

秦-祁结合部位陇山杂岩变泥质岩变质作用及年代学研究

栗娟娟, 卢俊生

(西北大学地质学系, 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要: 陇山杂岩位于秦-祁结合部位, 是研究此结合部位构造演化的重要岩石构造单元。为探讨秦-祁结合部位的构造演化历史, 本研究对陇山杂岩的变泥质岩进行了岩相学、矿物化学、变质相平衡模拟和 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 年代学研究。岩相观察及矿物成分分析结果显示, 陇山杂岩石榴黑云斜长片麻岩样品 21LS30-1 记录了 2 个变质演化阶段: 早期进变质阶段 (M_1) (Bt+Pl+Qz+Rt+Ilm) 和峰期变质阶段 (M_2) (Bt+Grt+Pl+Qz+Rt+Ilm+melt+liq)。含矽线石榴黑云斜长片麻岩样品 21LS37 同样记录了 2 个变质演化阶段: 早期进变质阶段 (M_1) (Bt+Sil+Pl+Qz) 和峰期变质阶段 (M_2) (Bt+Sil+Grt+Kfs+Pl+Qz+Ilm+Liq)。视剖面图模拟计算显示 2 个样品的峰期变质压力条件分别为 813~821°C、1.08~1.1 GPa 和 815~819°C、0.93~0.97 GPa, 达到了中压麻粒岩相变质。LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年得到 4 个石榴黑云斜长片麻岩样品的年龄分别为 451~425 Ma、455~431 Ma、415~395 Ma、315~394 Ma。陇山杂岩与北秦岭造山带在古生代经历了相似的构造过程, 推测陇山杂岩可能是北秦岭造山带向西延伸的部分, 经历了古生代的陆陆碰撞造山作用。

关键词: 秦-祁结合部位; 陇山杂岩; 相平衡模拟; 独居石 U-Pb 定年; 陆陆碰撞造山作用

中图分类号: P597+.3; P588.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)04-0895-29

Metamorphism and geochronology of metapelites from the Longshan Complex at the Qinling-Qilian junction zone

LI Juan-juan and LU Jun-sheng

(State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: The Longshan Complex located in the Qinling-Qilian junction zone is the key to understanding the tectonic evolution of this junction. This study conducted petrographic observations, phase equilibrium modeling and monazite U-Pb dating, to better discuss the tectonic implication. Based on petrographical observation and mineral composition analysis, the garnet biotite plagioclase gneisses sample 21LS30-1 of the Longshan Complex display two metamorphic mineral assemblages: the prograde stage (M_1) (biotite + plagioclase + quartz + rutile + ilmenite) and the peak stage (M_2) (biotite + garnet + plagioclase + quartz + rutile + ilmenite + melt). Sample 21LS37 exhibits two sets of metamorphic minerals during different formation stages: the prograde stage (M_1) (biotite+sillimanite+plagioclase+quartz) and the peak stage (M_2) (biotite+sillimanite+garnet+K-feldspar+plagioclase+quartz+ilmenite+melt). Phase equilibrium modeling constrained the peak p - t conditions of the two samples to be 813~821°C, 1.08~1.1 GPa and 815~819°C, 0.93~0.97 GPa, reaching the medium-pressure granulites facies metamorphism.

收稿日期: 2024-12-05; 接受日期: 2025-06-10; 编辑: 尹淑苹; 英文审稿: 王 丹

基金项目: 国家自然科学基金项目(41872195); 科技部大陆动力学国家重点实验室项目

作者简介: 栗娟娟(1998-), 女, 硕士研究生, 地质学专业, E-mail: lijjuanjuan17@163.com; 通讯作者: 卢俊生(1985-), 男, 博士, 教授, 变质地质学专业, E-mail: lujs@nwu.edu.cn.

LA-ICP-MS monazite data from the garnet biotite plagioclase gneisses show $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of 451~425 Ma, 455~431 Ma, 415~395 Ma and 415~394 Ma, respectively. The Longshan Complex and the North Qinling Orogenic Belt underwent similar tectonic processes during the Paleozoic. We preliminarily proposed that the Longshan Complex belongs to the western extension of the North Qinling orogenic belt and has experienced Paleozoic continental-continental collisional orogeny.

Key words: Qinling-Qilian junction zone; Longshan Complex; phase equilibrium modeling; monazite U-Pb ages; continental collisional orogeny

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41872195); Project of the State Key Laboratory of Continental Dynamics at Northwest University under the Ministry of Science and Technology

中央造山系是横亘中国中部的东西向巨型造山系(姜春发, 2002; 许志琴等, 2012)。秦岭造山带和祁连造山带是中央造山系的重要组成部分(张国伟等, 1995; 许志琴等, 1996, 2011; 杨经绥等, 2010; 张建新等, 2011; Dong *et al.*, 2011b, 2021, 2022; Dong and Santosh, 2016)。秦-祁结合部位位于两大造山带的交界之处, 是探究板块相互作用及造山带演变历程的关键地带。尽管前人已经对秦岭-祁连造山带进行了详细的研究(肖序常等, 1978; 张维吉等, 1994; 许志琴等, 1994; Yang *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2007, 2010; Wei *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2011a, 2013; Song *et al.*, 2009, 2013; 陈丹玲等, 2011; 裴先治等, 2013; Dong *et al.*, 2014; 李三忠等, 2017; 付东, 2020; Gao *et al.*, 2021), 但是秦-祁结合部位受宝鸡-天水断裂的影响, 两侧的构造单元以不同的角度交汇在此, 导致该结合部位演化历程及构造框架产生诸多争议(张维吉等, 1994; 徐学义等, 2008; 裴先治等, 2009)。

陇山杂岩属于中深成变质岩系, 是秦-祁结合部位的关键组成单元, 早前研究表明达到了角闪岩相变质(孟祥舒等, 2017; 徐可心等, 2018; 封强等, 2023)。前人对陇山杂岩不同的岩石类型进行研究, 认为其形成于不同的构造环境下。宋志高(1995)从构造体系的角度将其归为祁连造山带基底隆起部分; 部分学者认为陇山杂岩可以与秦岭杂岩进行对比归为北秦岭西延部分(周鼎武, 1994; 封强等, 2023; 李玉婷等, 2023); 也有学者认为陇山岩群与秦岭岩群有相似的构造单元(陈隽璐等, 2002; 董俊刚, 2004); 还有学者将其归为华北克拉通南缘的基底岩系(何艳红等, 2005; 徐可心, 2018)。

除此之外, 前人针对陇山杂岩已开展了诸多深入的岩石学与年代学研究, 但这些研究主要集中在岩浆作用和沉积时代(宋志高, 1995; 吴茂炳

等, 2000, 2002; 孟祥舒等, 2017; 李玉婷等, 2023), 对陇山杂岩的变质作用方面的研究相对较少(何艳红等, 2005; 何世平等, 2007; 徐可心, 2018; 封强等, 2023), 阻碍了对秦-祁结合部位构造演化历史的进一步认识。陇山杂岩经历了怎样的构造演化, 是和祁连造山带经历了相同的变质作用还是和秦岭造山带经历了相似的构造活动, 这些尚未解决的问题极大的限制了对秦-祁结合部位构造背景的认识。因此, 本次研究选择陇山杂岩变泥质岩中的黑云斜长片麻岩作为研究对象, 通过岩相学观察、相平衡模拟、LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年和矿物化学分析, 进行详细的变质作用研究, 进而探讨秦-祁结合部位的构造演化过程。

1 区域地质背景

秦岭-祁连造山带的结合部位被宝鸡-天水断裂带分割, 其北侧为北祁连造山带的东部, 南侧则为西秦岭造山带的北部。两造山带的构造单元以不同的角度交汇在此, 导致结合部位两侧的构造变形和物质组成存在差异, 给两侧岩石单元的相互对比造成了困难(徐学义等, 2008; 徐可心等, 2018; 封强等, 2023; 图 1a)。北祁连造山带的东段, 主要包括葫芦河群、陈家河群、陇山杂岩以及红土堡组基性火山岩(裴先治等, 2007; 何世平等, 2007a, 2007b; 徐学义等, 2008; 封强等, 2023; 李玉婷等, 2023); 西秦岭造山带的北部则主要包括秦岭岩群、宽坪岩群、草滩沟群、二郎坪岩群以及丹凤岩群(Pei *et al.*, 2007a, 2007b; 李玉婷等, 2023; 图 1a)。葫芦河群是一套浅层的变质碎屑岩地层, 出露于秦安县葫芦河下游区域, 具有复理石沉积特点。陈家河群从原葫芦河群中划分出来, 主要由北侧的浅变质中酸性火山岩和南侧的陆缘碎屑岩沉积组合构成。红土堡

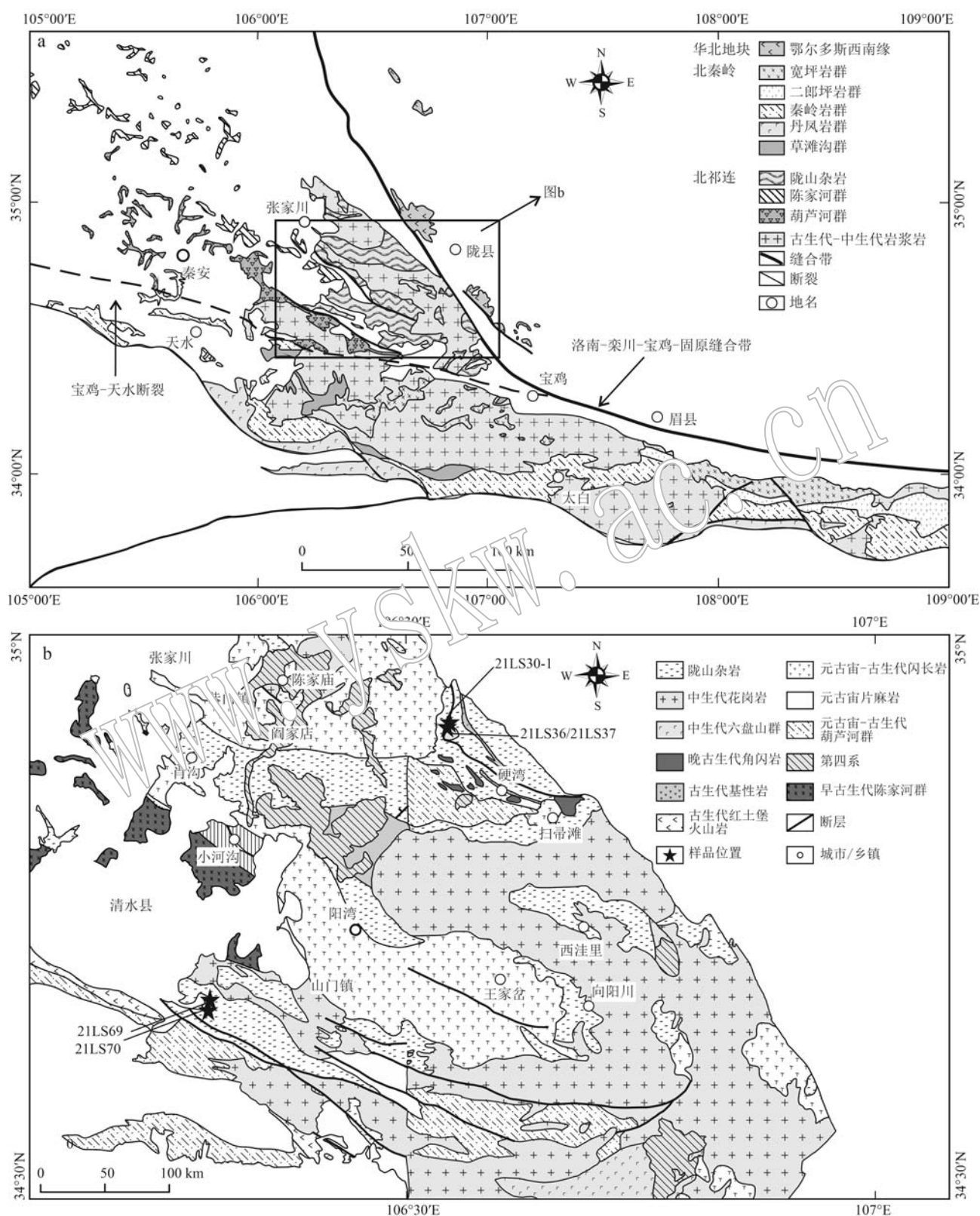


图1 秦-祁结合部位地质构造图(a)、陇山地区地质构造图和采样点位置(b) (据李玉婷等, 2023 修改)

Fig. 1 Geological structure diagram of Qinling-Qilian junction zone (a) and geological structure diagram of the Longshan area and the location of sampling points (b) (modified after Li Yuting *et al.*, 2023)

组变质基性火山岩同样是从原葫芦河群划分出来的,主要构成是绿片岩相变质玄武岩,其间夹杂着少量的硅质岩,这些岩石普遍展现出枕状构造,并且伴随着同时代的辉绿岩墙(裴先治等, 2007)。秦岭岩群是一套经历了中深层次变质的复杂岩石体系,其广泛发育各类片麻岩、大理岩、石英岩等岩石类型(刘良等, 2013)。宽坪岩群可以分为变沉积单元和变基性火山岩单元两部分,变质程度达到了绿片岩-低角闪岩相(刘学锋等, 2024)。丹凤岩群主要由一套变质火山-沉积岩系构成,变质程度达到绿片岩-低角闪岩相,形成于洋内岛弧的构造环境之下。

陇山杂岩最早被叫做“陇山群”,宋志高等(1991)将原“牛头河群”分解为3组变质岩系,其中就有元古宙陇山群深变质岩系,“陇山群”就此得来。陇山杂岩位于陕西-甘肃两省交界处,自张家川-宝鸡方向展布,南侧与宝鸡-天水断裂带接触,东侧以洛南-栾川-宝鸡-固原缝合带为界,区域上呈条带状展布。陇山杂岩属于中深成变质岩系,早前研究表明达到了角闪岩相变质,主要包括长英质片麻岩、斜长角闪岩、富铝质片麻岩以及多硅大理岩(陈英瑞等, 2002; 何艳红等, 2005; 图1b)。宋志高(1995)对陇山群进行研究,从构造体系的角度出发,将其归为祁连造山带秦岭隆起部分; 陈隽璐等(2002)通过研究认为陇山杂岩与秦岭岩群有相似的构造单元(董俊刚, 2002); 部分学者持相似观点,通过陇山杂岩与北秦岭造山带的秦岭杂岩类比,认为其可能是北秦岭向西延伸的部分(周鼎武, 1994; 封强等, 2023; 李玉婷等, 2023)。此外,也有学者将陇山杂岩归类为华北克拉通南缘的基底岩系(何艳红等, 2005; 徐可心等, 2018)。近年来,也有研究者提出了新的见解,认为陇山杂岩不同的地质单元应该形成于不同的构造环境,应予以解体(何世平等, 2006; 徐可心, 2018)。

此外,前人对于陇山杂岩不同的岩石类型进行记录。宋志高(1995)通过对陇山岩群片麻岩中的闪长岩体进行锆石研究,认为其经历了最早期的构造热事件(881~813 Ma); 吴茂炳等(2000)通过Sm-Nd同位素分析陇山群中的斜长角闪岩,认为其形成于新元古代(983±22 Ma和756±97 Ma); 吴茂炳等(2002)得到陇山群片麻岩样品中的Sm-Nd等时线年龄为1451±190 Ma,认为反映了其形成年龄,即中元古代; 何艳红等(2005)通过锆石U-Pb定年得到陇山杂岩中的TTG片麻岩的形成年龄为~2.5 Ga,

并认为陇山杂岩经历了~1.9 Ga的变质事件; 何世平等(2006)通过对陇山岩群变火山岩系进行锆石测年研究,得出其形成于奥陶纪(452.8±1.7 Ma),并且经历了加里东晚期的变质事件; 徐可心等(2018)将陇山杂岩中黑云母石英片岩原岩的沉积时代限定于早寒武纪-奥陶纪(539~454 Ma); 封强等(2023)通过对陇山杂岩中石榴黑云斜长片麻岩进行独居石定年(435~407 Ma)和石榴斜长角闪岩进行榍石定年(426~409 Ma),认为其经历了早古生代变质作用; 李玉婷等(2023)通过对陇山杂岩变沉积岩进行碎屑锆石U-Pb定年及Lu-Hf同位素分析,将陇山杂岩变沉积岩的沉积时限限定在491~463 Ma。这些不同的年龄数据表明,陇山杂岩由不同原岩类型和不同形成时代的岩石单元组成,其形成历史比较复杂。鉴于此,本文将“陇山群”称为陇山杂岩。

2 分析方法

岩石主量元素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室采用XRF法完成。实验前需要对岩石粉末进行处理,先将其烘干,随后按比例称取并与混合试剂均匀混合; 添加适量的溴化锂作为辅助溶剂,然后将这些混合物熔融,待其冷却成玻璃片。最后使用RIX2100型荧光光谱仪测试并得出结果(王建其等, 2016),分析结果的精确度优于5%。

矿物化学成分在西北大学的大陆动力学国家重点实验室JEOL JXA-8230的电子探针分析仪上完成。加速电压15 kV、电流10 nA、电子束直径1~2 μm,应用ZAF法对数据进行校正。

独居石的LA-ICP-MS U-Pb定年在武汉上谱分析科技有限责任公司分析完成。激光束斑和频率分别为16 μm和2 Hz。采用独居石标样44069作外标进行同位素分馏校正,玻璃标准物质NIST610作外标进行微量元素分馏校正。使用ICPMSDataCal软件(Liu *et al.*, 2008, 2010)对数据进行处理。

3 岩相学与矿物化学

3.1 岩相学

选取石榴黑云斜长片麻岩样品(21LS30-1)和含矽线石榴黑云斜长片麻岩样品(21LS37)进行岩相学观察、矿物化学成分分析和视剖面模拟。选取4个石榴黑云斜长片麻岩样品(21LS36、21LS37、21LS69、

21LS70) 进行独居石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究。其中, 样品 21LS30-1 (34° 55.360' N, 106° 32.754' E) 采集于固关林场内公路旁 (图 2a、2b), 样品 21LS36 (34° 55.153' N, 106° 32.596' E)、21LS37 (34° 55.153' N,

106° 32.596' E) 采集于富汗坪小河旁山坡电线杆旁 (图 2c、2d), 样品 21LS69 (34° 40.407' N, 106° 17.448' E)、21LS70 (34° 40.407' N, 106° 17.448' E) 采集于桦川村小河流左侧 (图 2e、2f)。本文涉及的矿物代号

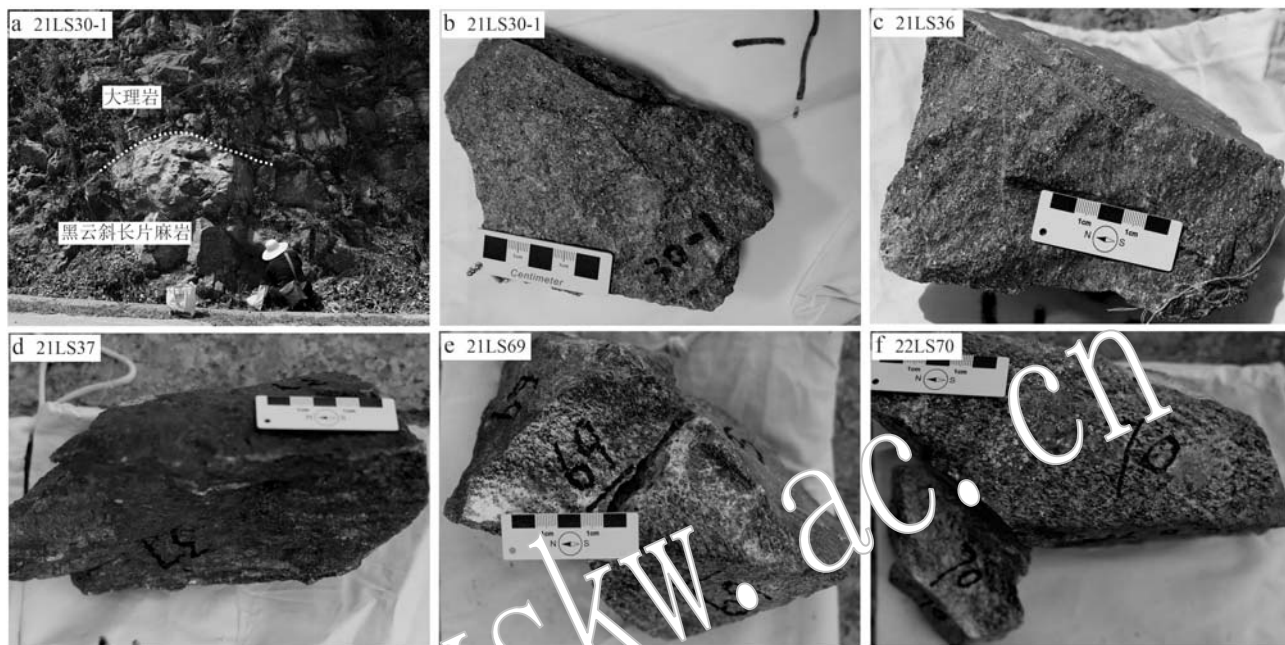


图 2 陇山杂岩石榴黑云斜长片麻岩野外露头照片以及手标本照片

Fig. 2 Field photographs and hand specimen photographs of garnet biotite plagioclase gneisses in the Longshan Complex

均参考自 Whitney and Evans (2010), 分别为: 石榴子石 (Grt)、钾长石 (Kfs)、斜长石 (Pl)、石英 (Qz)、黑云母 (Bt)、矽线石 (Sil)、钛铁矿 (Ilm)、金红石 (Rt) 和熔体 (Liq)。

样品 21LS30-1 表面呈灰黑色, 斑状变晶结构, 片麻状构造, 片麻理产状: $310^{\circ} \angle 34^{\circ}$, 主要由石英 (30%)、斜长石 (15%)、黑云母 (20%)、石榴子石 (25%) 等矿物组成, 含有少量的钛铁矿、金红石。石榴子石呈不规则半自形粒状, 颗粒半径大小不等 (多大于 2 mm)。黑云母主要存在于基质中或石榴子石包裹体中, 基质中的黑云母部分围绕石榴石变斑晶发育 (图 3b)。钛铁矿主要存在于基质, 其内部可见金红石残留 (图 3a)。样品 21LS30-1 石榴黑云斜长片麻岩的进变质阶段 (M_1) 矿物组合为: $Rt+Pl+Ilm+Qz+Bt$ 。峰期变质阶段 (M_2) 的矿物组合为: $Liq+Grt+Ilm+Bt+Rt+Pl+Qz$ 。

样品 21LS37 表面呈灰黑色, 斑状变晶结构, 片麻状构造, 主要矿物为石英 (30%)、黑云母 (20%)、斜长石 (20%)、石榴子石 (10%)、钾长石 (5%) 和矽

线石 (5%), 含有少量的钛铁矿、锆石 (图 3e、3f)。石榴子石呈不规则半自形粒状, 颗粒比样品 21LS30-1 的石榴子石颗粒小, 其半径多小于 1 mm (图 3c)。矽线石呈针状或纤维状, 主要存在于基质中, 石榴子石包裹体中含有少量矽线石, 石榴子石内的矽线石包体主要为针状或纤维状, 而基质中的矽线石则以长柱状和集合体的形式存在 (图 3d)。黑云母呈鳞片状, 大部分的黑云母都存在于基质中, 沿片麻理方向呈断续定向排列。样品 21LS37 含矽线石石榴黑云斜长片麻岩进变质阶段 (M_1) 矿物组合为: $Bt+Sil+Pl+Qz$ 。峰期变质阶段 (M_2) 矿物组合为: $Liq+Grt+Ilm+Bt+Sil+Kfs+Pl+Qz$ 。

3.2 矿物化学

样品 21LS30-1 的石榴子石具有较高的铁铝榴石 (0.62~0.64) 含量, 镁铝榴石次之 (0.22~0.23), 锰铝榴石和钙铝榴石的含量分别为 0.02~0.03 和 0.11~0.14 (表 1)。石榴子石在边部以及与黑云母接触部位, 铁铝榴石含量增加, 镁铝榴石含量降低, 而锰铝榴石含量无明显变化, 石榴子石核部的钙铝

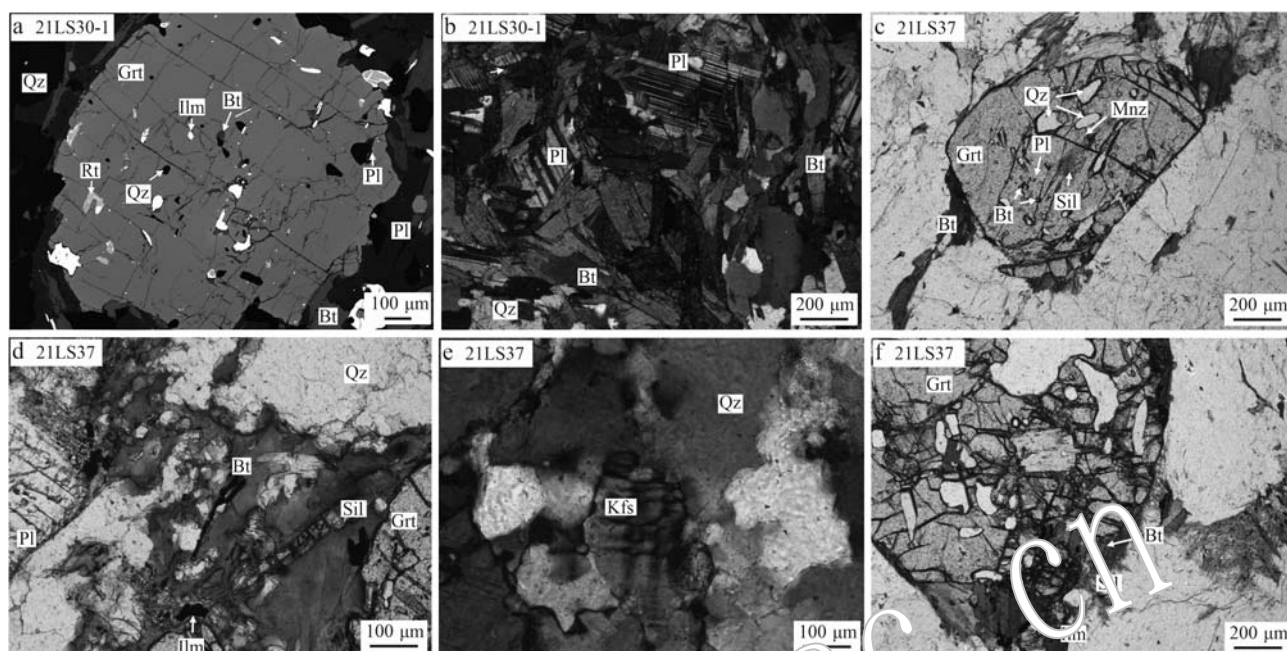


图3 陇山杂岩石榴黑云斜长片麻岩的岩相照片

Fig. 3 Petrographic photos of garnet-biotite-plagioclase gneiss of the Longshan Complex

a—样品 21LS30-1 石榴子石中的钛铁矿、黑云母、石英、金红石、斜长石包裹体(BSE); b—样品 21LS30-1 基质中的斜长石、黑云母、石英(正交偏光); c—样品 21LS37 石榴子石中的石英、矽线石、黑云母、斜长石包裹体(单偏光); d—样品 21LS37 基质中的矽线石、石英、黑云母、斜长石、钛铁矿(单偏光); e—样品 21LS37 基质中的钾长石和石英(单偏光); f—样品 21LS37 基质中的钛铁矿、矽线石、黑云母(单偏光)
a—inclusions of ilmenite, biotite, quartz, rutile and plagioclase in garnet of sample 21LS30-1 (BSE); b—plagioclase, biotite and quartz in the matrix of sample 21LS30-1 (cross-polarized light); c—inclusions of quartz, sillimanite, biotite and plagioclase in garnet of sample 21LS37 (plane-polarized light); d—sillimanite, quartz, biotite, plagioclase and ilmenite in the matrix of sample 21LS37 (plane-polarized light); e—K-feldspar and quartz in the matrix of sample 21LS37 (plane-polarized light); f—ilmenite, sillimanite and biotite in the matrix of sample 21LS37 (plane-polarized light)

榴石含量比边部具有相对更高的含量(图4b、4d),这种石榴子石剖面为典型的退变质扩散环带,这种成分变化是因为退变质过程中靠近边部的地方与相邻矿物(黑云母)发生镁铁交换(Spear, 1995)。

样品 21LS30-1 的斜长石成分变化相对较小,包裹体中的 X_{An} 含量为 0.45~0.49,基质中的 X_{An} 含量为 0.40~0.48(表1),这两种类型的斜长石均为中长石,基质中的斜长石有成分环带,从核部(0.4)到边部(0.45、0.48) X_{An} 升高(图5)。

样品 21LS30-1 的黑云母存在于基质中和包裹体中,基质中的黑云母有较低的 FeO(14.63%~16.60%)含量和较低的 TiO_2 (1.55%~1.76%)含量以及低 X_{Fe} (0.38~0.42)值。包裹体中的黑云母有较高的 FeO(16.55%~17.64%)含量和较高的 TiO_2 (1.78%~1.84%)含量以及高 X_{Fe} (0.41~0.43)值(表1)。

样品 21LS37 的石榴子石具有较高的铁铝榴石(0.71~0.76)含量,镁铝榴石次之(0.11~0.17),锰铝榴石和钙铝榴石的含量较低,分别为 0.05~0.08

和 0.04~0.08(表2)。从核部到边部镁铝榴石含量下降,锰铝榴石含量无明显变化,钙铝榴石含量微弱增加,石榴子石在边部的铁铝榴石含量比核部具有更高的含量(图4f、4h),为典型的退变质扩散环带的特征。其边部的成分变化与退变质降温过程中的 Fe-Mg 交换有关。

样品 21LS37 的斜长石成分变化相对较小,基质中和包裹体中的斜长石的 X_{An} 含量分别为 0.26~0.30 和 0.27(表2),为更长石,二者均没有环带。

对样品 21LS37 的两种不同产状的黑云母进行主量成分分析,不同位置的黑云母成分差异较大,基质中的黑云母有较高的 FeO(18.23%~19.35%)和较高的 TiO_2 (2.2%~2.65%)含量以及高 X_{Fe} (0.53~0.54)值。而包裹体中的黑云母有较低的 FeO(15.07%~15.73%)和较低的 TiO_2 (2.16%~2.5%)含量以及低 X_{Fe} (0.41~0.43)值(表2),这指示了基质类型的黑云母形成于比包裹体中的黑云母温度更高的环境。

表 1 样品 21LS30-1 中石榴子石、黑云母以及斜长石矿物化学数据

 $w_B/\%$

Table 1 Representative chemical data of garnet, biotite and plagioclase from sample 21LS30-1

位置	石榴子石			石榴子石			基质中的黑云母			包裹体中的黑云母		基质中的斜长石			包裹体中的斜长石	
	边	核	边	边	核	边						边	核	边		
	$n=5$	$n=20$	$n=5$	$n=7$	$n=20$	$n=7$	$n=2$	$n=2$	$n=4$	$n=1$	$n=1$	$n=1$	$n=1$	$n=1$	$n=1$	$n=1$
SiO ₂	38.19	38.39	38.58	38.49	38.55	38.81	37.21	37.92	36.90	36.33	36.70	57.19	58.93	56.95	54.57	56.59
TiO ₂	0.03	0.03	0.03	0.02	0.05	0.02	1.76	1.66	1.55	1.84	1.78	0.00	0.00	0.02	0.18	0.22
Al ₂ O ₃	21.48	21.51	21.66	21.49	21.52	21.64	17.31	17.56	17.28	16.76	18.25	26.80	25.69	26.60	26.06	27.62
FeO	29.20	28.95	29.09	29.12	29.33	29.34	15.37	14.63	16.60	16.55	17.64	0.07	0.05	0.02	1.93	0.51
MnO	0.91	0.69	0.79	0.96	1.57	1.47	0.05	0.04	0.03	0.08	0.02	0.01	0.00	0.02	0.07	0.06
MgO	5.56	5.78	5.80	5.72	5.81	5.61	13.09	13.26	13.09	13.24	13.16	0.00	0.01	0.01	1.46	0.01
CaO	4.70	5.06	4.81	4.78	3.83	3.98	0.04	0.10	0.02	0.05	0.01	9.34	8.17	9.76	8.85	9.92
Na ₂ O	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.24	0.40	0.21	0.14	0.13	6.30	6.68	5.85	5.28	5.70
K ₂ O	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	9.18	9.13	9.02	8.89	8.22	0.02	0.05	0.02	1.04	0.03
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.04	0.02	0.06	0.15	0.24	0.04	0.11	0.02	0.00	0.01
NiO	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.1	100.5	100.8	100.6	100.8	101.0	94.3	94.7	94.8	94.1	96.2	100.1	100.0	99.4	99.7	101.0
Si	2.99	2.99	3.00	3.00	3.00	3.02	2.80	2.82	2.78	2.76	2.72	2.57	2.64	2.57	2.50	2.53
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.09	0.09	0.11	0.10	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Al	1.98	1.98	1.98	1.97	1.98	1.98	1.53	1.54	1.53	1.50	1.59	1.00	1.36	1.42	1.41	1.45
Fe ²⁺	1.89	1.85	1.86	1.87	1.90	1.93	0.97	0.91	1.04	1.05	1.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
Fe ³⁺	0.02	0.04	0.02	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00
Mn	0.06	0.05	0.05	0.06	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.65	0.67	0.67	0.66	0.67	0.65	1.47	1.47	1.47	1.50	1.45	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00
Ca	0.39	0.42	0.40	0.40	0.32	0.33	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.45	0.39	0.47	0.43	0.47
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.06	0.03	0.02	0.02	0.55	0.58	0.51	0.47	0.49
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88	0.87	0.87	0.86	0.78	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	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
Sum	7.00	8.00	8.01	8.01	8.00	7.99	7.79	7.78	7.82	7.82	7.77	4.99	4.97	4.98	5.05	4.98
X_{Alm}	0.62	0.62	0.62	0.62	0.63	0.64										
X_{Prp}	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23	0.22										
X_{Grs}	0.13	0.14	0.13	0.13	0.11	0.11										
X_{Sps}	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03										
X_{Fe}							0.40	0.38	0.42	0.41	0.43					
X_{An}												0.45	0.40	0.48	0.45	0.49

4 温压条件计算

通过 GeoPS V3. 5. 6. 21170 软件 (Xiang and Connolly, 2022) 完成相平衡模拟, 模拟涉及的矿物相与其对应的矿物成分-活度模型均参考自 White 等 (2014), 内部一致性热力学数据库为 hp62ver. Dat, 参考自 Holland 和 Powell (2011)。变泥质岩样品 21LS30-1 和 21LS37 的全岩成分中 MnO 和 P₂O₅ 成分含量很低 (表 3), 可以忽略不计, Na₂O-CaO-K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-Fe₂O₃ (NCKF-MASHTO) 作为模拟体系。该体系提供了与实际样品近似的组分值, 能更好的拟合样品各变质阶段的

实际温压条件, 更好地反映样品的熔流体的演化特征, 同时该体系不仅可以用于评估 Fe³⁺ 和 H₂O 的含量, 还可以定量的研究参与反应的矿物含量的变化。

岩石体系中 Fe³⁺ 和 H₂O 的含量对于 p - t 视剖面图中的相反应关系以及 p - t 变质条件的确定起着至关重要的作用。本文采用 t - X 图的方法通过峰期矿物组合确定 Fe³⁺、O 和 H₂O 的含量。

4.1 样品 21LS30-1

对于样品 21LS30-1 而言, 需要确定 O 和 H₂O 的含量, 首先需要计算 t - X_0 视剖面图。在计算视剖面图时, 将全岩成分的 Fe 全部换算为 FeO 作为样品的最小含氧量 ($X_0 = 0$) 和全部换算为 Fe₂O₃ 作为样品的最大含氧量 ($X_0 = 1$) 所限定的范围作为 t - X_0 图

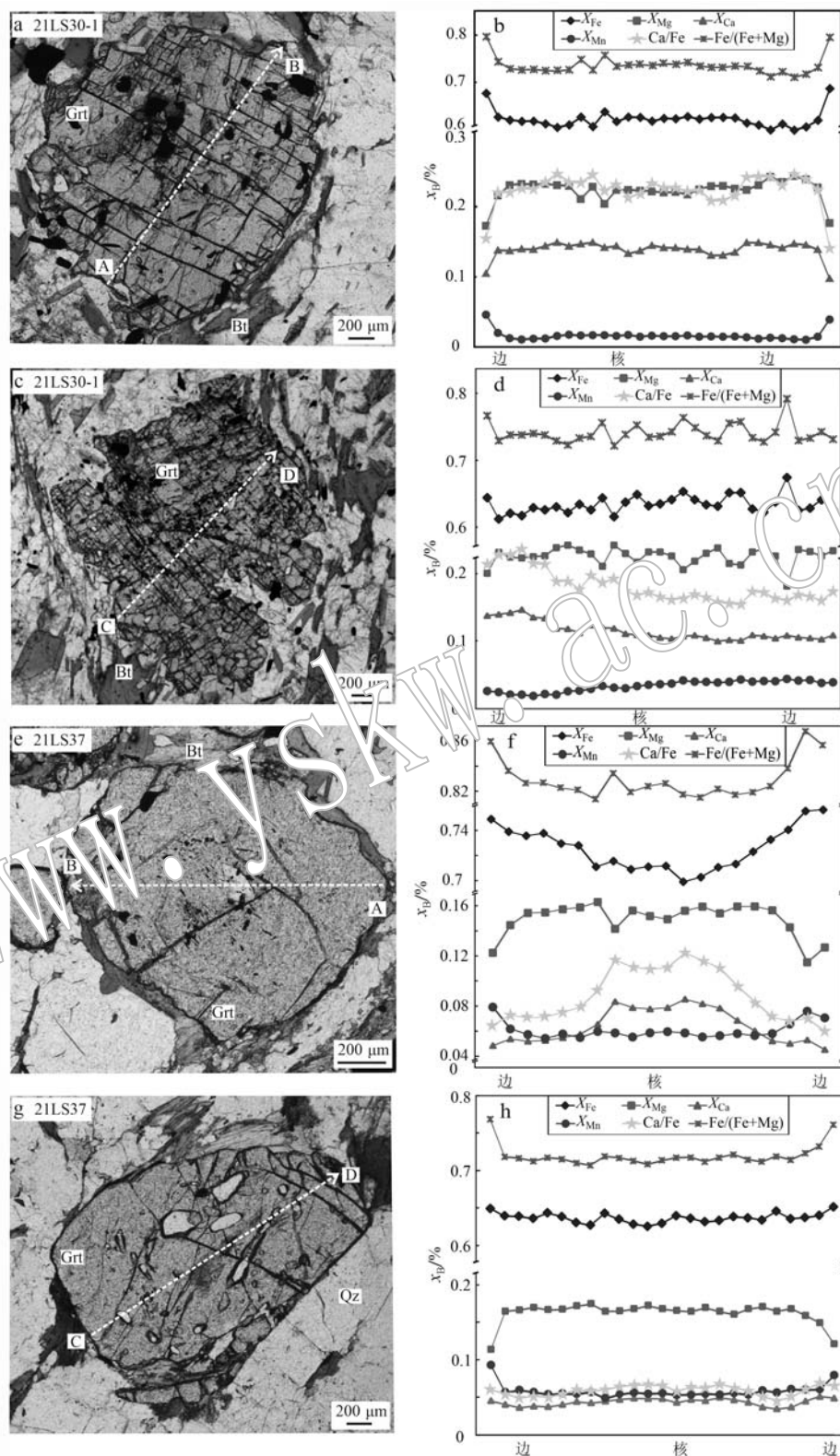


图4 陇山杂岩变泥质岩代表性石榴子石成分剖面图

Fig. 4 Diagram of representative composition profiles of garnet of metapelites from the Longshan Complex

a, c—样品 21LS30-1 代表性石榴子石 (单偏光); b, d—样品 21LS30-1 代表性石榴子石成分剖面图; e, g—样品 21LS37 代表性石榴子石 (单偏光); f, h—样品 21LS37 代表性石榴子石成分剖面图

a, c—representative garnet of sample 21LS30-1 (plane-polarized light); b, d—diagram of representative composition profiles of garnet from sample 21LS30-1; e, g—representative garnet of sample 21LS37 (plane-polarized light); f, h—diagram of representative composition profiles of garnet from sample 21LS37

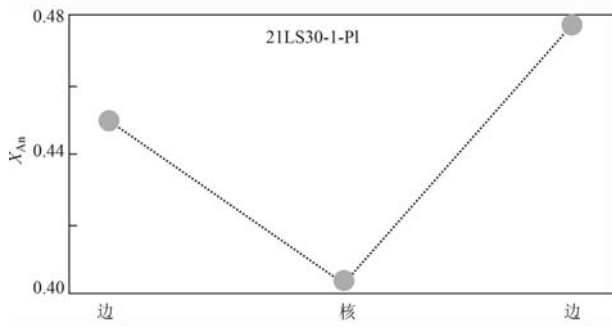


图 5 样品 21LS30-1 的代表性斜长石化学成分剖面

Fig. 5 Diagram of representative composition profiles of plagioclase from sample 21LS30-1

横坐标,将 700~900℃限定的温度作为纵坐标,设定固定压力为 1.0 GPa。得到样品 21LS30-1 的最终组分在固相线上可以稳定存在的 $X_0=0.175$ (图 6a)。

H_2O 含量对相平衡模拟的结果,特别是固相线位置有很大的影响 (Korhonen *et al.*, 2013)。例如,若采用较高的 H_2O 含量,将会导致固相线向低温方向偏移;若采用较低的 H_2O 含量,则会导致固相线向高温方向移动。在本次研究中,通过计算 $t-X_{H_2O}$ 视剖面图来限定合适的 H_2O 含量。在计算 $t-X_{H_2O}$ 图时,将样品的全岩水含量为完全无水时作为样品最小水含量 ($X_{H_2O}=0$) 和为 5.0% (摩尔分数) 的 H_2O

表 2 样品 21LS37 的石榴子石、黑云母以及斜长石矿物化学数据

 $w_B/\%$

Table 2 Representative chemical data of garnet, biotite and plagioclase from sample 21LS37

位置	石榴子石			石榴子石			基质中的黑云母			包裹体中的黑云母		基质中的斜长石		包裹体中的斜长石
	边	核	边	边	核	边	边	核	边	边	核	边	核	边
	$n=5$	$n=15$	$n=5$	$n=1$	$n=1$	$n=1$	$n=3$	$n=3$	$n=3$	$n=1$	$n=1$	$n=5$	$n=5$	$n=1$
SiO ₂	37.28	37.54	37.80	37.98	37.93	37.23	6.6	35.20	3.1	36.67	36.64	61.62	62.58	60.60
TiO ₂	0.01	0.01	0.01	0.00	0.07	0.00	2.3	2.0	2.65	2.16	2.50	0.02	0.01	0.05
Al ₂ O ₃	21.02	21.10	21.22	21.35	20.16	20.1	18.6	18.58	18.53	19.29	18.00	23.67	23.12	23.39
FeO	33.14	33.21	33.43	34.6	33.20	33.20	19.07	19.35	18.23	15.73	15.07	0.08	0.08	0.49
MnO	2.77	2.38	2.79	2.78	2.63	2.30	0.07	0.08	0.13	0.08	0.08	0.01	0.00	0.02
MgO	3.87	4.18	3.12	3.68	3.85	2.84	9.41	9.27	9.17	11.48	12.15	0.00	0.00	0.02
CaO	1.35	1.56	1.70	0.91	0.75	1.83	0.00	0.03	0.04	0.03	0.04	6.05	5.51	5.82
Na ₂ O	0.06	0.07	0.08	0.00	0.03	0.08	0.19	0.21	0.33	0.59	0.56	8.11	8.50	8.44
K ₂ O	0.01	0.02	0.01	0.00	0.02	0.04	9.47	9.36	9.33	9.35	8.81	0.16	0.11	0.16
Cr ₂ O ₃	0.0	0.01	0.02	0.06	0.00	0.00	0.13	0.09	0.18	0.08	0.05	0.01	0.01	0.02
NiO	0.00	0.02	0.01	0.04	0.00	0.04	0.05	0.05	0.04	0.02	0.05	0.00	0.02	0.02
Total	99.6	100.1	100.7	101.9	101.3	100.3	95.5	94.4	93.8	95.5	94.0	100.1	100.3	99.3
Si	3.00	3.00	3.01	3.00	3.01	3.00	2.73	2.71	2.71	2.73	2.76	2.74	2.78	2.73
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.13	0.15	0.12	0.14	0.00	0.00	0.00
Al	1.99	1.99	1.99	1.98	1.94	1.97	1.66	1.68	1.68	1.69	1.60	1.24	1.21	1.24
Fe ²⁺	2.21	2.18	2.19	2.21	2.13	2.24	1.21	1.25	1.18	0.98	0.95	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.02	0.04	0.03	0.03	0.07	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	-
Mn	0.19	0.16	0.19	0.19	0.18	0.23	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.46	0.50	0.45	0.43	0.46	0.34	1.06	1.06	1.05	1.27	1.37	0.00	0.00	0.00
Ca	0.12	0.13	0.13	0.16	0.23	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.26	0.28
Na	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.03	0.05	0.09	0.08	0.70	0.73	0.74
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	0.92	0.92	0.89	0.85	0.01	0.01	0.01
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	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
Sum	8.01	8.01	8.00	8.01	8.02	8.02	7.77	7.79	7.77	7.79	7.76	4.99	4.99	5.02
X_{Alm}	0.74	0.73	0.74	0.74	0.71	0.76								
X_{Prp}	0.16	0.17	0.15	0.14	0.15	0.11								
X_{Grs}	0.04	0.04	0.04	0.05	0.08	0.05								
X_{Sps}	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.08								
X_{Fe}							0.53	0.54	0.53	0.43	0.41			
X_{An}												0.30	0.26	0.27

表3 样品21LS30-1和21LS37的有效全岩成分

 $w_B/\%$

Table 3 Effective bulk-rock compositions from samples 21LS30-1 and 21LS37

样品	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	^T Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失	总量
21LS30-1	56.18	1.76	16.09	11.88	0.28	4.96	3.5	1.92	2.06	0.28	0.83	99.74
21LS37	72.96	1.37	8.95	9.15	0.26	2.73	0.75	0.88	2.16	0.06	0.47	99.74

表4 样品21LS30-1和21LS37变质相平衡模拟中的各组分含量

 $x_B/\%$

Table 4 The contents of each component in the metamorphic phase equilibrium simulation of samples 21LS30-1 and 21LS37

相图类型	图		H ₂ O	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	O*
$t-X_0$	6a	X=0	2.98	60.40	1.42	10.19	9.61	7.95	4.03	2.00	1.41	0.00
		X=1	2.84	57.63	1.36	9.73	9.17	7.59	3.85	1.91	1.35	4.59
$t-X_{H_2O}$	6b	X=0	0.00	61.72	1.45	10.42	9.82	8.12	4.12	2.04	1.44	0.86
		X=1	5.00	58.63	1.38	9.90	9.33	7.72	3.91	1.94	1.37	0.82
21LS30-1	6c, 6d		2.04	60.46	1.43	10.20	9.62	7.96	4.04	2.00	1.41	0.84
$t-X_0$	7a	X=0	1.65	76.95	1.09	5.56	7.26	4.29	0.85	0.90	1.45	0.00
		X=1	1.60	74.25	1.05	5.37	7.01	4.14	0.82	0.85	1.40	3.50
$t-X_{H_2O}$	7b	X=0	0.00	76.82	1.09	5.55	7.25	4.29	0.85	0.90	1.45	1.81
		X=1	5.00	72.98	1.03	5.28	6.89	4.07	0.80	0.85	1.38	1.72
21LS37	7c, 7d		2.05	75.25	1.06	5.44	7.10	4.20	0.83	0.88	1.42	1.78

注: *代表氧原子。

含量时作为最大水含量($X_{H_2O}=1$)限定的范围作为 $t-X_{H_2O}$ 图的横坐标,700~900℃限定的温度范围为纵坐标,设定固定压力为1 GPa。得到样品21LS30-1的最终组分在固相线上可以稳定存在的 $X_{H_2O}=0.859$ (图6b)。最后,通过确定的O和H₂O对样品21LS30-1的 $p-t$ 视剖面图进行计算(表4)。

在700~900℃和0.6~1.3 GPa的温压范围内计算样品21LS30-1的 $p-t$ 视剖面图。模拟的压力范围内,固相线出现在800~844℃。金红石的压力>~0.92 GPa,而黑云母则稳定在<~850℃。该样品的峰期矿物组合(Grt+Bt+Pl+Qz+Ilm+Rt+Liq)对应一个略大的温压范围,选取石榴子石的矿物等值线成分 X_{Grs} (0.1~0.12)和基质中斜长石的 X_{An} (0.40~0.45)进一步限定 M_2 的温压条件为813~821℃、1.08~1.1 GPa(图6c、6d)。

4.2 样品21LS37

对于样品21LS37而言,确定O和H₂O的含量,首先需要计算 $t-X_0$ 视剖面图。在计算 $t-X_0$ 视剖面图时,将全岩成分的Fe全部换算为FeO作为样品的最小含氧量($X_0=0$)和全部换算为Fe₂O₃作为样品的最大含氧量($X_0=1$)所限定的范围作为 $t-X_0$ 图横坐标,将700~900℃限定的温度作为纵坐标,设定固定压力为1.0 GPa。得到样品21LS37的最终组分在固相线上可以稳定存在的 $X_0=0.5$ (图7a)。

在计算 $t-X_{H_2O}$ 图时,将样品21LS37的全岩水含量为完全无水时作为样品最小水含量($X_{H_2O}=0$)和为5.0%(摩尔分数)的H₂O含量时作为最大水含量($X_{H_2O}=1$)限定的范围作为 $t-X_{H_2O}$ 图的横坐标,将700~900℃限定的温度范围为纵坐标,设定固定压力为1 GPa。得到样品21LS37的最终组分在固相线上可以稳定存在的 $X_{H_2O}=0.44$ (图7b)。最后,通过确定的O和H₂O对样品21LS37的 $p-t$ 视剖面图进行计算(表4)。

在700~900℃和0.6~1.3 GPa的温压范围内计算样品21LS37的 $p-t$ 视剖面图。模拟的压力范围内,固相线出现在780~820℃。矽线石出现在压力<~1.2 GPa,而黑云母则稳定在<~856℃。该样品的峰期矿物组合(Grt+Bt+Pl+Qz+Kfs+Ilm+Sil+Liq)对应一个略大的温压范围:792~873℃、0.73~1.12 GPa,选取石榴子石的矿物等值线成分 X_{Grs} (0.05~0.07)和基质中斜长石的 X_{An} (0.28~0.30)和基质中的黑云母的Ti(0.13~0.14)进一步限定 M_2 的温压条件为815~819℃、0.93~0.97 GPa(图7c、7d)。

5 独居石 U-Pb 年代学

样品21LS36的独居石颗粒多呈浑圆状和不规则粒状。独居石颗粒直径在90~120 μm之间,在背

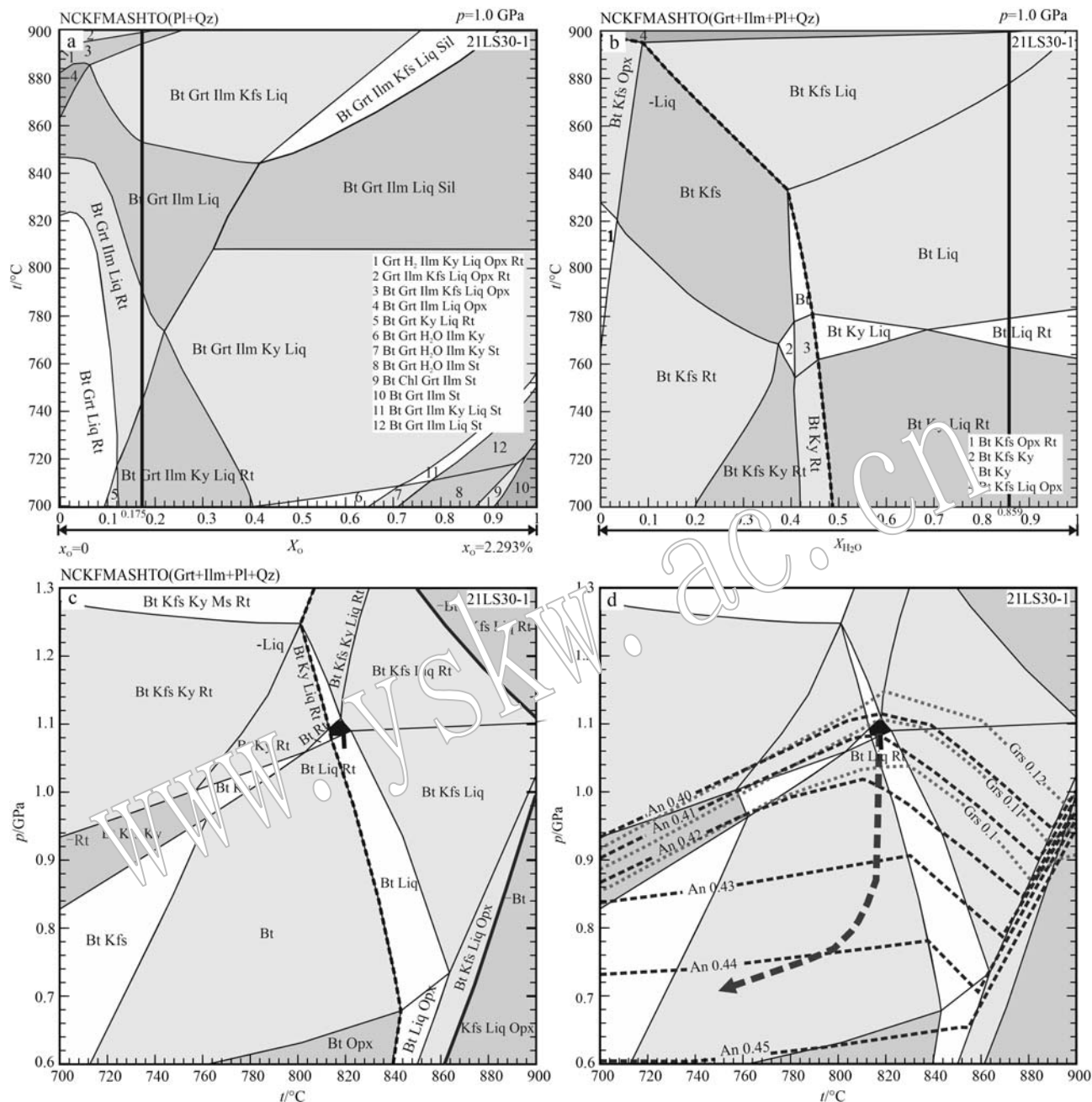


图6 陇山杂岩样品21LS30-1变质相平衡模拟视剖面图

Fig. 6 $t-X_0$, $t-X_{\text{H}_2\text{O}}$ and $p-t$ pseudosections calculated using local effective bulk-rock compositions of sample 21LS30-1

a—样品21LS30-1的 $t-X_0$ 视剖面图; b—样品21LS30-1的 $t-X_{\text{H}_2\text{O}}$ 视剖面图; c、d—样品21LS30-1的变质相平衡 $p-t$ 视剖面图

a— $t-X_0$ pseudosection of sample 21LS30-1; b— $t-X_{\text{H}_2\text{O}}$ pseudosection of sample 21LS30-1; c, d— $p-t$ pseudosection of sample 21LS30-1

散射图像中没有环带(图8a)。分析样品21LS36中的30个独居石颗粒的30个测点,测得U($3.070 \times 10^{-6} \sim 7.755 \times 10^{-6}$)、Th($19.404 \times 10^{-6} \sim 53.774 \times 10^{-6}$)和Th/U值为5.47~10.44(表5)。此外,独居石具有明显的Eu的负异常,Eu/Eu*值在0.41~0.67之

间,(Gd/Lu)_N值在560~1332之间(表6)。独居石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为451~425 Ma。在稀土元素配分图中(图9b),该样品具有轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的特征。

样品21LS37的独居石颗粒大部分为浑圆状或不

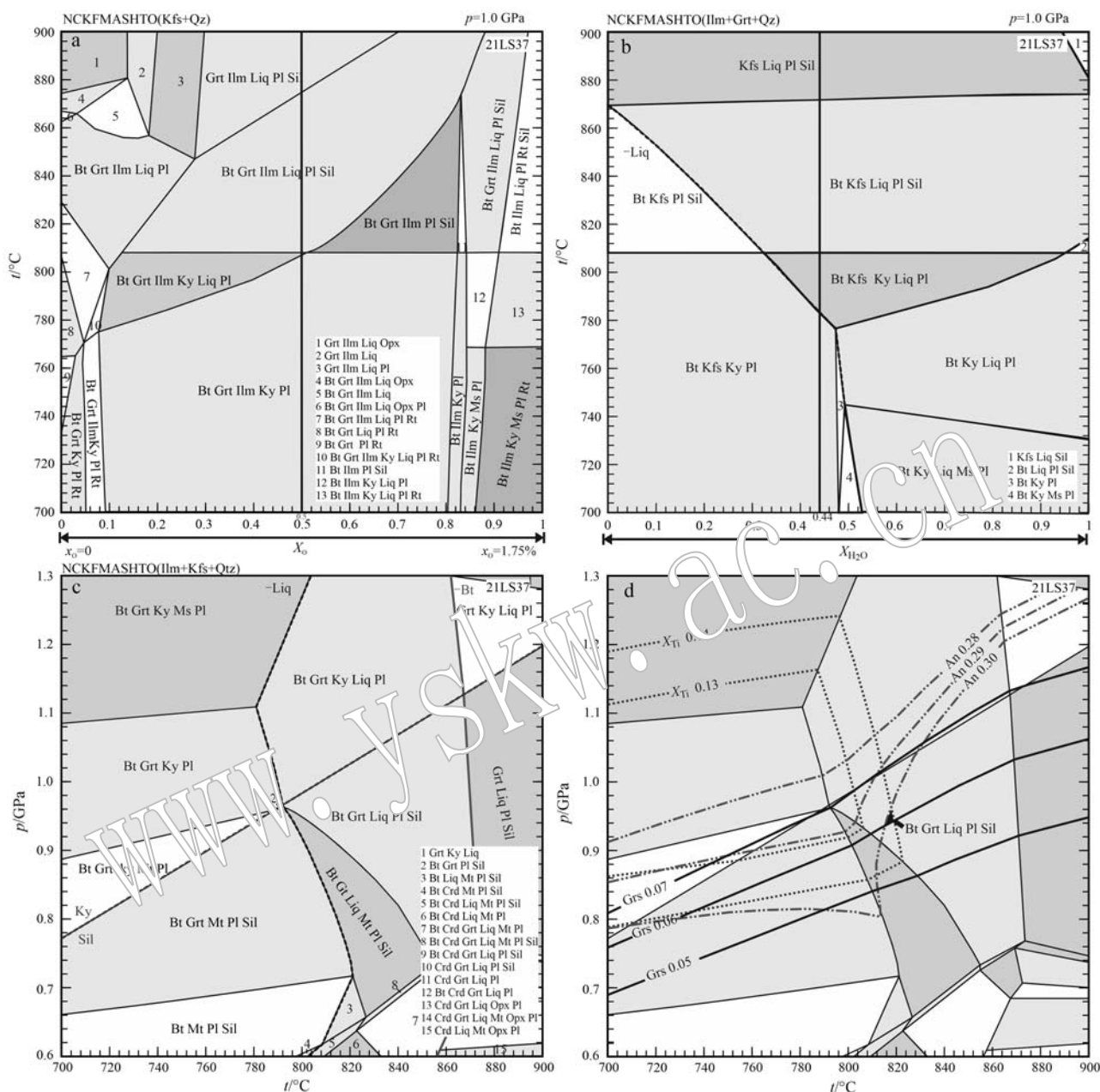


图7 陇山杂岩样品21LS37的变质相平衡模拟视剖面图

Fig. 7 $t-X_0$, $t-X_{H_2O}$ and $p-t$ pseudosections calculated using local effective bulk-rock compositions of sample 21LS37

a—样品21LS37的 $t-X_0$ 视剖面图; b—样品21LS37的 $t-X_{H_2O}$ 视剖面图; c、d—样品21LS37的变质相平衡 $p-t$ 视剖面图

a— $t-X_0$ pseudosection of sample 21LS37; b— $t-X_{H_2O}$ pseudosection of sample 21LS37; c, d— $p-t$ pseudosection of sample 21LS37

规则状。独居石颗粒较大,直径在80~150 μm 之间,在背散射图像中独居石结构较为均匀,没有环带(图8b)。对样品21LS37中的31个独居石颗粒分析了31个测点,这些分析点的Th($31\ 122\times 10^{-6}\sim 45\ 732\times 10^{-6}$)和U($1\ 906\times 10^{-6}\sim 9\ 175\times 10^{-6}$)含量较

高,Th/U值为4.98~16.33(表5)。此外,独居石具有明显的Eu的负异常,Eu/Eu*值在0.42~0.7之间,(Gd/Lu)_N值在650~29 816之间(表6)。独居石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为455~431 Ma。在稀土元素配分图中(图9d),该样品具有轻稀土元素富集、重稀土

表 5 陇山杂岩中黑云斜长片麻岩的独居石 U-Pb 同位素数据及年龄表
Table 5 LA-ICP-MS monazite U-Pb isotopic data and ages from garnet biotite plagioclase gneiss in the Longshan Complex

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma					
	U	Th	Pb		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	δ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	δ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$	δ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	δ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$	δ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$	δ
样品 21LS36																
1	3 500	38 148	959	10.90	0.056 1	0.001 3	0.556 3	0.013 2	0.071 8	0.000 5	457	21.3	449	8.6	447	3.0
2	3 270	38 101	968	11.65	0.057 8	0.001 4	0.576 7	0.013 5	0.072 4	0.000 5	524	49.1	462	8.7	451	3.2
3	3 469	37 056	932	10.68	0.055 6	0.001 5	0.546 1	0.014 0	0.071 2	0.000 5	439	59.3	442	9.2	443	3.1
4	3 783	37 564	966	9.93	0.056 0	0.001 3	0.550 0	0.012 5	0.071 1	0.000 5	450	51.8	445	8.2	443	3.0
5	3 705	36 696	956	9.90	0.055 9	0.001 3	0.538 3	0.011 8	0.069 9	0.000 5	456	51.8	437	7.8	436	3.2
6	3 452	37 361	961	10.82	0.056 3	0.001 4	0.554 9	0.013 3	0.071 5	0.000 5	461	55.6	448	8.7	445	3.0
7	7 755	36 566	1 191	4.72	0.055 4	0.001 1	0.526 9	0.010 3	0.068 9	0.000 5	428	44.4	430	6.9	429	3.0
8	3 493	39 816	969	11.40	0.056 1	0.001 4	0.526 1	0.012 3	0.068 2	0.000 5	454	55.6	429	8.2	425	3.2
9	4 908	38 760	1 064	7.90	0.055 7	0.001 2	0.537 2	0.011 1	0.069 8	0.000 5	439	46.3	437	7.3	435	2.9
10	3 760	38 477	988	10.23	0.055 8	0.001 4	0.539 2	0.012 9	0.070 1	0.000 5	443	55.6	438	8.5	437	2.9
11	3 349	38 352	947	11.45	0.055 7	0.001 5	0.529 4	0.013 4	0.069 0	0.000 5	439	54.6	431	8.9	430	3.2
12	3 668	39 499	976	10.77	0.055 3	0.001 5	0.522 4	0.014 4	0.068 6	0.000 5	433	58.3	427	9.6	427	3.1
13	3 592	38 775	975	10.79	0.055 7	0.001 4	0.528 1	0.012 9	0.068 7	0.000 5	443	53.7	431	8.5	428	3.2
14	3 742	38 020	960	10.16	0.056 1	0.001 8	0.530 0	0.016 9	0.069 3	0.001 8	454	70.4	432	11.2	433	10.8
15	3 664	35 297	902	9.63	0.054 9	0.001 8	0.526 2	0.017 8	0.069 4	0.000 5	409	67.6	429	11.9	432	2.8
16	3 465	37 615	964	10.86	0.056 2	0.001 5	0.551 3	0.014 5	0.071 1	0.000 6	461	26.9	446	9.5	443	3.4
17	5 711	53 774	1 381	9.42	0.055 8	0.001 6	0.528 5	0.014 7	0.068 7	0.000 5	443	58.3	431	9.8	428	3.1
18	3 527	37 854	942	10.73	0.055 6	0.001 4	0.527 7	0.012 6	0.068 9	0.000 5	435	49.1	430	8.4	430	3.0
19	3 070	19 404	583	6.32	0.056 0	0.001 4	0.543 6	0.013 1	0.070 0	0.000 5	450	55.6	441	8.6	439	3.2
20	3 609	34 771	884	9.63	0.055 3	0.001 7	0.528 4	0.015 7	0.069 3	0.000 5	433	70.4	431	10.4	432	3.2
21	3 492	38 293	978	10.97	0.055 8	0.001 4	0.535 4	0.013 3	0.069 5	0.000 5	456	57.4	435	8.8	433	2.9
22	6 574	31 301	1 016	4.76	0.055 3	0.001 3	0.521 9	0.012 0	0.068 3	0.000 5	433	53.7	426	8.0	426	3.1
23	3 711	37 643	981	10.14	0.056 6	0.001 4	0.555 4	0.014 0	0.071 1	0.000 5	476	57.4	449	9.1	443	3.2
24	4 306	37 696	988	8.75	0.055 6	0.001 4	0.524 5	0.012 4	0.068 5	0.000 5	435	62.0	428	8.3	427	3.1
25	3 333	36 532	933	10.96	0.056 0	0.001 4	0.548 9	0.013 4	0.071 1	0.000 5	454	57.4	444	8.8	443	3.0
26	3 213	38 730	953	12.05	0.055 9	0.001 3	0.544 8	0.013 4	0.070 5	0.000 4	450	53.7	442	8.8	439	2.7
27	7 165	37 123	1 193	5.18	0.056 2	0.001 3	0.545 0	0.011 8	0.070 4	0.000 5	461	54.6	442	7.7	438	3.1
28	3 560	34 733	896	9.76	0.055 7	0.001 3	0.536 2	0.012 5	0.069 8	0.000 5	455	56.5	436	8.3	435	3.2
29	3 565	39 037	970	10.95	0.055 8	0.001 6	0.531 6	0.014 4	0.069 1	0.000 5	442	58.3	433	9.5	431	3.1
30	7 280	38 838	1 211	5.33	0.055 2	0.001 1	0.528 2	0.010 6	0.069 2	0.000 4	420	44.4	431	7.1	431	2.7
样品 21LS37																
1	2 373	37 599	888	15.84	0.056 0	0.001 5	0.554 2	0.014 9	0.071 7	0.000 6	450	59.3	448	9.8	446	3.8
2	2 137	42 327	946	19.81	0.055 8	0.001 5	0.538 7	0.014 2	0.070 0	0.000 5	456	61.1	438	9.4	436	3.3
3	4 083	37 559	1 004	9.20	0.055 9	0.001 2	0.553 7	0.011 9	0.071 6	0.000 5	450	13.9	447	7.8	446	2.9
4	2 859	37 955	921	13.28	0.055 9	0.001 3	0.555 5	0.013 5	0.071 9	0.000 6	450	53.7	449	8.8	447	3.4
5	7 441	36 021	1 171	4.84	0.055 7	0.001 2	0.539 9	0.010 7	0.070 3	0.000 5	443	46.3	438	7.1	438	3.1

续表 5-1
Continued Table 5-1

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值										同位素年龄/Ma			
	U	Th	Pb		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	δ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	δ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$	δ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	δ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$	δ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$	δ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$	δ
6	4 737	38 269	1 037	8.08	0.056 1	0.001 3	0.537 6	0.012 4	0.070 7	0.000 5	454	21.3	443	8.1	440	2.9		
7	4 563	37 130	1 001	8.14	0.055 6	0.001 5	0.537 7	0.013 8	0.069 9	0.000 5	439	52.8	437	9.1	436	3.0		
8	6 007	36 925	1 115	6.15	0.056 0	0.001 3	0.536 0	0.012 1	0.072 0	0.000 6	454	19.4	449	7.9	448	3.3		
9	3 466	40 598	997	11.71	0.056 0	0.001 4	0.549 1	0.013 1	0.071 2	0.000 5	450	55.6	444	8.6	444	3.2		
10	3 405	31 122	834	9.14	0.057 2	0.001 4	0.571 5	0.013 6	0.072 4	0.000 5	498	49.1	459	8.8	451	3.0		
11	3 500	35 725	899	10.21	0.056 3	0.001 8	0.539 5	0.016 0	0.069 7	0.000 6	465	68.5	438	10.6	434	3.6		
12	2 295	43 764	988	19.07	0.056 0	0.001 5	0.552 1	0.014 1	0.071 5	0.000 6	454	63.9	446	9.3	445	3.6		
13	6 737	34 171	1 088	5.07	0.055 9	0.001 2	0.545 6	0.011 3	0.070 7	0.000 5	450	15.7	442	7.4	440	2.9		
14	2 325	37 948	883	16.32	0.056 1	0.001 7	0.554 7	0.016 9	0.071 7	0.000 7	454	66.7	448	11.0	446	4.0		
15	7 417	42 166	1 302	5.69	0.056 1	0.001 3	0.556 1	0.013 3	0.071 8	0.000 6	454	19.4	449	8.7	447	3.4		
16	3 084	36 730	910	11.91	0.056 2	0.001 7	0.553 3	0.011 4	0.071 4	0.000 6	457	66.7	447	10.5	445	3.4		
17	9 175	38 809	1 325	4.23	0.055 6	0.001 2	0.530 5	0.011 6	0.069 2	0.000 5	435	50.0	432	7.7	431	2.9		
18	2 444	42 806	979	17.52	0.057 0	0.002 5	0.558 3	0.023 7	0.073 3	0.000 6	500	98.1	450	15.6	444	3.8		
19	2 539	45 732	1 039	18.01	0.056 1	0.001 7	0.555 4	0.016 1	0.071 8	0.000 6	457	66.7	449	10.7	447	3.3		
20	4 110	36 841	968	8.96	0.056 0	0.001 6	0.544 9	0.015 0	0.070 6	0.000 6	454	67.6	442	9.8	440	3.4		
21	1 906	39 376	876	20.66	0.055 8	0.001 8	0.545 0	0.017 5	0.070 9	0.000 7	456	72.2	442	11.5	441	4.2		
22	4 530	39 035	1 044	8.62	0.056 5	0.001 7	0.552 3	0.016 3	0.071 0	0.000 6	472	36.1	447	10.7	442	3.7		
23	3 428	37 074	934	10.82	0.056 5	0.002 1	0.561 0	0.022 4	0.072 7	0.000 5	472	83.3	452	14.6	447	3.1		
24	4 510	38 225	1 019	8.48	0.055 7	0.001 6	0.544 3	0.016 3	0.070 5	0.000 5	443	56.5	441	10.7	440	3.0		
25	5 948	38 214	1 117	6.42	0.055 9	0.001 2	0.548 7	0.011 2	0.071 2	0.000 5	456	16.7	444	7.4	443	3.1		
26	5 293	32 298	962	6.10	0.055 8	0.001 6	0.551 9	0.011 9	0.071 0	0.000 5	443	52.8	446	7.8	446	2.9		
27	2 778	37 300	901	13.43	0.056 3	0.001 6	0.560 6	0.016 0	0.072 2	0.000 6	465	30.6	452	10.4	450	3.5		
28	5 559	34 118	1 009	6.14	0.056 0	0.001 4	0.547 2	0.013 4	0.071 0	0.000 5	450	55.6	443	8.8	442	3.0		
29	4 863	35 667	997	7.33	0.055 8	0.001 3	0.546 1	0.012 5	0.071 0	0.000 5	443	51.8	442	8.2	442	3.0		
30	5 708	38 944	1 140	6.82	0.057 9	0.001 3	0.583 0	0.012 9	0.073 1	0.000 5	524	51.8	466	8.3	455	2.8		
31	4 269	3 8627	1 025	9.05	0.057 6	0.001 2	0.578 5	0.011 7	0.072 8	0.000 5	517	41.7	464	7.6	453	3.1		
样品 211S69																		
1	4 526	31 673	853	7.00	0.053 9	0.001 1	0.494 6	0.010 1	0.066 4	0.000 4	369	46.3	408	6.9	415	2.7		
2	6 015	48 596	1 196	8.08	0.054 9	0.001 0	0.483 4	0.008 8	0.063 8	0.000 4	406	45.4	400	6.0	399	2.6		
3	6 839	48 986	1 260	7.16	0.055 2	0.001 2	0.482 6	0.010 5	0.063 1	0.000 5	420	52.8	400	7.2	395	2.9		
4	5 975	46 347	1 146	7.76	0.054 5	0.001 2	0.475 5	0.010 2	0.063 1	0.000 5	391	48.1	395	7.0	395	2.9		
5	6 170	37 891	1 040	6.14	0.054 7	0.001 2	0.483 2	0.010 2	0.063 8	0.000 5	467	48.1	400	7.0	399	3.1		
6	4 221	42 448	1 001	10.06	0.053 4	0.001 2	0.476 6	0.009 7	0.064 5	0.000 4	346	48.1	396	6.7	403	2.7		
7	4 368	45 938	1 073	10.52	0.056 7	0.001 3	0.504 0	0.010 7	0.064 4	0.000 5	480	50.0	414	7.2	403	2.8		
8	5 282	44 048	1 073	8.34	0.054 9	0.001 2	0.480 1	0.009 8	0.063 2	0.000 5	467	48.1	398	6.7	395	2.8		
9	4 470	40 000	981	8.95	0.055 2	0.001 3	0.492 7	0.011 2	0.064 6	0.000 5	420	53.7	407	7.6	403	3.0		
10	3 617	43 742	980	12.09	0.054 9	0.001 4	0.486 3	0.011 8	0.064 0	0.000 5	409	55.6	402	8.0	400	2.9		
11	5 026	46 139	1 125	9.18	0.056 0	0.001 2	0.508 5	0.010 7	0.065 5	0.000 5	450	46.3	417	7.2	409	3.0		
12	5 376	40 613	1 050	7.55	0.055 8	0.001 1	0.503 4	0.009 6	0.065 2	0.000 5	456	16.7	414	6.5	407	2.8		

续表 5-2
Continued Table 5-2

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma					
	U	Th	Pb		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	δ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	δ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$	δ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	δ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$	δ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$	δ
13	3 752	40 993	955	10.93	0.055 2	0.001 3	0.484 0	0.011 5	0.065 7	0.000 5	420	53.7	412	7.8	410	2.9
14	5 727	46 555	1 136	8.13	0.054 9	0.001 1	0.484 0	0.009 9	0.063 8	0.000 5	406	46.3	401	6.8	399	3.0
15	7 000	40 362	1 121	5.77	0.054 9	0.001 2	0.460 7	0.009 9	0.063 4	0.000 5	406	45.4	399	6.8	396	2.9
16	4 380	44 184	1 044	10.09	0.055 4	0.001 3	0.504 1	0.010 7	0.065 8	0.000 5	428	51.8	414	7.2	411	2.9
17	5 737	47 131	1 168	8.22	0.055 3	0.001 2	0.497 5	0.010 2	0.065 0	0.000 5	433	50.9	410	6.9	406	2.9
18	5 620	46 885	1 171	8.34	0.055 6	0.001 2	0.505 9	0.011 0	0.065 8	0.000 5	435	50.0	416	7.4	411	2.8
19	4 499	40 820	993	9.07	0.055 4	0.001 4	0.500 8	0.011 6	0.065 5	0.000 5	428	53.7	412	7.8	409	2.8
20	4 920	45 817	1 087	9.31	0.055 0	0.001 1	0.492 7	0.009 5	0.064 7	0.000 5	413	44.4	407	6.5	404	2.8
21	3 576	45 942	1 011	12.85	0.055 1	0.001 3	0.496 5	0.011 4	0.065 1	0.000 5	417	56.5	409	7.8	407	2.8
22	5 872	47 590	1 156	8.10	0.055 2	0.001 1	0.488 8	0.009 7	0.064 0	0.000 4	420	46.3	404	6.6	400	2.5
23	5 387	46 447	1 121	8.62	0.055 2	0.001 2	0.493 2	0.010 7	0.064 6	0.000 5	417	48.1	407	7.3	404	2.8
24	5 798	43 897	1 109	7.57	0.055 2	0.001 3	0.492 1	0.011 3	0.064 4	0.000 6	420	50.0	406	7.7	403	3.5
25	4 810	46 639	1 108	9.70	0.053 5	0.001 3	0.480 8	0.011 7	0.063 0	0.000 5	354	53.7	399	7.7	406	3.1
26	6 833	43 810	1 165	6.41	0.054 7	0.001 1	0.478 0	0.009 1	0.063 2	0.000 5	467	38.0	397	6.4	395	3.1
27	5 933	47 451	1 171	8.00	0.054 7	0.001 0	0.484 9	0.009 2	0.064 2	0.000 5	398	42.6	401	6.3	401	2.8
样品 21LS70																
1	7 422	57 893	1 420	7.80	0.054 7	0.001 2	0.478 4	0.010 8	0.063 3	0.000 5	398	54.6	397	7.4	396	3.2
2	4 254	37 067	943	8.71	0.055 1	0.001 3	0.506 7	0.011 7	0.065 5	0.000 5	417	58.3	416	7.9	415	2.9
3	6 272	46 750	1 213	7.45	0.055 0	0.001 2	0.502 7	0.010 6	0.066 1	0.000 4	413	48.1	414	7.2	412	2.6
4	7 028	51 280	1 291	7.30	0.053 7	0.001 0	0.471 3	0.009 0	0.063 5	0.000 5	367	38.0	392	6.2	397	2.8
5	4 835	48 688	1 119	10.07	0.054 6	0.001 1	0.478 5	0.009 9	0.063 1	0.000 4	394	46.3	397	6.8	396	2.4
6	5 862	52 510	1 243	8.96	0.054 8	0.001 2	0.485 9	0.010 6	0.064 1	0.000 5	406	43.5	402	7.3	400	2.9
7	4 571	37 237	925	8.15	0.055 1	0.001 2	0.494 9	0.010 7	0.065 0	0.000 5	417	56.5	408	7.3	406	2.8
8	5 614	49 715	1 201	8.86	0.055 9	0.001 2	0.507 5	0.010 4	0.065 7	0.000 5	450	13.9	417	7.0	410	2.8
9	6 978	43 695	1 144	6.26	0.054 2	0.001 1	0.471 9	0.009 6	0.063 0	0.000 5	389	44.4	392	6.6	394	3.0
10	4 912	46 375	1 078	9.44	0.054 4	0.001 1	0.482 4	0.009 2	0.064 3	0.000 5	387	42.6	400	6.3	401	2.8
11	5 078	41 399	1 024	8.15	0.053 7	0.001 1	0.488 6	0.010 0	0.066 0	0.000 5	367	78.7	404	6.8	412	2.8
12	6 148	25 495	797	4.15	0.053 5	0.001 1	0.480 0	0.010 4	0.064 8	0.000 4	350	48.1	398	7.1	405	2.6
13	7 656	50 446	1 335	6.59	0.053 7	0.001 1	0.483 8	0.010 0	0.065 2	0.000 5	367	78.7	401	6.8	407	3.1
14	4 432	45 877	1 058	10.35	0.055 3	0.001 2	0.504 0	0.011 0	0.066 0	0.000 5	433	48.1	414	7.4	412	2.9
15	6 539	50 289	1 259	7.69	0.055 0	0.001 1	0.493 7	0.009 9	0.065 0	0.000 5	413	46.3	407	6.7	406	3.2
16	6 201	35 579	996	5.74	0.054 7	0.001 0	0.489 1	0.009 5	0.064 7	0.000 4	407	38.0	404	6.5	404	2.3
17	7 051	14 517	696	2.06	0.055 3	0.001 1	0.498 6	0.009 0	0.065 3	0.000 4	433	38.0	411	6.1	408	2.5
18	5 388	41 694	1 055	7.74	0.055 3	0.001 2	0.497 9	0.010 2	0.065 2	0.000 4	433	48.1	410	6.9	407	2.5
19	6 357	45 862	1 153	7.21	0.055 6	0.001 2	0.489 3	0.010 3	0.063 6	0.000 4	433	46.3	404	7.0	398	2.5
20	5 526	45 489	1 123	8.23	0.055 9	0.001 2	0.507 5	0.010 5	0.065 7	0.000 5	450	13.9	417	7.1	410	2.9
21	6 320	50 824	1 252	8.04	0.054 8	0.001 0	0.489 1	0.009 1	0.064 6	0.000 4	433	38.9	404	6.2	403	2.6
22	7 511	51 908	1 321	6.91	0.054 3	0.001 1	0.469 3	0.010 0	0.062 5	0.000 5	383	41.7	391	6.9	394	2.8
23	6 149	13 013	602	2.12	0.054 9	0.001 1	0.493 5	0.009 7	0.065 1	0.000 5	409	42.6	407	6.6	406	3.2
24	5 412	47 626	1 158	8.80	0.054 4	0.001 2	0.495 0	0.011 5	0.065 8	0.000 5	387	47.2	408	7.8	411	2.8
25	7 281	52 787	1 371	7.25	0.054 0	0.001 1	0.484 3	0.010 6	0.064 8	0.000 5	372	46.3	401	7.2	405	2.8
26	7 569	54 872	1 404	7.25	0.055 8	0.001 1	0.491 5	0.010 4	0.063 7	0.000 5	456	50.9	406	7.1	398	3.0

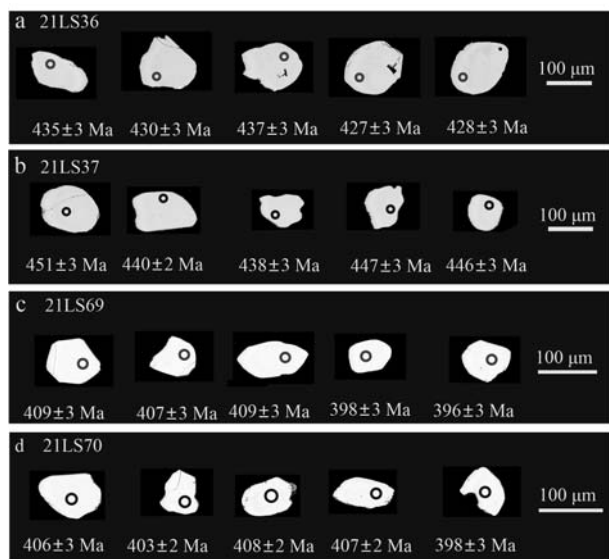


图8 陇山杂岩石榴黑云斜长片麻岩独居石背散射图像以及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 同位素年龄

Fig. 8 Back scattered electron images of monazite and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ isotope age of garnet biotite plagioclase gneisses in the Longshan Complex

元素亏损的特征。

样品21LS69的独居石颗粒为浑圆状,独居石颗粒直径在 $80\sim 130\ \mu\text{m}$ 之间,独居石结构较为均匀,没有环带(图9c)。分析了样品21LS69的27个独居石颗粒的27个测点,测得U($3\ 576\times 10^{-6}\sim 7\ 000\times 10^{-6}$)、Th($31\ 673\times 10^{-6}\sim 48\ 986\times 10^{-6}$)和Th/U值为 $7.0\sim 10.66$ (表5)。此外,独居石具有明显的Eu的负异常,Eu/Eu*值在 $0.07\sim 0.25$ 之间,(Gd/Lu)_N值在 $2\ 223\sim 15\ 441$ 之间(表6)。独居石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $415\sim 395\ \text{Ma}$ 。在稀土元素配分图中(图9f),该样品具有轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的特征。

样品21LS70的独居石颗粒大部分呈浑圆状。独居石颗粒直径在 $50\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间(图8d)。分析样品的26个独居石颗粒的26个测点,测得U($4\ 254\times 10^{-6}\sim 7\ 656\times 10^{-6}$)、Th($13\ 013\times 10^{-6}\sim 57\ 893\times 10^{-6}$)和Th/U值为 $3.06\sim 7.56$ (表5)。此外,独居石具有明显的Eu的负异常,Eu/Eu*值在 $0.07\sim 0.12$ 之间,(Gd/Lu)_N值在 $1\ 512\sim 5\ 394$ 之间(表6)。独居石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $415\sim 394\ \text{Ma}$ 。在稀土元素配分图中(图9h),该样品具有轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的特征。

6 讨论

6.1 变质温压条件

近年来,前人对陇山杂岩变质作用进行了研究,陈隽璐等(2002)对陇山岩群的变质矿物组合特征进行了研究,认为其达到角闪岩相变质;何世平等(2006)认为陇山岩群的片麻岩为角闪岩相变质;封强等(2023)对陇山杂岩中的斜长角闪岩和黑云斜长片麻岩进行变质作用研究,认为其达到了高角闪岩相变质,属于中压相系。本次研究得到陇山杂岩变泥质岩样品21LS30-1的峰期矿物组合为Grt+Bt+Pl+Qz+Ilm+Rt+Liq,进一步限定得到的温压条件为 $813\sim 821^\circ\text{C}$ 、 $1.08\sim 1.1\ \text{GPa}$ 。样品21LS37的峰期矿物组合为Grt+Bt+Pl+Qz+Kfs+Ilm+Sil+Liq,进一步限定所得温压条件为 $815\sim 819^\circ\text{C}$ 、 $0.93\sim 0.97\ \text{GPa}$,达到了中压麻粒岩相变质。

已有学者对于北祁连造山带做了详细的变质作用研究(肖序常等,1978;Wu *et al.*, 1993;许志琴等,1994;Zhang *et al.*, 2007, 2009;Wei *et al.*, 2009;Song *et al.*, 2009, 2013;李三忠等,2017;付东,2020)。关于北祁连造山带变质带可以划分为北部以含硬柱石蓝片岩相为主的低级变质带和南部以高压蓝片岩和榴辉岩为主的高级变质带。Zhang等(2007)对榴辉岩进行了研究,得到了峰期变质温压条件为 $420\sim 510^\circ\text{C}$ 、 $2.1\sim 2.4\ \text{GPa}$,得到了顺时针的 $p-t$ 轨迹。Zhang等(2009)对硬柱石蓝片岩进行了变质作用研究,得出峰期变质温压为 $345\sim 375^\circ\text{C}$ 、 $\sim 0.75\ \text{GPa}$,并且记录了顺时针的 $p-t$ 轨迹。Song等(2009)估计了含硬柱石蓝片岩的温压条件大约在 $250\sim 350^\circ\text{C}$ 、 $0.6\sim 1.1\ \text{GPa}$ 。Wei等(2009)对北祁连造山带的榴辉岩进行了变质作用研究,得出了峰期变质的温压为 $420\sim 510^\circ\text{C}$ 、 $2.1\sim 2.6\ \text{GPa}$,记录了顺时针的 $p-t$ 轨迹。

前人对于北秦岭的秦岭杂岩做了细致的变质作用研究(Kröner *et al.*, 1993;张建新等,2011;Dong *et al.*, 2011a;Wang *et al.*, 2011b, 2011c;Xiang *et al.*, 2012, 2014;陈丹玲等,2015;毛小红等,2018;Zhao *et al.*, 2020;梁爽等,2021;唐源等,2022;郭祺等,2022)。毛小红等(2018)对西秦岭天水地区的石榴矽线石片麻岩进行了变质作用研究,得出其峰期变质的温压为 $793\sim 803^\circ\text{C}$ 、 $0.88\sim 0.95\ \text{GPa}$,

$u_B/10^{-6}$

表6 陇山杂岩中石榴黑云斜长片麻岩独居石微量元素组成

Table 6 LA-ICP-MS trace element compositions of monazite from garnet biotite plagioclase gneiss in the Longshan Complex

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	(Gd/Lu) _N	δ Eu
样品 21LS36																	
1	135 558	261 275	29 667	112 602	18 700	2 393	12 736	1 189	3 514	280.1	240.5	9.74	23.74	1.33	578 185	9 568	0.474
2	138 400	263 436	28 516	107 531	17 120	2 287	11 417	1 012	3 438	297.6	279.4	11.90	28.29	1.76	573 864	6 484	0.500
3	135 704	263 051	29 236	108 274	17 516	2 382	11 648	1 164	3 840	367.3	375.9	17.42	42.06	2.76	573 621	4 218	0.510
4	138 486	262 379	29 271	108 808	17 530	2 469	11 405	1 082	3 248	266.5	245.1	11.26	26.69	2.01	575 232	5 685	0.534
5	134 417	257 108	28 899	109 222	17 455	2 372	11 921	1 269	4 666	509.8	636.7	33.90	99.19	7.28	568 616	1 637	0.503
6	140 597	262 044	28 576	105 559	16 466	2 209	10 745	1 154	3 434	315.5	311.7	12.92	29.41	2.42	571 356	4 432	0.508
7	144 734	263 907	29 255	106 525	17 262	2 366	11 012	946	2 448	189.3	205.4	11.28	34.57	3.28	578 899	3 354	0.525
8	135 371	260 374	28 607	107 648	17 647	2 447	11 805	1 100	4 162	410.6	475.3	26.38	79.33	5.54	570 269	2 132	0.518
9	138 050	264 159	29 054	110 940	18 011	2 441	11 270	897	2 117	155.3	141.9	6.98	25.67	2.55	577 303	4 418	0.524
10	134 339	259 558	28 773	106 612	17 231	2 370	11 935	1 259	523	484.3	584.0	33.62	86.02	5.58	567 793	2 138	0.505
11	137 462	260 394	28 786	106 570	17 017	2 253	11 435	1 166	3 966	402.8	447.6	25.86	74.49	5.40	570 005	2 117	0.494
12	134 481	258 814	28 857	106 791	17 298	2 337	11 757	1 266	4 718	527.8	657.0	37.57	109.54	8.27	567 660	1 422	0.501
13	131 320	255 299	28 507	106 787	17 998	2 502	12 404	1 322	4 611	509.5	636.6	34.27	88.45	6.38	562 067	1 943	0.512
14	136 368	262 888	29 199	108 629	17 323	2 393	11 306	1 096	3 411	262.0	290.2	14.07	40.80	3.24	573 251	3 488	0.523
15	133 605	260 152	28 896	109 496	18 269	2 440	12 503	1 318	4 501	459.5	512.3	25.03	64.40	4.03	572 246	3 103	0.494
16	135 363	257 126	28 851	107 500	17 458	2 364	11 826	1 226	4 184	429.7	498.0	26.16	74.05	5.72	566 933	2 069	0.503
17	135 171	250 023	27 847	109 312	18 094	2 133	13 680	1 236	3 411	255.1	234.6	10.72	33.71	2.69	561 450	5 084	0.414
18	133 264	258 267	28 959	110 064	18 145	2 569	12 604	1 322	4 697	527.1	636.9	37.59	110.93	8.99	571 185	1 401	0.519
19	136 719	261 381	29 045	108 155	18 107	3 289	12 291	1 420	5 987	781.4	1223.6	91.10	314.73	21.97	578 827	560	0.674
20	138 302	261 633	28 762	107 590	17 346	2 764	11 784	1 277	4 900	549.8	771.7	55.24	184.51	13.31	575 932	885	0.591
21	131 654	255 259	28 323	107 922	17 918	2 483	12 651	1 359	4 984	573.8	749.4	45.67	128.16	10.36	564 061	1 222	0.504
22	139 906	265 691	29 745	111 364	19 127	3 114	10 738	848	2 264	189.0	223.7	12.65	38.80	3.36	583 269	3 195	0.664
23	139 143	262 307	28 577	106 890	17 061	2 305	11 155	1 109	3 649	336.3	363.6	20.26	59.42	4.81	572 981	2 319	0.511
24	137 750	265 279	29 446	109 922	17 954	2 510	11 628	1 082	3 205	255.1	232.0	10.24	24.73	1.92	579 301	6 071	0.531
25	141 199	267 124	28 833	105 140	16 748	2 303	10 357	924	2 580	189.1	161.6	6.53	16.28	0.78	575 581	13 332	0.535
26	137 278	260 535	28 887	107 303	17 063	2 334	11 386	1 178	4 214	442.4	544.1	35.19	117.63	8.43	571 326	1 351	0.512
27	136 096	258 600	28 951	109 091	18 316	2 653	11 955	1 039	2 693	205.8	191.3	10.21	31.95	3.02	569 837	3 956	0.548
28	138 321	260 555	29 108	110 084	18 202	2 468	12 315	1 213	3 806	356.2	40.3	20.84	63.38	5.19	576 909	2 372	0.504
29	138 893	265 838	29 604	111 009	17 880	2 550	10 859	893	2 422	213.2	225.4	12.57	35.02	2.53	580 436	4 286	0.559
30	135 325	258 911	29 036	113 222	18 746	2 536	12 677	1 086	3 149	281.0	324.5	19.12	60.74	5.70	575 379	2 224	0.503
样品 21LS37																	
1	133 980	258 635	28 499	107 575	17 700	2 500	12 413	1 322	5 033	592.0	858.2	66.05	198.35	17.74	569 384	700	0.516
2	137 767	265 205	29 183	112 545	18 504	2 237	11 157	859	2 000	127.8	99.7	4.03	10.46	0.92	579 700	12 169	0.476
3	137 970	264 247	29 233	110 037	18 550	2 613	11 833	981	2 327	138.8	92.3	3.01	8.94	0.82	578 035	14 445	0.539
4	135 196	259 935	28 804	110 139	17 963	2 574	12 115	1 232	4 197	419.2	459.2	23.53	59.81	4.23	573 121	2 867	0.533
5	132 258	261 877	29 868	114 931	20 847	2 381	13 970	1 225	2 958	166.8	104.1	3.40	6.92	0.59	580 597	23 776	0.427
6	133 285	263 633	29 571	114 280	19 664	2 469	12 792	1 090	2 814	183.5	140.3	5.73	15.75	0.95	579 944	13 489	0.476
7	134 708	263 974	29 499	113 176	19 549	2 603	12 059	1 018	2 587	187.0	187.9	10.60	37.02	2.97	579 598	4 065	0.518

续表 6-1
Continued Table 6-1

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	(Gd/Lu) _N	δEu
8	132 244	259 734	29 355	113 093	19 996	2 500	13 250	141	2 874	184.5	135.9	5.37	15.37	1.18	574 540	11 284	0.469
9	135 872	261 952	28 962	109 808	18 550	2 573	12 335	149	3 394	254.9	212.1	7.91	19.15	1.73	575 091	7 141	0.520
10	132 960	263 565	28 984	110 006	19 190	2 653	13 290	153	4 547	474.0	596.9	36.16	118.49	10.28	577 783	1 293	0.508
11	130 308	258 964	29 328	111 579	19 566	2 742	13 634	158	4 490	456.7	557.7	35.48	115.19	9.53	573 143	1 430	0.513
12	140 968	264 664	28 725	107 588	16 778	2 302	9876	853	2 382	194.8	214.2	11.70	36.01	2.93	574 595	3 367	0.547
13	132 460	262 548	30 147	115 497	20 918	2 364	13 821	175	2 744	150.2	94.3	2.97	6.79	0.52	581 928	26 656	0.425
14	127 572	254 342	28 786	111 013	19 181	2 549	13 915	154	5 417	644.1	956.8	71.72	268.06	21.40	566 191	650	0.477
15	128 741	251 005	28 914	112 035	20 625	2 408	14 437	138	3 554	235.9	173.9	7.01	19.50	1.38	563 474	10 431	0.427
16	134 144	256 298	27 984	106 234	17 824	2 614	12 515	101	5 141	586.0	738.1	42.79	130.85	8.95	565 620	1 398	0.535
17	129 932	253 720	29 064	113 047	21 036	2 415	14 593	134	3 373	208.4	139.1	4.29	11.44	0.88	568 898	16 529	0.421
18	133 411	256 592	28 265	105 832	17 835	2 427	12 375	1375	5 268	625.6	863.2	58.11	188.33	14.33	565 129	863	0.499
19	131 129	259 555	29 208	112 621	19 123	2 221	12 248	972	2 338	154.1	126.8	5.51	15.94	1.25	569 719	9 802	0.444
20	134 253	265 370	29 300	112 961	18 982	2 619	12 339	1002	2 365	142.8	103.1	3.92	11.25	1.16	579 452	10 602	0.523
21	135 507	260 398	29 439	113 175	19 129	2 293	12 493	1110	3 067	250.6	249.6	12.33	33.72	3.14	577 158	3 985	0.454
22	135 214	264 014	29 794	114 888	19 068	2 411	11 326	862	1 774	60.9	66.1	1.98	7.27	0.53	579 518	21 480	0.502
23	134 582	261 079	29 194	110 673	18 847	2 630	12 585	1175	3 580	338.0	405.1	25.97	81.21	6.65	575 211	1 893	0.522
24	134 266	261 143	29 386	112 113	19 718	2 294	13 263	1203	3 288	256.1	233.7	11.27	29.88	2.18	577 209	6 071	0.434
25	130 925	258 499	29 579	114 281	20 637	2 391	14 004	1243	3 237	255.0	159.9	6.81	17.30	1.02	575 189	13 754	0.430
26	139 398	274 096	30 732	113 651	19 352	2 882	8 136	481	1 082	8.0	102.3	5.51	17.54	1.29	590 021	6 313	0.702
27	129 230	253 499	28 384	107 899	18 891	2 780	13 678	1479	5 721	680.6	936.3	64.73	210.85	17.28	563 471	792	0.529
28	142 318	267 568	29 585	111 004	18 068	2 130	11 035	893	2 038	106.7	66.1	1.73	4.98	0.37	584 820	29 816	0.461
29	135 175	262 624	29 504	112 728	18 599	2 502	11 539	953	2 273	145.4	114.1	4.74	12.10	0.74	576 172	15 685	0.522
30	132 545	257 240	28 842	110 538	18 836	2 454	12 391	1170	3 363	270.3	256.1	12.66	36.00	2.39	567 955	5 175	0.491
31	135 252	264 517	29 582	113 201	18 960	2 515	12 030	984	2 293	135.8	97.8	2.97	9.09	0.70	579 579	17 268	0.509
样品 21LS69																	
1	117 636	215 273	23 499	88 460	14 903	297	10 404	968	2 608	191.9	183.5	9.95	27.68	2.06	474 462	5 041	0.073
2	110 022	206 107	22 962	87 211	15 381	369	10 934	1 029	2 701	163.0	118.5	5.11	12.59	0.97	457 017	11 308	0.087
3	105 821	199 487	22 380	86 531	15 278	356	11 240	1 099	3 229	254.5	264.7	15.00	46.81	3.61	446 005	3 110	0.083
4	110 677	206 060	22 915	88 175	15 440	362	11 115	1 039	2 749	184.6	177.8	6.61	19.33	1.15	458 891	9 646	0.085
5	114 228	210 119	23 003	87 070	15 275	318	11 178	1 075	3 171	259.0	286.5	15.77	49.98	4.17	466 053	2 679	0.074
6	113 728	207 747	23 005	87 775	15 160	695	11 327	1 104	3 153	203.2	149.7	5.55	18.62	1.50	464 073	7 533	0.162
7	110 389	206 064	22 742	87 133	15 184	407	10 784	1 009	2 633	143.8	88.1	3.40	11.35	1.00	456 593	10 743	0.097
8	115 442	210 335	22 958	86 392	14 890	352	10 280	958	2 448	148.9	107.0	4.44	11.67	0.67	464 328	15 441	0.087
9	113 685	208 665	23 149	87 285	15 569	893	11 797	1 191	3 604	269.7	233.3	11.33	32.05	2.17	466 386	5 448	0.202
10	112 769	209 189	23 129	88 232	15 015	428	10 615	980	2 561	135.9	77.4	4.83	9.36	0.86	463 144	12 273	0.104
11	110 878	205 916	22 890	88 132	15 349	406	10 927	1 029	2 755	160.2	106.2	3.98	11.01	1.10	458 565	9 945	0.096
12	106 337	205 864	23 180	91 109	17 470	454	13 495	1 310	3 550	227.4	190.8	8.75	24.88	2.13	463 223	6 340	0.090
13	105 718	198 486	22 482	90 910	17 765	751	14 893	1 518	5 055	425.2	353.5	14.21	30.53	1.70	458 403	8 784	0.141
14	110 758	206 599	22 917	87 953	15 496	435	11 114	1 047	2 818	167.8	121.2	4.91	13.30	0.89	459 446	12 488	0.101

续表 6-2
Continued Table 6-2

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	(Gd/Lu) _N	δEu
15	110 573	207 403	23 109	87 656	15 747	318	11 475	1 109	3 258	274.2	302.6	17.89	56.84	4.67	461 304	2 456	0.072
16	111 222	205 093	22 782	85 766	15 037	565	11 000	1 112	3 400	235.2	176.5	8.00	22.60	2.08	456 490	5 333	0.134
17	110 517	205 352	23 160	87 488	15 289	359	10 950	1 120	2 656	164.7	121.5	5.02	13.59	0.84	457 067	13 020	0.085
18	109 437	204 952	22 599	86 077	15 110	361	10 788	1 001	2 618	152.0	108.7	4.47	12.41	1.02	453 223	10 554	0.086
19	109 981	203 710	22 818	86 795	16 133	1141	12 456	1 320	4 239	356.1	357.3	17.74	48.02	2.71	459 375	4 595	0.246
20	110 936	204 654	22 935	88 051	15 310	396	10 934	1 062	2 860	184.1	135.3	7.23	20.50	2.26	457 489	4 845	0.094
21	112 951	207 650	22 627	87 444	15 021	462	10 658	1 040	2 810	158.6	91.9	3.13	10.22	1.05	460 927	10 171	0.112
22	109 640	204 808	22 747	87 895	15 224	348	10 943	1 113	2 689	178.6	141.2	6.62	19.65	1.40	455 657	7 827	0.083
23	110 093	206 397	22 707	87 022	15 285	417	10 973	1 054	2 961	199.4	169.8	8.98	25.02	2.37	457 315	4 621	0.098
24	109 399	206 400	22 851	87 935	15 688	374	11 293	1 09	3 032	208.6	180.7	8.58	28.86	2.31	458 491	4 883	0.086
25	105 621	205 454	23 231	90 056	16 648	467	12 075	1 165	3 000	187.0	147.1	6.62	22.58	1.81	458 162	6 688	0.101
26	108 050	203 350	22 643	86 265	15 271	343	11 334	1 143	2 496	3 09.6	363.1	22.65	69.60	5.10	452 665	2 223	0.080
27	110 074	205 938	22 865	87 806	15 303	351	10 977	1 019	2 552	175.7	140.1	6.22	15.26	1.16	457 362	9 439	0.083
样品 21LS70																	
1	123 505	227 933	25 479	99 014	17 071	321	12 833	1 311	4 091	317.0	274.2	13.58	34.24	2.80	512 207	4 582	0.066
2	130 255	238 453	26 271	100 230	17 446	516	12 873	1 297	4 315	440.6	507.3	28.87	77.42	6.03	532 796	2 133	0.105
3	124 286	227 615	25 685	100 386	17 782	466	13 560	1 361	4 476	432.1	477.3	25.74	73.23	6.32	516 632	2 146	0.092
4	120 208	231 703	25 770	101 807	17 984	339	13 275	1 358	4 134	350.8	334.1	17.51	52.36	4.57	517 536	2 905	0.067
5	127 393	234 086	26 189	102 708	18 008	478	13 062	1 243	3 740	320.3	337.7	16.79	44.98	3.17	527 647	4 116	0.095
6	125 992	231 596	25 738	99 412	17 012	401	12 242	1 166	3 615	320.6	300.2	13.91	41.89	3.16	517 850	3 880	0.085
7	123 581	237 780	26 972	105 125	19 185	511	14 497	1 429	4 481	412.1	422.0	19.76	47.46	3.43	534 466	4 228	0.094
8	119 768	230 728	26 190	101 946	18 406	475	13 695	1 337	4 310	422.5	508.1	29.90	85.30	6.71	517 907	2 042	0.091
9	125 811	233 371	26 196	102 098	18 493	427	13 797	1 348	4 185	558.8	348.7	17.33	53.51	3.91	526 507	3 525	0.082
10	122 245	232 863	26 510	103 783	18 631	509	14 209	1 395	4 652	453.5	422.3	25.64	68.05	5.34	525 852	2 660	0.096
11	127 173	235 568	26 091	100 157	17 548	526	13 371	1 348	4 590	460.6	521.1	30.07	89.31	6.09	527 485	2 194	0.105
12	147 560	235 279	25 550	98 750	17 107	474	13 332	1 399	4 511	409.3	461.9	26.65	73.89	5.75	544 939	2 318	0.096
13	118 987	226 337	25 658	100 220	17 717	343	13 398	1 383	4 503	405.1	431.7	24.93	79.91	6.33	509 495	2 117	0.068
14	122 580	234 172	26 840	103 850	18 542	488	13 501	1 331	4 337	412.3	431.6	19.52	49.89	3.66	526 557	3 688	0.094
15	120 006	227 207	25 990	101 400	18 472	513	14 103	1 431	4 679	466.9	522.2	29.78	82.58	6.11	514 910	2 308	0.097
16	134 606	236 790	26 429	102 144	18 331	445	13 385	1 274	3 722	311.5	6.3	14.24	40.28	3.01	537 801	4 451	0.087
17	151 290	237 951	25 711	98 169	18 020	488	14 263	1 512	4 940	444.3	462.9	22.50	62.58	4.20	553 341	3 396	0.093
18	126 061	228 125	25 627	101 720	18 597	625	14 885	1 570	5 592	610.0	771.9	47.37	132.20	9.85	524 374	1 512	0.115
19	126 058	234 642	26 412	100 826	17 678	430	13 335	1 302	4 070	366.0	379.8	15.69	59.98	4.50	525 583	2 966	0.086
20	123 075	226 860	25 684	102 323	18 548	550	14 694	1 481	4 970	503.3	585.2	32.78	88.44	6.63	519 400	2 215	0.102
21	118 806	226 074	25 879	103 894	19 225	488	15 034	1 527	4 803	430.9	427.1	19.26	47.86	4.29	516 659	3 505	0.088
22	119 386	225 230	26 217	101 854	17 882	344	13 589	1 387	4 419	380.9	375.6	17.78	62.19	5.62	511 152	2 420	0.067
23	148 759	243 699	26 705	103 080	19 046	505	14 711	1 528	4 695	406.7	386.8	16.46	36.38	2.90	563 577	5 074	0.092
24	130 172	235 306	26 514	102 229	17 501	408	12 274	1 103	3 048	228.7	199.2	8.53	24.98	2.28	529 019	5 394	0.085
25	121 221	228 646	25 988	101 766	17 775	376	12 704	1 253	3 768	282.6	266.3	15.30	49.63	3.69	514 116	3 439	0.077
26	121 012	227 069	25 570	100 303	17 382	382	12 746	1 237	3 829	315.6	305.1	14.70	46.66	3.75	510 216	3 402	0.078

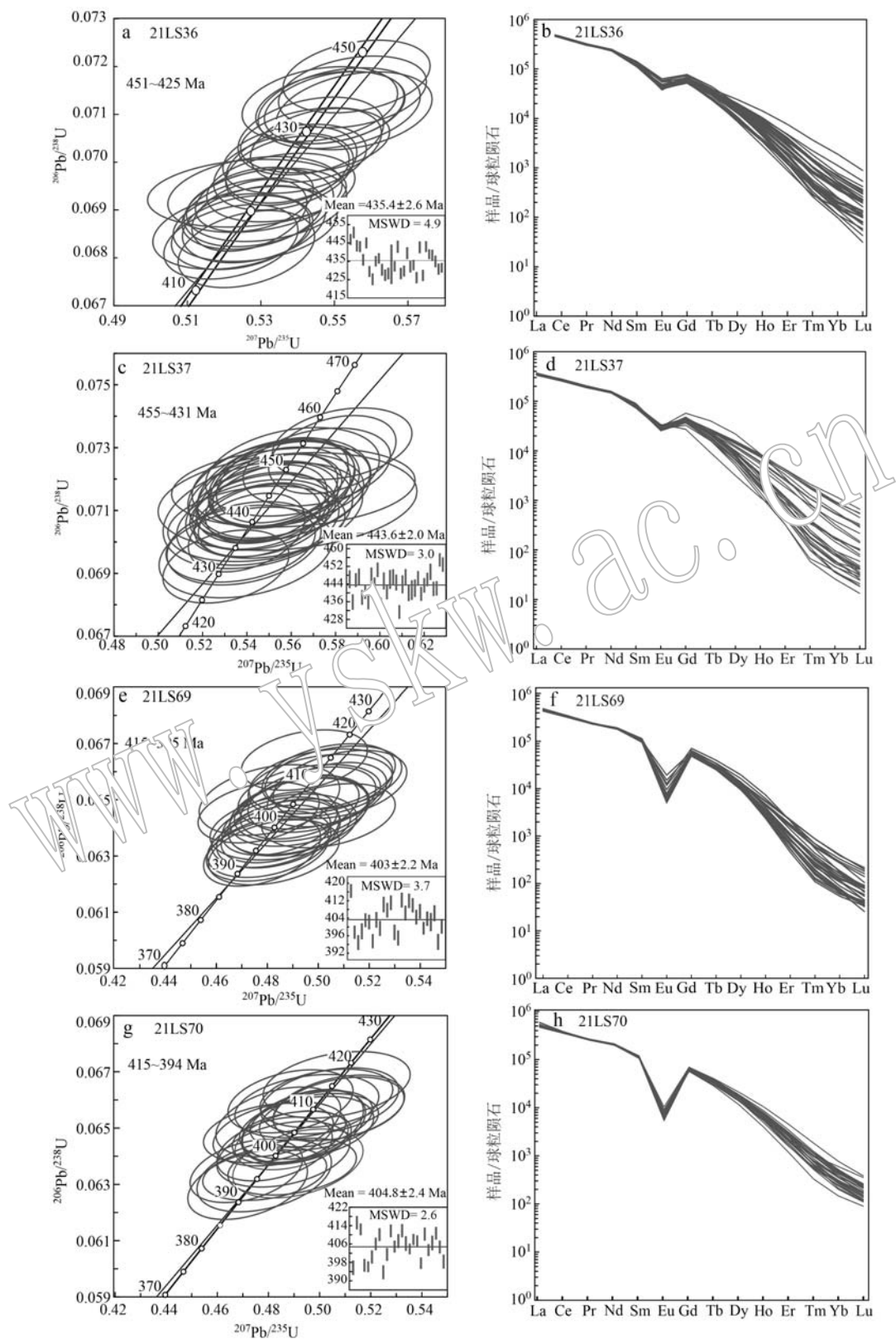


图9 陇山地区黑云斜长片麻岩样品 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年谐和图和球粒陨石标准化稀土元素配分图 (标准化值自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 9 Concordia diagram of LA-ICP-MS monazite U-Pb dating and chondrite-normalized rare earth element patterns (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

认为其记录的降温降压的顺时针 p - t 轨迹。赵宇航 (2020) 通过研究喂子坪地区的黑云角闪斜长片麻岩, 得到了峰期温压条件为 $745 \sim 820^{\circ}\text{C}$ 、 $0.85 \sim 0.97 \text{ GPa}$, 得出其经历了中压麻粒岩相变质作用, 并记录了顺时针的 p - t 轨迹。梁爽等 (2021) 对秦岭造山带西峡-内乡地区石榴黑云斜长片麻岩和石榴黑云二长片麻岩进行研究, 通过 GBPQ 温压计计算, 得到它们进变质阶段和峰期变质阶段的温压条件分别为 $\sim 553^{\circ}\text{C}$ 、 0.21 GPa , $\sim 676^{\circ}\text{C}$ 、 $\sim 0.52 \text{ GPa}$, $\sim 617^{\circ}\text{C}$ 、 $\sim 0.3 \text{ GPa}$ 和 $\sim 705^{\circ}\text{C}$ 、 $\sim 0.6 \text{ GPa}$, 认为该地区经历了广泛的角闪岩相变质作用。郭祺等 (2022) 对西秦岭的天水地区中压麻粒岩相变质的石榴矽线黑云片麻岩进行了变质作用研究, 得到顺时针的 p - t 轨迹, 峰期温压为 $\sim 820^{\circ}\text{C}$ 、 $\sim 1.02 \text{ GPa}$ 。刘学锋等 (2024) 对喂子坪地区的含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩和含石榴子石黑云斜长角闪片麻岩进行了研究, 分别得到温压条件 $790 \sim 810^{\circ}\text{C}$ 、 $0.99 \sim 1.04 \text{ GPa}$ 和 $840 \sim 862^{\circ}\text{C}$ 、 $1 \sim 1.19 \text{ GPa}$, 变质程度达到了麻粒岩相, 同样记录了顺时针 p - t 轨迹 (图 10)。

样品 21LS30-1 基质中的斜长石 X_{An} (图 5) 成分分带变化, 指示了该样品经历了峰后降压, 矿物等值线 X_{Grs} (图 6d) 可能也指示了降压, 推测其指示了顺时针的 p - t 轨迹。此外, 样品 21LS37 剖面模拟得到的峰期温压也在该路径上 (图 10), 因此推测陇山杂岩变泥质岩在峰期之后经历了近等温降压的抬升阶段。

6.2 变质作用时代

前人对秦-祁结合部位陇山杂岩的变质作用时代进行了一些研究。何艳红等 (2005) 通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年对陇山杂岩中的 TTG 片麻岩进行了研究, 得到了 $\sim 1.9 \text{ Ga}$ 的变质年龄; 何世平等 (2006) 对陇山岩群变火山岩系进行锆石 U-Pb 定年, 获得了 $417 \pm 1.5 \text{ Ma}$ 的主变质年龄; 徐可心等 (2018) 对陇山杂岩中的黑云斜长片麻岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 认为其经历了 $\sim 1.8 \text{ Ga}$ 的变质事件; 封强等 (2023) 通过独居石和榍石定年, 分别得到陇山杂岩的变质年龄为 $407 \sim 435 \text{ Ma}$ 、 $409 \sim 426 \text{ Ma}$ 。本文通过 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年得到了陇山杂岩中的 4 个石榴黑云斜长片麻岩样品 21LS36、21LS37、21LS69、21LS70 的独居石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 $451 \sim 425 \text{ Ma}$ 、 $455 \sim 431 \text{ Ma}$ 、 $415 \sim 395 \text{ Ma}$ 、 $415 \sim 394 \text{ Ma}$ 。这些独居石年龄表明陇山杂岩经历了古生代的变质事件。

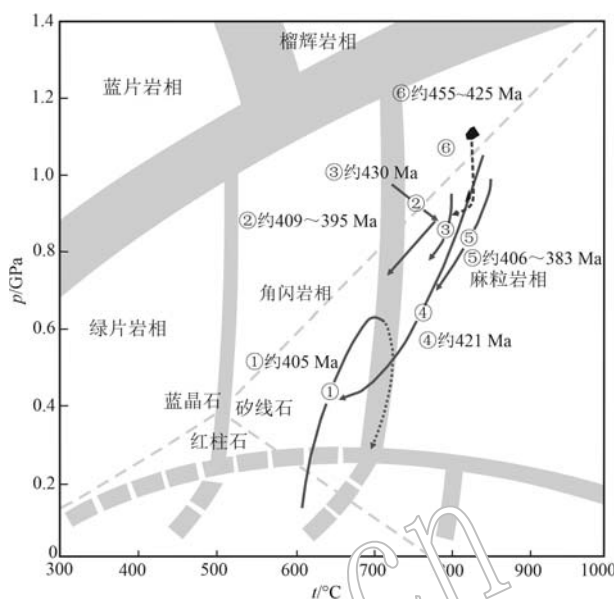


图 10 中压麻粒岩相变质岩的 p - t 轨迹总结

(据刘学锋等, 2024 修改)

Fig. 10 Summary of p - t paths from the granulite-facies metamorphic rocks (modified after Liu Xuefeng et al., 2024)

①—西峡-内乡地区石榴黑云斜长片麻岩和石榴黑云二长片麻岩变质 p - t 轨迹 (梁爽等, 2021); ②—喂子坪地区含石榴黑云角闪斜长片麻岩变质 p - t 轨迹 (Zhao et al., 2020); ③—西秦岭造山带的石榴子石矽线石片麻岩变质 p - t 轨迹 (毛小红等, 2018); ④—西秦岭北缘天水地区石榴矽线黑云片麻岩变质 p - t 轨迹 (郭祺等, 2022); ⑤—喂子坪地区含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩变质 p - t 轨迹 (刘学锋等, 2024); ⑥—陇山杂岩石榴黑云斜长片麻岩变质 p - t 轨迹 (本文) (图中黑色区域为样品 21LS30-1 和 21LS37 峰期矿物组合区域)

①—metamorphic p - t path of garnet-biotite-plagioclase gneisses and garnet-biotite two-feldspar gneiss in the Xixia and Neixiang area (Liang Shuang et al., 2021); ②—metamorphic p - t path of garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss in the Weiziping area (Zhao et al., 2020); ③—metamorphic p - t path of garnet-sillimanite gneiss in the western Qinling Orogen (Mao Xiaohong et al., 2018); ④—metamorphic p - t path of garnet-sillimanite-biotite gneiss on the northern edge of the West Qinling Orogen in the Tianshui area (Guo Qi et al., 2022); ⑤—metamorphic p - t path of garnet-bearing hornblende-biotite-plagioclase gneiss in the Weiziping area (Liu Xuefeng et al., 2024); ⑥—metamorphic p - t path of biotite plagioclase gneisses of the Longshan Complex (this study) (the black area in the figure represents the peak mineral assemblage area from 21LS30-1 and 21LS37)

前人对北祁连造山带的变质作用时代进行了研究 (Zhang et al., 2007; Wei et al., 2009; Song et al., 2009; Cheng et al., 2016; 彭银彪等, 2017)。Zhang 等 (2007) 对北祁连两个榴辉岩进行了锆石

U-Pb 定年,得到 489 ± 7 Ma 和 477 ± 16 Ma 两个榴辉岩相变质的年龄。Song 等(2009)得到北祁连造山带榴辉岩相变质作用的时间 ~ 472 Ma。Cheng 等(2016)得到了蓝片岩的 Lu-Hf 和 Sm-Nd 年龄分别为 466.3 ± 2.0 Ma 和 462.2 ± 5.6 Ma,并认为是蓝片岩相变质的年龄。

近年来,北秦岭发现了大量的高压/超高压岩石,在秦岭岩群北缘的官坡-双槐树、中部的清油河北-松树沟-寨根北以及西峡均有分布(Kröner *et al.*, 1993; Chen *et al.*, 2004; 陈丹玲等, 2004, 2011; 丁仁平等, 2009; 张建新等, 2011; Cheng *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2011a, 2011b; Wang *et al.*, 2011a; Xiang *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2013, 2014, 2015; Tang *et al.*, 2015; 毛小红等, 2017; Mao *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2020; 赵宇航, 2020; 郭祺等, 2022; 刘学锋等, 2024)。张建新等(2011)通过对西峡双龙地区麻粒岩进行锆石 U-Pb 年代学研究,得到其麻粒岩相变质作用时代(440 ± 2 Ma)和角闪岩相变质作用叠加时代(426 ± 1 Ma)。也有学者对桐柏山地区的基性麻粒岩样品进行了锆石 U-Pb 年代学研究,得到了桐柏山地区发生峰期麻粒岩相变质作用的时代(432 ± 1 Ma)以及退变质作用阶段的时代(415 ± 2 Ma)(Xia *et al.*, 2012)。梁爽等(2021)通过 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年和锆石 U-Pb 定年,得到了西峡-内乡地区两个片麻岩样品独居石年龄分别为 413 ± 1.6 Ma 和 409.6 ± 1.9 Ma, 锆石年龄分别为 408.8 ± 3.3 Ma 和 405.8 ± 3.6 Ma, 认为其记录了变质作用的时代。综上所述,东秦岭地区这些高压-超高压岩石经历了一个完整的由陆壳俯冲-深俯冲(~ 500 Ma),之后连续两次抬升(~ 450 Ma、 ~ 420 Ma)的构造演化过程(刘良等, 2013)。

随着研究的不断深入,北秦岭西段发现了与东段相似的年代学记录。毛小红等(2017)对西秦岭造山带天水地区进行了研究,得出西秦岭北部的秦岭杂岩经历了麻粒岩相变质作用($433 \sim 424$ Ma)和角闪岩相($411 \sim 402$ Ma)退变质作用改造。郭祺等(2022)通过独居石原位 U-Pb 定年研究了西秦岭北缘的麻粒岩相岩石,得到其代表了中麻粒岩相变质作用的时代(~ 421 Ma)。唐源等(2022)对北秦岭造山带天水南部的榴闪岩进行了年代学研究,得到了3组变质年龄: 497 ± 3 Ma、 452 ± 3 Ma 和 423 ± 7 Ma,并认为北秦岭造山带西段在早古生代经历了与东段相

似的大陆俯冲和折返过程。

本文的样品 21LS36 和 21LS37 采样点位置较近,所记录的独居石年龄 $451 \sim 425$ Ma、 $455 \sim 431$ Ma 在误差范围内与西秦岭中压麻粒岩相峰期变质作用的年代及东秦岭已报道的退变质作用时代基本一致。而样品 21LS69、21LS70 采样位置相同,所记录的独居石年龄 $415 \sim 394$ Ma、 $415 \sim 391$ Ma 应该代表了麻粒岩相变质后的退变质改造的时代。样品 21LS69、21LS70 得到的独居石年龄比 21LS36、21LS37 偏年轻,可能是在冷却抬升阶段的差异性抬升造成的。综上所述,陇山杂岩的变质年龄与北秦岭造山带秦岭杂岩变质时代在误差范围内一致,因此推断陇山杂岩经历了与北秦岭造山带相似的古生代构造事件。

6.3 构造背景

前人研究认为陇山杂岩属于北祁连造山带的基底隆起(宋志高, 1995);而后又有研究认为其应该归属于华北板块南缘的基底岩系(何艳红等, 2005; 徐可心等, 2018);此外,部分研究学者认为陇山杂岩与秦岭岩群有相似的构造特征(陈隽璐等, 2002; 董俊刚, 2004),认为其可能是北秦岭造山带向西延伸的部分(周鼎武等, 1994; 封强等, 2023; 李玉婷等, 2023)。最新研究表明,陇山杂岩不同的地质单元应形成于不同的构造环境,分别可划分出新太古代-古元古代的古老基底岩系(宋志高, 1995; 何艳红等, 2005; 徐可心等, 2018)以及早古生代变沉积-火山岩系(何世平等, 2006; 孟祥舒等, 2017; 贾明辉等, 2021)。

野外地质调查时发现,陇山杂岩出露大面积早古生代变沉积-火山岩系,古老基底出露面积较少。何艳红等(2005)在陇县关山地区得到 TTG 片麻岩的原岩年龄为 ~ 2.5 Ga,变质年龄为 ~ 1.9 Ga;王银川等(2012)在张家川-马鹿镇南长宁驿得到花岗质片麻岩的原岩结晶年龄为 ~ 1.76 Ga,捕获到的继承性岩浆锆石继承年龄为 ~ 1.95 Ga、 ~ 2.2 Ga;陇县铁佛寺-西洼里地区得到黑云斜长片麻岩形成年龄为 ~ 2.47 Ga,变质年龄为 ~ 1.85 Ga,条带状黑云斜长片麻岩形成年龄为 ~ 2.49 Ga,变质年龄为 ~ 1.96 Ga(徐可心, 2018)。上述的古老基底岩系与华北克拉通南缘 ~ 2.5 Ga 的岩浆事件和 $\sim 1.97 \sim 1.80$ Ga 的变质事件(万渝生等, 2009; 王国栋等, 2012; Lu *et al.*, 2013; 王雪, 2017; Tang *et al.*, 2017; Feng *et al.*, 2022)保持一致的记录,因此笔者推测陇山杂

岩 TTG 片麻岩可能属于华北克拉通南缘基底岩系, 经历了古元古代变质事件的改造, 最后受到加里东造山作用卷入陇山杂岩中。

本文对陇山杂岩中的变泥质岩进行变质作用研究, 认为达到了中压麻粒岩相变质等级。结合前述陇山杂岩与北秦岭造山带在古生代的相似构造演化, 推测陇山杂岩的古生代构造事件可能与北秦岭的构造演化有关。

秦岭造山带经历了 4 次主要的陆块增生和碰撞, 包括南北秦岭沿着商丹缝合发生的古生代造山运动 (Dong and Santosh, 2016)。具体而言, 早寒武世 (~ 540 Ma) 商丹洋开始向北俯冲, 导致了二郎坪弧后盆地开始形成和北秦岭的岛弧岩浆活动; 中寒武世 (~ 515 Ma) 商丹洋持续俯冲引发北秦岭地块大规模辉长岩-花岗岩侵入, 二郎坪弧后盆地正式出现, 并向南俯冲至北秦岭造山带之下, 形成了高压/超高压变质岩; 奥陶纪 (~ 450 Ma), 二郎坪弧后盆地闭合, 但商丹洋仍持续存在俯冲 (460~420 Ma), 导致北秦岭地块 (458~434 Ma) 出现辉长岩和大量花岗质岩体; 最后, 泥盆纪早期 (~ 400 Ma), 商丹洋闭合 (Dong *et al.*, 2011b)。本文初步推测, 陇山杂岩属于北秦岭造山带的西延部分, 经历了古生代陆陆碰撞造山作用。

7 结论

(1) 陇山杂岩中的石榴黑云斜长片麻岩样品记录了两个变质演化阶段: 早期进变质阶段和峰期变质阶段, 峰期变质温压条件为 813~821℃、0.93~1.1 GPa, 为中压麻粒岩相变质。

(2) LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 测年获得 4 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 变质年龄, 分别为 451~425 Ma、455~431 Ma、415~395 Ma、415~394 Ma, 得到的变质年龄与秦岭杂岩中压麻粒岩相峰期变质作用以及退变质作用时代基本一致。

(3) 陇山杂岩可能与北秦岭造山带经历了相似的古生代构造事件, 初步推断陇山杂岩属于北秦岭造山带的西延部分, 经历了古生代陆陆碰撞造山作用。

致谢 感谢孔旭博士、李玉婷硕士、刘刚、封强、段增印和张艺一在野外采样时提供的帮助, 感谢西北大学大陆动力实验室杨文强博士在矿物化学分析

方面给予的帮助和指导。

References

- Chen Danling and Liu Liang. 2011. New data on the chronology of eclogite and associated rock from Guanpo area, North Qinling orogeny and its constraint on nature of North Qinling HP-UHP eclogite terrane[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 158~169 (in Chinese with English abstract).
- Chen D L, Liu L, Sun Y, *et al.* 2004. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for high-pressure basic granulite from North Qinling and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(21): 2296~2304.
- Chen Danling, Ren Yunfei, Gong Xiangkuan, *et al.* 2015. Identification and its geological significance of eclogite in Longshou, the North Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 1841~1854 (in Chinese with English abstract).
- Chen Junlu, Chen Yocang, Li Haiping, *et al.* 2002. Comparison of Longshan Group and Qinling Group at the junction of Qilian and North Qinling mountains[J]. *Geology of Shaanxi*, 20(2): 39~49 (in Chinese with English abstract).
- Cheng H, Lu T, Cao D. 2016. Coupled Lu-Hf and Sm-Nd geochronology constrains blueschist-facies metamorphism and closure timing of the Qilian Ocean in the North Qilian orogen[J]. *Gondwana Research*, 34: 99~108.
- Cheng H, Zhang C, Vervoort J D, *et al.* 2011. Geochronology of the transition of eclogite to amphibolite facies metamorphism in the North Qinling orogen of central China[J]. *Lithos*, 125(3~4): 969~983.
- Ding Saping, Pei Xianzhi, Li Yong, *et al.* 2009. Biotite ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of granitic mylonite at the Xinyang-Yuanlong ductile shear zone in the northern margin of West Qinling and their geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1624~1632 (in Chinese with English abstract).
- Dong Jungang. 2004. The Longshan Group and Comparison with Qinling Group in Tianshui Area[D]. Xi'an: Chang'an University (in Chinese with English abstract).
- Dong Y P and Santosh M. 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Gondwana Research*, 29(1): 1~40.
- Dong Y P, Sun S S, Santosh M, *et al.* 2021. Central China Orogenic Belt and amalgamation of East Asian continents[J]. *Gondwana Research*, 100: 131~194.

- Dong Y P, Sun S S, Santosh M, *et al.* 2022. Cross orogenic belts in central China: Implications for the tectonic and paleogeographic evolution of the east Asian continental collage[J]. *Gondwana Research*, 109: 18~88.
- Dong Y P, Yang Z, Liu X M, *et al.* 2014. Neoproterozoic amalgamation of the Northern Qinling terrain to the North China Craton: Constraints from geochronology and geochemistry of the Kuanping ophiolite[J]. *Precambrian Research*, 255(Pt. 1): 77~95.
- Dong Y P, Zhang G W, Hauenberger C, *et al.* 2011a. Palaeozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: Evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks[J]. *Lithos*, 122(1-2): 39~56.
- Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, *et al.* 2011b. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 213~237.
- Feng Qiang, Li Yuting, Zhai Mingguo, *et al.* 2023. Determination of Early Paleozoic metamorphic event in the Longshan Complex and its geological implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(3): 702~718 (in Chinese with English abstract).
- Feng Q, Lu J S, Zhai M G, *et al.* 2022. Clockwise *p-T-t* path of Neoproterozoic metamorphism from the Dengfeng Complex, southern North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 381: 106846.
- Fu Dong. 2020. Early Paleozoic Accretionary Orogenesis and Crustal Evolution in the Eastern Margin of the North Qilian Orogenic Belt[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Gao Y L, Long X P, Luo J, *et al.* 2021. Provenance and Hf isotopic variation of Precambrian detrital zircons from the Qilian Orogenic Belt, NW China: Evidence to the transition from breakup of Columbia to the assembly of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 357(3~4): 106153.
- Guo Qi, Mao Xiaohong, Zhang Jianxin, *et al.* 2022. Granulite-facies metamorphism in the northern part of West Qinling: Constraints from phase equilibrium modeling and in-situ U-Pb dating of monazite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(11): 3 259~3 280 (in Chinese with English abstract).
- He Shiping, Wang Hongliang, Chen Junlu, *et al.* 2006. Zircon LA-ICP-MS dating of amphibolite from Longshan Group in the eastern part of North Qilian and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(11): 1 668~1 675 (in Chinese with English abstract).
- He Shiping, Wang Hongliang, Xu Xueyi, *et al.* 2007a. A LA-ICP-MS U-Pb chronological study of zircons from Hongtubu basic volcanic rocks and its geological significance in the east segment of North Qilian Orogenic Belt[J]. *Advances in Earth Science*, 22(2): 143~151 (in Chinese with English abstract).
- He Shiping, Wang Hongliang, Xu Xueyi, *et al.* 2007b. Geochemical characteristics and tectonic environment of Hongtubu basalts and Chenjiahe intermediate-acid volcanic rocks in the eastern segment of North Qilian orogenic belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(4): 295~309 (in Chinese with English abstract).
- He Yanhong, Sun Yong, Chen Liang, *et al.* 2005. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of Longshan complex and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 125~134 (in Chinese with English abstract).
- Holland T J B and Powell R. 2011. An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phase equilibria of interest, involving a new equation of state for solids[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(3): 333~383.
- Li Minghui, Cao Huihua, Li Sanzhong, *et al.* 2021. Geochronology of amphibolite from Longshan Group in Tianshui area and its geological significance[J]. *Global Geology*, 40(2): 298~306 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Chunfa. 2002. Several important geological problems about the Central Orogenic Belt and progress in its research (in lieu of preface) [J]. *Geological Bulletin of China*, 21(8): 453~455 (in Chinese with English abstract).
- Korhonen F J, Brown M, Clark C, *et al.* 2013. Osumilite-melt interactions in ultrahigh temperature granulites: Phase equilibria modelling and implications for the *p-t* evolution of the Eastern Ghats Province, India[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 31(8): 881~907.
- Kröner A, Zhang G W and Sun Y. 1993. Granulites in the Tongbai area, Qinling belt, China: Geochemistry, petrology, single zircon geochronology, and implications for the tectonic evolution of Eastern Asia[J]. *Tectonics*, 12(1): 245~255.
- Li Sanzhong, Li Tao, Zhao Shujuan, *et al.* 2017. Proto-Tethys Ocean in East Asia (IV): Deformation and evolution of microcontinents in the west segment of the northern Proto-Tethys Tectonic Domain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(6): 1 615~1 632 (in Chinese with English abstract).
- Li Yuting, Lu Junsheng, Kong Xu, *et al.* 2023. Depositional age, provenance and tectonic significance of metasedimentary rocks from the Longshan Complex: Evidence from geochemical characteristics, detrital zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotope[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(8): 2 445~2 469 (in Chinese with English abstract).

- tract).
 Liang Shuang, Zhang Qian, Liu Jiahui, *et al.* 2021. LA-ICP-MS U-Pb dating of metamorphic monazite and zircon of the Qinling metamorphic complex, Xixia and Neixiang areas, Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(12): 3 797~3 814 (in Chinese with English abstract).
 Liu Liang, Liao Xiaoying, Zhang Chengli, *et al.* 2013. Multi-metamorphic timings of HP-UHP rocks in the North Qinling and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1 634 ~ 1 656 (in Chinese with English abstract).
 Liu Q, Wu Y B, Wang H, *et al.* 2014. Zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions of migmatites from the North Qinling terrane and their geological implications[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 32(2): 177~193.
 Liu X, Li S Z, Suo Y H, *et al.* 2011a. Structural anatomy of the exhumation of high-pressure rocks: Constraints from the Tongbai Collisional Orogen and surrounding units[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 46: 156~172.
 Liu X C, Jahn B M, Hu J, *et al.* 2011b. Metamorphic patterns and SHRIMP zircon ages of medium-to-high grade rocks from the Tongbai orogen, central China: Implications for multiple accretion/collision processes prior to terminal continental collision[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 29: 979~1 002.
 Liu X C, Jahn B M, Li S Z, *et al.* 2013. U-Pb zircon age and geochemical constraints on tectonic evolution of the Paleozoic accretionary orogenic system in the Tongbai orogen, central China[J]. *Tectonophysics*, 599: 67~88.
 Liu X C, Li S Z and Jahn B M. 2015. Tectonic evolution of the Tongbai-Hong'an orogen in central China: From oceanic subduction/accretion to continent-continent collision[J]. *Science China Earth Sciences*, 58(9): 1 477~1 496.
 Liu Xufeng, Gou Longlong, Tian Zhibo, *et al.* 2024. Metamorphic *p-t* evolution and tectonic implications of granulite-facies meta-sedimentary rock in the Weiziping from the Qinling Complex[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 43(2): 274~303 (in Chinese with English abstract).
 Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010. 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 of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1~2): 537~571.
 Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1~2): 34~43.
 Lu J S, Wang G D, Wang H, *et al.* 2013. Metamorphic *p-t* paths retrieved from the amphibolites, Lushan terrane, Henan Province and reappraisal of the Paleoproterozoic tectonic evolution of the Trans-North China Orogen[J]. *Precambrian Research*, 238: 61~77.
 Mao X H, Zhang J X, Yu S Y, *et al.* 2017. Early Paleozoic granulite facies metamorphism and anatexis in the northern West Qinling orogen: Monazite and zircon U-Pb geochronological constraints[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(5): 943~957.
 Mao Xiaohong, Zhang Jianxin, Yu Shengyao, *et al.* 2018. Metamorphism of Qinling Complex in northern West Qinling Orogen: Petrology, phase equilibria modelling of paragneiss and their geological implication[J]. *Earth Science*, 43(1): 278~297 (in Chinese with English abstract).
 Meng Xiangshu, He Yanning, Chen Liang, *et al.* 2017. The discovery of the Early Paleozoic adakitic rocks in the conjunction of the Qinling and Qilian orogenic belts and its implications on the orogenic processes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(12): 2 679~2 696 (in Chinese with English abstract).
 Pei Xianzhi, Ding Saping, Li Zuochen, *et al.* 2009. Early Paleozoic Tianshui-Wushan tectonic zone of the Northern margin of west Qinling and its tectonic evolution[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1 547~1 564 (in Chinese with English abstract).
 Pei Xianzhi, Ding Saping, Zhang Guowei, *et al.* 2007. The LA-ICP-MS zircons U-Pb ages and geochemistry of the Baihua basicous complexes in Tianshui area of West Qinling[J]. *Science in China (Series D)*, 37 (Suppl. 1): 224~234 (in Chinese).
 Pei X Z, Ding S P, Zhang G W, *et al.* 2007a. The LA-ICP-MS zircons U-Pb ages and geochemistry of the Baihua basic igneous complexes in Tianshui area of West Qinling[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(2): 264~276.
 Pei X Z, Li Z C, Liu H B, *et al.* 2007b. Geochemical characteristics and zircon U-Pb isotopic ages of island-arc basic igneous complexes from the Tianshui area in West Qinling[J]. *Frontiers of Earth Science in China*, 1(1): 49~59.
 Peng Yinbiao, Yu Shengyao, Zhang Jianxin, *et al.* 2017. Early Paleozoic arc magmatism and metamorphism in the northern Qilian Block, western China: A case study of Menyuan-Kekeli[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(12): 3 925~3 941 (in Chinese with English abstract).
 Song S G, Niu Y L, Su L, *et al.* 2013. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1 378~1 401.

- Song S G, Niu Y L, Zhang L F, *et al.* 2009. Tectonic evolution of early Paleozoic HP metamorphic rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New perspectives[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3~4): 334~353.
- Song Zhigao. 1995. Proterozoic Longshan Group in the eastern Qilian mountains[J]. *Acta Geoscientiae Sinica*, 16(2): 204~210 (in Chinese).
- Song Zhigao, Jia Qunzi, Zhang Zhitao, *et al.* 1991. Study on the early Paleozoic volcanic series and their tectonic connections between the North Qinling-North Qilian (Tianshui-Baoji)[J]. *Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources*, 34: 1~82 (in Chinese).
- Spear F S. 1995. Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths[J]. *Washington: Mineralogical Society of America*, 60(403): 992~993.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Sanders A D and Norry M J. *Magmatism in Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publications, 42(1): 313~345.
- Tang L, Santosh M and Dong Y P. 2015. Tectonic evolution of a complex orogenic system: Evidence from the northern Qinling Orogen, Central China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 544~559.
- Tang L, Santosh M, Tomura T, *et al.* 2017. Petrology, phase equilibria modelling and zircon U-Pb geochronology of Paleoproterozoic mafic granulites from the Fuping Complex, North China Craton[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 35(5): 517~540.
- Tang Yuan, Chen Danling, Ren Yunfei, *et al.* 2022. Discovery of Early Paleozoic eclogite-facies metamorphic rocks in the western part of North Qinling Orogen and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(3): 585~597 (in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng. 2009. Early Precambrian crustal evolution in the Dengfeng area: Constraints from geochemistry and SHRIMP U-Pb zircon dating [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(7): 982~999 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guodong, Wang Hao, Chen Hongxu, *et al.* 2012. U-Pb dating of zircons from metamorphic rocks of the Taihua metamorphic complex, Mt. Huashan, Southern margin of the Trans-North China Orogen [J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1541~1551 (in Chinese with English abstract).
- Wang F, Zhu L M, Li J M, *et al.* 2011c. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic characteristics of the Dehe biotite monzonitic gneiss pluton in the North Qinling orogen and their geological significance[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 30(2): 204~216.
- Wang H, Wu Y B, Gao S, *et al.* 2011a. Eclogite origin and timings in the North Qinling terrane, and their bearing on the amalgamation of the South and North China Blocks[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(9): 1019~1031.
- Wang H, Wu Y B, Gao S, *et al.* 2011b. Silurian granulite-facies metamorphism, and coeval magmatism and crustal growth in the Tongbai orogen, central China[J]. *Lithos*, 125(1~2): 249~271.
- Wang Jianqi and Liu Xiaoming. 2016. Proficiency testing of the XRF method for measuring 10 major elements in different rock types[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 35(2): 145~151 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xue. 2017. The Early Precambrian Magmatism and Crustal Growth in the Southern Margin of the North China Craton [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Wang X X, Wang T and Zhang C L. 2013. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling Orogen, China: Constraints on orogenic process[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 129~151.
- Wang Yinchuan, Pei Xianzhi, Li Zuochen, *et al.* 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Mesoproterozoic granitic gneisses at Changningyi of Zhangjiachuan area on the eastern edge of the Qilian Orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(10): 1576~1587 (in Chinese with English abstract).
- Wei C J, Yang Y, Su X L, *et al.* 2009. Metamorphic evolution of low-*T* eclogite from the North Qilian orogen, NW China: Evidence from petrology and calculated phase equilibria in the system NCKF-MASHO[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(1): 55~70.
- White R W, Powell R, Holland T J B, *et al.* 2014. New mineral activity-composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 32(3): 261~286.
- Whitney D L and Evans B W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals[J]. *American Mineralogist*, 95(1): 185~187.
- Wu H Q, Feng Y M and Song S G. 1993. Metamorphism and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian Mountains, China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 11(4): 523~536.
- Wu Maohong, Fu Bihong and Liu Chunyan. 2000. Formation age and tectonic setting of plagioclase amphibolite in the Middle Longshan Group, eastern Gansu Province[J]. *Geology and Geochemistry*, 28(2): 45~50 (in Chinese).

- Wu Maobing, Guo Yanru, Liu Chunyan, *et al.* 2002. The Sm-Nd age of Longshan Group in eastern Gansu and its tectonic significance[J]. Geological Review, 48(S1): 59~63 (in Chinese).
- Xiang H and Connolly J A. 2022. GeoPS: An interactive visual computing tool for thermodynamic modelling of phase equilibria[J]. Journal of Metamorphic Geology, 40(2): 243~255.
- Xiang H, Zhang L, Zhong Z Q, *et al.* 2012. Ultrahigh-temperature metamorphism and anticlockwise *p-T-t* path of Paleozoic granulites from north Qinling-Tongbai orogen, Central China[J]. Gondwana Research, 21(2~3): 559~597.
- Xiang H, Zhong Z Q, Li Y, *et al.* 2014. Sapphirine-bearing granulites from the Tongbai orogen, China: Petrology, phase equilibria, zircon U-Pb geochronology and implications for Paleozoic ultrahigh temperature metamorphism[J]. Lithos, 208~209(4): 446~461.
- Xiao Xuchang, Chen Guoming and Zhu Zhizhi. 1978. A preliminary study on the tectonics of ancient ophiolites in the Qilian Mountain, Northwest China[J]. Acta Geologica Sinica, 52(4): 281~295, 338 (in Chinese with English abstract).
- Xu Kexin. 2018. Precambrian Geochronology and Geochemistry of the Qinqi Coalbed: Evidence from Longshan Group[D]. Xi'an: Northwest University (in Chinese with English abstract).
- Xu Kexin, He Yanhong, Chen Ling, *et al.* 2018. Studies on the detrital zircon U-Pb dating of the Longshan complex in the tectonic conjunction Qinling-Qilian orogen: Provenance and tectonic setting[J]. Chinese Journal of Geology, 53(3): 1 054~1 074 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, He Shiping, Wang Hongliang, *et al.* 2008. Tectonic framework of North Qinling Mountain and North Qilian Mountain conjunction area in Early Paleozoic: Study of the evidences from strata and tectonic-magmatic events[J]. Northwestern Geology, 41(1): 1~21 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin and Cui Junwen. 1996. Tectonic Dynamics of Deformation in Continental Mountain Chains[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1~246 (in Chinese).
- Xu Zhiqin, Li Sitian, Zhang Jianxin, *et al.* 2011. Paleo-Asian and Tethyan tectonic systems with docking the Tarim block[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(1): 1~22 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Xu Huifen, Zhang Jianxin, *et al.* 1994. The Zhoulangnanshan Caledonian subductive complex in the northern Qilian Mountains and its dynamics[J]. Acta Geologica Sinica, 68(1): 1~15 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Huaqi, *et al.* 2012. Indosinian collision-orogenic system of Chinese continent and its orogenic mechanism [J]. Acta Petrologica Sinica, 28(6): 1 697~1 709 (in Chinese with English abstract).
- Yang J S, Xu Z Q, Dobrzhinetskaya L F, *et al.* 2003. Discovery of metamorphic diamonds in central China: An indication of a >4 000-km-long zone of deep subduction resulting from multiple continental collisions[J]. Terra Nova, 15: 370~379.
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Ma Changqian, *et al.* 2010. Compound orogeny and scientific problems concerning the Central Orogenic Belt of China[J]. Geology in China, 37(1): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Meng Qinren and Lai Shaocong. 1995. The structure and tectonics of the Qinling Orogenic Belt[J]. Science in China (Series B), 38: 994~1 002 (in Chinese).
- Zhang J, Meng F and Fan Y. 2007. A cold Early Palaeozoic subduction zone in the North Qilian Mountains, NW China: Petrological and U-Pb geochronological constraints[J]. Journal of Metamorphic Geology, 25(3): 285~304.
- Zhang Jianxin, Yu Shengyao and Meng Fancong. 2011. Ployphase Early Paleozoic metamorphism in the northern Qinling orogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(4): 1 179~1 190 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Wang Q and Song S. 2009. Lawsonite blueschist in Northern Qilian, NW China: *p-t* pseudosections and petrologic implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 35(3~4): 354~366.
- Zhang Weiwei, Meng Xianxun, Hu Jianmin, *et al.* 1994. Structural Characteristics and Orogenic Process of the Junction of the Qilian-North Qinling Orogenic Belt[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1~283 (in Chinese).
- Zhao Yuhang. 2020. Study on Zircon Geochronology and Metamorphism of Qinling Complex in Weiziping Area, Qinling Orogenic Belt[D]. Xi'an: Northwest University (in Chinese).
- Zhao Y H, Gou L L, Long X P, *et al.* 2020. Zircon U-Pb geochronology and clockwise *p-t* evolution of garnet-bearing migmatites from the Qinling complex in the Weiziping area of the Qinling Orogen, Central China: Implications for thermal relaxation after crustal thickening[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 195(21): 104354.
- Zhou Dingwu. 1994. Geological Features of Southwest Margin of Erdos Basin and its Relationships with Qinling Orogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~178 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈丹玲, 刘 良. 2011. 北秦岭榴辉岩及相关岩石年代学的进一步确定及其对板片俯冲属性的约束[J]. 地学前缘, 18(2): 158~169.
- 陈丹玲, 刘 良, 孙 勇, 等. 2004. 北秦岭松树沟高压基性麻粒岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. 科学通报, 49(18): 1 901~1 908.
- 陈丹玲, 任云飞, 宫相宽, 等. 2015. 北秦岭松树沟榴辉岩的确定及其地质意义[J]. 岩石学报, 31(7): 1 841~1 854.
- 陈隽璐, 陈有仓, 李海平, 等. 2002. 祁连与北秦岭结合部位陇山岩群与秦岭岩群对比讨论[J]. 陕西地质, 20(2): 39~49.
- 丁仁平, 裴先治, 李 勇, 等. 2009. 西秦岭北缘新阳-元龙韧性剪切带中花岗质糜棱岩黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及地质意义[J]. 地质学报, 83(11): 1 624~1 632.
- 董俊刚. 2004. 甘肃天水地区的陇山(岩)群与秦岭(岩)群的对比[D]. 西安: 长安大学.
- 封 强, 李玉婷, 翟明国, 等. 2023. 陇山杂岩早古生代变质事件的厘定及其地质意义[J]. 岩石学报, 39(3): 661~718.
- 付 东. 2020. 北祁连造山带东段早古生代增生造山作用与地壳演化[D]. 北京: 中国地质大学.
- 郭 祺, 毛小红, 张建新, 等. 2022. 西秦岭北缘秦岭杂岩麻粒岩相变质作用: 来自相平衡模拟和独居石原位 U-Pb 定年的制约[J]. 岩石学报, 38(11): 3 259~3 283.
- 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 等. 2006. 北祁连东端陇山岩群斜长角闪岩锆石 LA-ICP-MS 测年及其地质意义[J]. 地质学报, 80(11): 1 668~1 675.
- 何世平, 王洪亮, 徐学义, 等. 2007a. 北祁连东段红土堡基性火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 地球科学进展, 22(2): 143~151.
- 何世平, 王洪亮, 徐学义, 等. 2007b. 北祁连东段红土堡基性火山岩和陈家河酸性火山岩地球化学特征及构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 26(4): 295~309.
- 何艳红, 孙 勇, 陈 亮, 等. 2005. 陇山杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 21(1): 125~134.
- 贾明辉, 曹花花, 李三忠, 等. 2021. 天水地区陇山群斜长角闪岩的年代学及其地质意义[J]. 世界地质, 40(2): 298~306.
- 姜春发. 2002. 中央造山带几个重要地质问题及其研究进展(代序)[J]. 地质通报, 21(8): 453~455.
- 李三忠, 李 涛, 赵淑娟, 等. 2017. 东亚原特提斯洋(IV): 北界西段早古生代构造变形[J]. 岩石学报, 33(6): 1 615~1 632.
- 李玉婷, 卢俊生, 孔 旭, 等. 2023. 陇山杂岩变沉积岩的沉积时代、物源及构造意义: 来自地球化学、碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素的证据[J]. 岩石学报, 39(8): 2 445~2 469.
- 梁 爽, 张 谦, 刘嘉惠, 等. 2021. 西峡-内乡地区秦岭岩群变质独居石和锆石的 U-Pb 定年[J]. 岩石学报, 37(12): 3 797~3 822.
- 刘 良, 廖小莹, 张成立, 等. 2013. 北秦岭高压-超高压岩石的多期变质时代及其地质意义[J]. 岩石学报, 29(5): 1 634~1 656.
- 刘学锋, 苟龙龙, 田智博, 等. 2024. 喂子坪秦岭南缘麻粒岩相变沉积岩的变质作用 $p-t$ 演化及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 43(2): 274~303.
- 毛小红, 张建新, 于胜尧, 等. 2017. 西秦岭-祁连山北部早古生代麻粒岩相变质作用及深熔作用: 锆石和独居石 U-Pb 年代学的制约[J]. 中国科学: 地球科学, 47(5): 601~616.
- 毛小红, 张建新, 于胜尧, 等. 2018. 西秦岭北缘秦岭杂岩变质作用: 副片麻岩锆石和相平衡模拟及其地质意义[J]. 地球科学, 43(1): 278~295.
- 毛舒, 何艳红, 陈 亮, 等. 2017. 秦岭-祁连结合部位早古生代埃达克岩的发现及其造山作用意义[J]. 地质学报, 91(12): 2 679~2 696.
- 裴先治, 丁仁平, 李佐臣, 等. 2009. 西秦岭北缘早古生代天水-武山构造带及其构造演化[J]. 地质学报, 83(11): 1 547~1 564.
- 裴先治, 丁仁平, 张国伟, 等. 2007. 西秦岭天水地区百花基性岩杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 中国科学(D辑), 37(增 1): 224~234.
- 彭银彪, 于胜尧, 张建新, 等. 2017. 北祁连地区早古生代弧岩浆作用及变质作用事件: 以门源-柯柯里地区为例[J]. 岩石学报, 33(12): 3 925~3 941.
- 宋志高. 1995. 祁连山东段的元古宙陇山群[J]. 地球学报, 16(2): 204~210.
- 宋志高, 贾群子, 张治洮, 等. 1991. 北秦岭-北祁连(天水-宝鸡)间早古生代火山岩系及其构造连接关系的研究[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 34: 1~82.
- 唐 源, 陈丹玲, 任云飞, 等. 2022. 北秦岭造山带西段早古生代榴辉岩相变质岩石的发现及其地质意义[J]. 岩石学报, 38(3): 585~598.
- 万渝生, 刘敦一, 王世炎, 等. 2009. 登封地区早寒武纪地壳演化-地球化学和锆石 SHRIMP U-Pb 年代学制约[J]. 地质学报, 83(7): 982~999.
- 王国栋, 王 浩, 陈泓旭, 等. 2012. 华北中部造山带南缘华山地区太华变质杂岩中锆石 U-Pb 定年[J]. 地质学报, 86(9): 1 541~

1 551.

王建其, 柳小明. 2016. X 射线荧光光谱法分析不同类型岩石中 10 种主量元素的测试能力验证[J]. 岩矿测试, 35(2): 145~151.

王 雪. 2017. 华北克拉通南缘早前寒武纪岩浆活动和地壳生长 [D]. 北京: 中国科学院大学.

王银川, 裴先治, 李佐臣, 等. 2012. 祁连造山带东端张家川地区长宁驿中元古代花岗岩片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质通报, 31(10): 1 576~1 587.

吴茂炳, 傅碧宏, 刘春燕. 2000. 甘肃东部陇山群中斜长角闪岩的形成时代和构造背景[J]. 地质地球化学, 28(2): 45~50.

吴茂炳, 郭彦如, 刘春燕, 等. 2002. 甘肃东部陇山群的 Sm-Nd 年龄及其构造意义[J]. 地质论评, 48(S1): 59~63.

肖序常, 陈国铭, 朱志直. 1978. 祁连山古蛇绿岩带的地质构造意义 [J]. 地质学报, 52(4): 281~295, 338.

徐可心. 2018. 秦祁结合部位前寒武纪年代学和地球化学研究: 来自陇山岩群的证据[D]. 西安: 西北大学.

徐可心, 何艳红, 陈 亮, 等. 2018. 秦-祁构造结合部位陇山岩群中碎屑锆石年代学研究及其地质意义[J]. 地质科学, 53(3): 1 054~1 074.

徐学义, 何世平, 王洪亮, 等. 2008. 早古生代以来秦岭-北祁连结合部位构造格局的地层及构造岩浆事件约束[J]. 西北地质, 41(1):

1~21.

许志琴, 崔军文. 1996. 大陆山链变形构造动力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1~246.

许志琴, 李思田, 张建新, 等. 2011. 塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J]. 岩石学报, 27(1): 1~22.

许志琴, 徐惠芬, 张建新, 等. 1994. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学[J]. 地质学报, (1): 1~15.

许志琴, 杨经绥, 李化启, 等. 2012. 中国大陆印支碰撞造山系及其造山机制[J]. 岩石学报, 28(6): 1 697~1 709.

杨经绥, 许志琴, 马昌前, 等. 2010. 复合造山作用和中国中央造山带的科学问题[J]. 中国地质, 37(1): 1~11.

张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 1995. 秦岭造山带的结构构造[J]. 中国科学(B 辑), 38: 994~1 003.

张建新, 于胜尧, 孟繁聪. 2011. 北秦岭造山带的早古生代多期变质作用[J]. 岩石学报, 27(4): 1 177~1 190.

张维吉, 孟宪荷, 胡仁民, 等. 1994. 祁连-北秦岭造山带接合部位构造特征与造山过程[J]. 西安: 西北大学出版社, 1~283.

赵宇航. 2020. 秦岭造山带喂子坪地区秦岭杂岩锆石年代学和变质作用研究[D]. 西安: 西北大学.

周鼎武. 1994. 鄂尔多斯盆地西南缘地质特征及其与秦岭造山带的关系[M]. 北京: 地质出版社, 1~178.