

https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.256



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

陈丹玲, 刘良, 廖小莹, 任云飞, 官相宽

西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安 710069

摘要: 北秦岭构造带早古生代的构造格局和演化过程一直是地质界比较关注也是存在较大争议的问题之一。在已有研究基础上, 系统总结了本课题组近年来在北秦岭早古生代高压-超高压变质作用研究方面的进展, 从变质作用角度对北秦岭早古生代的构造演化提供重要限定。丹凤斜长角闪岩中柯石英的发现为区内超高压变质作用的存在提供了最直接的矿物学证据; 东秦岭秦岭杂岩中的斜长角闪岩普遍经历了高压-超高压榴辉岩相变质, 具面状分布的特征, 是陆壳俯冲/深俯冲作用的产物; 高压-超高压榴辉岩和围岩片麻岩都记录了顺时针的 P - T - t 轨迹, 峰期变质时代为500~490 Ma, 之后主体又经历约470~450 Ma和约420~400 Ma两期抬升退变质叠加和部分熔融作用; 高压-超高压岩石两期退变质和部分熔融发生的时代与北秦岭460~440 Ma和~420 Ma的两期岩浆事件的时代一致, 说明北秦岭早古生代岩浆作用是深俯冲陆壳板片断裂和碰撞造山结束后地壳伸展作用的岩浆响应; 高压-超高压榴辉岩原岩形成时代约800 Ma, 具有与南秦岭新元古代中晚期岩浆岩一致的地球化学特征, 北秦岭超高压岩石的形成可能是商丹洋关闭后洋壳拖曳着南秦岭陆壳物质向北发生大陆深俯冲的结果, 商丹洋在500 Ma主体应该已经关闭; 秦岭岩群是部分而不是整体经历了大陆的深俯冲, 现今的秦岭岩群是一个俯冲碰撞杂岩带而不是一个岩石地层单元或微陆块; 北秦岭早古生代造山作用在中泥盆世已经结束, 整体处于构造隆升后的剥蚀阶段, 是南秦岭刘岭群碎屑岩的主要蚀源区, 刘岭群沉积盆地形成于碰撞造山后的伸展构造背景而非弧前环境。

关键词: 超高压变质作用; 时空分布; P - T - t 演化轨迹; 形成机制; 北秦岭造山带; 岩石学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2019)12-4017-11

收稿日期: 2019-09-10

The Distribution, P - T - t Evolution and Formation Mechanism of HP-UHP Metamorphic Rocks in the North Qinling Orogenic Belt

Chen Danling, Liu Liang, Liao Xiaoying, Ren Yunfei, Gong Xiangkuan

State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: The Early Paleozoic tectonic framework and evolution history of the North Qinling orogenic belt (NQOB) is in great dispute and has drawn wide concern. In this contribution, we systematically summarized our recent progresses on Early Paleozoic HP-UHP metamorphism in the NQOB and constrained the Early Paleozoic tectonic evolution of the NQOB from the perspectives of metamorphism. The discovery of coesite in the Danfeng amphibolite provides a conclusive evidence for the UHP metamorphism in the NQOB. The amphibolites, which are widely distributed in Qinling Complex in East Qinling, commonly experienced HP-UHP metamorphism and are products of continental (deep) subduction. HP-UHP eclogites and host gneisses have clockwise P - T - t paths and similar peak metamorphic ages of 500–490 Ma, and experienced two stages retrogression and anatexis at 470–450 Ma and 420–400 Ma, respectively. The times of the two stage retrogression and anatexis are coincident with the magmatism in the

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(No.2015CB856103); 国家自然科学基金项目(Nos.41472053, 41430209).

作者简介: 陈丹玲(1967-), 女, 教授, 从事岩石大地构造研究. ORCID: 0000-0002-5231-5659. E-mail: dlchen@nwu.edu.cn

引用格式: 陈丹玲, 刘良, 廖小莹, 等, 2019. 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. 地球科学, 44(12):4017-4027.

NQOB, which occurred at 460–450 Ma and ~420 Ma, suggesting that the Early Paleozoic magmatism in the NQOB were formed under the tectonic setting of breaking-off of deeply subducted continental slab and post-orogenic extension-thinning, respectively. The HP-UHP rocks have protolith ages of ca. 800 Ma, and geochemical characteristics similar to Mid-Late Neoproterozoic magmatic rocks from South Qinling, indicating that continental materials from South Qinling were dragged down to mantle depth and experienced UHP metamorphism by the north dipping Shangdan oceanic lithosphere, and the Shangdan Ocean was already closed at 500 Ma. The Qinling Group is a tectonic complex rather than a uniform stratigraphic unit or a microcontinent and only part of it underwent continental deep subduction. The Early Paleozoic orogenesis in North Qinling was ended and the HP-UHP rocks were exhumated up to the surface in Mid-Devonian, and became the main provenance of sedimentary rocks in Liuling group in South Qinling. The Liuling basin is a post-orogenic extensional basin, rather than a fore-arc basin.

Key words: ultrahigh pressure metamorphism; spatio-temporal distribution; *P-T-t* path; formation mechanism; North Qinling orogenic belt; petrology.

0 引言

造山带中的超高压变质岩石记录了地壳物质俯冲到地幔深度再折返回地表的整个动力学过程,为了解板块俯冲和碰撞以及揭示和重建造山带的形成和演化历史提供重要信息.然而由于俯冲板片在其折返过程中通常经历了不同程度、多期次的退变质作用改造,使得峰期变质矿物被改变或消失,为超高压变质岩石的识别及其峰期变质条件的准确恢复带来困难.锆石是超高压变质岩中最重要的副矿物之一,具有较高的化学和物理稳定性及抗干扰能力,可以对其中的高压-超高压(HP-UHP)变

质矿物包裹体起到很好的保护作用,是研究遭受强烈退变质改造的HP-UHP岩石复杂演化历史的最理想矿物.而且,锆石的内部结构和微量元素组成特征受其成因以及共生矿物种类(如石榴子石、斜长石等)的控制,对反演岩石成因(岩浆作用还是变质作用)以及变质作用的条件(如榴辉岩相、麻粒岩相或者角闪岩相等)具有重要的指示意义;碎屑锆石的年代学研究,也可为沉积物来源、沉积环境和沉积时代提供重要限定.因此,将锆石的内部结构、显微矿物包裹体、微量元素组成特征,以及U-Th-Pb和Lu-Hf同位素等研究相结合,可以为超高压变质岩石的确定以及探讨变质作用过程、变质原岩属

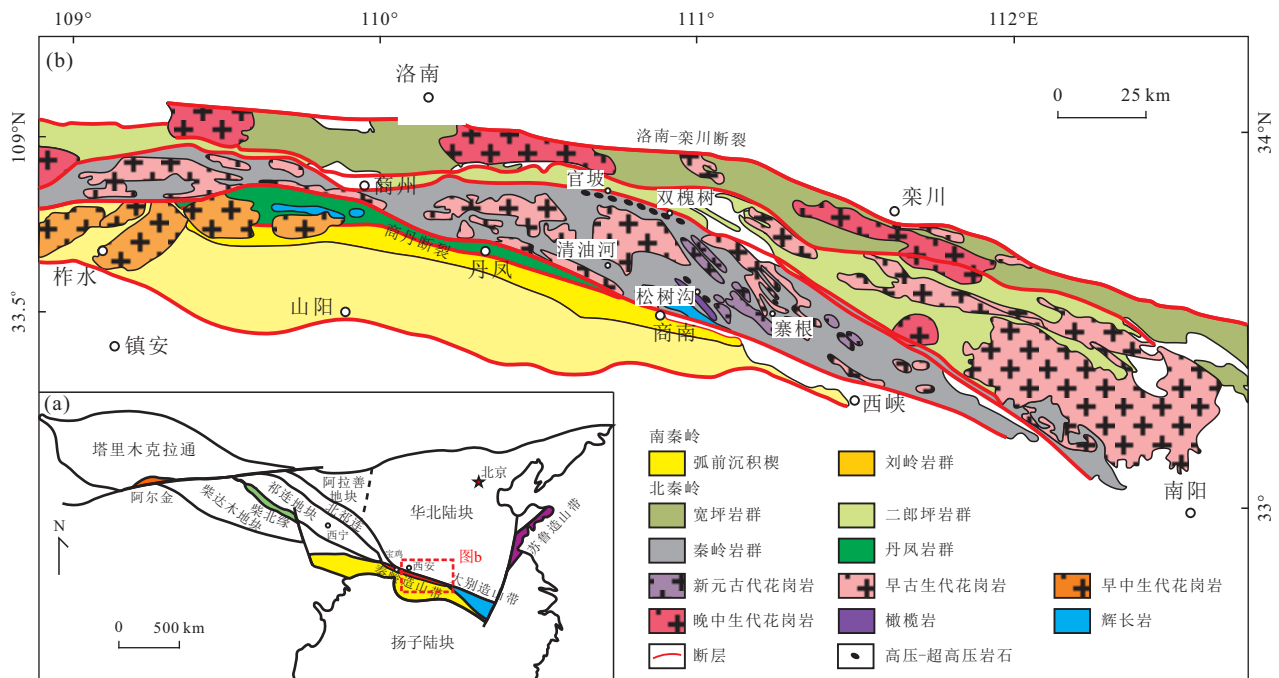


图 1 区域地质简图

Fig.1 Sketch geological map

a. 中国中西部构造地质简图; b. 北秦岭构造带构造地质简图(据 Wang et al., 2013)

性、地质作用的时效及过程提供重要信息。

秦岭造山带地处中国大陆中部,连接东西、分割南北,有关其形成和演化过程在中国大陆构造地质研究中占据重要位置(图 1),受到广泛关注。近 30 余年来,围绕秦岭造山带的系统综合研究,基本建立了秦岭造山带,是由北秦岭(由北向南主要由宽坪岩群、二郎坪岩群、秦岭岩群以及丹凤岩群)、南秦岭和扬子板块北缘分别在早古生代沿商丹缝合带和早中生代沿勉略缝合带俯冲碰撞造山而成的一个复合造山带的基本构造框架(张国伟等,2001 及其参考文献),但由于长期复杂多期次构造运动的叠加,一些关键地质问题尚存在不同认识,导致有关其早古生代构造演化过程存在较大争议(Wu and Zheng, 2013; Dong and Santosh, 2016 及其参考文献; Liu *et al.*, 2016 及其参考文献)。之前的研究认为,秦岭杂岩以普遍经历高角闪岩相变质为特征,局部达麻粒岩相(张国伟等,2001 及其参考文献)。然而,随着区内高压—超高压变质岩石的不断发现和深入研究(杨经绥等,2002; Liu *et al.*, 2016 及其参考文献; Cheng *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2014)引发

了大家新的思考,秦岭杂岩中广泛分布的斜长角闪岩或榴闪岩是否都经历过早期的 HP-UHP 榴辉岩相变质、它们的 P - T - t 演化轨迹如何、它们是在何种构造背景下以及通过何种机制形成等。本文在前人已有研究基础上,系统总结了本课题组近年来在北秦岭超高压变质作用研究方面的主要进展,力图从 HP-UHP 变质作用的角度,对北秦岭早古生代的构造格局和演化过程提供重要限定。

1 柯石英的发现与北秦岭超高压变质作用

秦岭造山带的超高压变质作用研究始于 1994 年胡能高报道在官坡榴辉岩中发现柯石英假象,但提供了拉曼光谱证据并真正引起广泛关注的则是官坡榴辉岩及其围岩片麻岩锆石中微粒金刚石的发现(杨经绥等,2002);以及近乎同时 Liu *et al.* (2016 及其参考文献)依据对松树沟长英质高压麻粒岩石榴子石中大量石英+金红石+磷灰石棒状出溶体的研究,指出该石榴子石出溶前超 Si,形成

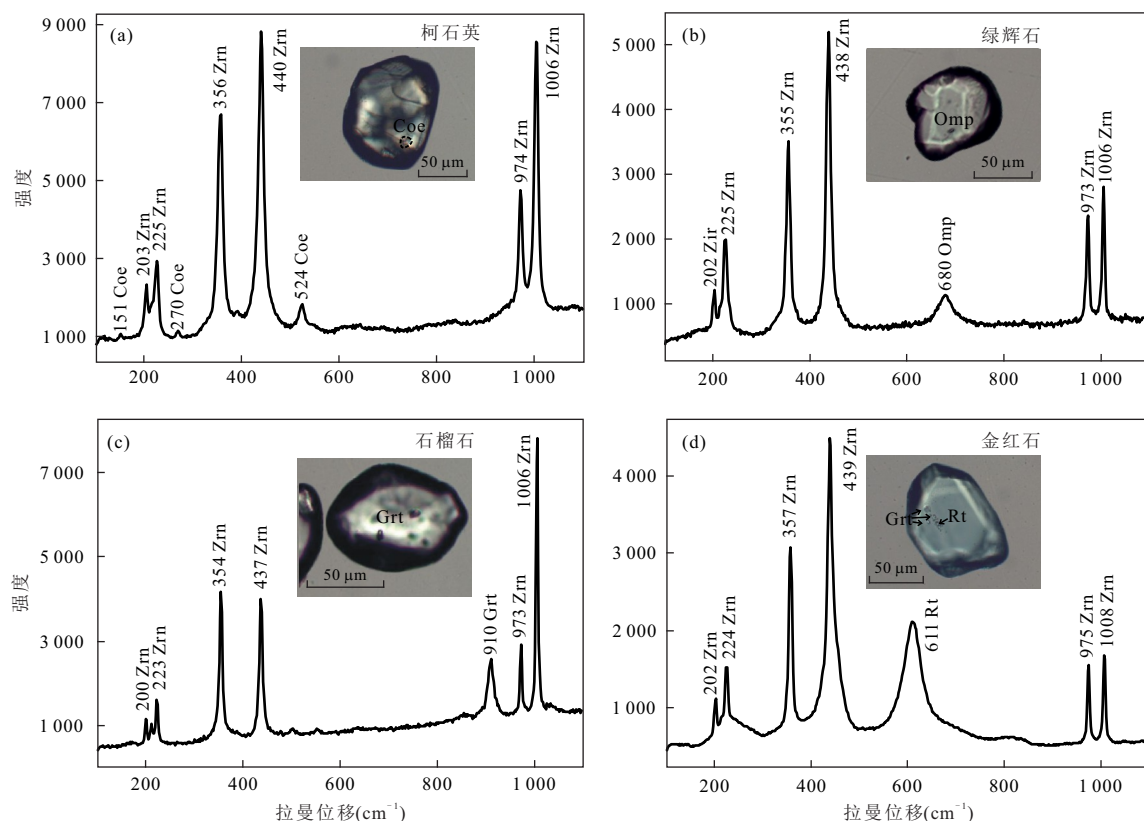


图 2 丹凤斜长角闪岩锆石中的包裹体及其激光拉曼谱图

Fig.2 Representative photographs and Raman spectra of mineral inclusions in zircons from Danfeng amphibolite
Coe. 柯石英; Omp. 绿辉石; Grt. 石榴子石; Rt. 金红石; Zrn. 锆石. 据宫相宽等(2016)

在超高压变质条件下,之后,Wang *et al.*(2014)在松树沟西邻的清油河地区的斜长角闪岩锆石中发现微粒金刚石包裹体,并指出该岩石是俯冲至 >120 km地幔深度经历超高压变质的产物.但由于缺乏更广泛和常见的超高压矿物柯石英,北秦岭的超高压变质作用始终遭到质疑(Liou, 2015. 华人地质大会报告. 台湾).

本课题组在对陕西丹凤大寺沟地区秦岭岩群长英质片麻岩和其中的斜长角闪岩透镜体研究过程中发现,该地区的斜长角闪岩主要由角闪石、斜长石和少量石英、钛铁矿、黑云母组成,个别样品中可见少量石榴子石,显示了典型角闪岩相变质特征.但是,利用激光拉曼光谱分析方法,在一个斜长角闪岩的锆石包裹体中发现了柯石英、绿辉石、石榴石和金红石等多种矿物包裹体(宫相宽等, 2016).其中,柯石英具有 524 cm^{-1} 主峰以及 270 cm^{-1} 和 151 cm^{-1} 次峰的拉曼光谱组合,绿辉石具有典型的 680 cm^{-1} 拉曼峰值(图2).柯石英、石榴石、绿辉石和金红石显微包裹体矿物组合的发现,证明该斜长角

闪岩是先期超高压榴辉岩退变质的产物.丹凤含柯石英斜长角闪岩的发现无疑证明北秦岭造山带确实存在超高压变质作用,而且至少有部分俯冲到了 >120 km 甚至更大的地幔深度(Wang *et al.*, 2014).

2 松树沟、寨根等地退变榴辉岩的确定与HP-UHP岩石的空间分布

详细的岩相学研究并结合电子探针和激光拉曼光谱分析,在松树沟超镁铁质岩体旁侧的榴闪岩的角闪石核部、石榴石变斑晶的幔部以及锆石包体中都发现了残留的绿辉石(图3),而且发现部分石榴石变斑晶保存了很好的进变质矿物包裹体和主、微量元素成分环带;绿辉石发育强烈的透辉石+钠质斜长石冠状体和后成合晶(陈丹玲等, 2015),表明松树沟榴闪岩为榴辉岩相退变质的产物,至少经历了从角闪岩相到榴辉岩相再到角闪岩相退变质的3阶段顺时针 $P-T$ 演化,其形成是区域榴辉岩相

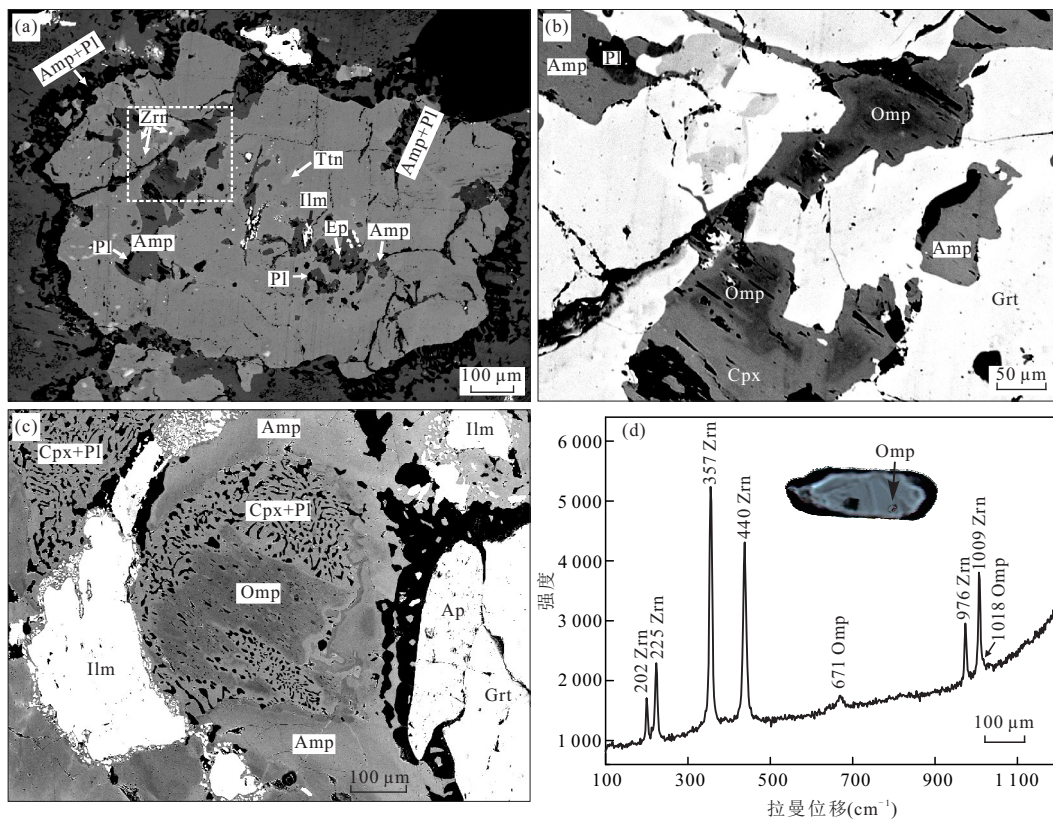


图3 松树沟退变榴辉岩石榴石和锆石中绿辉石包裹体及基质中残留的绿辉石

Fig.3 The omphacite inclusions in garnet and zircon and relic omphacite in matrix of Songshugou retrograde eclogite. Amp. 角闪石; Zrn. 锆石; Pl. 斜长石; Ttn. 榍石; Ilm. 钛铁矿; Ep. 绿帘石; Cpx. 单斜辉石; Omp. 绿辉石; Ap. 磷灰石. 据陈丹玲等(2015)

变质的结果,基本排除了该“榴闪岩”的形成与松树沟超镁铁质岩的“热侵位”或“构造就位”事件有关的认识;在河南西峡县寨根地区秦岭群的石榴子石辉石岩透镜体的石榴石核部发现了残留的绿辉石包体,表明该岩石是榴辉岩退变质的产物.综合石榴子石不同部位包体矿物组合和成分变化特征,以及岩石中石榴子石和绿辉石的多期次退变质反应结构,揭示该岩石至少经历了从进变质到峰期榴辉岩相变质,之后再叠加高压和中压麻粒岩相变质,最后到角闪岩相变质的5阶段顺时针的变质演化过程(Liao *et al.*, 2016).

与此同时,课题组对东秦岭陕西商洛丹凤以东,河南西峡及其以西广大区域秦岭岩群中不同产状斜长角闪岩/榴闪岩进行了大范围的HP-UHP变质作用筛查.结果发现,丹凤县城北、商南县清油河、西峡县城北、耿家店等多个地区(图1)的秦岭岩群斜长角闪岩(榴闪岩)和部分围岩片麻岩,也包括松树沟原定的高压基性麻粒岩,在这些岩石中虽然没有发现榴辉岩相变质矿物,但它们中的锆石多具有无Eu负异常和HREE平坦—亏损的榴辉岩相变质锆石的稀土元素配分曲线特征,并且都获得了与HP-UHP榴辉岩一致的峰期变质年龄(刘良等, 2013;宫相宽等, 2016; Liao *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2016及其参考文献;王亚伟等, 2016),结合清油河地区含金刚石斜长角闪岩(Wang *et al.*, 2014)和丹凤含柯石英斜长角闪岩(宫相宽等, 2016)的发现,共同说明这些斜长角闪岩(或榴闪岩)或高压麻粒岩及其围岩片麻岩很可能都是先期HP-UHP榴辉

岩相岩石退变质的产物.而且,这些岩石在空间上呈面状分布于秦岭杂岩之中(图1),进一步证明,北秦岭秦岭杂岩可能主体经历了HP-UHP榴辉岩相变质,而非原来认为的普遍经历角闪岩相变质,局部经历麻粒岩相或榴辉岩相变质.

3 北秦岭超高压变质作用的年代学

采用LA-ICP-MS锆石U-Pb原位定年方法,对丹凤含柯石英斜长角闪岩以及区内新确定的榴辉岩和斜长角闪岩/榴闪岩及其围岩长英质片麻岩进行了系统的年代学研究.在丹凤含柯石英斜长角闪岩得到499~497 Ma、453~451 Ma和425~416 Ma三组年龄,其中499~497 Ma来自于含柯石英、绿辉石和石榴石的微区,代表该岩石超高压变质年龄;453~451 Ma和425~416 Ma分别来自于~500 Ma和~450 Ma测点的外围,在425~416 Ma的环带可见Amp+Q包裹体,指示超高压变质之后该岩石又经历了两期退变质事件的叠加(宫相宽等, 2016).获得寨根退变榴辉岩的榴辉岩相变质年龄为501~497 Ma,原岩年龄结晶年龄为786±10 Ma,同时在锆石的两类变质边获得了两期退变质年龄分别为474~447 Ma和425 Ma以及Cpx、Amp、Pl和Q包裹体(Liao *et al.*, 2016).获得松树沟退变榴辉岩的榴辉岩相的变质年龄为500±8 Ma,榴辉岩原岩结晶时代为796±16 Ma(陈丹玲等, 2015).获得清油河斜长角闪岩的原岩年龄774±13 Ma,榴辉岩相变质年龄493±5 Ma,麻粒岩相退变质年龄448±4 Ma和Cpx+Rt包裹体(王亚伟等, 2016).

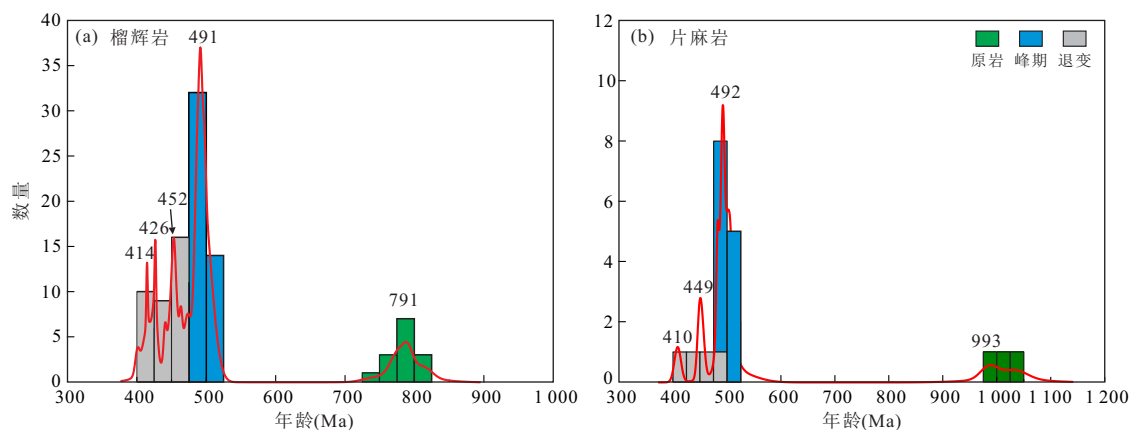


图4 北秦岭高压—超高压变质榴辉岩及围岩片麻岩的年龄统计结果

Fig.4 Summary of ages for HP-UHP eclogites and host gneisses in the NQOB

数据引自 Liu *et al.* (2016); 宫相宽(2017); 廖小莹(2018)及其参考文献

如果我们将本课题组新获得的年龄数据与文献中已报道数据汇总在一起(图4)可以看出,所有结果非常一致,而且围岩长英质片麻岩与(退变)榴辉岩的峰期变质和退变质年龄也非常一致,峰期变质时代皆变化于500~490 Ma,而且都记录了两期~470~450 Ma和420~400 Ma的退变质;榴辉岩的原岩年龄约为800 Ma,长英质片麻岩最年轻碎屑锆石年龄约为1.0 Ga.其中峰期变质年龄(500~490 Ma)与斜长角闪岩锆石含柯石英(495±5 Ma;宫相宽等,2016)和金刚石(490±6 Ma;Wang *et al.*,2014)微区,以及云母石英片岩锆石含金刚石微区(511~507 Ma;杨经绥等,2002)和松树沟超高压长英质片麻岩(497±8Ma;刘良等,2013)的定年结果一致,从退变榴辉岩得到的两期退变质年龄来自同一颗锆石的不同变质环带(宫相宽等,2016;Liao *et al.*,2016),结合~470~450 Ma变质环带中Cpx+Pl+Rt,以及420~400 Ma变质环带中Amp+Q+Rt显微矿物包裹体的存在(宫相宽等,2016;Liao *et al.*,2016;王亚伟等,2016),我们有理由认为:北秦岭秦岭岩群在500~490 Ma的早古生代经历了同一期HP-UHP变质作用,是大陆深俯冲作用的结果,~470~450 Ma和420~400 Ma的两期退变质作用可能分别对应于北秦岭深俯冲陆壳的板片断离和碰撞造山结束后的构造伸展过程(Liao *et al.*,2016).

4 变质作用 P - T - t 轨迹

超高压变质岩石的 P - T - t 轨迹可以直观反映板块从深俯冲到折返的整个过程,是变质岩石学研究的核心内容.但是,在北秦岭造山带,由于强烈的退变质改造,使得多数岩石早期经历的榴辉岩相变质矿物被抹去或改造,仅保留在锆石的包裹体或微量元素特征上,给变质作用 P - T - t 轨迹的准确限定带来很大困难.本次在详细岩相学研究基础上,选择研究区内官坡、松树沟、寨根和清油河4个地区的未被完全改造的(退变)榴辉岩及其围岩片麻岩,综合利用传统矿物温压计和平衡模拟计算方法,结合包裹体矿物学、矿物化学和年代学研究结果,重建了北秦岭HP-UHP变质岩石的变质作用 P - T - t 轨迹(图5)(Liu *et al.*,2016).可以看出,北秦岭不同地区、不同类型的HP-UHP岩石都经历了顺时针的 P - T - t 演化轨迹,目前可获得的峰期变质条件被限定在石英-柯石英转变线附近或之上的超高压稳定域,结合它们具有几乎一致的峰期变质时代,我们初步

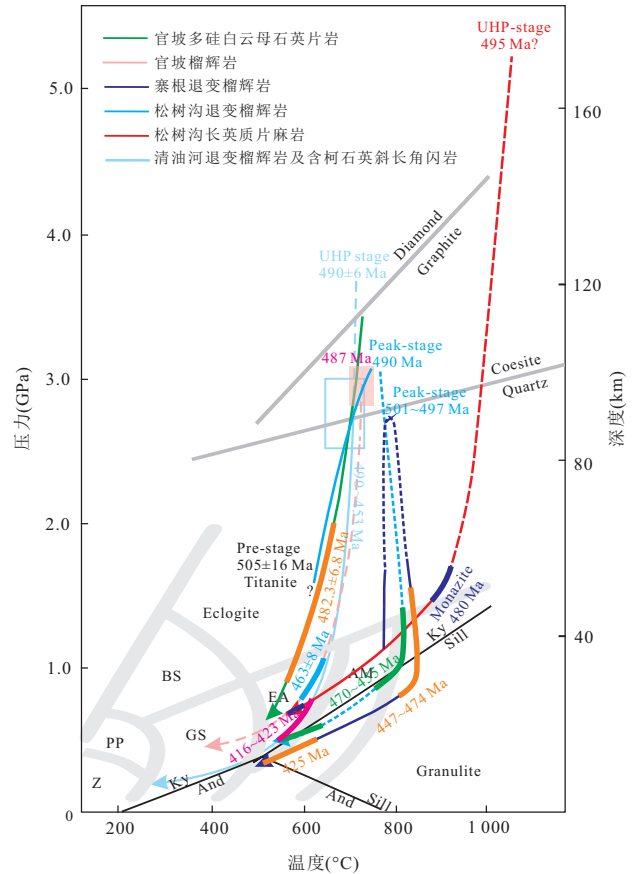


图5 北秦岭高压-超高压岩石的 P - T - t 轨迹

Fig.5 The P - T - t paths of HP-UHP rocks in the NQOB
据廖小莹(2018)

认为它们经历了同一期板块的俯冲碰撞构造事件,但不可否认,它们的峰期俯冲深度和折返过程存在差异,其中官坡和清油河地区的榴辉岩以及官坡的云母石英片麻岩达到了金刚石稳定域,松树沟长英质片麻岩甚至达到了>9 GPa的地幔深度(Liu *et al.*,2016);折返过程中,官坡和清油河的超高压岩石直接降温降压至角闪岩相阶段,而松树沟和寨根地区的超高压岩石则在峰期变质之后,先升温降压叠加麻粒岩相变质作用(1.56~0.83 GPa,800~850 °C),然后再降温降压至角闪岩相阶段(0.45~0.68 GPa,550~620 °C).从目前看,这些差异的分布不具有规律性,是由于研究程度的不足还是确实代表了不同俯冲深度和折返路径物质的混杂,亦或是由于强烈退变质作用改造抹去了一些信息的结果,有待进一步的研究.

5 北秦岭深俯冲板片的属性及俯冲方向

详细的主、微量元素地球化学研究揭示,官坡、

清油河和松树沟地区的(退变)榴辉岩、斜长角闪岩/榴闪岩主体显示了轻—中度富集轻稀土和大离子不相容元素,不具有明显 Nb、Ta 负异常(图 6)的 E-MORB 的地球化学属性,且具有高的全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (2.81~5.53) 和锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (10.5~11.9) 值 (Cheng *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2016 及其参考文献). 在多种微量元素构造环境判别图上落入 E-MORB 和大陆拉板玄武岩的区域 (张安达等, 2003; 陈丹玲和刘良, 2011; Cheng *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2016). 考虑到北秦岭 HP-UHP 榴辉岩几乎全部呈透镜状或夹层状产于长英质片麻岩中的地质观察以及与片麻岩具有相似的峰期变质条件、相同的变质时代和变质 P - T - t 轨迹,虽然我们目前还很难确定其原岩究竟是基性侵入体(岩墙)还是基性火山岩,但即使部分榴辉岩显示洋壳的地球化学特征,~800 Ma 的榴辉岩的原岩年龄的获得,也指示它们是早已就位于大陆边缘的新元古代的古洋壳残片,在古生代时期,随着大洋的闭合,与陆壳岩石一起发生大陆的深俯冲.

按照现有认识,大陆板块的深俯冲必须要有早期大洋板片的拖曳. 从图 1 可见,北秦岭秦岭杂岩的南北两侧分别发育有商丹蛇绿混杂岩带和二郎坪蛇绿混杂岩带 (Dong and Santosh, 2016). 那么,北秦岭的大陆深俯冲到底是与商丹洋的向北俯冲还是与二郎坪洋的向南俯冲拖曳有关? Liu *et al.* (2016) 在详细对比了丹凤和二郎坪蛇绿混杂岩的发育时代和地球化学属性后分析认为,商丹蛇绿岩具有 N-MORB 和 E-MORB 的地球化学属性,大洋发育时代为 534~518 Ma,由玻安岩和岛弧火山岩的定

年结果限定商丹洋的俯冲时代为 520~500 Ma;二郎坪蛇绿混杂岩具有弧后盆地蛇绿岩属性,岛弧火山岩 (474~440 Ma) 和花岗闪长岩 (486~473 Ma) 限定了洋壳的俯冲时代为 480~440 Ma. 由此可见,商丹洋向北俯冲形成弧火山岩的时代 (524~500 Ma) 明显早于或接近秦岭杂岩中 HP-UHP 岩石的峰期变质时代 (500~490 Ma),而二郎坪洋俯冲形成岩浆与弧火山岩的时代 (486~440 Ma) 滞后 HP-UHP 岩石的峰期变质时代 ~10~50 Ma. 结合北秦岭榴辉岩的原岩地球化学属性,尤其是 Nb-Pb 同位素特征与南秦岭的新元古代中晚期 (850~680 Ma) 岩浆岩具有极强的可比性 (Liu *et al.*, 2016),我们初步认为,拖曳北秦岭陆壳岩石发生深俯冲的洋壳可能是商丹洋而不是二郎坪洋. 因此,北秦岭 HP-UHP 变质岩石的形成是商丹洋闭合时大洋板块拖曳南秦岭地壳物质向北发生深俯冲作用的产物.

6 秦岭杂岩的构造属性——来自二郎坪—宽坪碎屑锆石定年结果的约束

从图 1 可见,现今的秦岭杂岩主要由各种副变质的片麻岩、片岩、大理岩、呈透镜状或夹层状产出的斜长角闪岩(榴闪岩)以及新元古代和古生代的侵入体组成. 区内已发现的 HP-UHP 变质岩石在秦岭杂岩中面状广泛分布(图 1),而且具有相似的 P - T - t 演化轨迹(图 5)和相似的峰期变质和退变质年龄,似乎表明北秦岭构造带在早古生代时期发生了大陆物质的整体俯冲 (Zhang *et al.*, 2015). 但是, Liu *et al.*

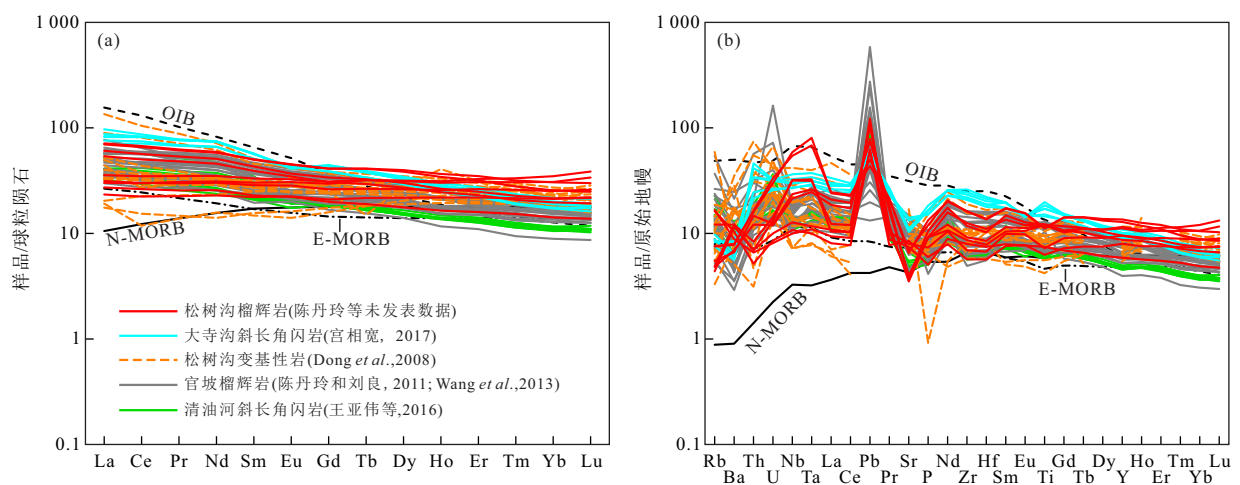


图 6 北秦岭高压—超高压榴辉岩的地球化学特征

Fig. 6 The geochemical characteristics of HP-UHP eclogites in the NQOB

(2016)对秦岭杂岩北侧二郎坪群和宽坪群浅变质碎屑岩的碎屑锆石的分析结果显示,二郎坪和宽坪群的碎屑岩具有几乎一致的碎屑锆石年龄谱特征,暗示两者可能形成在商丹洋北向俯冲产生的同一个弧后盆地构造背景之中,碎屑岩中最年轻碎屑锆石年龄(500 Ma)限定其沉积时代应该在 500 Ma 之后.依据碎屑物中普遍存在来自秦岭岩群 1.0~0.9 Ga 新元古代花岗岩和 1.48~1.35 Ga 长英质片麻岩的碎屑锆石,而缺乏与 HP-UHP 变质岩石相关的 500~400 Ma 花岗岩和变质岩碎屑锆石的记录,表明二郎坪—宽坪群碎屑岩沉积时,其南侧北秦岭的新元古代侵入体和长英质片麻岩是主要的碎屑物源区,而经历早古生代 HP-UHP 变质的岩石和花岗质岩石此时尚未抬升至地表.也就是说,至少部分北秦岭的新元古代侵入体和长英质片麻岩(可能还包括部分斜长角闪岩)并未参与大陆的深俯冲,秦岭岩群是部分而不是全部经历了深俯冲作用,现今的秦岭杂岩不是一个统一的岩石地层单元或微陆块而是一个构造混杂岩带.

7 高压—超高压变质岩石折返过程的多期次部分熔融

对丹凤含柯石英斜长角闪岩围岩片麻岩中的长英质浅色体和含石榴子石暗色包体的花岗质脉体的详细研究发现,这些长英质浅色体大致平行或小角度切割围岩的片麻理,具有高 Si、Al 和 K,低 Mg、Fe 和 Ti,以及富集 Rb、Ba 而明显亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 的特征,与白云母脱水熔融形成的熔体成分类似,脉体中的锆石含有 Qr+Pl+Ap+Q 显微包裹体(罗芬红等,2018),为熔体结晶成因;含石榴子石暗色包体的花岗质脉体沿围岩片麻理方向侵入,具过铝质 S 型花岗岩属性以及 HREE 强烈亏损与石榴子石平衡的高压熔体特征,其中的锆石显示清晰岩浆振荡环带结构(罗芬红等,2018).定年结果得到长英质浅色体中深熔锆石的形成时代为 445 ± 4 Ma,含石榴子石暗色包体的花岗质脉体岩浆结晶时代为 420 ± 1 Ma(罗芬红等,2018).考虑到暗色包体中石榴子石的核部成分与 HP-UHP 秦岭岩群长英质片麻岩中石榴子石的成分一致(罗芬红等,2018),而且脉体的结晶年龄(420 ± 1 Ma)明显晚于区内 HP-UHP 峰期变质年龄,说明该花岗质脉体是秦岭杂岩中含石榴子石长英质片麻岩在峰期变质之后减压部分熔融的产物,暗色包体为片麻岩部分熔融

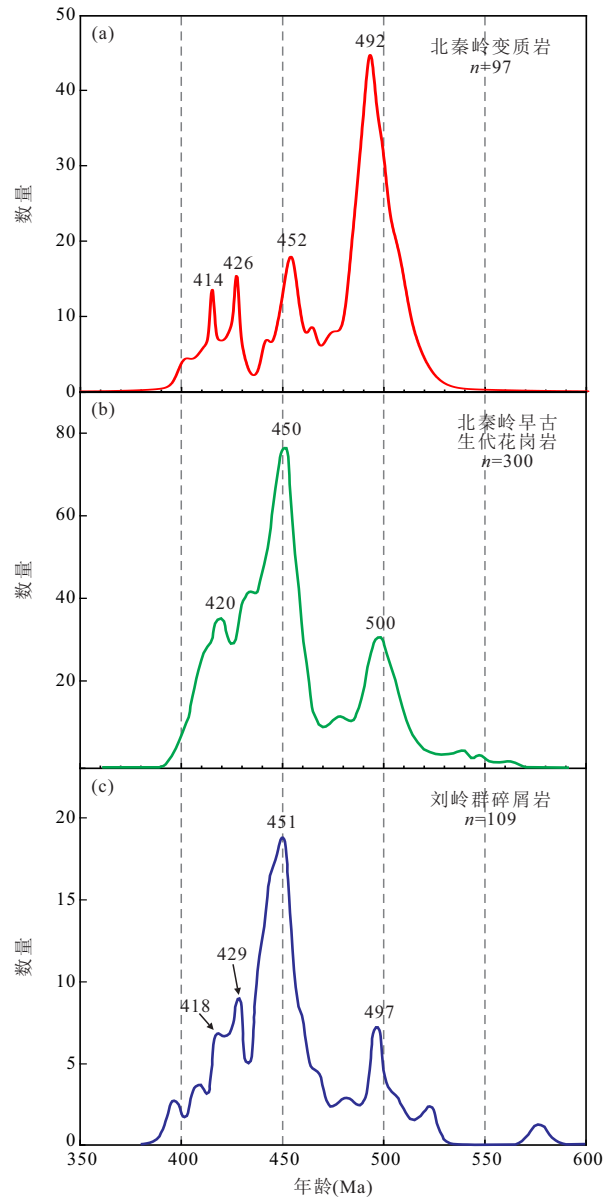


图7 北秦岭古生代高压—超高压变质岩(a)、花岗岩(b)和刘岭群碎屑锆石(c)的年龄统计结果

Fig.7 Summary of ages for HP-UHP rocks (a) and Paleozoic granitoids (b) in the NQOB, detrital zircons in the Liuling Group (c)

花岗岩数据引自张成立等(2013);变质岩和碎屑岩数据来自 Liao *et al.*(2017)、宫相宽(2017)和廖小莹(2018)

的残留体,不支持~420 Ma的部分熔融是来源于接触交代变质的认识(Cheng *et al.*, 2011).这两期部分熔融的年龄,与上述超高压变质岩石折返过程中 470~450 Ma 和 420~400 Ma 的两期退变质年龄基本一致,而且也与北秦岭最广泛产出的一期(460~440Ma)花岗质与镁铁质岩浆岩和少量发育的一期花岗岩(~420 Ma)的形成时代基本一致(图 7a,

7b), 暗示这两期岩浆岩的形成可能分别对应于北秦岭深俯冲陆壳板片断离和碰撞造山结束后伸展减薄的构造背景, 本文花岗质脉体中含石榴子石长英质片麻岩残留体的存在以及减压熔融的熔体成分特征更是表明, 北秦岭造山带古生代的岩浆作用是经历过 HP-UHP 变质的长英质片麻岩部分熔融的结果, 而非岛弧岩浆作用的产物。

8 北秦岭 HP-UHP 变质地体折返到地表时限的限定——来自南秦岭刘岭群碎屑锆石的证据

为了追踪北秦岭 HP-UHP 变质岩带何时折返到地表的时限, 我们综合利用碎屑锆石的形貌特征、微量元素组成、U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素特征, 详细分析对比了商丹缝合带南侧南秦岭中泥盆世刘岭群的碎屑物组成特征及来源 (Liao *et al.*, 2017). 结果得到刘岭群沉积岩最年轻碎屑锆石年龄为 400 Ma, 同时得到 500~410 Ma、850~700 Ma 和 1.0~0.9 Ga 三个主要的碎屑年龄集中区和 1.8~1.4 Ga、2.5~2.4 Ga 两个次要的年龄集中区。其中, 1.0~0.9 Ga 和 850~750 Ma 对应的锆石分别与秦岭杂岩中新元古代花岗岩和南秦岭或扬子北缘的新元古代中期岩浆锆石 (或者秦岭群斜长角闪岩) 具有很强的可比性; 而最为发育的 500~400 Ma 的锆石存在 421 Ma、450 Ma 和 496 Ma 三个年龄峰值 (图 7c)。依据锆石的内部结构和 Th/U 比值, 这三个年龄峰值区的锆石均可识别出主体为发育震荡环带的岩浆锆石, 少量为具有变质增生边的变质锆石 (Liao *et al.*, 2017)。其中岩浆锆石与秦岭杂岩中的三期古生代花岗质岩浆岩的锆石年龄谱一致, 变质锆石与 HP-UHP 岩石的峰期变质时代和两期退变质时代一致 (图 7), 尤其是个别年龄为 ~500 Ma 的锆石变质增生边还显示出无 Eu 负异常的 HREE 平坦型榴辉岩相变质特征 (Liao *et al.*, 2017), 无疑说明 500~400 Ma 的碎屑锆石来自秦岭杂岩中早古生代的岩浆岩和变质岩。刘岭群碎屑沉积物中古生代花岗岩尤其是榴辉岩相变质锆石的大量出现, 无疑表明南秦岭中泥盆世刘岭群沉积时, 北秦岭的 HP-UHP 变质岩石和古生代花岗岩已经抬升至地表遭受剥蚀, 是刘岭群碎屑岩的最主要物源, 同时也说明, 北秦岭早古生代造山作用在中泥盆世已经结束, 南秦岭的刘岭群沉积盆地形成于碰撞造山后的

伸展构造背景而非与俯冲相关的弧前环境。

9 北秦岭早古生代构造演化的几点认识

综合上述研究并参考北秦岭各岩石地层单元的研究结果, 本文对北秦岭造山带从新元古代到早古生代构造演化过程概括如下 (图 8)。

600~534 Ma, 商丹洋发育阶段。

524~500 Ma, 商丹洋向北持续俯冲, 形成秦岭岛弧以及二郎坪—宽坪弧后盆地。

500~490 Ma, 商丹洋拖曳南秦岭部分陆壳物质发生深俯冲, 商丹洋盆主体关闭。

485~470 Ma, 部分俯冲陆壳物质在地幔深度发生初始折返, 白云母脱水熔融促进深俯冲板片快速折返。

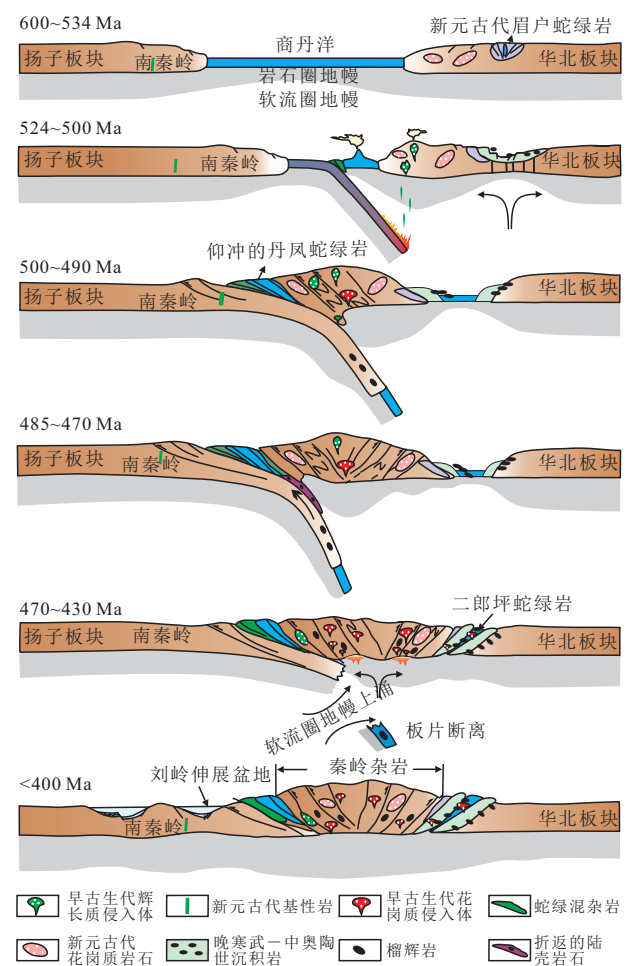


图 8 北秦岭早古生代构造演化简图

Fig.8 Schematic cartoons showing the Early Paleozoic tectonic evolution of the North Qinling orogenic belt

据 Liu *et al.* (2016)修改

470~430 Ma, 俯冲板片发生断离, 高压—超高压岩石发生大规模折返至下地壳环境, 叠加麻粒岩相退变质改造, 同时伴随软流圈地幔上涌和幔源岩浆侵入, 深俯冲陆壳物质发生部分熔融, 形成北秦岭最为广泛的花岗质岩浆岩和少量基性岩浆岩石。

430 Ma 之后, 伴随着断离板片的下沉, 区内持续造山后伸展, 高压—超高压岩石发生第二次抬升, 表现为广泛的角闪岩相退变质的叠加和俯冲陆壳的部分熔融, 同时产生少量花岗质岩浆作用。

400 Ma 或稍后, 深俯冲的 HP-UHP 岩石和古生代的花岗质岩石抬升地表遭受剥蚀, 在商丹带南侧形成造山后伸展盆地, 接受北秦岭隆升后风化剥蚀的大量碎屑物质。

References

- Chen, D. L., Liu, L., 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. *Earth Science Frontiers*, 18(2):158—169(in Chinese with English abstract).
- Chen, D.L., Ren, Y.F., Gong, X.K., et al., 2015. Identification and Its Geological Significance of Eclogite in Songshugou, the North Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 1841—1854(in Chinese with English abstract).
- 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. *Lithos*, 125(3—4): 969—983. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.010>
- Cheng, H., Zhang, C., Vervoort, J.D., et al., 2012. Timing of Eclogite Facies Metamorphism in the North Qinling by U-Pb and Lu-Hf Geochronology. *Lithos*, 136—139:46—59. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.06.003>
- Dong, Y. P., Santosh, M., 2016. Tectonic Architecture and Multiple Orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Gondwana Research*, 29(1): 1—40. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.06.009>
- Dong, Y.P., Zhou, M.F., Zhang, G.W., et al., 2008. The Grenvillian Songshugou Ophiolite in the Qinling Mountains, Central China: Implications for the Tectonic Evolution of the Qinling Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32:325—335.
- Gong, X. K., 2017. Metamorphism, Composition and Formaiton Age of the Qinling Group in Danfeng Area(Dissertation). Northwest University, Xi'an(in Chinese with English abstract).
- Gong, X.K., Chen, D.L., Ren, Y.F., et al., 2016. Identification of Coesite-Bearing Amphibolite in the North Qinling and Its Geological Significance. *Chinese Science Bulletin*, 61(12):1365—1378(in Chinese).
- Liao, X. Y., 2018. Continental Deep Subduction-Exhumation Process of North Qinling Belt: Constraints on Early Paleozoic Tectonic Evolution(Dissertation). Northwest University, Xi'an(in Chinese with English abstract).
- Liao, X. Y., Liu, L., Wang, Y. W., et al., 2016. Multi-Stage Metamorphic Evolution of Retrograde Eclogite with a Granulite-Facies Overprint in the Zhaigen Area of the North Qinling Belt, China. *Gondwana Research*, 30:79—96. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.09.012>
- Liao, X. Y., Wang, Y. W., Liu, L., et al., 2017. Detrital Zircon U-Pb and Hf Isotopic Data from the Liuling Group in the South Qinling Belt: Provenance and Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 134: 244—261. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2016.11.020>
- Liu, L., Liao, X. Y., Wang, Y. W., et al., 2016. Early Paleozoic Tectonic Evolution of the North Qinling Orogenic Belt in Central China: Insights on Continental Deep Subduction and Multiphase Exhumation. *Earth - Science Reviews*, 159: 58—81. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2016.05.005>
- Liu, L., Liao, X. Y., Zhang, C. L., et al., 2013. Multi-Metamorphic Timing of HP-UHP Rocks in the North Qinling and Their Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5):1634—1656(in Chinese with English abstract).
- Luo, F. H., Chen, D. L., Gong, X. K., et al., 2018. Multi-Stages Partial Melting of North Qinling Ultrahigh Pressure Metamorphic Terrane during Exhumation. *Acta Petrologica Sinica*, 34(12):3671—3689(in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Wu, Y. B., Gao, S., et al., 2013. Continental Origin of Eclogites in the North Qinling Terrane and Its Tectonic Implications. *Precambrian Research*, 230: 13—30. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.12.010>
- Wang, H., Wu, Y. B., Gao, S., et al., 2014. Deep Subduction of Continental Crust in Accretionary Orogen: Evidence from U-Pb Dating on Diamond-Bearing Zircons from the Qinling Orogen, Central China. *Lithos*, 190—191:420—429. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.12.021>
- Wang, Y. W., Liu, L., Liao, X. Y., et al., 2016. Multi-Metamorphism of Amphibolite in the Qinling Complex, Qingy-ouhe Area: Revelation from Trace Elements and Mineral Inclusions in Zircons. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5):

- 1467—1492(in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2013. Tectonic Evolution of a Composite Collision Orogen: An Overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu Orogenic Belt in Central China. *Gondwana Research*, 23(4): 1402—1428. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.09.007>
- Yang, J. S., Xu, Z. Q., Pei, X. Z., et al., 2002. 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. *Acta Geologica Sinica*, 76(4): 484—495(in Chinese with English abstract).
- Zhang, A. D., Liu, L., Wang, Y., et al., 2003. Geochemistry and Tectonic Setting of the Protolith of Eclogites in North Qinling. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 33(2): 191—195(in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. L., Liu, L., Wang, T., et al., 2013. Granitic Magmatism Related to Early Paleozoic Continental Collision in the North Qinling Belt. *Chinese Science Bulletin*, 58(23): 2323—2329(in Chinese).
- Zhang, G. W., Zhang, B. R., Yuan, X. C., et al., 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Science Press, Beijing(in Chinese).
- Zhang, H. F., Yu, H., Zhou, D. W., et al., 2015. The Meta-Gabbroic Complex of Fushui in North Qinling Orogen: A Case of Syn-Subduction Mafic Magmatism. *Gondwana Research*, 28(1): 262—275. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.04.010>
- 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. *地学前缘*, 18(2): 158—169.
- 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. *岩石学报*, 31(7): 1841—1854.
- 宫相宽, 2017. 丹凤地区秦岭岩群物质组成、形成时代及变质作用研究(博士学位论文). 西安: 西北大学.
- 宫相宽, 陈丹玲, 任云飞, 等, 2016. 北秦岭含柯石英斜长角闪岩的发现及其地质意义. *科学通报*, 61(12): 1365—1378.
- 廖小莹, 2018. 北秦岭陆壳深俯冲—折返作用及对早古生代构造演化过程的限定(博士学位论文). 西安: 西北大学.
- 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. *岩石学报*, 29(5): 1634—1656.
- 罗芬红, 陈丹玲, 宫相宽, 等, 2018. 北秦岭超高压地体折返过程中的多期次部分熔融. *岩石学报*, 34(12): 3671—3689.
- 王亚伟, 刘良, 廖小莹, 等, 2016. 秦岭杂岩清油河斜长角闪岩多期变质的证据: 来自锆石微量元素和包裹体的启示. *岩石学报*, 32(5): 1467—1492.
- 杨经绥, 许志琴, 裴先治, 等, 2002. 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. *地质学报*, 76(4): 484—495.
- 张安达, 刘良, 王焰, 等, 2003. 北秦岭榴辉岩的地球化学特征及形成环境. *西北大学学报(自然科学版)*, 33(2): 191—195.
- 张成立, 刘良, 王涛, 等, 2013. 北秦岭早古生代大陆碰撞过程中的花岗岩浆作用. *科学通报*, 58(23): 2323—2329.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等, 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社.