 38.63 | 38.66 | 38.20 | 37.45 |
| TiO_2 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 0.02 | 0.05 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.03 |
| Al_2O_3 | 20.97 | 21.03 | 20.84 | 20.61 | 20.95 | 20.81 | 21.21 | 21.08 | 20.89 | 21.12 | 21.28 | 21.20 | 20.92 | 21.06 | 20.81 | 20.99 | 20.99 |
| FeO | 34.72 | 34.52 | 33.90 | 33.77 | 33.35 | 33.64 | 33.73 | 33.30 | 33.20 | 33.60 | 32.91 | 32.82 | 33.29 | 33.09 | 32.92 | 33.11 | 32.83 |
| MnO | 2.97 | 3.19 | 2.74 | 2.44 | 2.06 | 2.18 | 2.11 | 2.15 | 1.95 | 2.57 | 1.89 | 1.78 | 1.69 | 1.61 | 1.63 | 1.72 | 2.00 |
| MgO | 2.97 | 2.62 | 3.32 | 3.35 | 3.79 | 4.02 | 4.13 | 3.87 | 3.74 | 3.18 | 4.37 | 4.45 | 4.51 | 4.51 | 4.41 | 4.39 | 4.24 |
| CaO | 1.36 | 1.29 | 1.30 | 1.29 | 1.36 | 1.32 | 1.42 | 1.31 | 1.33 | 1.36 | 1.42 | 1.34 | 1.29 | 1.20 | 1.34 | 1.37 | 1.39 |
| Na_2O | 0.05 | 0.06 | 0.02 | 0.06 | 0.07 | 0.06 | 0.08 | 0.07 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 0.03 | 0.05 | 0.04 | 0.09 | 0.06 |
| K20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Cr_2O_3 | 0.07 | 0.04 | 0.06 | 0.00 | 0.03 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.07 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.04 | 0.02 |
| Total | 100.63 | 100.08 | 99.30 | 99.13 | 99.21 | 99.74 | 99.87 | 99.16 | 99.22 | 99.39 | 99.67 | 99.65 | 100.16 | 100.16 | 99.81 | 99.94 | 99.01 |
| | | | | | | · | 分子 | 式计算方法 | ≒: 12 0 | | | | | | | | |
| Si | 3.004 | 3.012 | 3.006 | 3.04 | 3.026 | 3.021 | 2.981 | 3.012 | 3.068 | 3.033 | 3.011 | 3.027 | 3.046 | 3.072 | 3.087 | 3.047 | 3.017 |
| Ti | 0.003 | 0 | 0 | 0.001 | 0.001 | 0 | 0.001 | 0 | 0.001 | 0 | 0.002 | 0.001 | 0.003 | 0 | 0.001 | 0.002 | 0.002 |
| Al | 1.981 | 2 | 1.989 | 1.964 | 1.988 | 1.967 | 2.005 | 2.002 | 1.986 | 2.013 | 2.002 | 1.991 | 1.956 | 1.973 | 1.958 | 1.973 | 1.993 |
| Fe | 2.327 | 2.33 | 2.296 | 2.284 | 2.245 | 2.256 | 2.263 | 2.244 | 2.239 | 2.272 | 2.197 | 2.187 | 2.209 | 2.201 | 2.199 | 2.208 | 2.212 |
| Mn | 0.201 | 0.218 | 0.188 | 0.167 | 0.141 | 0.148 | 0.143 | 0.147 | 0.133 | 0.176 | 0.128 | 0.12 | 0.114 | 0.108 | 0.11 | 0.116 | 0.137 |
| Mg | 0.354 | 0.315 | 0.401 | 0.404 | 0.454 | 0.48 | 0.494 | 0.465 | 0.45 | 0.383 | 0.519 | 0.529 | 0.533 | 0.534 | 0.525 | 0.522 | 0.509 |
| Ca | 0.117 | 0.111 | 0.112 | 0.112 | 0.117 | 0.113 | 0.122 | 0.113 | 0.115 | 0.117 | 0.121 | 0.115 | 0.109 | 0.102 | 0.115 | 0.117 | 0.12 |
| Na | 0.008 | 0.009 | 0.003 | 0.01 | 0.01 | 0.009 | 0.012 | 0.01 | 0.007 | 0.004 | 0.005 | 0 | 0.004 | 0.008 | 0.006 | 0.014 | 0.009 |
| K | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Cr | 0.005 | 0.003 | 0.004 | 0 | 0.002 | 0.003 | 0.001 | 0 | 0 | 0.001 | 0.001 | 0.004 | 0 | 0.001 | 0 | 0.002 | 0.001 |
| 离子数总和 | 8 | 8 | 8 | 7.982 | 7.983 | 7.998 | 8.022 | 7.992 | 8 | 8 | 7.988 | 7.974 | 7.975 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Alm 铁铝榴石 | 0.773 | 0.783 | 0.766 | 0.781 | 0.767 | 0.754 | 0.731 | 0.756 | 0.786 | 0.783 | 0.746 | 0.757 | 0.764 | 0.77 | 0.775 | 0.755 | 0.745 |
| Gross 钙铝榴石 | 0.032 | 0.036 | 0.035 | 0.037 | 0.038 | 0.037 | 0.008 | 0.038 | 0.038 | 0.038 | 0.04 | 0.036 | 0.037 | 0.033 | 0.038 | 0.038 | 0.04 |
| Pyp 镁铝榴石 | 0.118 | 0.105 | 0.134 | 0.135 | 0.152 | 0.16 | 0.164 | 0.155 | 0.15 | 0.128 | 0.173 | 0.177 | 0.178 | 0.178 | 0.175 | 0.174 | 0.17 |
| Spess 锰铝榴石 | 0.067 | 0.073 | 0.063 | 0.056 | 0.047 | 0.049 | 0.048 | 0 049 | 0.044 | 0.059 | 0.043 | 0.04 | 0.038 | 0.036 | 0.037 | 0.039 | 0.046 |

表1 南山变质岩代表性石榴子石的电子探针分析数据(%)

Table 1 Representative microprobe analyses of garnet in the Nanshan metamorphic rocks (%)



图 5 南山地区变质岩背散射图像(BSE)及石榴子石成分环带

Fig. 5 BSE images of the Nanshan metamorphic rocks and Compositional profiles of garnet

- (a)石榴子石黑云母变粒岩背散射图像(Y4 号样);(b)石榴子石成分环带(Y4 号样);
 - (c)石榴子石黑云母变粒岩背散射图像(Y5号样);(d)石榴子石成分环带(Y5号样)
- Grt一石榴子石;Bt一黑云母;Pl一斜长石;Ms一白云母;llm一钛铁矿;Mag一磁铁矿;Qtz一石英

(a) Garnet biotite granulite back scatter images (Y4 sample); (b) Compositional zonation of garnet (Y4 sample);

(c) Garnet biotite granulite back scatter images (Y5 sample); (d) Compositional zonation of garnet (Y5 sample)

Grt-Garnet; Bt-Biotite; Pl-Plagioclase; Ms-Muscovite; Ilm-Ilmenite; Mag-Magnetite; Qtz-Quartz

Y4 的变质温度为 667℃, 压力在 0. 68GPa 左右。蓝 晶石带样品 Y5 的变质温度为 670℃, 压力在0. 71 GPa 左右。

6 讨论

青海南山地区的构造格局及变质作用主要受到 西秦岭与东昆仑的侧向运动的影响,其大致经历了 三个演化阶段:晚古生代有限洋盆的发展、中生代早 期陆一陆俯冲碰撞、三叠纪末碰撞造山,最终完成了 西秦岭与东昆仑间的侧向碰撞与造山的结合,其后 便进入造山期后走滑伸展、改造变形的发展历程 (王云山等,1987)。区内出露地层主体为隆务河 组、甘家组,为一套堆积速度快、环境动荡,且属于近 源堆积的活动型沉积组合,代表三叠纪活动大陆边 缘环境(闫臻等,2012)。本次研究中针对研究区内 甘家组顶部采集碎屑锆石中(采样位置见图3),最 年轻一颗年龄为254±3Ma(岩浆结晶锆石,CL环带 清晰),限定了甘家组的沉积下限(另文刊发);同位 素年代学证据表明,研究区岩浆岩时间跨度较小,主 要为印支晚期,对应的锆石同位素 U-Pb 年龄为235

表 2 南山变质岩代表性黑云母、斜长石、蓝晶石、矽线石的电子探针分析数据(%)

Table 2 Microprobe analysis of representative biotite and plagioclase and kyanite and sillimanite in the Nanshan metamorphic rocks (%)

| 样品号 | Y | 3 | Y | 4 | | ¥5 | | 样品号 | ¥3 | Y4 | ¥5 | 样品号 | Y | 5 | Y | 6 |
|-----------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|------------------|--------|--------|--------|------------------|-------|--------|-------|-------|
| 点号 | 3 | 4 | 14 | 15 | 24 | 25 | 26 | 点号 | 5 | 16 | 27 | 点号 | 28 | 29 | 30 | 31 |
| 矿物 | | | | Bt | | | | 矿物 | | Pl | | 矿物 | K | y | S | il |
| SiO2 | 36.61 | 35.90 | 36.35 | 36.26 | 35.94 | 35.74 | 36.26 | SiO2 | 57.12 | 58.86 | 60.11 | SiO ₂ | 36.66 | 36.83 | 37.21 | 37.23 |
| TiO_2 | 3.97 | 3.00 | 3.96 | 3.46 | 3.90 | 3.38 | 4.30 | ${\rm TiO}_2$ | 0.03 | 0 | 0 | TiO ₂ | 0 | 0.02 | 0.01 | 0 |
| Al_2O_3 | 18.28 | 18.71 | 17.81 | 17.79 | 18.64 | 18.46 | 18.09 | Al_2O_3 | 26.64 | 26.71 | 23.34 | Al_2O_3 | 61.78 | 61.32 | 60.93 | 60.33 |
| FeO | 19.49 | 19.49 | 21.02 | 21.40 | 20.39 | 20.67 | 21.03 | FeO | 0.07 | 0.01 | 0.08 | FeO | 0.28 | 0.33 | 0.18 | 0.21 |
| MnO | 0.08 | 0.09 | 0.07 | 0.08 | 0.05 | 0.08 | 0.06 | MnO | 0 | 0 | 0 | MnO | 0.01 | 0.00 | 0 | 0 |
| MgO | 8.11 | 8.99 | 8.04 | 7.76 | 7.42 | 7.61 | 7.14 | MgO | 0 | 0.01 | 0 | MgO | 0 | 0 | 0 | 0.01 |
| CaO | 0 | 0.01 | 0 | 0 | 0 | 0.01 | 0.02 | CaO | 3.63 | 3.14 | 2.63 | CaO | 0.02 | 0 | 0.04 | 0.03 |
| Na_2O | 0.11 | 0.15 | 0.04 | 0.14 | 0.12 | 0.11 | 0.18 | Na_2O | 9.75 | 9.46 | 8.61 | Na_2O | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 |
| K_2O | 9.43 | 9.59 | 9.41 | 9.26 | 9.01 | 8.88 | 9.19 | K ₂ O | 0.17 | 0.18 | 0.12 | K ₂ O | 0 | 0.01 | 0.03 | 0.01 |
| 总量 | 96.08 | 95.93 | 96.68 | 96.14 | 95.47 | 94.94 | 96.26 | 总量 | 97.41 | 98.38 | 94.89 | 总量 | 98.76 | 98.51 | 98.41 | 97.81 |
| | | | 分子式 | 2:11 0 | | | | | 分子ョ | 式:8 0 | | | | 分子式:50 | | |
| Si | 2.755 | 2.714 | 2.739 | 2.751 | 2.726 | 2.733 | 2.729 | Si | 2.559 | 2.621 | 2.8 | Si | 1.003 | 1.01 | 1.02 | 1.027 |
| Ti | 0.225 | 0.171 | 0.224 | 0.197 | 0.223 | 0.194 | 0.243 | Al | 1.406 | 1.401 | 1.281 | Ti | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Al^N | 1.245 | 1.286 | 1.261 | 1.249 | 1.274 | 1.267 | 1.271 | Fe | 0.003 | 0 | 0.003 | Al | 1.991 | 1.981 | 1.969 | 1.96 |
| Al^{VI} | 0.377 | 0.382 | 0.32 | 0.341 | 0.393 | 0.397 | 0.334 | Ca | 0.174 | 0.15 | 0.131 | Fe | 0.006 | 0.007 | 0.004 | 0.005 |
| Fe | 1.227 | 1.232 | 1.325 | 1.358 | 1.294 | 1.322 | 1.324 | Na | 0.847 | 0.817 | 0.778 | Mn | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mn | 0.005 | 0.006 | 0.005 | 0.005 | 0.003 | 0.005 | 0.004 | K | 0.01 | 0.01 | 0.007 | Mg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mg | 0.91 | 1.013 | 0.903 | 0.877 | 0.84 | 0.867 | 0.801 | Ab | 82.166 | 83.593 | 84.886 | Ca | 0.001 | 0 | 0.001 | 0.001 |
| Ca | 0 | 0.001 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.002 | An | 16.908 | 15.354 | 14.329 | Na | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0 |
| Na | 0.016 | 0.022 | 0.005 | 0.02 | 0.017 | 0.016 | 0.026 | Or | 0.926 | 1.052 | 0.785 | K | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Κ | 0.905 | 0.925 | 0.904 | 0.896 | 0.872 | 0.866 | 0.883 | | | | | | | | | |

| | Tal | ble 2 Micr | oprobe an | 表 2 alysis of re | 南山变质。 presentativ | 岩代表性鼻 re biotite a | 県云母、鈴卡 und plagioc | ☆石、茜晶 そ Jase and k | 5、砂线石É yanite and | 约电子探针 sillimanitu | -分析数据 e in the Na | (%) ushan met | tamorphic | rocks (% | - | |
|------------------------|-------|------------|-----------|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|-----------|-----------|------------------|-------|
| 寺福寺 | Y. | 6 | | Y4 | | Y5 | 1 | 各唱共 | ¥3 | Y4 | ΥS | 朱品号 | Å | 5 | X | 10 |
| 다 또 | m | 4 | 14 | 15 | 24 | 25 | 26 | 다 고 | s | 16 | 27 | | 28 | 29 | 30 | 31 |
| 矿物 | | | | Bt | | | | 矿物 | | Ы | | 矿物 | K | Ę. | Si | 1 |
| Si02 | 36.61 | 35.90 | 36.35 | 36.26 | 35.94 | 35.74 | 36.26 | Si02 | 57.22 | 58.86 | 60.11 | SiO_2 | 36.66 | 36.83 | 37.2. | 37.23 |
| TiO_2 | 3.97 | 3.00 | 3.96 | 3.46 | 3.90 | 3.38 | 4.30 | ${ m TiO}_2$ | 0.03 | 0 | 0 | TiO_2 | 0 | 0.02 | 0.0 | 0 |
| M_2O_3 | 18.28 | 18.71 | 17.81 | 17.79 | 28.64 | 18.46 | 18.09 | AI_2O_3 | 26.64 | 26.71 | 23.34 | M_2O_3 | 61.78 | 61.32 | 60.93 | 60.33 |
| FeO | 19.49 | 19.49 | 21.02 | 21.40 | 20.39 | 20.67 | 21.03 | FeO | 0.07 | 0.01 | 0.08 | FeO | 0.28 | 0.33 | 0.18 | 0.21 |
| MrO | 0.08 | 0.09 | 0.07 | 0.08 | 0.05 | 0.08 | 0.06 | MnO | 0 | 0 | 0 | MnO | 0.01 | 0.00 | 0 | 0 |
| MgO | 8.11 | 8.99 | 8.04 | 7.76 | 7.42 | 7.61 | 7.14 | MgO | 0 | 0.01 | 0 | MgO | 0 | 0 | 0 | 0.01 |
| CaO | 0 | 0.01 | 0 | 0 | 0 | 0.01 | 0.02 | CaO | 3.63 | 3.14 | 2.63 | CaO | 0.02 | 0 | 0.04 | 0.03 |
| Na_2O | 0.11 | 0.15 | 0.04 | 0.14 | 0.12 | 0.11 | 0.18 | $Na_2 O$ | 9.75 | 9.46 | 8.61 | Na_2O | 0.01 | 0.02 | 0.0 ² | 0.01 |
| K_2^{0} | 9.43 | 9.59 | 9.41 | 9.26 | 9.01 | 8. 88 | 9.19 | $K_2 O$ | 0.17 | 0.18 | 0.12 | K ₂ 0 | 0 | 0.01 | 0.03 | 0.01 |
| मित्र ड्रेडर | 96.08 | 95.93 | 96.68 | 96.14 | 95.47 | 94.94 | 96.26 | मित द्वार | 97.41 | 98.38 | 94.89 | मित द्वार | 98.76 | 98.51 | 98.4′. | 97.81 |
| | | | 分子王 | र्द्र:11 O | | | | | 分子王 | ¢.8 0 | | | | 分子式:50 | | |
| Si | 2.755 | 2.714 | 2.739 | 2.751 | 2.726 | 2.733 | 2.729 | Si | 2. 559 | 2.621 | 2.8 | Si | 1.003 | 1.01 | 1.02 | 1.027 |
| Ţ | 0.225 | 0.171 | 0.224 | 0.197 | 0.223 | 0.194 | 0.243 | ΥI | 1.406 | 1.401 | 1.281 | 'n | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $A1^{IV}$ | 1.245 | 1.286 | 1.261 | 1.249 | 2.274 | 1.267 | 1.271 | Fe | 0.003 | 0 | 0.003 | AI | 1.991 | 1.981 | 1.969 | 1.96 |
| MIM | 0.377 | 0.382 | 0.32 | 0.341 | 0.393 | 0.397 | 0.334 | Ca | 0.174 | 0.15 | 0.131 | Fe | 0.006 | 0.007 | 0.004 | 0.005 |
| Fe | 1.227 | 1.232 | 1.325 | 1.358 | .294 | 1.322 | 1.324 | Na | 0.847 | 0.817 | 0.778 | Mn | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mn | 0.005 | 0.006 | 0.005 | 0.005 | 0.003 | 0.005 | 0.004 | Х | 0.0 | 0.01 | 0.607 | Mg | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mg | 0.91 | 1.013 | 0.903 | 0.877 | 0.84 | 0.867 | 0.801 | Ab | 82.166 | 83.593 | 84.886 | Са | 0.001 | 0 | 0.001 | 0.001 |
| Ca | 0 | 0.001 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.002 | An | 16.908 | 15.354 | 14.329 | Na | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0 |
| Na | 0.016 | 0.022 | 0.005 | 0.02 | 0.617 | 0.016 | 0.026 | 0r | 0.926 | 1.052 | 0.785 | Х | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Х | 0.905 | 0.925 | 0.904 | 0.896 | 0.872 | 0.866 | 0.883 | | | | | | | | | |

±2Ma,可能形成于俯冲陆壳 断离、幔源岩浆底侵的地球动 力学背景(张宏飞等,2006),本 次采集侵入甘家组中的辉长岩 进行了锆石同位素 U-Pb 测年 (采样位置见图3),获得其结 晶年龄为 244.2 ± 1.5Ma (MSWD = 0.94, n = 20), 形成 的时代为中印支世(另文刊 发),野外考察显示该岩浆岩基 本未受到后期变质作用的影 响,表明年龄数据真实可靠,推 测青海南山地区的区域变质岩 形成于这一时期(具体准确时 代仍需测试变质矿物的 Ar-Ar 同位素年龄确定)。

综上,研究区的变质作用 可能与印支期构造运动具有同 时性,印支期古特提斯洋持续 向北沿马沁—花石峡—带发生 斜向俯冲,三叠纪中期同德--泽库一带的盆地逐渐封闭,晚 期强烈褶皱、隆起,特提斯洋海 水南退,形成了西秦岭楔北缘 天峻南山一青海湖断裂,其内 部发育多条北西一南东向左行 走滑断层(许志琴等,2001;孙 延贵等,2004; 樊光明等, 2007),而这一时期与构造推挤 作用同时发生的变质作用,其 主要受控于地壳表层强烈的应 力和热流的联合作用,热流主 要来源于沿断裂带上涌形成对 应的热构造(沿断裂分布有串 珠状岩浆型花岗岩,花岗闪长 岩及闪长岩脉,造成了一条平 行于构造带的花岗岩基)。

结论 7

青海南山地区发育的这套 递增变质带,依次可分为:矽线 石带、蓝晶石带、石榴子石带、 黑云母带、绿泥石带,通过地质 温压计计算显示其变质 P—T



 Fig. 6 Classification of micas(after Foster, 1960)
 A-金云母;B-镁质黑云母;C-铁质黑云母; D-铁叶云母;E-铁白云母;F-白云母
 A-Phlogopite;B-Magnesian biotite;C-Iron biotite; D-Eastonite;E-Ferrimuscovite;F-muscovite

条件属于中压相系,推测与印支期古特提斯洋闭合 导致的地壳碰撞加厚有关。

致谢:四川省冶金地质勘查院杨柳、贺光兴、李 佳奇、易建、邓华波在讨论中给予了很大启发;实验 过程中得到了中国地质大学(武汉)杨水源老师的 大力帮助;章雨旭研究员仔细审阅了全稿,提出了宝 贵意见,在此一并表示谢意。

附:本文矿物代号一览表(Code list of minerals in this paper)

Ab—钠长石, albiteBi—黑云母, biotiteChl—绿泥石, chloriteCht—硬绿泥石, chloritoidCrt—石榴子石, garnetIlm—钛铁矿, ilmeniteKy—蓝晶石, kyaniteMag—磁铁矿, magnetiteMs—白云母, muscovitePl—斜长石, plagioclaseQtz—石英, quartzSer—绢云母, sericiteSil—砂线石, sillimaniteSil—砂线石, sillimanite

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)

- 樊光明, 雷东宁. 2007. 祁连山东南段加里东造山期构造变形年代的精确限定及其意义. 地球科学:中国地质大学学报, 32(1): 39~44.
- 冯益民,曹宣铎,张二朋,胡云绪,潘晓萍,杨军录,贾群子,李文明. 2003.西秦岭造山带的演化、构造格局和性质.西北地质, 36(1):1~10.
- 李俊民,徐尚礼,王利华,周湘志. 2006. 青海湖南山钨(锡)矿远

景区地球化学勘查及其找矿潜力分析.矿产与地质,20(6): 664~670.

- 李王晔. 2008. 西秦岭—东昆仑造山带蛇绿岩及岛弧型岩浆岩的年 代学和地球化学研究——对特提斯洋演化的制约. 中国科学技 术大学,博士学位论文.
- 骆必继. 2013. 西秦岭造山带印支期岩浆作用及深部过程. 中国地 质大学(武汉),博士学位论文.
- 强娟. 2008. 青藏高原东北缘宗务隆构造带花岗岩及其构造意义. 西北大学,硕士学位论文.
- 孙崇仁. 青海省岩石地层. 1997. 武汉:中国地质大学出版社,1~340.
- 孙延贵,张国伟,郭安林,王瑾. 2004. 秦-昆三向联结构造及其构 造过程的同位素年代学证据. 中国地质, 31(4): 372~378.
- 王云山,陈基娘. 1987. 青海省及毗邻地区变质地带与变质作用. 北京:地质出版社.
- 吴春明,肖玲玲,倪善芹. 2007. 泥质变质岩系主要的矿物温度计 与压力计. 地学前缘,14(1):144~150.
- 许志琴,李海兵,杨经绥,陈文.2001.东昆仑山南缘大型转换挤压 构造带和斜向俯冲作用.地质学报,75(2):156~164.
- 闫臻,王宗起,李继亮,许志琴,邓晋福. 2012. 西秦岭楔的构造属 性及其增生造山过程. 岩石学报, 28(6):1808~1828.
- 尹安. 2001. 喜马拉雅~青藏高原造山带地质演化——显生宙亚洲 大陆生长. 地球学报, 22(3): 193~230.
- 于森,丰成友,肖晔,刘建楠,李大新,李国臣,马圣钞. 2013. 青 海共和县加当根斑岩铜矿床成矿流体特征及演化. 矿床地质, 32(1):133~147.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭一松潘 大陆构造结. 地学前缘, 11(3):23~32.
- 张宏飞,陈岳龙,徐旺春,刘荣,袁洪林,柳小明.2006.青海共和 盆地周缘印支期花岗岩类的成因及其构造意义.岩石学报,22 (12):2910~2922.
- 张雪亭,杨生德,杨站君.青海省板块构造研究1:100万青海省大 地构造图说明书.北京:地质出版社,2007.
- Fan Guangming, Lei Dongning. 2007 &. Precise Timing and Significance of Caledonian Structural Deformation Chronology in Southeast Qilian. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 32(1): 39 ~ 44.
- Feng Yimin, Cao Xuanduo, Zhang Erpeng, Hu Yunxu, Pan Xiaoping, Yang Junlu, Jia Qunzi, Li Wenming. 2003 &. Tectonic evolution framework and nature of the West QinLing orogenic belt. Northwestern Geology, 36(1): 1~10.
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas. U S Geological Survey Professional Paper.
- Holdaway M J. 2000. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet—biotite geothermometer. American Mineralogist, 85(7): 881~892.
- Li Junmin, Xu Shangli, Wang Lihua, Zhou Xiangzhi. 2006&. Analysis of geological characteristics & searching potentialities of Nanshan W&Sn deposit in Qinghai lake. Mineral Resources And Geology, 20 (6): 664~670.
- Li Wangye. 2008 &. Geochronology and geochemistry of the ophiolites and island ~ arc ~ type igneous rocks in the Western Qinling orogen and the Eastern Kunlun orogen: Implication for the evolution of the Tethyan Ocean. A Dissertation Submitted to University of Science and technology of china for the Doctor Degree.
- Luo Biji. 2013 &. Petrogenesis and geodynamic processes of the Indosinian magmatism in the West Qinling Orogenic belt, central China. A Dissertation Submitted to China University of Geosciences

(Wuhan) for the Doctor Degree.

- Qiang Juan. 2008 &. The granitoids in Zongwulong tectonic zone on the northeastern margin of the Qinghai ~ Tibet Plateau and its tectonic significance. A Dissertation Submitted to Northwest University for the Master Degree.
- Sun Chongren. 1997. Rock strata in Qinghai Province. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1 ~ 340.
- Sun Yangui, Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Jin. 2004&. Qinling— Kunlun triple junction and isotope chronological evidence of its tectonic progress. Geology of China, 31(4): 372 ~ 378.
- Wang Yun Shan, Chen Ji Liang. 1987. Metamorphic zone and Metamorphism in Qinghai province and its adjacent areas. Beijing: Geol. Pub.
- Wu Chunming, Xiao Lingling, Ni Shanqin. 2007 & Main geothermometers and geobarometers in metapelites. EarthScience Frontiers, 14(1): 144 ~ 150.
- Wu C, Zhang J, Ren L. 2004. Empirical garnet—biotite—plagioclase quartz (GBPQ) geobarometry in medium-to high-grade metapelites. Journal of Petrology, 45(9): 1907 ~1921.
- Xu Zhiqin, Li Haibing, Yang Jingsui, Chen Wen. 2001&. A Large TransPression Zone at the South Margin of the East Kunlun Mountains and Oblique Subduction. Acta Geologica Sinica, 75(2):

 $156\sim 164.$

- Yan Zhen, Wang Zongqi, Li Jiliang, Xu Zhiqin, Deng Jinfu. 2012 &. Tectonic settings and accretionary orogenesis of the West Qinling Terrane, northeastern margin of the Tibet Plateau. Acta Petrologica Sinica, 28(6): 1808 ~ 1828.
- Yin An. 2001&. Tectonic evolution of the Himalayan—Tibetan orogeny——Phanerozoic continental growth of Asia. Acta Geoscientia Sinica, 22(3): 193 ~ 230. Yu Miao, Feng Chengyou, Xiao Ye, Liu Jiannan, Li Daxin, Li Guochen, Ma Shengchao. 2013&. Features and evolution of metallogenic fluid in Jiadanggen porphyry copper deposit of Gonghe Country, Qinghai Province. Mineral Deposits, 32(1): 133 ~ 147.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Yao Anping. 2004&. Western Qinling ~ Songpan continental tectonic node in China's continental tectonics. EarthScience Frontiers, 11(3): 23 ~ 32.
- Zhang Hongfei, Chen Yuelong, Xu Wangchun, Liu Rong, Yuan Honglin, Liu Xiaoming. 2006 &. Granitoids around Gonghe basin in Qinghai province: petrogenesis and tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 22(12): 2910 ~ 2922.
- Zhang Xueting, Yang Shengde, Yang Zhanjun. 2007 #. The plate Tectonics of Qinghai Province——A guide to the geotectonic map of Qinghai Province. Beijing: Geol. Pub. House: 1 ~ 221.

A Preliminary Study on the Medium Pressure Facies Series Progressive Metamorphic Zone in Nanshan Area, Qinghai Province

DAI Xiong, YANG Liu, HE Guangxing, LI Jiaqi, YI Jian, DENG Huabo Sichuan Institute of Metallurgical Geology & Exploration, Chengdu, 610051

Abstract: Well-developed progressive metamorphic zone is found in Nanshan area, located in the joint region between the East Kunlun and the West Qinling Orogenic Belt in Qinghai Province. From center to the rim, the metamorphic zone could be subdivided into sillimanite zone, kyanite zone, garnet zone, biotite zone and chlorite zone with the decreasing of metamorphic grade. Among them, garnet porphyroblasts in Gt—Bio granulite show weak growth zoning, and biotite are mainly high temperature ferrobiotite. Based on Gt—Bi thermometer and Gt—Bi—Pl—Q barometer, garnet zone has temperatures of 564 °C and pressures of 0. 56GPa, kyanite zone has temperatures of 667 ~ 670 °C and pressures of 0. 68 ~ 0. 71GPa, belonging to medium pressure facies series. Related to the crustal collision thickening of the closure of the Paleo-Tethys Ocean in the Indosinian.

Keywords: progressive metamorphic zone; medium pressure facies series; the Indosinian; Qinghai Nanshan area

Acknowledgements: This study was supported by the China Geological Survey project "Wenbadi area J47E021015, J47E021016, J47E022016, J47E022017 regional geological survey of mineral resources, Gonghe xian county Qinghai province". China Geological Survey Project of China Geological Survey (No. 12120113033019).

First author: DAI Xiong, male, born in 1989, assistant engineer. His current interests focus on regional geological and mineral surveys. Email address: dai890320@126.com.

Manuscript received on: 2016-03-29; Accepted on: 2016-08-21; Edited by: ZHANG Yuxu.

Doi: 10.16509/j. georeview. 2016.05.008