



引文格式: 高一杰, 辜平阳, 张江伟, 等. 中国西北地区近十年中高级变质作用研究进展[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 19–41. DOI: 10.12401/j.nwg.2025086

Citation: GAO Yijie, GU Pingyang, ZHANG Jiangwei, et al. Progresses in the Study of Metamorphism of Northwest China in the Past Decade[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 19–41. DOI: 10.12401/j.nwg.2025086

中国西北地区近十年中高级变质作用研究进展

高一杰¹, 辜平阳¹, 张江伟¹, 孔会磊¹, 齐琳琳²

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710119; 2. 长庆油田分公司页岩油开发分公司悦乐中心站, 甘肃 庆阳 745000)

摘要: 变质作用研究在了解深部地壳组成和演化、恢复地壳热演化历史、指导找矿等方面发挥举足轻重的作用。中国西北地区既有古老的大陆地块, 也分布有众多显生宙造山带, 它们均是各类变质岩广泛出露的场所, 更是中国变质作用研究的重点区域。笔者综述了近十年来西北地区超高压(UHP)变质、超高温(UHT)变质、陆壳部分熔融、俯冲带流体活动和变质矿产找矿等方面的进展。在 UHP 变质作用方面, 通过对柯石英为代表的 UHP 变质证据的新发现, 不仅进一步夯实了早期确立的 UHP 变质带中岩石发生深俯冲的事实, 而且新确立了东昆仑 UHP 变质带。在 UHT 变质作用方面, 阿尔泰和阿尔金造山带 UHT 变质作用的 P - T 轨迹、变质时代和成因方面研究取得一系列进展, 并在东昆仑、柴西缘、秦岭等地区识别出新的 UHT 变质岩出露点。部分熔融作用研究是过去十年造山带变质作用研究的重点, 主要集中在熔融作用的产物及特征、发生的构造背景和机制等方面。俯冲带流体活动研究聚焦于流体识别和流体成分特征厘定, 为进一步研究俯冲带物质循环提供基础。在矿产找矿方面, 取得了以变质成因金红石矿和晶质石墨矿为代表的重要找矿新发现。

关键词: 西北地区; 超高压变质; 超高温变质; 部分熔融; 俯冲带流体; 变质矿产

中图分类号: P56; P588.34

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)03-0019-23

Progresses in the Study of Metamorphism of Northwest China in the Past Decade

GAO Yijie¹, GU Pingyang¹, ZHANG Jiangwei¹, KONG Huilei¹, QI Linlin²

(1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits of Ministry of Natural Resources, Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center of Geoscience Innovation, Xi'an 710119, Shannxi, China; 2. Yuele Centre Station, Shale Oil Development Branch of Changqing Oil field Company, Qingyang 745000, Gansu, China)

Abstract: The study of metamorphism plays an important role in deciphering the composition and evolution of the deep crust, restoring the thermal evolution history of the crust, and guiding the prospecting. Both ancient

收稿日期: 2023-06-24; 修回日期: 2025-05-21; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBQN-0344、2023-JC-ZD-14), 国家自然科学基金(42402063), 中国地质调查局项目(DD20230032、DD20240115)联合资助。

作者简介: 高一杰(1989-), 男, 博士, 高级工程师, 从事变质岩石学研究和矿产地质调查。E-mail: gaoyj@mail.cgs.gov.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

continental blocks and Phanerozoic orogenic belts in northwest China are the key areas for the study of metamorphism in China. This paper reviews ultra-high pressure (UHP) metamorphism, ultra-high temperature (UHT) metamorphism, crustal anatexis, fluid activity in subduction zone and metamorphic mineral prospecting in northwest China in the past decade. In terms of UHP metamorphism, based on the new discoveries of evidences of UHP metamorphism represented by coesite, the fact of deep subduction of rocks has been further strengthened for previously established UHP metamorphic belts, and the East Kunlun UHP metamorphic belt was firstly established. In terms of UHT metamorphism, progresses in P - T paths, metamorphic ages and genesis of UHT metamorphism have been achieved in the Altai and Altyn orogen, and new outcrops of UHT metamorphic rocks have been identified in the East Kunlun, Qinling orogens and western Qaidam. The study of partial melting has been the focus of the study of orogenic metamorphism in the past decade, mainly including the products of partial melting, the tectonic setting and mechanism of melting. Studies on fluid activities in subduction zones focus on fluid identification and composition characterization, which provide a basis for further study of mass transfer in subduction zones. New discoveries of metamorphic ore deposits, represented by rutile and crystalline graphite, have been made.

Keywords: northwest China; UHP metamorphism; UHT metamorphism; crustal anatexis; subduction zone fluid activity; metamorphic ore deposit

变质作用是指在地下一定深度,由于岩石所处的环境温度、压力和流体成分发生变化,岩石中的矿物组合、结构、构造发生改变的情形,因而变质作用研究在了解深部地壳组成和演化、恢复地壳热演化历史、指导找矿等方面发挥重要作用。中国西北地区中高级变质岩广泛分布于古老的大陆地块和显生宙造山

带中,如塔里木克拉通、柴达木陆块、全吉地块、秦岭造山带、祁连造山带、昆仑造山带、天山造山带、阿尔泰造山带等(图1)。在充分调研分析前人研究成果的基础上,笔者从UHP变质作用、UHT变质作用、陆壳部分熔融作用、俯冲带流体活动、变成矿产找矿等角度系统梳理总结中高级变质作用研究进展。在此基

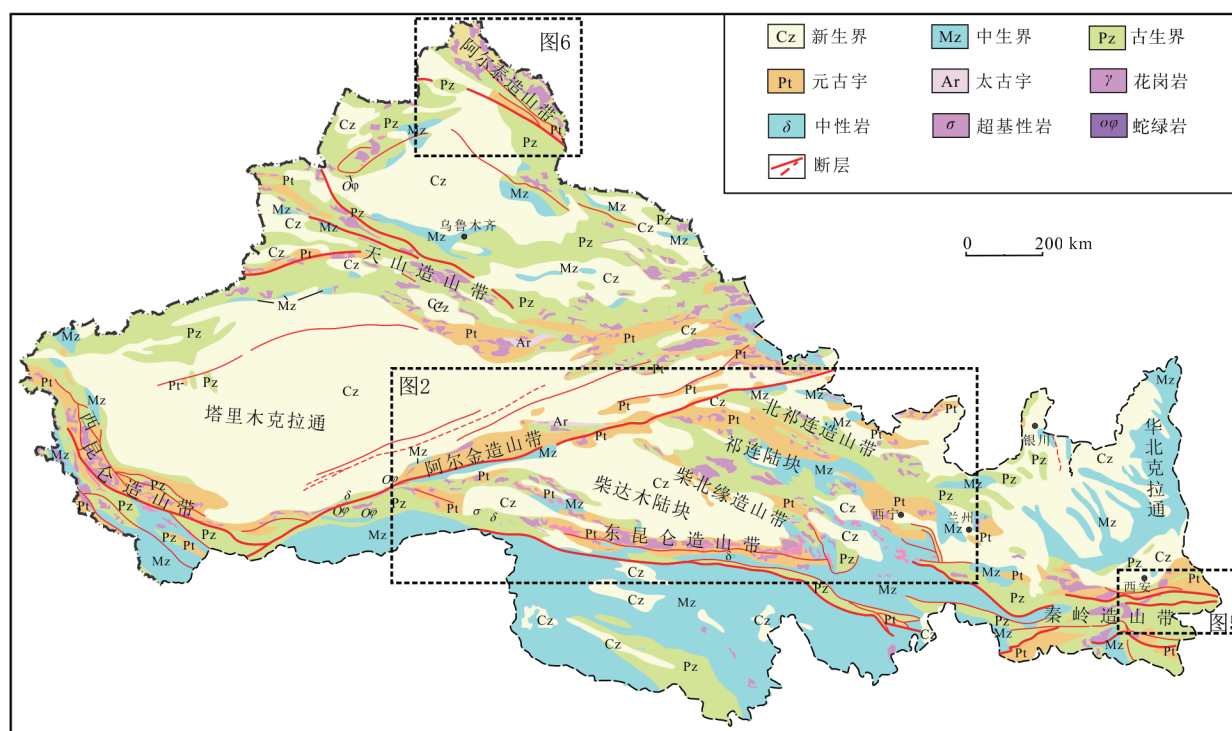


图1 中国西北地区地质简图(据张照伟等, 2022 修改)

Fig. 1 Geological sketch map of northwest China

础上,提出一些新的科学问题,以期为西北地区中高级变质岩的调查和研究提供参考。

1 UHP变质作用研究进展

UHP变质岩形成于俯冲带深部,以发育柯石英和金刚石等矿物为特征,它们在约2.6~2.7 GPa以上的压力下稳定,代表岩石俯冲到80~90 km以上的地下深度(孙勇等,2006)。UHP变质岩的研究不仅给板块构造理论带来了一场革命,而且极大的扩大了变质作用研究范畴,包括UHP矿物学、深俯冲和折返机制、俯冲带熔流体活动等。在中国西北地区,早期的研究主要聚焦于秦岭、柴北缘、阿尔金和西南天山造山带UHP变质作用

的确立。近十年来,基于以柯石英为代表的UHP变质证据的新发现(表1),国内学者不仅进一步夯实了早期确立的UHP变质带中岩石发生深俯冲的事实,而且新确立了东昆仑UHP变质带。笔者将重点围绕东昆仑UHP变质带确立、超深俯冲、柯石英及其他一些UHP指示矿物的新发现和新进展进行简单综述。

1.1 东昆仑 HP-UHP 变质带的确立

东昆仑造山带处于中央造山带西段、青藏高原北部,在大地构造上北邻柴达木盆地,南接松潘-甘孜-巴颜喀拉地块,EW向延伸超过1 200 km,分别被温泉断裂和阿尔金断裂截切,是一条横亘在青藏高原内部的造山带(图2)。Meng et al.(2013)首次在东昆仑造山带东部温泉地区报道了榴辉岩的存在,之后沿着昆

表1 中国西北地区近十年新发现的UHP和UHT变质岩

Tab. 1 The newly discovered UHP and UHT metamorphic rocks in northwest China in the last decade

位置	所处造山带	岩石名称	特征性矿物或矿物组合	峰期温压条件	参考文献
UHP变质岩					
克合特	东昆仑	榴辉岩	柯石英	2.9~3.0 GPa/ 610~675 °C	Bi et al., 2018, 2020; Song et al., 2018
		变泥质岩	柯石英	> 2.8 GPa/ 685±41 °C*	
江尕勒萨依	南阿尔金	榴辉岩	斯石英副象	> 8~9 GPa/ 800~1 000 °C	Liu et al., 2018
克其克江尕勒萨依	南阿尔金	榴辉岩	柯石英	> 2.8 GPa/728~880 °C	Gai et al., 2017
丹凤大寺沟	北秦岭	斜长角闪岩	柯石英	> 2.8 GPa	宫相宽等, 2016
锡铁山	柴北缘	角闪岩	柯石英	> 2.8 GPa	Liu et al., 2012
野马滩	柴北缘	榴辉岩	绿辉石定向出溶多硅白云母	> 6 GPa/900 °C	Han et al., 2015
木扎尔特	西南天山	榴辉岩及其围岩片岩	柯石英	2.8~3.2 GPa/ 480~590 °C	Lü et al., 2019a, 2019b
木扎尔特	西南天山	超基性岩	钛粒硅镁石和钛斜硅镁石	3.0~3.7 GPa/ 510~540 °C*	Shen et al., 2015
UHT变质岩					
喀拉苏	阿尔泰	泥质麻粒岩	石榴子石-斜方辉石(高Al ₂ O ₃ 含量)-堇青石	ca.8 kbar/970 °C*	全来喜等, 2013; Tong et al., 2014b;
金水口	东昆仑	基性麻粒岩	无角闪石、单斜辉石中发育一组斜方辉石的出溶片晶	4.6~8.9 kbar/ 867~1 079 °C	何凡等, 2020
			单斜辉石+斜方辉石+角闪石+斜长石	4~7 kbar/ ca. 980 °C*	
清水泉	东昆仑	泥质和基性麻粒岩	缺乏角闪石、单斜辉石中发育斜方辉石出溶体、石榴子石中出溶定向排列的金红石棒状体	9~12 kbar/ ca. 900~950 °C*	Bi et al., 2021
花土沟	柴西缘	Mg-Al麻粒岩	石榴子石+斜方辉石+石英+堇青石+黑云母+铝直闪石±夕线石±斜长石	> ca. 9 kbar/ > ca. 915 °C*	Teng et al., 2020
		基性麻粒岩	石榴子石+单斜辉石+石英或石榴子石+斜方辉石+石英	> ca. 14 kbar/ > ca. 910 °C*	

注: *代表结合热力学模拟计算的温压条件。

中断裂陆陆续续有榴辉岩的报道, 主要出现在温泉、克合特-浪木日上游、诺木洪、大格勒沟和夏日哈木-苏海图等地区(图 2; Meng et al., 2013; 祁晓鹏等, 2016; Du et al., 2017; Song et al., 2018; Bi et al., 2018; Xiong et

al., 2024; Zhou et al., 2024), 构成一条长达 500 km 的 HP-UHP 榴辉岩带。榴辉岩/榴闪岩多以团块或透镜体的形式赋存于围岩中, 围岩主要为金水口群黑云/二云石英片岩、黑云斜长片麻岩、长英质片麻岩等。

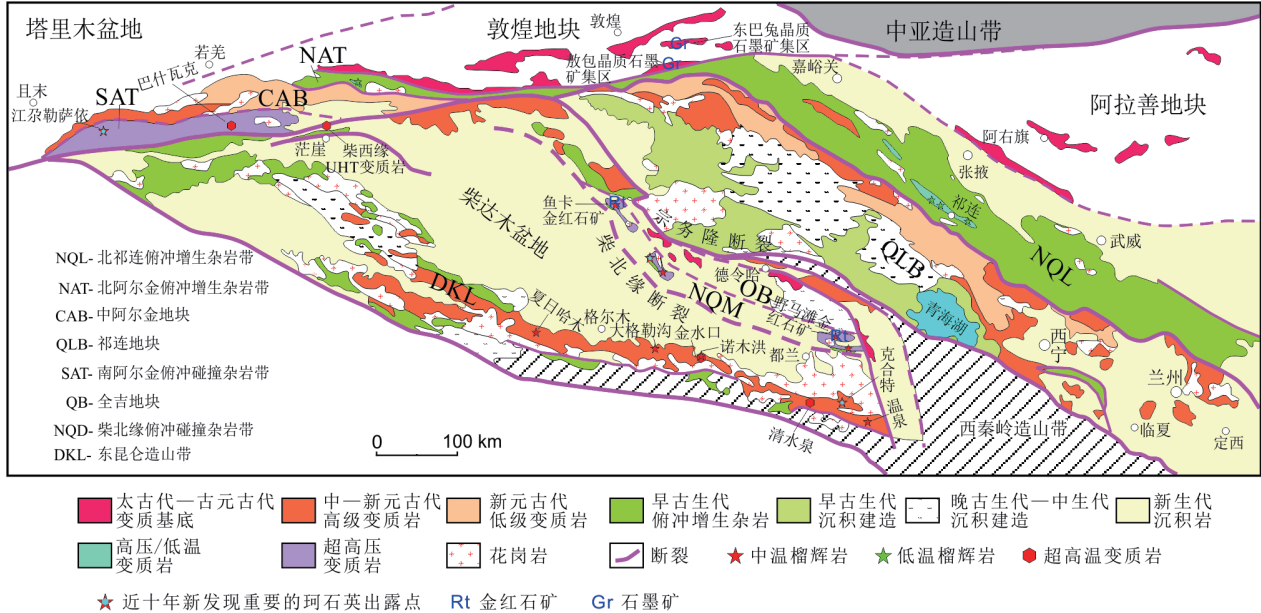


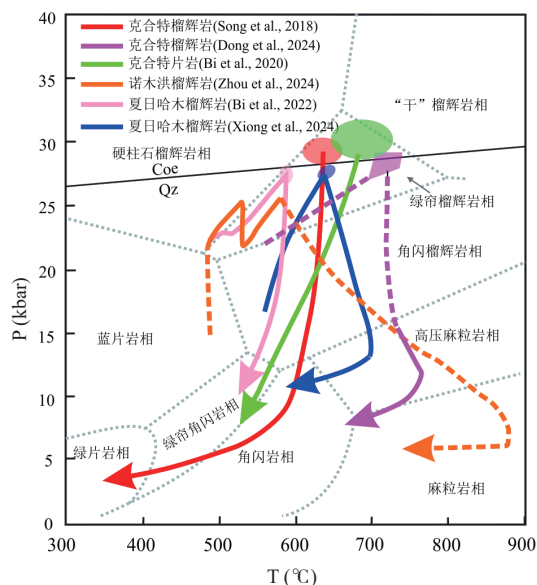
图 2 青藏高原东北缘地质简图(修改自 Yu et al., 2019a)

Fig. 2 Geological sketch map of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau

自东昆仑 HP-UHP 变质带确立以来, 前人研究主要集中在变质时代的限定和变质 $P-T$ 轨迹恢复上。在温泉地区的细粒榴辉岩锆石原岩年龄为 934 Ma (Meng et al., 2013), 夏日哈木地区榴辉岩原岩年龄为 828 Ma (Xiong et al., 2024), 而诺木洪地区榴辉岩锆石原岩年龄为 $(464 \pm 8 \text{ Ma})$; Zhou et al., 2024), 表明东昆仑榴辉岩原岩时代复杂, 形成于 Rodinia 超大陆汇聚-裂解和原特提斯洋俯冲各个阶段。Meng et al. (2013) 在温泉地区榴辉岩变质锆石域内识别出石榴子石、绿辉石和金红石; Song et al. (2018)、Bi et al. (2018)、Xiong et al. (2024) 和 Dong et al. (2024) 在克合特-浪木日上游和夏日哈木地区榴辉岩和片岩中识别出石榴子石、绿辉石、柯石英和金红石包裹体, 这些包裹体支持锆石生长于 HP-UHP 变质条件下, 对应的年龄为 425.5~443 Ma。Du et al. (2017) 和 Zhou et al. (2024) 利用 SHRIMP 分别对大格勒地区和诺木洪地区榴辉岩锆石定年得到 $(433 \pm 5.1) \text{ Ma}$ 和 $(419 \pm 4) \text{ Ma}$ 的变质年龄。这些年龄数据表明了东昆仑 HP-UHP 变质年龄介于 419~443 Ma。角闪岩相退变质年龄为 ca. 410~413 Ma, 其主要记录在围岩片岩锆石和榴辉岩榍石中。

由于东昆仑地区榴辉岩的峰期矿物组合简单, 缺

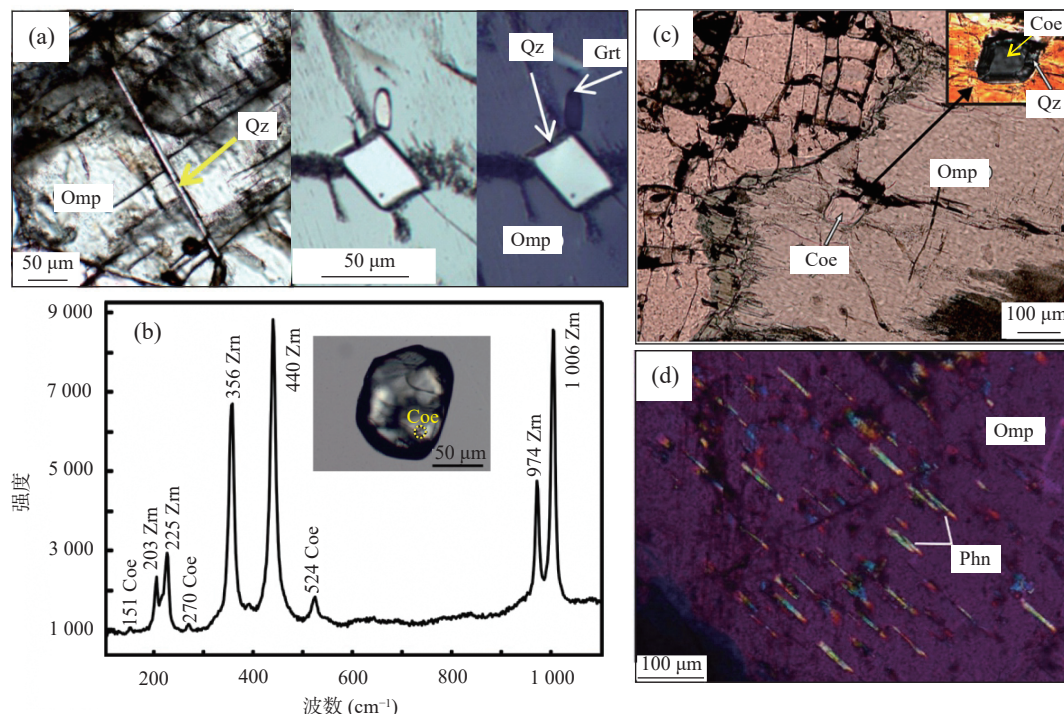
乏多硅白云母, 早期温压条件的限定主要借助石榴子石-单斜辉石 Fe-Mg 交换温度计和单斜辉石中硬玉组分压力计, 得出的榴辉岩峰期变质条件为 $590 \sim 650 \text{ }^{\circ}\text{C}$ / $> 1.6 \text{ GPa}$ (Meng et al., 2013)。Song et al. (2018) 在克合特地区发现含有多硅白云母的榴辉岩, 利用石榴子石-绿辉石-多硅白云母地质温压计, 获得岩石的峰期变质条件为 $610 \sim 675 \text{ }^{\circ}\text{C}$ / $2.9 \sim 3.0 \text{ GPa}$, 峰期之后岩石经历了近等温降压的折返过程(图 3)。通过结合岩相学观察、相平衡模拟和金红石 Zr 含量温度计, Dong et al. (2024) 获得的压力峰期的温压条件为 $700 \sim 740 \text{ }^{\circ}\text{C}$ / $> 2.7 \sim 2.9 \text{ GPa}$ 。更为重要的是, 克合特地区榴辉岩的石榴子石、榴辉岩和围岩片岩的锆石中分别发现的柯石英假象和柯石英包裹体 (Song et al., 2018; Bi et al., 2018, 2020; Dong et al., 2024), 毫无疑问地证实了该地区榴辉岩和围岩一起经历深俯冲过程并发生 UHP 变质作用。夏日哈木地区榴辉岩峰期变质条件为 $570 \sim 650 \text{ }^{\circ}\text{C}$ / $2.7 \sim 2.8 \text{ GPa}$ (图 3; Bi et al., 2022; Xiong et al., 2024), 峰期后经历了等温降压 (Bi et al., 2022) 或升温降压过程 (Xiong et al., 2024)。诺木洪地区榴辉岩记录了折返过程中显著的加热过程, 从压力峰期的 $570 \text{ }^{\circ}\text{C}$ / ca. 26 kbar 到 ca. $860 \sim 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ / 6 kbar, 反映了中压麻粒

图3 东昆仑 HP-UHP 变质岩 P - T 轨迹Fig. 3 P - T paths of HP-UHP metamorphic rocks in the East Kunlun

岩相叠加于早期榴辉岩相变质作用(图 3; Zhou et al., 2024)。

1.2 陆壳超深俯冲研究进展

陆壳超深俯冲是指陆壳物质俯冲到斯石英的稳定域的地幔深度。斯石英作为 α -石英的高压同质多相变体, 其形成压力为 $>8\sim 9$ GPa ($800\sim 1\,000$ °C), 对应的深度为 $>250\sim 300$ km。Liu et al. (2007) 在南阿尔金 UHP 变质带中江孜勒萨依南部, 发现了含先存斯石英出溶蓝晶石+尖晶石的泥质片麻岩, 依据斯石英中 Al 和 Fe 的溶解度, 估算该片麻岩最小的变质压力为 12 GPa。最近, 又在南阿尔金 UHP 变质带中江孜勒萨依地区的榴辉岩中, 首次报道了石榴子石和绿辉石中的长柱状/针状的多晶石英集合体和方形/平行四边形的单相石英包裹体(图 4a; Liu et al., 2018), 依据形态和成分分析, 判断这些石英包裹体应是先存四方长柱状斯石英副象不同截切面的晶体形态。根据实验岩石学确定的斯石英稳定域, 该榴辉岩在 $800\sim 1\,000$ °C 时的最小峰期压力为 $8\sim 9$ GPa (Liu et al., 2018)。斯石英副象的发现进一步证实了南阿尔金陆壳岩石发生了超深俯冲和折返过程。刘良等 (2019) 针对 SiO_2 饱和体系中超硅石榴子石最小的稳定压力条件开展



a. 南阿尔金 UHP 变质带江孜勒萨依地区榴辉岩中的斯石英副相 (Liu et al., 2018); b. 秦岭造山带丹凤县斜长角闪岩锆石中的柯石英包裹体 (官相宽等, 2016); c. 南阿尔金克其克江孜勒萨依地区榴辉岩中赋存于绿辉石中的柯石英包裹体 (Gai et al., 2017); d. 柴北缘 UHP 变质带野马滩榴辉岩中的绿辉石出溶定向分布的多硅白云母 (Han et al., 2015); Grt. 石榴子石; Omp. 绿辉石; Qz. 石英; Coe. 柯石英; Phn. 多硅白云母; Zm. 锆石

图4 西北地区新发现的 UHP 变质岩的诊断性矿物学证据

Fig. 4 Diagnostic mineralogical evidences of newly discovered UHP metamorphism rocks in Northwest China

实验岩石学研究,并结合前人实验岩石学研究资料,明确 SiO_2 饱和体系中石榴子石超硅的最小的稳定压力为 $\geq 9 \sim 10 \text{ GPa}$ 的斯石英稳定域。基于此,重新厘定了南阿尔金英格利萨依石榴辉石岩和北秦岭松树沟长英质片麻岩的峰期变质压力为 $9 \sim 10 \text{ GPa}$ 。

1.3 柯石英的新发现

柯石英是判定岩石发生 UHP 变质作用最重要的指示矿物。在同一 HP-UHP 变质带不同地区或者在同一地区不同岩石类型中寻找柯石英,对于确认俯冲事实和厘清 UHP 变质带的空间延伸和俯冲物质规模十分重要。

秦岭造山带最早的 UHP 变质记录来自秦岭群榴辉岩中的柯石英假象(胡能高等, 1994),然而并无

相关的拉曼光谱证据。之后,在该造山带中发现的 UHP 变质的证据包括官坡榴辉岩及其围岩片麻岩和清油河地区的斜长角闪岩锆石中微粒金刚石(杨经绥等, 2002; Wang et al., 2014a)、松树沟长英质高压麻粒岩石榴子石中大量石英+金红石+磷灰石棒状出溶体(刘良等, 2019)。官相宽等(2016)首次在丹凤县东北部秦岭群斜长角闪岩的锆石中发现了柯石英、石榴子石、绿辉石和金红石等多种榴辉岩相矿物包裹体(图 5)。其中,柯石英具有典型的 521 cm^{-1} 主峰及 270 cm^{-1} 和 151 cm^{-1} 次峰的拉曼光谱组合(图 4b)。柯石英、石榴子石和绿辉石显微包裹体的发现证明,北秦岭丹凤斜长角闪岩应是退变的 UHP 榴辉岩,其变质峰期压力 $> 2.8 \text{ GPa}$ 。

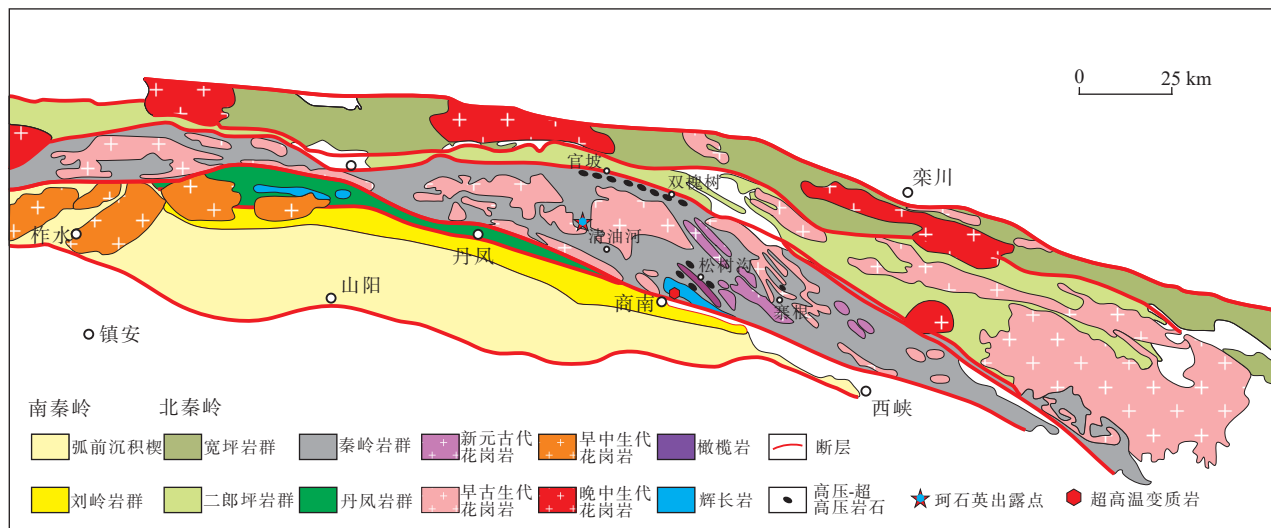


图5 北秦岭构造带地质简图(修改自陈丹玲等, 2019)

Fig. 5 Geological sketch map of the North Qinling orogen

阿尔金造山带 UHP 变质作用的认定主要是通过柯石英假象和显微出溶结构(Zhang et al., 2002; Liu et al., 2002, 2005, 2007), 缺乏 UHP 变质指示矿物柯石英。Gai et al.(2017)在南阿尔金地区克其克江尕勒萨依的榴辉岩中(图 2), 首次报道了柯石英呈包裹体赋存于绿辉石中, 其边部已相变为多晶石英, 并被放射状裂纹围绕(图 4c)。相较于石英, 柯石英以高突起和较亮的 BSE 图像为特征。拉曼光谱分析显示, 柯石英包裹体核部具有显著的 524 cm^{-1} 主峰, 以及 151 cm^{-1} 、 178 cm^{-1} 和 271 cm^{-1} 等次峰。利用传统地质温压计, 结合柯石英包裹体的发现, 确定该榴辉岩的峰期变质条件为 $728 \sim 880 \text{ }^{\circ}\text{C}/\geq 2.8 \text{ GPa}$ 。克其克江尕勒萨依榴辉岩中柯石英的发现为南阿尔金 UHP 变质作用提供了有

力证据。

柴北缘造山带是一个研究程度较高的 HP-UHP 变质带。在 21 世纪前十年, 都兰地体(Yang et al., 2001; 王佳兴等, 2020)、鱼卡地体(Zhang et al., 2009; 林成贵等, 2017)和绿梁山地体(Song et al., 2005)中均发现了明确的 UHP 变质证据, 而锡铁山地体中的 UHP 变质证据不是很可靠, 因其主要依据柯石英假象和传统地质温压计确定的(Zhang et al., 2008; Zhang et al., 2011)。Liu et al.(2012)首次在锡铁山地体角闪岩中的变质锆石中报道了柯石英包裹体(图 2), 其在拉曼光谱图上具有显著的 122 cm^{-1} 主峰以及 152 和 525 cm^{-1} 次峰, 柯石英的发现为该地体的 UHP 变质作用提供了明确的证据。

西南天山作为少数仅存的大洋型 HP-UHP 变质带之一,受到学界广泛关注。自 Lü et al.(2008)首次在榴辉岩相岩石中发现柯石英以来,不同学者又陆续在各种岩石类型中报道了柯石英包裹体(Tan et al., 2019),这些柯石英均发现于变质带东段的阿克萨依河-阿坦塔依河地区。近些年, Lü et al.(2019a, 2019b)在该变质带西段的木扎尔特地区的榴辉岩及其围岩片岩中均发现含柯石英,确凿地证明了西南天山 UHP 变质带的空间延伸规模巨大。

1.4 其他 UHP 变质的指示结构或矿物

Han et al.(2015)描述了柴北缘 UHP 变质带野马滩榴辉岩中的绿辉石定向出溶多硅白云母(图 4d),通过矿物学分析,这些未出溶之前的原始绿辉石中 K_2O 含量高达 1.16%。实验研究表明,这种绿辉石在高于 6 GPa(900 °C)的压力下形成,证明了野马滩榴辉岩俯冲深度至少可达 200 km。

在西南天山 HP-UHP 变质带西段木扎尔特地区的超基性岩中, Shen et al.(2015)报道了钛粒硅镁石和钛斜硅镁石,它们均被认为是 UHP 指示矿物。通过高压实验确定其稳定的 P - T 范围,进而获得该 UHP 蛇纹岩的峰期变质温压条件为 510~540 °C/3.0~3.7 GPa。

到目前为止,西北地区 UHP 变质岩发现于北秦岭、柴北缘、南阿尔金、东昆仑和西南天山造山带,依据其所属大地构造位置可以分为两种类型:①大陆型 UHP 变质岩,分布在特提斯构造域的北秦岭、柴北缘、南阿尔金和东昆仑造山带,整体位于中央造山带的西段,其形成与原特提斯造山系的大陆深俯冲作用有关,峰期变质温度为 600~>900 °C,峰期变质时代集中在 500~490 Ma(北秦岭和南阿尔金)和 440~420 Ma(东昆仑和柴北缘)。西北地区的大陆型 UHP 变质作用和中国东部的 UHP 变质作用(位于大别-苏鲁造山带)都与形成中国大陆基本构造格架有关。②大洋型 UHP 变质岩,其出现在古亚洲洋构造域的西南天山造山带,与南天山洋的北向俯冲有关,峰期变质温度为 500~600 °C,峰期变质时代为 320~310 Ma(西南天山)。西南天山 UHP 变质岩记录的是与中国北方大陆地壳增生有关的变质作用。这两种不同类型 UHP 变质作用反映了不同类型的造山作用。西南天山属于中亚造山带的重要组成部分,后者是全球最大的保持最好的显生宙巨型增生造山带,其发育由洋壳俯冲形成的以蓝片岩、低温榴辉岩为特征的(超)高压/低温变质带,陆块之间的碰撞为软碰撞,不发生大陆

深俯冲;北秦岭、柴北缘、南阿尔金和东昆仑属于大陆碰撞形成的碰撞型造山带,其以大陆发生硬碰撞加厚失去平衡,大陆地壳深俯冲进入地幔深度发生 UHP 变质作用为特征。

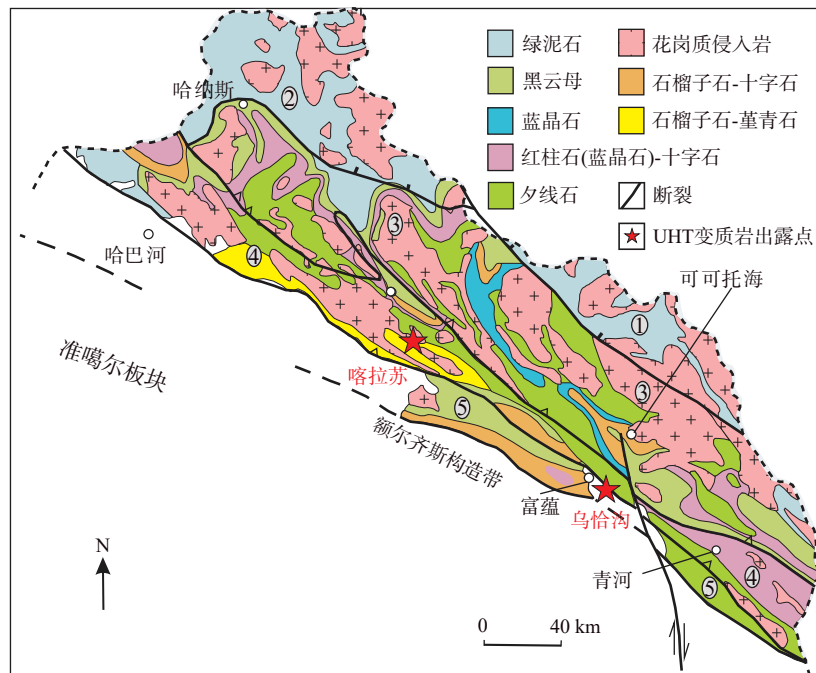
2 UHT 变质作用研究进展

UHT 变质作用作为麻粒岩相的一个亚相,通常是指在中下地壳压力条件下(7~13 kbar),峰期变质温度为 900~1 100 °C 的变质作用(Kelsey et al., 2015)。越来越多的研究表明,一些记录 UHT 变质的岩石也可形成在较低(<0.7 GPa)或较高(1.5~2.5 GPa)的压力条件下(Carswell et al., 1993; Kelsey and Hand, 2015),后者多于 UHP 变质岩相关联。UHT 变质作用通常是根据特征性矿物或矿物组合来识别,在富 Mg-Al 的变泥质岩中出现假蓝宝石+石英、斜方辉石+夕线石±石英、大隅石+石榴子石等;在镁铁质岩石中出现易变辉石。此外,富铝的斜方辉石、三元长石、高 Zr 金红石($Zr > 3\,700 \times 10^{-6}$)和高 Ti 锆石($Ti > 42 \times 10^{-6}$)和石英($Ti > 500 \times 10^{-6}$)也可作为识别 UHT 变质作用的标志。变质热力学模拟在识别 UHT 变质作用过程中也发挥了越来越显著的作用。近十年来,学者们不仅对西北地区早期发现的 UHT 变质岩开展了更加详细研究工作并取得新进展,还新发现了一批 UHT 变质岩的出露点(表 1)。笔者按照将 UHT 变质岩的分布区域介绍西北地区 UHT 作用的研究进展。

2.1 阿尔泰 UHT 变质作用

阿尔泰造山带是中亚造山带的重要组成部分,其自北向南可划分为 5 个构造单元(图 6)。前人报道的 UHT 泥质麻粒岩出露于富蕴县乌恰沟和阿勒泰东南喀拉苏附近,分别位于构造单元⑤和④。

乌恰沟 UHT 泥质麻粒岩由 Li et al.(2004)首次报道,其分布狭窄,呈不连续透镜状赋存于围岩(石榴)黑云斜长片麻岩中,主要由石榴子石、斜方辉石、夕线石、尖晶石、黑云母、斜长石和石英组成(图 7a)。该地区 UHT 麻粒岩保留 UHT 特征矿物组合高 Al 斜方辉石+夕线石+石英和低 Zn 尖晶石+石英组合。虽然通过岩石学研究结合传统地质温压计和/或变质相平衡模拟得到相似的峰期 UHT 温压条件,但是恢复的 P - T 轨迹存在争议。Yang et al.(2015b)获得顺时针 P - T 轨迹,对应的峰期温压条件为 920~1 010 °C/ >8 kbar; Li et al.(2014)获得逆时针 P - T 轨迹,高 Al 斜方



①. 晚泥盆纪—早石炭纪变质沉积岩；②. 新元古代—奥陶纪沉积-火山岩；③. 中阿尔泰山地体；④. 阿巴宫地体；⑤. 额尔齐斯地体

图6 中国阿尔泰山地区变质地质图(修改自 Tong et al. 2014a)

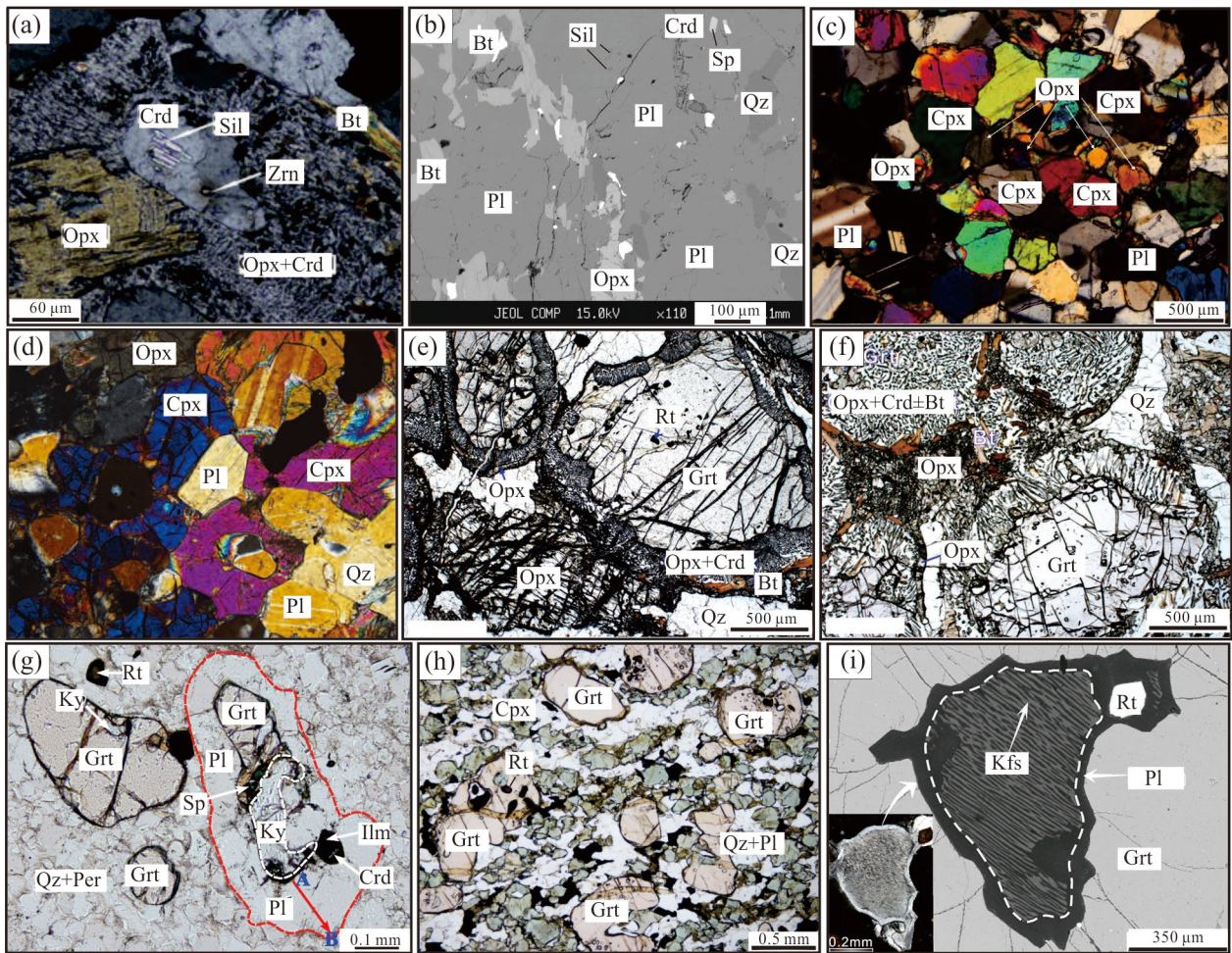
Fig. 6 Simplified metamorphic geological map of the Chinese Altai

辉石限定的峰期变质条件为 $>940\text{ }^{\circ}\text{C}/7.8\sim 10\text{ kbar}$ 。Liu et al. (2020a) 识别出 4 个变质阶段的矿物组合, 相平衡模拟得到逆时针的 $P-T$ 轨迹, 峰期 UHT 阶段以相对粗粒的含石榴子石-高 Al 斜方辉石-堇青石变斑晶的组合为代表, 形成温压条件为 $\text{ca. } 980\text{ }^{\circ}\text{C}/8.0\text{ kbar}$ 。UHT 泥质麻粒岩锆石均发育变质增生边, LA-ICP MS U-Pb 定年结果显示变质时代为 $(277\pm 2)\sim (288\pm 11)\text{ Ma}$ (Li et al., 2014; Liu et al., 2020a); 独居石 LA-ICPMS U-Th-Pb 定年结果为 $(287.9\pm 2.1)\text{ Ma}$ (Liu et al., 2020a), 这些年龄均表明乌恰沟 UHT 变质作用发生于早二叠世。

喀拉苏 UHT 泥质麻粒岩由全来喜等 (2013) 报道, 以构造透镜状产于中低压泥质麻粒岩中, 其主要矿物组合为石榴子石、斜方辉石、夕线石、堇青石、尖晶石、黑云母、斜长石、石英及少量钛铁矿和磁铁矿等副矿物, 未见钾长石 (图 7b)。岩石学分析识别出三期矿物组合: ①峰期前含斜方辉石 (低 Al_2O_3 含量)-尖晶石或尖晶石-夕线石的包裹体矿物组合; ②峰期粗粒含石榴子石-斜方辉石 (高 Al_2O_3 含量)-堇青石的 UHT 矿物组合; ③峰期后含斜方辉石 (中等 Al_2O_3 含量)-夕线石-黑云母的高温矿物组合 (全来喜等, 2013; Tong et al., 2014a, 2014b)。针对上述三期矿物组合, 利用传统地质温压计结合变质相平衡模拟恢复得到逆时针

$P-T$ 轨迹, 包括初始进变质加热过程和峰期后近等压冷却过程, 峰期变质温压条件为 $\text{ca. } 970\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ca. } 8\text{ kbar}$ (Tong et al., 2014b)。锆石 LA-ICP MS 和 SHRIMP U-Pb 定年显示变质时代为 $(271\pm 5)\sim (278\pm 2)\text{ Ma}$ (全来喜等, 2013; Tong et al., 2014a, 2014b), 表明喀拉苏 UHT 变质事件发生在早二叠世。

综上所述, 阿尔泰山造山带乌恰沟和喀拉苏两处 UHT 泥质麻粒岩年代学研究表明该造山带的 UHT 变质事件发生于早二叠纪, 该 UHT 变质事件与造山带中其他中低压高温麻粒岩和片麻岩的二叠纪变质时代一致, 共同反映了阿尔泰山造山带在二叠纪 ($260\sim 290\text{ Ma}$) 经历了一次重要的高级构造变质热事件 (刘兆等, 2015; Liu et al., 2020b, 2020c, 2021)。然而, 对于该 UHT 变质事件的构造背景认识还存在争议。Li et al. (2010) 和 Yang et al. (2015b) 认为 UHT 变质作用发生于西伯利亚板块与哈萨克斯坦-准噶尔板块之间的碰撞造山过程中; Li et al. (2014) 认为阿尔泰山造山带中 UHT 麻粒岩的逆时针 $P-T$ 路径, 可能与哈萨克斯坦-准噶尔板块与西伯利亚板块汇聚过程中俯冲拆离后沿额尔齐斯构造带左行走滑相关的伸展事件有关。其余学者多认为阿尔泰山造山带二叠纪的 HT-UHT 变质改造发生在与外部热源输入有关的造山后或板内



a. 阿尔泰造山带乌恰沟地区 UHT 麻粒岩 (Li et al., 2014); b. 阿尔泰造山带喀拉苏地区 UHT 泥质麻粒岩 (Tong et al., 2014b); c. 东昆仑造山带清水泉麻粒岩地体中的 UHT 基性麻粒岩 (Bi et al., 2021); d. 东昆仑造山带金水口地区 UHT 基性麻粒岩 (何凡等, 2020); e~f. 柴西缘地区 UHT Mg-Al 麻粒岩 (Teng et al., 2020); g. 南阿尔金巴什瓦克地区的 UHT 长英质麻粒岩; h. 南阿尔金巴什瓦克地区的 UHT 基性麻粒岩; i. 南阿尔金巴什瓦克地区 UHT 石榴子石岩中的条纹长石 (Dong et al., 2018, 2019, 2020); Grt. 石榴子石; Opx. 斜方辉石; Cpx. 单斜辉石; Crd. 堇青石; Bt. 黑云母; Pl. 斜长石; Kfs. 钾长石; Per. 条纹长石; Qz. 石英; Ky. 蓝晶石; Sil. 夕线石; Ilm. 钛铁矿; Sp. 尖晶石; Rt. 金红石

图7 西北地区代表性 UHT 变质岩岩相学特征

Fig. 7 Petrological characteristics of representative UHT metamorphic rocks in Northwest China

伸展背景, 极有可能与塔里木地幔柱活动引起的深源岩浆底侵有关 (全来喜等, 2013; Wang et al., 2014b; Yang et al., 2015a; 刘兆等, 2015; Liu et al., 2020a)。

2.2 东昆仑 UHT 变质作用

东昆仑造山带昆中缝合带清水泉等地的蛇绿混杂岩中夹杂有麻粒岩, 它们与斜长角闪岩、浅粒岩、变粒岩、大理岩、片麻岩等共同组成清水泉麻粒岩地体 (图 2)。早期的研究认为该地体麻粒岩相变质作用条件为 $760\sim 880\text{ }^{\circ}\text{C}/8.3\sim 12\text{ kbar}$, 为高温中高压麻粒岩相变质作用, SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $(508\pm 8)\text{ Ma}$ (李怀坤等, 2006)。Bi et al. (2021) 针对该地区基性

(Cpx-Opx 麻粒岩、Grt-Cpx 麻粒岩和 Grt-Opx 麻粒岩) 和泥质麻粒岩开展系统的岩石学、相平衡模拟和锆石年代学工作。详细的变质相平衡模拟计算表明金水口麻粒岩记录了顺时针的 $P-T$ 轨迹, 依次包括 3 个阶段: 压力峰期 (ca. $900\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}/13\text{ kbar}$)、温度峰期 (ca. $900\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}/9\sim 12\text{ kbar}$) 和最后的冷却阶段 ($800\sim 895\text{ }^{\circ}\text{C}/6\sim 10\text{ kbar}$)。此外, 基性麻粒岩中峰期矿物组合缺乏角闪石 (图 7c), 大部分单斜辉石中发育斜方辉石出溶体, 石榴子石中出溶定向排列的金红石棒状体等均支持麻粒岩经历了 UHT 变质作用。锆石 LA-ICP MS U-Pb 定年得到较宽的变质年龄范围 ($530\sim 465\text{ Ma}$),

对应的年龄峰值为 $ca. 503 \text{ Ma}$ 。该 UHT 麻粒岩记录了从俯冲早期弧收缩到俯冲板片回卷导致的活动大陆边缘伸展的完整过程,对限定原特提斯洋俯冲和碰撞过程具有重要意义。

东昆仑金水口地区识别出格林威尔期、奥陶纪和泥盆纪三期 UHT 变质作用(何凡等, 2020; Dong et al., 2024, 2026), 它们均以基性或泥质麻粒岩包体的形式赋存于早古生代 S 型石榴子石花岗岩中(图 2)。格林威尔期基性麻粒岩峰期矿物组合为单斜辉石+紫苏辉石+钙长石+石英+磁铁矿(图 7d), 岩石中缺少角闪石且单斜辉石中发育一组斜方辉石的出溶片晶均可指示变质温度大于 900°C 。利用二辉石温度计和单斜辉石-斜长石-石英地质压力计得到的变质温压条件为 $867\sim 1\,079^\circ\text{C}/4.6\sim 8.9 \text{ kbar}$, 属于低压 UHT 变质的温压范围。锆石 LA-ICP MS U-Pb 测年确定了峰期变质年龄为 $(995\pm 34) \text{ Ma}$, 并遭受了泥盆纪构造热事件的改造。该 UHT 麻粒岩可能形成于高地温梯度的岛弧环境, 是 Rodinia 超大陆汇聚过程中低压高温变质的产物, 可以与全球格林威尔期造山带进行对比(何凡等, 2020)。奥陶纪 UHT 变质作用记录在长英质和 Mg-Fe-Al 麻粒岩中, 利用相平衡模拟方法获得石榴子石中含尖晶石的包裹体组合与基质斜长石的核部记录的变质温压条件为 $930\sim 1\,050^\circ\text{C}/5\sim 8 \text{ kbar}$, 对应的时代为 $> 460 \text{ Ma}$ 。奥陶纪 UHT 变质作用与原特提斯洋俯冲晚期板片回卷引起上覆板块伸展和减薄有关(Dong et al., 2026)。东昆仑泥盆纪基性麻粒岩的矿物组合为单斜辉石+斜方辉石+斜长石+角闪石+黑云母+钛铁矿, 变质相平衡模拟获得峰期温压条件为 $ca. 980^\circ\text{C}/4\sim 7 \text{ kbar}$, 锆石学研究显示 UHT 变质时代为 $ca. 410\sim 400 \text{ Ma}$, 该期 UHT 变质作用可能与软流圈上涌和幔源岩浆侵位提供的热有关, 对应的深部动力学机制为造山带垮塌期的岩石圈拆沉(Dong et al., 2024)。

2.3 柴西缘 UHT 变质作用

Teng et al.(2020)首次在柴西缘花土沟附近识别出各种类型的 UHT 变质岩(图 2), 包括副片麻岩、长英质片麻岩、基性麻粒岩和 Mg-Al 麻粒岩, 基性麻粒岩和 Mg-Al 麻粒岩分别呈透镜状和层状位于副片麻岩。Mg-Al 麻粒岩主要矿物组合为石榴子石+斜方辉石+石英+堇青石+黑云母+铝直闪石±夕线石±斜长石(图 7e、图 7f); 基性麻粒岩主要矿物组合为石榴子石+单斜辉石+石英或石榴子石+斜方辉石+石英。详细的岩相学观察结合变质相平衡模拟表明, Mg-Al 麻粒岩记录的峰期温压条件为 $> ca. 915^\circ\text{C}/> ca. 9 \text{ kbar}$, 之后经历了

一个顺时针的退变质轨迹; 基性麻粒岩同样得到一个顺时针的退变质轨迹, 其峰期温压条件为 $> ca. 910^\circ\text{C}/> ca. 14 \text{ kbar}$ 。锆石 U-Pb 年龄显示 UHT 变质作用发生于 $540\sim 520 \text{ Ma}$ 。作者认为该地区 UHT 变质岩与熟知的泛非造山带 UHT 变质地体在时代和 $P-T$ 轨迹方面具有相似特征, 进而认为柴达木地块是泛非造山作用后从冈瓦纳大陆分裂出来的。

2.4 南阿尔金 UHT 变质作用

南阿尔金 UHT 变质作用记录在巴什瓦克地区(图 2), 以出露石榴橄榄岩、石榴辉石岩、基性麻粒岩、长英质麻粒岩和榴辉岩为典型特征。早期的研究识别出长英质麻粒岩峰期矿物组合为石榴子石+蓝晶石+条纹长石+石英, 石榴橄榄岩为石榴子石+单斜辉石+斜方辉石+橄榄石, 基性麻粒岩为石榴子石+单斜辉石+条纹长石+金红石+石英(Zhang et al., 2005)。利用传统地质温压计计算, 所有岩石类型都经历了峰期 HP-UHT 变质作用, 对应的温压条件为 $870\sim 1\,050^\circ\text{C}/18.5\sim 27.3 \text{ kbar}$, 并遭受了中压麻粒岩相叠加($780\sim 820^\circ\text{C}/9.5\sim 12 \text{ kbar}$)(Zhang et al., 2005)。矿物出溶结构表明这些岩石经历过 UHP 变质作用(Liu et al., 2002, 2005), 锆石 U-Pb 定年结果为 $487\sim 509 \text{ Ma}$ (Zhang et al., 2005)。近十年来, 不同学者针对该地区内不同岩石类型开展了系统工作, 并取得以下重要进展。①郭晶等(2021a)首次在巴什瓦克报道新鲜榴辉岩, 并限定出榴辉岩相峰期温压条件为 $946\sim 1\,026^\circ\text{C}/2.9\sim 3.2 \text{ GPa}$, 榴辉岩相变质时代为 $(493\pm 3) \text{ Ma}$ 。②Dong et al.(2018, 2019, 2020)分别针对长英质麻粒岩(图 7g)、基性麻粒岩(图 7h)和石榴子石岩(图 7i)开展岩相学、矿物化学、相平衡模拟及锆石 U-Pb 年代学研究, 精确刻画了岩石演化 $P-T-t$ 轨迹。基性麻粒岩主要记录了深俯冲大陆地壳折返过程的变质演化, 其 HP-UHT 麻粒岩相变质的温压条件为 $1\,000\sim 1\,070^\circ\text{C}/1.6\sim 2.3 \text{ GPa}$ 。长英质麻粒岩除了记录与基性麻粒岩相似的折返过程外, 还记录了从角闪岩相到 UHP 榴辉岩相的进变质演化过程, 其 HP-UHT 麻粒岩相变质的温压条件为 $970\sim 1\,090^\circ\text{C}/1.4\sim 2.5 \text{ GPa}$ 。石榴子石岩记录了大陆超深俯冲至地幔深处 $ca. 200 \text{ km}$ 或以上, 然后底辟折返至地壳底部完整的变质 $P-T-t$ 演化历史, 其 HP-UHT 麻粒岩相变质的温压条件为 $960\sim 1\,020^\circ\text{C}/ca. 3.3\sim 1.2 \text{ GPa}$ 。锆石年代学显示这 3 类岩石的原岩时代都为 $ca. 900 \text{ Ma}$, 长英质麻粒岩的变质年龄约为 500 Ma , 代表晚期降温冷却的时间; 含假蓝宝石基性

麻粒岩和普通基性麻粒岩的变质年龄分别为 505 Ma 和 507 Ma, 前者代表降压至 HP-UHT 麻粒岩相阶段的时代, 后者代表降温冷却的时代, 二者在误差范围内是一致的, 指示了折返过程经历快速降压冷却历史; 石榴子石岩得到两期变质年龄, 分别为 500 Ma 和 486 Ma, 前者代表进变质榴辉岩相时代, 后者代表降压至 HP-UHT 麻粒岩相阶段的时代。该系列研究揭示了在超深俯冲陆壳的快速折返过程中, UHT 变质作用更有可能是对压力峰期 UHT 条件的继承。③金红石 U-Pb 年代学研究显示其年龄在 ca. 480 Ma 和 ca. 450 Ma 呈双峰式分布, 早期金红石形成温度为 950 °C (2 GPa), 表明其在峰期或近峰期条件下生长, 晚期金红石形成温度为 780 °C (1 GPa), 与峰期后中压-中温麻粒岩相条件下的再加热有关 (Zhang et al., 2014)。

2.5 秦岭 UHT 变质作用

秦岭造山带 UHT 变质岩位于北秦岭造山带南缘的松树沟地区 (图 4)。松树沟变镁铁质-超镁铁质岩体长为 27 km, 宽为 3 km, 呈透镜状位于秦岭群片麻岩中, 主要岩石类型包括斜长角闪岩、榴闪岩、橄榄岩和基性麻粒岩, 少量的长英质麻粒岩位于该岩体的西南边缘。近些年研究表明, 松树沟岩体中的部分榴闪岩的基质矿物、石榴子石幔部及锆石包裹体中发现绿辉石, 证明其为退变榴辉岩 (陈丹玲等, 2015), 进一步温压计算显示退变榴辉岩的峰期变质温压条件为 462~542 °C/1.93~2.54 GPa (Bader et al., 2020) 和 570~650 °C/1.7~2.1 GPa (Belic et al., 2019)。基性麻粒岩主要矿物组成为石榴子石+单斜辉石+斜长石+金红石+石英, 峰期温压条件为 826~925 °C/1.3~1.8 GPa (刘良等, 1995; 张建新等, 2011; Bader et al., 2020)。长英质麻粒岩的平衡矿物组合为石榴子石+(反)条纹长石+蓝晶石+石英, 峰期温压条件为 800~900 °C/1.2~1.6 GPa (刘良等, 1995; Bader et al., 2020)。该地区长英质麻粒岩中的石榴子石发育金红石+石英+磷灰石出溶体, 表明超硅石榴子石的存在, 对应的压力 $\geq 9\sim 10$ GPa (刘良等, 2019)。Dong et al. (2022) 针对该地区长英质麻粒岩和基性麻粒岩开展岩相学、矿物化学、相平衡模拟及锆石与独居石 U-Pb 年代学研究, 构建了顺时针变质演化 P - T - t 轨迹, 对应的 HP-UHT 阶段温压条件分别为 900~980 °C/1.3~2.2 GPa 和 960~1010 °C/1.0~2.1 GPa。锆石和独居石年代学研究揭示大陆俯冲发生在 521~503 Ma, 晚期冷却发生在 500~480 Ma, 因此在 3 Ma 之内发生了快速折返

(Dong et al., 2022), 同样反映了 UHT 变质作用是对压力峰期 UHT 条件的继承。

中国西北地区 UHT 变质岩时空分布具有两大特点: ①点状零星分布于不同造山带, 从古亚洲构造域的阿尔泰造山带到特提斯构造域的秦岭、昆仑、阿尔金造山带等; ②时间跨度大, 从新元古代早期到二叠纪。这和中国东部 UHT 变质岩时空分布特征不同, 中国东部 UHT 变质岩广泛分布于孔兹岩带, 具有“面”状分布的特征, 时间跨度也相对集中在 1.96~1.80 Ga。这种差异性一方面与西北地区复杂的构造背景有关, 即板块构造和塔里木地幔柱构造体制下均形成 UHT 变质岩; 另一方面可能反映了西北地区 UHT 变质作用研究程度低, 许多 UHT 变质岩露头尚未识别出来。尽管如此, 西北地区已有的 UHT 变质岩的研究揭示了伸展背景有利于 UHT 变质作用的形成, 如清水泉 UHT 变质作用形成于俯冲板片回卷导致活动大陆边缘伸展背景下; 秦岭和阿尔金 UHT 变质岩形成于超深俯冲岩石的折返过程中, 而伸展构造体制最有利于俯冲陆壳的折返; 东昆仑金水口地区泥盆纪 UHT 变质岩形成于碰撞后岩石圈拆沉机制下伸展背景; 阿尔泰造山带的 UHT 变质岩形成于塔里木地幔柱伸展构造体制下。

3 陆壳部分熔融作用的研究进展

部分熔融作为地壳深部重要的地质过程, 是变质岩石学研究的重要内容, 部分熔融产生的熔体可以参与变质反应, 控制反应速率, 促进元素和物质的迁移以及壳幔相互作用 (Brown, 2007)。此外, 熔体可以显著降低岩石的流变学强度 (Rosenberg et al., 2005), 使岩石发生弱化, 进而对陆壳的俯冲与折返动力学具有重要影响。笔者将从熔融作用的产物及其特征、发生的构造背景和机制 3 个方面对西北地区中高级变质岩部分熔融作用的研究进展进行总结。

3.1 部分熔融作用的产物及其特征

部分熔融作用产生一系列宏观到微观的地质现象, 这些地质现象不仅是识别部分熔融作用的关键证据, 也是研究部分熔融作用的重要载体。在宏观露头尺度, 岩石发生部分熔融作用形成一种特征的岩石类型—混合岩。混合岩广泛分布于西北地区众多造山带核部, 如秦岭造山带的秦岭群 (罗芬红等, 2018)、柴北缘构造带的沙柳河岩群和达肯大坂岩群 (Zhang et al., 2015; Yu et al., 2015a, 2015b, 2019a; Cao et al., 2017;

Li et al., 2018)、阿尔金造山带的阿尔金岩群(于胜尧等, 2016; Cao et al., 2019)、东昆仑造山带的金水口群(Gao et al., 2023)、西南天山造山带低压高温变质带(Xia et al., 2014; 施建荣等, 2014)、阿尔泰造山带南缘(Liu et al., 2020b)等。混合岩由浅色体/浅色脉体和暗色体组成(Sawyer, 2008)。浅色体主要由石英、钾长石和斜长石组成, 代表的是熔体结晶的产物; 暗色体(寄主岩石)中含有较多的暗色矿物, 多被认为是部分熔融作用的残余体(Sawyer, 2008)。和世界上其他造山带混合岩特征类似, 西北地区造山带中混合岩也具有以下两个特征: ①从结构上来说, 混合岩浅色体矿物粒径明显粗于暗色体矿物, 且浅色体矿物更加自形, 显示出从熔体结晶的结构特征(Gao et al., 2023); ②从成分上来说, 尽管浅色体/浅色脉体成分总体为花岗质, 但无论是主微量元素或同位素特征均呈现较大的变化范围, 其受控因素主要包括原岩成分(基性或长英质)、部分熔融温压条件、深熔熔体的分离结晶等。柴北缘锡铁山和绿梁山体中的榴辉岩和围岩片麻岩经历了相同的变质演化过程, 然而它们部分熔融形成的浅色体成分差异较大, 反映了原岩对浅色体成分的控制作用。榴辉岩部分熔融形成富含斜长石的浅色体, 其具有高的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 、 Sr 和 LREE 含量, 而 MgO 、 FeO^T 、 K_2O 、 Y 、 Yb 和 HREE 含量较低, 类似于英云闪长岩-奥长花岗岩成分特征; 而片麻岩部分熔融形成富含钾长石的浅色体, 其具有高的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, 而较低的 CaO 、 MgO 、REE 的花岗岩地球化学特性(Yu et al., 2019a)。这与实验岩石学研究得到的长英质岩石部分熔融产生熔体贫 Ca, 而基性岩石产生熔体贫 K 的特征一致(Prouteau et al., 2001; Skjerlie et al., 2002)。柴北缘都兰 HP 麻粒岩单元中的浅色体和英云闪长岩体以富 SiO_2 、 Na_2O 和 MgO , 高 Sr 、 Sr/Y 、 La/Yb , 低 HREE, 以及正 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(0.1~4.3)和锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(8.3~10.2)为特征, 这些特征与现代埃达克岩和 TTG 的地球化学特征重叠(Yu et al., 2019a), 代表了辉长质岩石在高压麻粒岩相条件下部分熔融的产物, 反映了部分熔融温压条件对深熔熔体成分的控制。深熔熔体的分离结晶也是影响浅色体成分的重要因素(Sawyer, 1987), Li et al. (2018)依据成分特征将乌兰地区混合岩化片麻岩中的浅色体分为 3 组, 第一组具有最低的 REE 含量以及显著的正 Eu 异常, 第二组具有最高的 LREE 含量以及轻微的负 Eu 异常, 第三组具有最高的 HREE 含量特征且无

Eu 异常; REE 模式和 Eu 异常的变化反映了长石的分离结晶作用, 即第一组到第三组浅色体分别代表早期形成的长石堆晶、相对演化的熔体和近似的初始熔体。

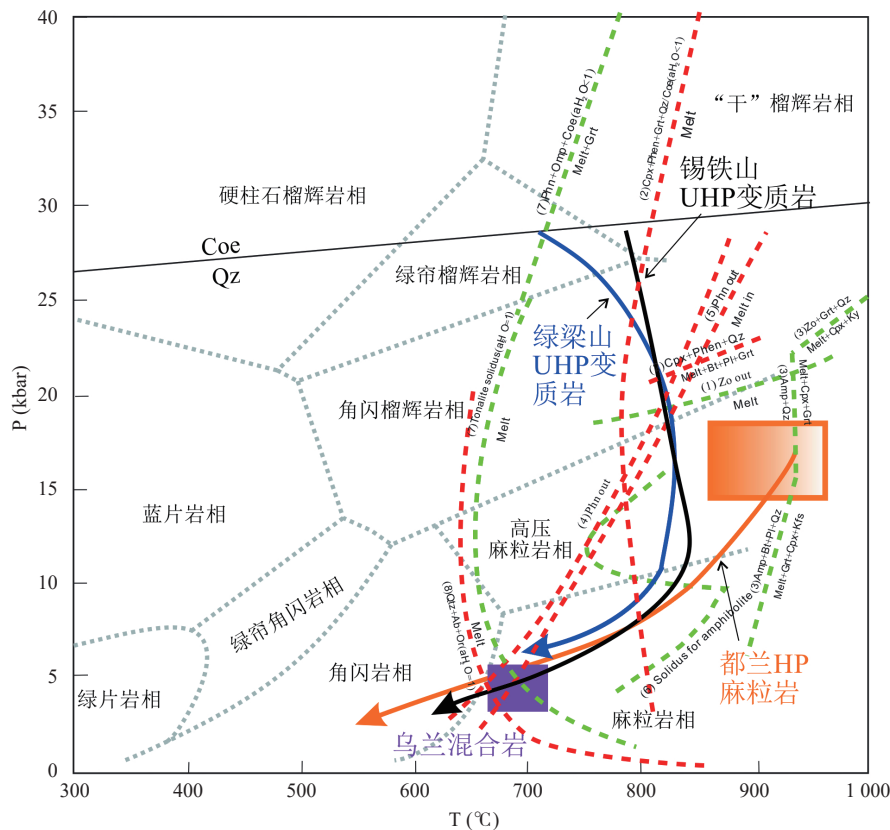
当岩石经历过较彻底的熔体抽取和分离, 或者部分熔融的程度很低, 可形成一些毫米或亚毫米尺度的一些微观结构特征, 如由石英-钾长石-斜长石-云母组成的长英质显微脉体(Yu et al., 2015a, 2015b, 2019a; Cao et al., 2017); 位于不同矿物颗粒之间, 由石英-钾长石-斜长石-云母组成的显微“熔体袋”(melt pocket)(Zhang et al., 2015; Yu et al., 2015a, 2019a); 在 3 个矿物相(一般为残余矿物)三联点位置发育楔形的长石或石英颗粒(Yu et al., 2015a, 2015b; Zhang et al., 2015; Cao et al., 2017; Gao et al., 2023); 串珠状排列的石英颗粒(Liu et al., 2020b)。这些微观结构现象在西北地区发生过部分熔融的岩石中都或多或少有所体现。转熔矿物相中的熔体包裹体是寄主岩石发生过部分熔融最有力的证据(高一杰等, 2018), 近十年来已经在部分熔融作用研究中发挥了举足轻重的作用(Cesare et al. 2009, 2015)。阿尔泰造山带二叠纪泥质麻粒岩中的石榴子石中发育由长石、石英和黑云母组成的显微花岗岩(即结晶的熔体包裹体), 其粒径通常为 5~10 μm , 发育明显的负晶形和爆裂结构(Liu et al., 2020b)。Xia et al. (2014)在西南天山造山带混合岩锆石中报道了钾长石+石英±斜长石/钠长石的多相固体包裹体, 代表了锆石生长捕获的熔体包裹体。Gao et al. (2025)在柴北缘乌兰地区早古生代泥质片麻岩的独居石中发现了粒径约 10 μm 的熔体包裹体, 其矿物组成为石英+斜长石+钾长石, 且发育明显的爆裂结构。

3.2 部分熔融作用发生的构造背景

前人通过对西北地区不同造山带部分熔融作用的研究, 提出部分熔融作用可发生在洋壳俯冲过程中的大陆弧、大陆碰撞过程中的加厚下地壳、深俯冲陆壳的折返过程以及后碰撞岩石圈拆沉伸展过程。洋壳俯冲过程中大陆弧的部分熔融作用主要记录在柴北缘造山带的乌兰地区(Li et al., 2018; Yu et al., 2019a)和西南天山低压高温变质带(Xia et al., 2014)。青海乌兰北部片麻岩杂岩位于全吉地块东北部, 都兰 UHP 变质体地北侧, 代表早古生代南祁连洋和柴达木地块俯冲系统的上盘。该地区普遍分布有混合岩化角闪黑云片麻岩和泥质片麻岩, 锆石 U-Pb 年代学显示部分熔融时代为 450~470 Ma(Li et al., 2018; Yu et al., 2019a), 早于

柴达木地块深俯冲相关的 HP-UHP 变质时代 (420~440 Ma), 且与该地区大陆弧岩浆作用和高温-低压变质作用同期(李秀财等, 2015; Li et al., 2018), 表明部分熔融作用发生于大陆弧背景(Li et al., 2018; Yu et al., 2019a)。Xia et al.(2014)在西南天山地区低压高温变质带混合岩中识别出一期 ca. 400 Ma 的部分熔融事件, 被认为与南天山洋俯冲过程中上盘大陆弧大规模岩浆侵位有关。大陆碰撞过程中加厚下地壳的部分熔融作用记录在柴北缘都兰 HP 麻粒岩单元中, 其主要由基性 HP 麻粒岩、花岗片麻岩、副片麻岩和角闪岩组成, HP 麻粒岩形成的峰期温压条件为 800~950 °C/1.45~1.85 GPa(图 8; Yu et al., 2011, 2014; Song et al., 2014)。位于 HP 基性麻粒岩中的浅色体及邻近的英闪长岩侵入体具有 TTG-埃达克质地球化学特征, 其形成时代为 446~428 Ma(Yu et al., 2019a), 被认为是大陆碰撞过程中加厚下地壳基性岩高压部分熔融的产物(Yu et al., 2019a, 2019b)。与深俯冲陆壳折返相关的部分熔融作用广泛记录在秦岭、柴北缘和阿尔金造山带中的榴辉岩及其围岩长英质片麻岩中, 其发生时限不晚

于 HP-UHP 变质岩角闪岩相退变质阶段(Yu et al., 2019a)。柴北缘造山带中榴辉岩和片麻岩部分熔融形成的浅色体/浅色脉体的锆石 U-Pb 年龄为 417~435 Ma(Zhang et al., 2015; Yu et al., 2015a, 2019a; Cao et al., 2017), 略晚于 UHP 峰期变质年龄(420~440 Ma)且老于角闪岩相退变质时代。在秦岭造山带中, 榴辉岩中的浅色脉体形成时代为 ca. 490 Ma(He et al., 2023), 长英质片麻岩分别在 445 Ma 和 420 Ma 发生了两期部分熔融作用(罗芬红等, 2018), 前者略晚于峰期变质年龄 492 Ma, 指示了 HP-UHP 地体快速折返过程(He et al., 2023), 后者两期次部分熔融作用与折返过程中麻粒岩相和角闪岩相退变质年龄几乎一致(宫相宽等, 2016)。南阿尔金巴什瓦克基性麻粒岩中的长英质脉体的锆石 U-Pb 年龄为 491 Ma(郭晶等, 2021b), 与寄主麻粒岩榴辉岩相变质时代在误差范围内近乎一致, 而长英质脉体锆石微量元素和包裹体特征指示其形成于低压条件, 同样反映了部分熔融发生在 HP-UHP 地体快速折返过程中; 吐拉地区和江孜勒萨依地区泥质片麻岩发生部分熔融的时限为 ca. 450 Ma 和 ca. 418



绿色虚线为中基性岩石的固相线; 红色虚线为长英质岩石的固相线

图8 柴北缘地区不同类型变质岩的 P - T 轨迹阐明不同类型深熔作用(据 Yu et al., 2019a 修改)

Fig. 8 Schematic P - T paths illustrate different types of anatexis in the North Qaidam

Ma(于胜尧等, 2016; Cao et al., 2019), 其明显要晚于南阿尔金地区榴辉岩峰期变质时代, 而与榴辉岩折返过程中麻粒岩相和角闪岩相叠加变质作用的时代较为接近。东昆仑和西南天山造山带的混合岩记录了后碰撞岩石圈拆沉过程中的部分熔融作用。东昆仑造山带混合岩记录的部分熔融时限小于 410 Ma, 略晚于 UHP 榴辉岩角闪岩相退变质年龄, 而与区域上高 T/P 型麻粒岩相变质作用、基性岩墙和夏日哈木基性-超基性侵入体形成时代一致(Gao et al., 2023), 都支持岩石圈拆沉所对应的伸展背景。西南天山造山带低压高温变质带混合岩记录了一期二叠纪的部分熔融事件, 其年龄为 265~290 Ma(Xia et al., 2014; 施建荣等, 2014), 对应于后碰撞阶段的造山带垮塌过程。

3.3 部分熔融的机制

部分熔融作用主要通过两种机制发生: ①含水矿物(云母、角闪石、帘石)脱水熔融; ②外来流体加入的水致熔融(Brown, 2010)。深俯冲陆壳折返相关的部分熔融作用多被认为通过含水矿物脱水分解导致。多硅白云母和黝帘石是基性榴辉岩中最主要的含水矿物, 而 UHP 变泥质岩和变花岗岩最重要的含水矿物为多硅白云母, 这些矿物的脱水是导致 UHP 变质岩折返过程中部分熔融的主要原因(Lang et al., 2007; Zheng et al., 2011)。不同含水矿物的脱水熔融线已经通过大量实验岩石学得到较好的限定(图 8; Hermann, 2002; Skjerlie et al., 2002; Auzanneau et al., 2006), 在 P - T 图解中, 多硅白云母和黝帘石脱水熔融线均具有正斜率(图 8), 当岩石降压折返的温度足够高穿过这些脱水熔融线时, 岩石便会发生部分熔融作用, 其中变基性岩主要发生的脱水熔融反应为 $Zo+Phe+Qz \rightarrow Grt+Ky+Melt$ (Skjerlie et al., 2002), 而变泥质岩和变花岗岩发生的脱水熔融反应为 $Phe+Cpx+Qz \rightarrow Grt+Bt+Pl+Melt$ (Auzanneau et al., 2006)或 $Phe+Qz \rightarrow Ky+Bt+Pl+Melt$ (Vielzeuf et al., 1988)。柴北缘锡铁山和绿梁山地区 UHP 变质岩 P - T 轨迹与实验约束的白云母和黝帘石为主的熔融曲线相交, 结合岩石学和浅色体化学成分特征, 表明锡铁山和绿梁山地区变基性岩部分熔融通过黝帘石和少量多硅白云母脱水熔融实现, 而变泥质岩和变花岗岩部分熔融通过多硅白云母脱水熔融实现(图 8; Yu et al., 2019a)。水致熔融作用是指岩石在水饱和固相线以上, 由外部来源流体的加入而导致岩石发生部分熔融作用。乌兰地区弧岩浆岩部分熔融作用通过水致熔融反应实现(图 8; Li et al., 2018),

岩石学研究显示该地区混合岩中不存在无水转熔矿物、浅色体含量很高(高达 40%)、转熔角闪石中含有浑圆状黑云母+石英+斜长石包裹体等, 这些特征均与水致熔融反应特征一致, 对应的熔融反应为 $Bt+Pl+Qz+H_2O \rightarrow Hbl+Pl+Ttn+Melt$ (Li et al., 2018)。

4 俯冲带流体的研究进展

俯冲带流体(文中特指富水流体)在全球物质和能量传递中发挥重要作用, 尤其是显著促进变质反应、壳幔相互作用和弧岩浆作用的形成(Stern, 2002)。近十年来, 前人对以柴北缘为代表的大陆俯冲带和西南天山为代表的大洋俯冲带的流体活动进行了较为系统研究。笔者仅从俯冲带变质流体的识别和流体的成分特征两方面对取得的研究进展进行总结。

4.1 俯冲带变质流体的识别

HP-UHP 变质岩中变质流体活动的最直接证据为变质脉体, 其是流体-岩石相互作用的产物, 也是研究俯冲带流体组成和演化的重要载体。柴北缘和西南天山造山带变质脉体组成存在较大差异, 已报道的柴北缘变质脉体均赋存于榴辉岩中, 为富含石英的纯石英脉, 石英含量占比超过 98%, 另有少量的金红石、钛铁矿、榍石和锆石(Liu et al., 2014; Chen et al., 2020)。西南天山地区变质脉体主要赋存于榴辉岩和蓝片岩中, 组成较复杂, 石英含量为 0~90%, 其余组成矿物包括(斜)黝帘石、金红石、钠云母、钠长石、石榴子石、绿辉石、角闪石、多硅白云母、榍石、磷灰石、石墨、碳酸盐、硫化物等(Gao et al., 2007; Li et al., 2013, 2021; Zhang et al., 2016; Chen et al., 2019; Zhu et al., 2020)。

4.2 流体的成分特征

变质脉体的矿物组成和关键矿物的成分特征可为流体的成分、演化和来源提供重要线索。柴北缘造山带变质脉体中含有大量含 Ti 矿物相, 如金红石、钛铁矿和榍石, 表明高场强元素(HFSEs, 如 Nb、Ta、Zr、Ti)在榴辉岩相条件下具有较高的活动性(Liu et al., 2014; Chen et al., 2020)。锡铁山变质脉体形成于 UHP 变质峰期, 其锆石 Hf 同位素与围岩片麻岩类似, 而 O 同位素变化介于寄主榴辉岩和围岩片麻岩, 暗示了脉体具有榴辉岩和片麻岩混合来源特征(Liu et al., 2014)。鱼卡地区变质脉体锆石 Hf 同位素与寄主榴辉岩相同, 暗示成脉流体来源于榴辉岩, 锆石和金红石微量元素特征显示俯冲-折返过程中多阶段的流体-岩石相互

作用(Chen et al., 2020)。西南天山变质脉体中同样含有金红石(Zhang et al., 2016; Chen et al., 2019), 表明 HFSEs 可以从寄主岩石迁移至脉中, 这可能与溶解的 Na-Al 硅酸盐和富氟流体的络合作用有关, 进一步研究发现, Ta 更倾向于进入流体中, 导致脉中金红石的 Nb/Ta 值低于寄主榴辉岩(Zhang et al., 2016)。近些年, 西南天山变质脉体的研究为俯冲带 C 和 S 的循环提供了启示(Zhu et al., 2020; Li et al., 2021)。Zhu et al.(2020)针对碳酸盐榴辉岩中富石墨脉体的研究, 查明碳酸盐岩化榴辉岩在折返过程中可释放约 0.92%~2.03% 的 CO_2 , 这足以作为变质脉体中石墨的沉淀提供碳源, 暗示脱碳作用或碳酸盐溶蚀作用形成的碳质流体可能不完全运移到地幔楔中, 而是在运移过程中有利条件下重新沉淀形成非生物石墨或碳酸盐。西南天山榴辉岩中产出大量含硫化物的榴辉岩相高压脉体(Li et al., 2021), 暗示 S 在俯冲带流体具有较高的溶解度, 并可以随流体迁移交代地幔。Li et al.(2021)针对高压蓝片岩/榴辉岩-蚀变带和脉体体系的研究, 为流体-岩石相互作用中硫的转化、硫的迁移/储存和硫同位素交换提供了自然证据, 并阐明了这些过程在硫从俯冲板片释放和向地幔俯冲中的作用。

5 变质矿产找矿新发现和新进展

变质矿床是指在变质岩区, 岩石受区域变质作用、接触交代变质作用、局部接触热变质、动力变质作用和混合岩化作用的影响而形成的矿床(沈其韩, 2007)。西北地区变质矿床种类较多, 如新疆阿克陶蓝宝石矿、苏克塔格能厄肯大型红柱石矿、甘肃萨尔哈布塔勒蓝晶石矿、柴北缘榴辉岩型金红石矿、甘肃敖包山晶质石墨矿等。笔者仅对近十年来新发现的且具有代表性的柴北缘榴辉岩型金红石矿和甘肃敖包山晶质石墨矿进行介绍。

5.1 柴北缘榴辉岩型金红石矿

柴北缘榴辉岩型金红石矿主要分布在鱼卡-落凤坡地区和都兰野马滩地区。

鱼卡-落凤坡地区金红石矿(图 2)主要以似层状或透镜状分布于元古界鱼卡河群的榴辉岩中, 矿体走向为 NW-SE 向, 宽度可达 30~80 m, 断续相连达 2~3 km。工业矿体($\text{TiO}_2 \geq 2.0\%$)的围岩为云母石英片岩和大理岩, 榴辉岩中 TiO_2 品位为 0.97%~4%, 含钛物相主要为金红石。金红石主要有包裹结构、粒间

结构、后期串珠状结构、退变残余结构和丝缕状结构 5 种赋存状态, 其中粒间和串珠状的金红石含矿性最好, 流体活动影响金红石的赋存状态。部分含金红石榴辉岩原岩为古生代洋壳镁铁质岩, 形成时代为 551~529 Ma, 变质时代为 440~432 Ma。结合榴辉岩地球化学及同位素组成特征, 提出鱼卡-落凤坡地区榴辉岩具有两种原岩, 分别为新元古代大陆溢流玄武岩、早古生代洋壳镁铁质岩, 前者高 $\text{TiO}_2 > 2\%$, 形成高品位矿石, 后者低 $\text{TiO}_2 < 2\%$, 形成低品位矿石(陈鑫等, 2018; 林成贵等, 2019)。

都兰野马滩地区金红石矿(图 2)主要似层状或透镜状分布于榴辉岩中, 其围岩主要为寒武纪—奥陶纪野马滩片岩或片麻岩中, 部分和镁铁质-超镁铁质岩共生。根据矿体产出特征, 榴辉岩被分为两类, 第一类榴辉岩产于花岗质片麻岩中, 金红石呈浸染状分布, 与石榴子石和绿辉石处于平衡状态, TiO_2 品位为 1%~4.5%, 其原岩为大陆溢流玄武岩, 形成时代为 $(845 \pm 4)\text{Ma}$, 榴辉岩相变质年龄为 $(433 \pm 10)\text{Ma}$; 第二类榴辉岩产于镁铁质-超镁铁质蛇绿混杂岩中, 金红石位于石榴子石和绿辉石核部, 或以自形或半自形颗粒与石榴子石和绿辉石平衡, 或以集合体或巨晶形式分布于裂隙和矿物边界, TiO_2 品位为 0.8%~3.5%, 原岩为 SSZ 型蛇绿岩的组成部分, 形成时代为 $(449 \pm 3)\text{Ma}$, 榴辉岩相变质年龄为 $(435 \pm 3)\text{Ma}$ 和 $(434 \pm 5)\text{Ma}$ 。结合地球化学特征, 第一类榴辉岩可能起源于新元古代 Rodinia 超大陆裂解过程中 OIB 型地幔柱源的部分熔融, 而第二类榴辉岩是板片衍生成成分交代的亏损地幔源部分熔融的产物(Chen et al., 2019)。

陈鑫(2019)进一步总结出榴辉岩型金红石矿的主要控矿因素、成矿规律和找矿标志。榴辉岩型金红石矿床主要受原岩 TiO_2 含量、金红石粒度形态和保存等控矿因素的控制。富集地幔源区、高演化程度、低的陆壳混染程度、富钛基性原岩, 是鱼卡榴辉岩型金红石矿成矿的物质基础; HP-UHP 变质作用促使原岩中的钛铁矿转变为金红石, 是榴辉岩型金红石矿成矿的必要条件; 不同阶段熔流体活动、折返速度、岩体侵入等影响金红石的形成和保存。柴北缘鱼卡-落凤坡和都兰榴辉岩型金红石矿在矿体形态、品位、规模、结构构造、金红石赋存状态方面较相似, 主要区别在于都兰榴辉岩型金红石矿主要以大洋型榴辉岩为主, 比大陆型榴辉岩厚度更大、平均品位较低。找矿标志为 UHP 变质带中钛含量高的新鲜榴辉岩(陈

鑫, 2019)。

5.2 甘肃敖包山晶质石墨矿

甘肃敖包山晶质石墨矿集区位于敦煌地块南缘(图2), 晶质石墨矿体严格受地层控制, 赋矿岩石为太古宇—古元古界敦煌岩群二云母石英片岩、白云母石英片岩, 局部地段为大理岩。矿体多呈似层状、条带状产出, 矿体长为400~3450 m, 宽为2~160 m, 固定碳含量为2.68%~11.75%(王东升等, 2020)。矿体中的矿石矿物为石墨, 脉石矿物主要为石英和白云母。矿石呈片状构造和块状构造, 矿石矿物呈显微鳞片变晶结构, 脉石矿物具细粒鳞片粒状变晶结构。矿石自然类型主要为二云石英片岩型晶质石墨矿石。全岩地球化学特征表明, 含矿变质岩的原岩为含碳质泥岩和粉砂质泥岩(陈世强等, 2021; 苏天宝, 2022)。石墨的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-22.30‰~-31.35‰, 平均为-29.51‰, 指示石墨物源为有机碳(陈世强等, 2021; 苏天宝, 2022)。针对石墨的XRD实验分析结果表明, 晶质石墨晶体结构较完善, 石墨化度平均值为0.85, 变质程度为中级变质(苏天宝, 2022)。

敦煌地块中的晶质石墨的形成以富含有机碳的泥质岩为物质基础, 在区域变质作用过程中, 随着变质温度的升高, 非晶质碳将逐渐转化为晶质石墨, 因此区域变质作用是晶质石墨矿形成的必要条件。目前尚无直接针对含石墨二云石英片岩的变质温压条件和年代学研究, 但前人已对包括敖包山和东巴兔地区在内的敦煌岩群变质作用开展了系统研究, 这些成果将对晶质石墨成矿条件和年代提供一些约束。敦煌地块长期以来被视为前寒武纪稳定陆块, 其被认为属于华北克拉通或塔里木克拉通的一部分(Lu et al., 2008; Zhang et al., 2012, 2013)。然而, 近些年研究显示, 敦煌地块中前寒武纪岩石比例有限, 敦煌岩群变质岩普遍记录了早古生代—泥盆纪的变质作用, 被认为是中亚造山带的南延部分, 故被称为“敦煌造山带”。敦煌岩群中的变质表壳岩中通常裹挟着呈透镜体形式产出且具有不同变质程度和时代的变质基性岩岩块, 显示构造混杂岩典型的“基质夹岩块”特征, 其中大多数的角闪岩、麻粒岩和榴辉岩块的峰期变质时代为晚奥陶世至晚泥盆世(Zong et al., 2012; Zhao et al., 2016; Wang et al., 2016, 2017a, 2017b, 2018a, 2018b, 2022), 少数角闪岩和麻粒岩块变质时代为古元古代, 可能与哥伦比亚超大陆的汇聚有关(Zhang et al., 2012, 2013, 2019, 2021a, 2021b)。基质主要为黑云斜长片麻

岩、长英质片麻岩、云母石英片岩及少量变质杂砂岩和变硅质岩。晶质石墨赋矿岩石即为典型的基质组成部分。敖包山晶质石墨矿集区内基质岩石(含石榴子石蓝晶石的变泥质岩、含石榴子石变泥质岩)的峰期变质条件为700~708 °C/10.2~10.7 kbar和630 °C/8.9 kbar, 变质时代为414 Ma(Wang et al., 2017a, 2017b); 东巴兔晶质石墨矿集区内基质岩石(石榴子石黑云母片岩)的峰期变质条件为667~690 °C/8.8~8.9 kbar和635~651 °C/6.0 kbar, 变质时代为(417±21) Ma和(372.4±4) Ma(Wang et al., 2018a; 刁志鹏等, 2019)。上述基质岩石变质温压条件和晶质石墨XRD分析结果一致, 指示角闪岩相的变质作用, 进一步说明晶质石墨的形成时代很有可能为泥盆纪, 为古生代俯冲带弧前复合增生系统的产物(Wang et al., 2022)。

6 展望

立足西北地区, 从UHP变质、UHT变质、陆壳部分熔融、俯冲带流体活动和变质矿产找矿等方面, 对近十年中高级变质作用的研究进展进行了总结和归纳。在UHP变质作用方面, 在西北地区新确立了东昆仑志留纪UHP变质带, 并在多个UHP变质带中陆续发现了以斯石英副相和柯石英为代表的新的UHP变质证据, 夯实了岩石发生深俯冲的事实, 进一步确定了UHP变质的空间延伸和俯冲物质规模。在UHT变质作用方面, 学者们不仅在阿尔泰和阿尔金地区UHT变质岩的P-T轨迹、变质时代和成因方面研究取得一系列重要进展, 而且在东昆仑、柴西缘、秦岭等地区识别出新的UHT变质岩出露点。变质作用相关的熔流体活动已成为西北地区造山带变质作用研究的热点, 尤其是在部分熔融和变质流体活动的产物及特征、熔融发生的地质背景和机制等方面取得重要进展。变质矿产找矿发现和理论研究取得重要突破, 代表性变质矿产包括柴北缘造山带与HP-UHP变质作用相关的金红石矿和敦煌地块与角闪岩相变质作用相关的晶质石墨矿。

近十年来, 前人在西北地区中高级变质作用研究方面取得丰富成果, 但也有一些新的科学问题亟需解决, 因笔者水平有限, 仅从以下两个方面加以总结, 以供抛砖引玉, 带来更多思考和讨论。

(1) 东昆仑和柴北缘的榴辉岩在野外地质特征和矿物组合方面有相似的特征, 更为重要的是, 东昆仑

与大陆俯冲相关的榴辉岩相变质时代为 443~419 Ma (Meng et al., 2013; 祁晓鹏等, 2016; Du et al., 2017; Song et al., 2018; Bi et al., 2018; Xiong et al., 2024; Zhou et al., 2024; Dong et al., 2024), 柴北缘为 ca. 440~420 Ma (Song et al., 2014), 两者近乎一致。此外, 东昆仑榴辉岩围岩金水口群被认为是柴达木变质基底的南部出露部分, 这显示在柴达木地块南北两侧均有早古生代榴辉岩的出露, 那么如何理解两者之间的关系呢? 一个可能的解释是柴达木盆地周缘造山带为一弯山构造(牟墩玲等, 2018), 即昆北带和柴北缘构造带为同一条连续的原特提斯洋缝合带, 在加里东运动后期, 以柴东缘为核部发生弯曲而呈现出现今状态。然而, 柴达木盆地被新生代沉积物覆盖, 其基底属性并没有得到充分认识, 制约了对其南北两侧榴辉岩关系的理解。未来需进行更加详细的调查研究, 厘清东昆仑和柴北缘榴辉岩的关系。

(2) 加强西北地区泛非期构造热事件, 尤其是变质作用的研究, 这对于恢复新元古代晚期—早古生代早期洋陆格局和构造演化尤为重要。柴西缘地区晚泛非期 UHT 变质岩形成于 540~520 Ma, 类似于东冈瓦纳 UHT 变质地质体的变质时代(Teng et al., 2020)。东昆仑造山带清水泉地区高级变质岩, 如花岗片麻岩、斜长角闪岩、HP-UHT 麻粒岩, 记录了 560~500 Ma 的岩浆和变质作用事件(李怀坤等, 2006; 陈能松等, 2008; Bi et al., 2021)。这些结果暗示了西北地区一些陆块(如柴达木地块)可能在泛非造山事件之后才从东冈瓦纳大陆分离。然而, 这些泛非期构造热事件记录呈点状零星出现, 现有的结果并不能很好限定泛非期构造热事件影响的范围和机制。下一步需开展更加精细的野外地质调查和泛非期变质作用研究, 进而对西北地区泛非期和加里东期构造热事件的关系及相关的构造演化过程进行厘定。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 陈丹玲, 任云飞, 官相宽, 等. 北秦岭松树沟榴辉岩的确定及其地质意义[J]. 岩石学报, 2015, 31(7): 1841-1854.
- CHEN Danling, REN Yunfei, GONG Xiangkuan, et al. Identification and its geological significance of eclogite in Songshugou, the North Qinling[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(7): 1841-1854.
- 陈丹玲, 刘良, 廖小莹, 等. 北秦岭高压-超高压岩石的时空分布、P-T-t 演化及其形成机制[J]. 地球科学, 2019, 44(12): 4017-4027.
- CHEN Danling, LIU Liang, LIAO Xiaoying, et al. The distribution, P-T-t evolution and formation mechanism of HP-UHP metamorphic rocks in the North Qinling Orogenic Belt[J]. Earth Science, 2019, 44(12): 4017-4027.
- 陈能松, 孙敏, 王勤燕, 等. 东昆仑造山带中带的锆石 U-Pb 定年与构造演化启示[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2008, 38(6): 657-666.
- CHEN Nengsong, SUN Min, WANG Qinyan, et al. The implication of zircon U-Pb dating and tectonic evolution in the middle section of East Kunlun orogenic belt[J]. Science in China (series D), 2008, 38(6): 657-666.
- 陈世强, 李省晔, 贾鑫, 等. 甘肃省肃北县敖包沟晶质石墨矿床地球化学特征与成因研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(6): 1384-1393.
- CHEN Shiqiang, LI Shengye, JIA Xin, et al. Geochemical Characteristics and Genesis of the Aobaogou Crystalline Graphite Deposit in Subei County, Gansu Province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(6): 1384-1393.
- 陈鑫, 郑有业, 许荣科, 等. 柴北缘鱼卡榴辉岩型金红石矿床金红石矿物学、元素地球化学及成因[J]. 岩石学报, 2018, 34(6): 1685-1703.
- CHEN Xin, ZHENG Youye, XU Rongke, et al. Mineralogical, trace element composition of rutile and genesis of eclogite-type rutile deposit from the Yuka terrane, North Qaidam UHPM belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(6): 1685-1703.
- 陈鑫. 柴北缘榴辉岩型金红石矿成矿条件对矿产勘查的启示[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- CHEN Xin. Metallogenic conditions of eclogite-type rutile deposit from the North Qaidam UHP metamorphic belt and their implications for mineral exploration[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019.
- 刁志鹏, 朱文斌, 吴海林. 甘肃敦煌东巴兔山地区敦煌杂岩的变质变形特征及时代限定[J]. 高校地质学报, 2019, 25(1): 144-160.
- DIAO Zhipeng, ZHU Wenbin, WU Hailin. Metamorphism, deformation and chronological constraints on the Dunhuang Complex in Dongbatu area, Dunhuang, Gansu province[J]. Geological Journal of China Universities, 2019, 25(1): 144-160.
- 何凡, 宋述光. 东昆仑金水口地区格林威尔期超高温麻粒岩[J]. 岩石学报, 2020, 36(4): 1030-1040.
- HE Fan, SONG Shuguang. The Grenvillian-aged UHT gneiss in Jinshuikou region, East Kunlun Orogenic Belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36: 1030-1040.

- 胡能高, 赵东林, 徐柏青, 等. 北秦岭含柯石英榴辉岩的发现及其意义[J]. 科学通报, 1994, 21: 2013.
- HU Nenggao, ZHAO Donglin, XU Baiqing, et al. Identification of coesite-bearing eclogite in the North Qinling and its geological significance[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 21: 2013.
- 高一杰, 刘景波. 高级变质岩中熔体包裹体研究进展[J]. 地球科学, 2018, 43(1): 236–246.
- GAO Yijie, LIU Jingbo. Research advances of melt inclusions in high-grade metamorphic rocks[J]. Earth Science, 2018, 43(1): 236–246.
- 宫相宽, 陈丹玲, 任云飞, 等. 北秦岭含柯石英斜长角闪岩的发现及其地质意义[J]. 科学通报, 2016, 61(12): 1365–1378.
- GONG Xiangkuan, CHEN Danling, REN Yunfei, et al. Identification of coesite-bearing amphibolite in the North Qinling and its geological significance[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(12): 1365–1378.
- 郭晶, 李云帅, 于胜尧, 等. 南阿尔金巴什瓦克榴辉岩的变质演化: 对南阿尔金超高压变质作用的启示[J]. 地质学报, 2021a, 95(12): 3691–3704.
- GUO Jing, LI Yunshuai, YU Shengyao, et al. Metamorphic evolution of the eclogite in the Bashiwake area: implications for ultrahigh pressure metamorphism in South Altyn tagh[J]. Acta Geologica Sinica, 2021a, 95(12): 3691–3704.
- 郭晶, 李云帅, 张建新. 大陆碰撞造山带榴辉岩相的熔体活动: 来自南阿尔金基性麻粒岩中中长英质脉体的证据[J]. 地质学报, 2021b, 95(3): 723–736.
- GUO Jing, LI Yunshuai, ZHANG Jianxing. Eclogite-facies melt activity in the continental collisional orogen: evidence from the felsic vein in mafic granulite, South Altyn Tagh[J]. Acta Geologica Sinica, 2021b, 95(3): 723–736.
- 李怀坤, 陆松年, 相振群, 等. 东昆仑中部缝合带清水泉麻粒岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究[J]. 地学前缘, 2006, 13(6): 311–321.
- LI Huaikun, LU Songnian, XIANG Zhenqun, et al. SHRIMP U-Pb zircon age of the granulite from the Qingshuiquan area, Central Eastern Kunlun Suture Zone[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(6): 311–321.
- 李秀财, 牛漫兰, 闫臻, 等. 青海省乌兰县早古生代低压高温变质岩: 柴北缘存在双变质带? [J]. 科学通报, 2015, 60(35): 3501–3513+1–5.
- LI Xiucan, NIU Manlan, YAN Zhen, et al. LP/HT metamorphic rocks in Wulan County, Qinghai Province: An Early Paleozoic paired metamorphic belt on the northern Qaidam Basin? [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(35): 3501–3513+1–5.
- 林成贵, 郑有业, 程志中, 等. 柴北缘鱼卡榴辉岩型金红石矿床成矿物理条件[J]. 地质通报, 2019, 38(5): 866–883.
- LIN Chenggui, ZHENG Youye, CHENG Zhizhong, et al. An analysis of metallogenic physical conditions of the Yuqia eclogite-type rutile deposit in the North Qaidam[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(5): 866–883.
- 刘良, 周鼎武, 董云鹏, 等. 东秦岭松树沟超高压变质基性岩石及其退变质作用的 P-T-t 演化轨迹[J]. 岩石学报, 1995, 11(2): 127–136.
- LIU Liang, ZHOU Dingwu, DONG Yunpeng, et al. High pressure metabasites and their retrograde metamorphic P-T-t Path from Songshugou Area, Eastern Qinling Mountain[J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11(2): 127–136.
- 林成贵, 许荣科, 郑有业, 等. 柴北缘超高压变质带鱼卡榴辉岩型金红石矿地质特征及原岩性质探讨[J]. 西北地质, 2017, 50(2): 142–155.
- LIN Chenggui, XU Rongke, ZHENG Youye, et al. Geological Characteristic and Protolith Nature of Yuqia Eclogite-type Rutile Deposit in Northern Qaidam UHP Metamorphic Belt[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(2): 142–155.
- 刘良, 陈丹玲, 章军锋, 等. 陆壳超深俯冲到斯石英稳定域地幔深度 (~300 km) 的新证据[J]. 地球科学, 2019, 44(12): 3998–4003.
- LIU Liang, CHEN Danling, ZHANG Junfeng, et al. New evidence of an ultra-deep continental subduction to mantle depth (~300 km) in stishovite stability field[J]. Earth Science, 2019, 44(12): 3998–4003.
- 刘兆, 全来喜. 阿尔泰山带晚古生代高温变质作用与塔里木地幔柱活动的成因联系: 来自泥质和镁铁质麻粒岩的证据[J]. 岩石学报, 2015, 31(6): 1761–1773.
- LIU Zhao, TONG Laixi. The petrogenetic link between the Late Paleozoic high-temperature metamorphism in the Altayorogen and the Tarim mantle plume: Evidence from metapelitic and mafic granulites[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(6): 1761–1773.
- 罗芬红, 陈丹玲, 宫相宽, 等. 北秦岭超高压地体折返过程中的多期次部分熔融[J]. 岩石学报, 2018, 34(12): 3671–3689.
- LUO Fenhong, CHEN Danling, GONG Xiangkuan, et al. Multi-stages partial melting of North Qinling ultrahigh pressure metamorphic terrane during exhumation[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(12): 3671–3689.
- 牟墩玲, 李三忠, 王倩, 等. 柴达木盆地东缘早古生代弯山构造[J]. 岩石学报, 2018, 34(12): 3721–3738.
- MU Dunling, LI Sanzhong, WANG Qian, et al. The Early Paleozoic orocline in the eastern Qaidam Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(12): 3721–3738.
- 祁晓鹏, 范显刚, 杨杰, 等. 东昆仑东段浪木日上游早古生代榴辉岩的发现及其意义[J]. 地质通报, 2016, 35(11): 1771–1783.
- QI Xiaopeng, FAN Xiangang, YANG Jie, et al. The discovery of Early Paleozoic eclogite in the upper reaches of Langmuri in eastern East Kunlun Mountains and its significance[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(11): 1771–1783.
- 沈其韩. 变质矿产成因分类的讨论[J]. 高线地质学报, 2007, 13(3): 371–382.

- SHEN Qihan. Discussion on Genetic Classification of Metamorphic Ore Deposits[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3): 371–382.
- 施建荣, 刘福来, 刘平华, 等. 新疆西南天山低压高温变质带深熔时代及其地质意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(10): 2843–2856.
- SHI Jianrong, LIU Fulai, LIU Pinghua, et al. Age and geological significance of anatexis from the low-pressure and high-temperature metamorphic belt, southwestern Tianshan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(10): 2843–2856.
- 苏天宝. 敦煌地块大水峡北晶质石墨矿床地球化学特征及成因[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- SU Tianbao. Geochemical characteristics and genesis of the Dashuixiabei crystalline graphite deposit in Dunhuang Block [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- 孙勇, 陈丹玲. 超高压变质作用及大陆深俯冲——地球科学前沿评述[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2006, 36(1): 1–9.
- SUN Yong, CHEN Danling. Ultrahigh pressure metamorphism and continental deep subduction: review on frontiers of geosciences [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2006, 36(1): 1–9.
- 全来喜, 陈义兵, 徐义刚, 等. 阿尔泰超高温变泥质麻粒岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(10): 3435–3445.
- TONG Laixi, CHEN Yibing, XU Yigang, et al. Zircon U-Pb ages of the ultrahigh-temperature metapelitic granulite from the Altai orogen, NW China, and geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(10): 3435–3445.
- 王东升, 刘强. 甘肃省敖包山晶质石墨矿集区地质特征及地质经济意义[J]. 矿产与地质, 2020, 34(3): 457–462+485.
- WANG Dongsheng, LIU Qiang. Geological characteristics and geological economic significance of Aobaoshan crystalline graphite ore concentration area in Gansu[J]. Mineral Resources and Geology, 2020, 34(3): 457–462+485.
- 王佳兴, 蔺梦, 刘泽宇, 等. 柴北缘超高压变质带变质蛇绿岩组合及其地质意义[J]. 西北地质, 2020, 53(4): 1–10.
- WANG Jiaying, LIN Meng, LIU Zeyu, et al. Petrological Study of the Meta-ophiolite from the North Qaidam UHP Metamorphic Belt and Its Geological Implications[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(4): 1–10.
- 杨经绥, 许志琴, 裴先治, 等. 秦岭发现金刚石: 横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别[J]. 地质学报, 2002, 76(4): 484–495.
- YANG Jingsui, XU Zhiqin, PEI Xianzhi, et al. Discovery of diamond in North Qinling: Evidence for a giant UHPM belt across Central China and recognition of Paleozoic and Mesozoic dual deep subduction between North China and Yangtze Plates[J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(4): 484–495.
- 于胜尧, 张建新, 李三忠, 等. 大陆碰撞过程中的巴罗式变质作用及原地深熔作用: 以南阿尔金为例[J]. 岩石学报, 2016, 32(12): 3703–3714.
- YU Shengyao, ZHANG Jianxin, LI Sanzhong, et al. “Barrovian-type” metamorphism and in situ anatexis during continental collision, A case study from the South Altun Mountains, western China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(12): 3703–3714.
- 张建新, 于胜尧, 孟繁聪. 北秦岭造山带的早古生代多期变质作用[J]. 岩石学报, 2011, 27(4): 1179–1190.
- ZHANG Jianxin, YU Shengyao, MENG Fancong. Ployphase Early Paleozoic metamorphism in the northern Qinling orogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(4): 1179–1190.
- 张照伟, 谭文娟, 王小红, 等. 西北地区调查与战略性矿产找矿勘查[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 45–63.
- ZHANG Zhaowei, TAN Wenjuan, WANG Xiaohong, et al. Geological survey and prospecting of strategic minerals in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 45–63.
- Auzanneau E, Vielzeuf D, Schmidt M W. Experimental evidence of decompression melting during exhumation of subducted continental crust[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2006, 152: 125–148.
- Bader T, Zhang L, Li X, et al. High-P granulites of the Songshugou area (Qinling Orogen, east-central China): petrography, phase relations, and U/Pb zircon geochronology[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2020, 38(4): 421–450.
- Belic M, Hauenberger C A, Dong Y. Multistage metamorphic evolution of retrograded eclogites from the Songshugou complex, Qinling orogenic belt, China[J]. Journal of Petrology, 2019, 60(11): 2201–2226.
- Bi H Z, Song S G, Dong J L, et al. First discovery of coesite in eclogite from East Kunlun, northwest China[J]. Science Bulletin, 2018, 63: 1536–1538.
- Bi H Z, Song S G, Yang L M, et al. UHP metamorphism recorded by coesite-bearing metapelite in the East Kunlun Orogen (NW China)[J]. Geological Magazine, 2020, 157(2): 160–172.
- Bi H Z, Song S G, Whitney D L, et al. HP–UHT granulites in the East Kunlun Orogen, NW China: Constraints on the transition from compression to extension in an arc setting of the Proto-Tethys Ocean[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2021, 39(8): 1071–1095.
- Bi H Z, Whitney D L, Song S G, et al. HP–UHP eclogites in the East Kunlun Orogen, China: P–T evidence for asymmetric suturing of the Proto-Tethys Ocean[J]. Gondwana Research, 2022, 104: 199–214.
- Brown M. Crustal melting and melt extraction, ascent and emplacement in orogens: Mechanisms and consequences[J]. Journal of the Geological Society of London, 2007, 164: 709–730.
- Brown M. Melting of the continental crust during orogenesis: the thermal, rheological, and compositional consequences of melt transport from lower to upper continental crust[J]. Canadian

- Journal of Earth Sciences, 2010, 47(5): 655–694.
- Cao Y T, Liu L, Chen D L, et al. Partial melting during exhumation of Paleozoic retrograde eclogite in North Qaidam, western China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 148: 223–240.
- Cao Y T, Liu L, Wang C, et al. Timing and nature of the partial melting processes during the exhumation of the garnet-bearing biotite gneiss in the Southern Altyn Tagh HP/UHP Belt, Western China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 170: 274–293.
- Carswell D A, O'Brien P J. Thermobarometry and geotectonic significance of high-pressure granulites: Examples from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif in lower Austria[J]. Journal of Petrology, 1993, 34: 427–459.
- Cesare B, Ferrero S, Salviole-Mariani E, et al. Nanogranite and glassy inclusions: the anatexitic melt in migmatites and granulites[J]. Geology, 2009, 37: 627–630.
- Cesare B, Acosta-Vigil A, Bartoli O, et al. What can we learn from melt inclusions in migmatites and granulites?[J]. Lithos, 2015, 239: 186–216.
- Chen X, Xu R, Zheng Y, et al. The geodynamic setting of Dulan eclogite-type rutile deposits in the North Qaidam orogen, western China[J]. Ore Geology Review, 2019, 110: 102936.
- Chen X, Xu R, Zheng Y, et al. Subduction channel fluid-rock interaction: Indications from rutile-quartz veins within eclogite from the Yuka terrane, North Qaidam orogen[J]. Geoscience frontier, 2020, 11: 635–650.
- Chen Z Y, Zhang L F, Lü Z, et al. Episodic Fluid Action in Chinese Southwestern Tianshan HP/UHP Metamorphic Belt: Evidence from U–Pb Dating of Zircon in Vein and Host Eclogite[J]. Minerals, 2019, 9: 727.
- Dong J, Wei C J, Clarke G L, et al. Metamorphic evolution during deep subduction and exhumation of continental crust: insights from felsic granulites in South Altyn Tagh, West China[J]. Journal of Petrology, 2018, 59(10): 1965–1990.
- Dong J, Wei C J, Zhang J X. Ultra high temperature metamorphism of mafic granulites from South Altyn Orogen, West China: A result from the rapid exhumation of deeply subducted continental crust[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2019, 37(3): 315–338.
- Dong J, Wei C, Chen J, et al. P-T-t path of garnetites in South Altyn Tagh, West China: a complete record of the ultradeep subduction and exhumation of continental crust[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, 125: e2019JB018881.
- Dong J, Wei C J, Song S G. Deep subduction and exhumation of micro-continents in the Proto-Tethys realm: Evidence from metamorphism of HP-UHT rocks in the North Qinling Orogen, central China[J]. Gondwana Research, 2022, 104: 215–235.
- Dong J, Wei C, Yin A, et al. Tectonic transition from continental subduction to orogenic collapse recorded by ultrahigh-pressure to ultrahigh-temperature metamorphism[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2024, 638: 118743.
- Dong J, Wei C, Song S, et al. Two episodes of ultrahigh-temperature metamorphism within one orogenic cycle[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2026, 679: 119887.
- Du W, Jiang C Y, Tang Z L, et al. Discovery of the Dagele eclogite in East Kunlun, West China and its zircon SHRIMP U-Pb Ages: new constrains on the Central Kunlun Suture Zone[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(3): 1153–1154.
- Gai Y S, Liu L, Wang C, et al. Discovery of coesite in eclogite from Keqike Jianggalesayi: New evidence for ultrahigh-pressure metamorphism in South Altyn Tagh, northwestern China[J]. Science Bulletin, 2017, 62(15): 1048–1051.
- Gao J, John T, Klemd R, et al. Mobilization of Ti-Nb-Ta during subduction: Evidence from rutile-bearing dehydration segregations and veins hosted in eclogite, Tianshan, NW China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71: 4974–4996.
- Gao Y J, Liu Y G, Zhang J W, et al. Post-UHP tectonic evolution of the East Kunlun Orogenic Belt, northern Tibetan Plateau: insight from the regional-scale crustal anatexis[J]. International Geology Review, 2023, 65(4): 585–606.
- Gao Y J, Jing D L, Liu Y G, et al. Metamorphic evolution of overriding plate reveals the deep geodynamic process during continental subduction and collision: Insights from the North Qaidam tectonic belt, northern Tibetan Plateau[J]. Gondwana Research, 2025, 143: 1–19.
- Han L, Zhang L F, Zhang G B. Ultra-deep subduction of Yematan eclogite in the North Qaidam UHP belt, NW China: Evidence from phengite exsolution in omphacite[J]. American Mineralogist, 2015, 100(8-9): 1848–1855.
- He Y, Zhang W X, Zhao Y J, et al. Petrochronological study of zircon from felsic dikes associated with eclogites in the North Qinling orogen: Constraint on rapid exhumation of HP-UHP terrane[J]. Lithos, 2023, 450–451: 107177.
- Hermann J. Experimental constraints on phase relations in subducted continental crust[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143(2): 219–235.
- Kelsey D E, Hand M. On ultrahigh temperature crustal metamorphism: Phase equilibria, trace element thermometry, bulk composition, heat sources, timescales and tectonic settings[J]. Geoscience Frontiers, 2015, 6(3): 311–356.
- Lang H M, Gilotti J A. Partial melting of metapelites at ultrahigh-pressure conditions, Greenland Caledonides[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2007, 25: 129–147.
- Li J L, Gao J, John T, et al. Fluid-mediated metal transport in subduction zones and its link to arc-related giant ore deposits: Constraints from a sulfide-bearing HP vein in lawsonite eclogite (Tianshan, China)[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, 120: 326–362.
- Li J L, Schwarzenbach E M, John T, et al. Subduction zone sulfur mobilization and redistribution by intraslab fluid-rock interaction [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2021, 297: 40–64.

- Li X C, Niu M L, Yakymchuk C, et al. Anatexis of former arc magmatic rocks during oceanic subduction: A case study from the North Wulan Gneiss Complex[J]. *Gondwana Research*, 2018, 61: 128–149.
- Li Z L, Chen H L, Santosh M, et al. Discovery of ultrahigh-Tspinel-garnet granulite with pure CO₂ fluid inclusions from the Altay orogenic belt, NW China[J]. *Journal of Zhejiang University-Science*, 2004, 5(10): 1180–1182.
- Li Z L, Yang X Q, Li Y Q, et al. Late Paleozoic tectono-metamorphic evolution of the Altai segment of the Central Asian Orogenic Belt: constraints from metamorphic P-T pseudosection and zircon U-Pb dating of ultrahigh-temperature granulite[J]. *Lithos*, 2014, 204: 83–96.
- Liu L, Sun Y, Xiao P X, et al. Discovery of ultrahigh-pressure magnesite-bearing garnet Iherzolite (> 3.8 GPa) in the Altyn Tagh, northwest China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 44: 881–886.
- Liu L, Chen D L, Zhang A D, et al. Ultrahigh pressure (> 7 GPa) gneissic K-feldspar (-bearing) garnet clinopyroxenite in the Altyn Tagh, NW China: evidence from clinopyroxene exsolution in garnet[J]. *Science China Earth Sciences*, 2005, 48: 1000–1010.
- Liu L, Zhang J F, Green I H W, et al. Evidence of former stishovite in metamorphosed sediments, implying subduction to > 350 km[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 263: 180–191.
- Liu L, Zhang J F, Cao Y T, et al. Evidence of former stishovite in UHP eclogite from the South Altyn Tagh, western China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 484: 353–362.
- Liu X C, Wu Y B, Gao S, et al. First record and timing of UHP metamorphism from zircon in the Xitieshan terrane: implications for the evolution of the entire North Qaidam metamorphic belt[J]. *American Mineralogist*, 2012, 97: 1083–1093.
- Liu X, Wu Y, Gao S, et al. Record of multiple stage channelized fluid and melt activities in deeply subducted slab from zircon U-Pb age and Hf-O isotope compositions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 144: 1–24.
- Liu Z, Bartoli O, Tong L, et al. Permian ultrahigh-temperature reworking in the southern Chinese Altai: evidence from petrology, P-T estimates, zircon and monazite U-Th-Pb geochronology[J]. *Gondwana Research*, 2020a, 78: 20–40.
- Liu Z, Bartoli O, Tong L, et al. Anatexis and metamorphic history of Permian pelitic granulites from the southern Chinese Altai: constraints from petrology, melt inclusions and phase equilibria modelling[J]. *Lithos*, 2020b, 360–361: 105432.
- Liu Z, Tong L, Bartoli O, et al. Low-pressure granulite-facies metamorphism in the Southern Chinese Altay orogenic belt, NW China: P-T estimates, U-Pb ages and tectonic implications[J]. *Geochemistry*, 2020c, 80: 125603.
- Liu Z, Tong L, Bartoli O, et al. Prolonged metamorphism of garnet-orthoamphibole gneisses from the Fuyun area: New insights into metamorphic evolution of the southern Chinese Altai orogen[J]. *Lithos*, 2021, 406–407: 106534.
- Lu S N, Li H K, Zhang C L, et al. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160: 94–107.
- Lü Z, Zhang L F, Du J X, et al. Coesite inclusions in garnet from eclogitic rocks in western Tianshan, northwest China: convincing proof of UHP metamorphism[J]. *American Mineralogist*, 2008, 93: 1845–1850.
- Lü Z, Zhang L F, Yue J, et al. Ultrahigh-pressure and high-P lawsonite eclogites in Muzhaerte, Chinese western Tianshan[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2019a, 37(5): 717–743.
- Lü Z, Zhang L F, Yue J. Coesite in metasediments from the Muzhaerte valley, southwestern Tianshan[J]. *Science Bulletin*, 2019b, 64(2): 78–80.
- Meng F C, Zhang J X, Cui M. Discovery of Early Paleozoic eclogite from the East Kunlun, Western China and its tectonic significance[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 825–836.
- Prouteau G, Scaillet B, Pichavant M, et al. Evidence of mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust[J]. *Nature*, 2001, 410: 197–200.
- Rosenberg C L, Handy M R. Experimental deformation of partially melted granite revisited: implications for the continental crust[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2005, 23: 19–28.
- Sawyer E W. The role of partial melting and fractional crystallization in determining discordant migmatite leucosome compositions[J]. *Journal of Petrology*, 1987, 28: 445–473.
- Sawyer E W. *Atlas of Migmatites*, the Canadian Mineralogist special Publication 9[M]. Ottawa: NRC Research Press, 2008.
- Shen T T, Hermann J, Zhang L F, et al. UHP metamorphism documented in Ti-chondrodite and Ti-clinohumite-bearing serpentinitized ultramafic rocks from Chinese Southwestern Tianshan[J]. *Journal of Petrology*, 2015, 56(7): 1425–1458.
- Skjerlie K P, Patino Douce A E. The fluid-absent partial melting of a zoisite-bearing quartz eclogite from 1.0 to 3.2 GPa; implications for melting in thickened continental crust and for subduction-zone processes[J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43(2): 291–314.
- Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. Geochronology of diamond-bearing zircons from garnet peridotite in the North Qaidam UHPM belt, Northern Tibetan Plateau: a record of complex histories from oceanic lithosphere subduction to continental collision[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 234(1–2): 99–118.
- Song S G, Niu Y L, Su L, et al. Adakitic (tonalitic-trondhjemitic) magmas resulting from eclogite decompression and dehydration melting during exhumation in response to continental collision[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 130: 42–62.

- Song S G, Bi H Z, Qi S S, et al. HP-UHP metamorphic belt in the East Kunlun Orogen: final closure of the Proto-Tethys Ocean and formation of Pan-North-China Continent[J]. *Journal of Petrology*, 2018, 59: 2043–2060.
- Stern R J. Subduction zones[J]. *Review of Geophysics*, 2002, 40(4): 1012.
- Tan Z, Agard P, Monié P, et al. Architecture and P–T-deformation-time evolution of the Chinese SW-Tianshan HP/UHP complex: implications for subduction dynamics[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 197: 102894.
- Teng X, Zhang J X, Mao X H, et al. The earliest Cambrian UHT metamorphism in the Qaidam block, western China: A record of the final assembly of Greater Gondwana?[J]. *Gondwana Research*, 2020, 87: 118–137.
- Tong L, Xu Y G, Cawood P A, et al. Anticlockwise P–T evolution at ~280 Ma recorded from ultrahigh-temperature metapelitic granulite in the Chinese Altai orogen, possible link with the Tarim mantle plume?[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014a, 94: 1–11.
- Tong L X, Chen Y B, Chen L L, et al. Confirmation of ultrahigh-temperature metapelitic granulite in the Altay orogen and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014b, 59(27): 3441–3448.
- Vielzeuf D, Holloway J R. Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, 98: 257–276.
- Wang H Y C, Chen H X, Lu J S, et al. Metamorphic evolution and SIMS U-Pb geochronology of the Qingshigou area, Dunhuang block, NW China: Tectonic implications of the southernmost Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithosphere*, 2016, 8(5): 463–479.
- Wang H Y C, Chen H X, Zhang Q W L, et al. Tectonic melange records the Silurian-Devonian subduction-metamorphic process of the southern Dunhuang terrane, southernmost Central Asian Orogenic Belt[J]. *Geology*, 2017a, 45(5): 427–430.
- Wang H Y C, Wang J, Wang G D, et al. Metamorphic evolution and geochronology of the Dunhuang orogenic belt in the Hongliuxia area, northwestern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017b, 135: 51–69.
- Wang H Y C, Zhang Q W L, Chen H X, et al. Paleozoic subduction of the southern Dunhuang Orogenic Belt, Northwest China: Metamorphism and geochronology of the Shuixiakou area[J]. *Geodinamica Acta*, 2018a, 30(1): 63–83.
- Wang H Y C, Zhang Q W L, Lu J S, et al. Metamorphic evolution and geochronology of the tectonic melange of the Dongbatu and Mogutai blocks, middle Dunhuang orogenic belt, northwestern China[J]. *Geosphere*, 2018b, 14(2): 883–906.
- Wang H, Xiao W, Windley B F, et al. Diverse P–T–t paths reveal high-grade metamorphosed forearc complexes in NW China[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127: e2022JB024309.
- Wang H, Wu Y B, Gao S, et al. Deep subduction of continental crust in accretionary orogen: evidence from U–Pb dating on diamond-bearing zircons from the Qinling Orogen, Central China[J]. *Lithos*, 2014a, 190–191: 420–429.
- Wang W, Wei C J, Zhang Y H, et al. Age and origin of sillimanite schist from the Chinese Altai metamorphic belt: implications for late Palaeozoic tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *International Geology Review*, 2014b, 56: 224–236.
- Xia B, Zhang L F, Bader T. Zircon U–Pb ages and Hf isotopic analyses of migmatite from the ‘paired metamorphic belt’ in Chinese SW Tianshan: Constraints on partial melting associated with orogeny[J]. *Lithos*, 2014, 192–195: 158–179.
- Xiong L, Zhang G B, Song S G, et al. Eclogite in the East Kunlun Orogen, northwestern China: A record of the Neoproterozoic breakup of Rodinia and early Paleozoic continental subduction[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2024, 136(3–4): 1413–1430.
- Yang J S, Xu Z Q, Song S G, et al. Discovery of coesite in the North Qaidam Early Palaeozoic ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt, NW China[J]. *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie Ii Fascicule a-Sciences De La Terre Et Des Planetes*, 2001, 333(11): 719–724.
- Yang T N, Li J Y, Liang M J, et al. Early Permian mantle-crust interaction in the south-central Altai: high-temperature metamorphism, crustal partial melting, and mantle-derived magmatism[J]. *Gondwana Research*, 2015a, 28: 371–390.
- Yang X Q, Li Z L, Wang H H, et al. Petrology and geochemistry of ultrahigh-temperature granulites from the South Altay orogenic belt, northwestern China: implications for metamorphic evolution and protolith composition[J]. *Island Arc*, 2015b, 24: 169–187.
- Yu S Y, Zhang J X, Del Real P G. Petrology and P–T path of high-pressure granulite from the Dulan area, North Qaidam Mountains, northwestern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(4): 641–660.
- Yu S Y, Zhang J X, Mattinson C G, et al. Paleozoic HP granulite-facies metamorphism and anatexis in the Dulan area of the North Qaidam UHP terrane, western China: constraints from petrology, zircon U–Pb and amphibole Ar–Ar geochronology[J]. *Lithos*, 2014, 198: 58–76.
- Yu S Y, Zhang J X, Sun D Y, et al. Anatexis of ultrahigh-pressure eclogite during exhumation in the North Qaidam ultrahigh-pressure terrane: constraints from petrology, zircon U–Pb dating, and geochemistry[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2015a, 127(9–10): 1290–1312.
- Yu S Y, Zhang J X, Sun D Y, et al. Petrology, geochemistry, zircon

- U-Pb dating and Lu-Hf isotope of granitic leucosomes within felsic gneiss from the North Qaidam UHP terrane: constraints on the timing and nature of partial melting[J]. *Lithos*, 2015b, 218: 1–21.
- Yu S Y, Li S Z, Zhang J X, et al. Multistage Anatexis during Tectonic Evolution from Oceanic Subduction to Continental Collision: A Review of the North Qaidam UHP Belt, NW China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019a, 191: 190–211.
- Yu S Y, Zhang J X, Li S Z, et al. TTG-adakitic-like (tonalitic-trondhjemitic) magmas resulting from partial melting of metagabbro under high-pressure condition during continental collision in the North Qaidam UHP Terrane, western China[J]. *Tectonics*, 2019b, 38: 791–822.
- Zhang C, Zhang L, Roermund H V, et al. Petrology and SHRIMP U-Pb dating of Xitieshan eclogite, North Qaidam UHP metamorphic belt, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(4): 752–767.
- Zhang G B, Ellis D J, Christy A G, et al. UHP metamorphic evolution of coesite-bearing eclogite from the Yuka terrane, North Qaidam UHPM belt, NW China[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2009, 21(6): 1287–1300.
- Zhang J X, Yang J S, Xu Z Q, et al. Evidence for UHP metamorphism of eclogites from the Altun Mountains[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47: 751–755.
- Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al. An early Paleozoic HP/HT granulite-garnet peridotite association in the south Altyn Tagh, NW China. P-T history and U-Pb geochronology[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2005, 23(7): 491–510.
- Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al. Polyphase tectonothermal history recorded in granulitized gneisses from the north Qaidam HP/UHP metamorphic terrane, western China: Evidence from zircon U-Pb geochronology[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, 120(5-6): 732–749.
- Zhang J X, Gong J H, Yu S Y. 1.85Ga HP granulite-facies metamorphism in the Dunhuang block of the Tarim Craton, NW China: Evidence from U-Pb zircon dating of mafic granulites[J]. *Journal of the Geological Society*, 2012, 169(5): 511–514.
- Zhang J X, Yu S Y, Gong J H, et al. The latest Neoproterozoic evolution of the Dunhuang block, eastern Tarim craton, northwestern China: Evidence from zircon U-Pb dating and Hf isotopic analyses[J]. *Precambrian Research*, 2013, 226: 21–42.
- Zhang J X, Mattinson C G, Yu S Y, et al. Combined rutile-zircon thermometry and U-Pb geochronology: New constraints on Early Paleozoic HP/UHT granulite in the south Altyn Tagh, north Tibet, China[J]. *Lithos*, 2014, 200–201: 241–257.
- Zhang L J, Zhang L F, Lü Z, et al. Nb-Ta mobility and fractionation during exhumation of UHP eclogite from southwestern Tianshan, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 122: 136–157.
- Zhang L, Chen R X, Zheng Y F, et al. Partial melting of deeply subducted continental crust during exhumation: insights from felsic veins and host UHP metamorphic rocks in North Qaidam, northern Tibet[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2015, 33(7): 671–694.
- Zhang Q W L, Liu J H, Wang H Y C, et al. Amphibolite facies metamorphism and geochronology of the Paleoproterozoic Aketashitage Orogenic Belt, northwestern China[J]. *Precambrian Research*, 2019, 328: 146–160.
- Zhang Q W L, Li Z M G, Shi M Y, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of hornblende and U-Pb dating of zircon in the Aketashitage orogen, NW China: Constraints on exhumation and cooling in the Paleoproterozoic[J]. *Precambrian Research*, 2021a, 352: 106018.
- Zhang Q W L, Liu J H, Li Z M G, et al. Juxtaposition of diverse, subduction-related tectonic blocks with contrasting metamorphic features and ages in the Paleoproterozoic Aketashitage orogen, NW China: Implications for Precambrian orogeny[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2021b, 133(7-8): 1483–1504.
- Zhao Y, Sun Y, Diwu C R, et al. The Dunhuang block is a Paleozoic orogenic belt and part of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB), NW China[J]. *Gondwana Research*, 2016, 30: 207–223.
- Zheng Y F, Xia Q X, Chen R X, et al. Partial melting, fluid supercriticality and element mobility in ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision[J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 107: 342–374.
- Zhou W X, Chang F, Huang B, et al. Oceanic subduction to continental collision in the NE Proto-Tethys revealed by early Paleozoic eclogites with high-temperature granulite-facies overprinting in the East Kunlun orogenic belt, northern Tibet[J]. *The Geological Society of America Bulletin*, 2024, 136(1-2): 619–636.
- Zhu J J, Zhang L F, Tao R B, et al. The formation of graphite-rich eclogite vein in S. W. Tianshan (China) and its implication for deep carbon cycling in subduction zone[J]. *Chemical Geology*, 2020, 533: 119430.
- Zong K Q, Zhang Z M, He Z Y, et al. Early Palaeozoic high-pressure granulites from the Dunhuang block, northeastern Tarim Craton: Constraints on continental collision in the southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2012, 30(8): 753–768.