

https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.597



北秦岭超高压榴辉岩中长英质脉体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

何宇^{1,2}, 赵宇洁^{1,2}, 张文祥^{1,2}, 王浩^{3,4}, 周光颜^{1,2}, 吴元保^{1,2*}

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国科学院岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘要: 北秦岭地区的早古生代超高压变质作用是整个秦岭—桐柏—红安—大别—苏鲁造山带内最古老的超高压变质记录, 代表华南与华北板块之间最早的一期增生碰撞事件, 然而目前对于该地区早古生代的构造演化过程仍存在较大争议。对北秦岭官坡超高压榴辉岩中的一个长英质脉体开展了详细的锆石形态学、微量元素和 U-Pb 年代学研究。结果表明, 脉体中的锆石呈自形的棱柱状晶形, 发育弱的振荡环带、面状分带或无明显分带特征, 具有高的 HREE、Y、U 含量, 低的 Th 含量和 Th/U 比值, 说明锆石生长自含水熔体。另外, 这些变质锆石具有 LREE 亏损、HREE 相对富集的配分模式以及明显的 Eu 负异常, 表明含水熔体形成于角闪岩相退变质过程。锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 494 ± 10 Ma (MSWD = 2.2), 与北秦岭超高压变质作用的峰期年龄 (490.4 ± 5.8 Ma) 在误差范围内基本一致。北秦岭地体经历深俯冲作用之后发生快速折返, 并在折返过程中发生角闪岩相退变质作用诱发俯冲板片部分熔融产生含水熔体。

关键词: 北秦岭; 长英质脉体; 锆石 U-Pb; 锆石微量元素; 快速折返; 地球化学; 地质年代学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)02-0389-12

收稿日期: 2017-10-24

Zircon U-Pb Ages of A Felsic Vein in Ultrahigh-Pressure Eclogite from North Qinling Terrane and Their Geological Implications

He Yu^{1,2}, Zhao Yujie^{1,2}, Zhang Wenxiang^{1,2}, Wang Hao^{3,4}, Zhou Guangyan^{1,2}, Wu Yuanbao^{1,2*}

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

4. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: The Early Paleozoic high pressure (HP) to ultrahigh pressure (UHP) metamorphism in the North Qinling (NQ) terrane preserves the oldest UHP record in the whole Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt and thus registers the first accretionary collision process between the South China block (SCB) and the North China block (NCB). However, its evolution processes remain the subject of heated debate. This paper presents an integrated study of CL image, trace elements, and U-Pb age of zircons from a felsic vein within a UHP eclogite outcrop from the Guanpo area, NQ terrane. Zircons from the vein are euhedral in shape, displaying oscillatory, planar or no zoning, high U but low Th contents resulting in low Th/U ratios, indicating that they precipitated from hydrous melts responsible for the vein formation. In addition, these metamorphic zircons

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41625008, 41273035, 41173016); 国家重点基础研究发展计划 (“973”计划) 项目 (No. 2015CB856106)。

作者简介: 何宇 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事造山带地球化学方面的研究。ORCID: 0000-0003-3172-2463. E-mail: 1454995430@qq.com

* **通讯作者:** 吴元保, ORCID: 0000-0001-7770-6093. E-mail: yuanbaowu@cug.edu.cn

引用格式: 何宇, 赵宇洁, 张文祥, 等, 2018. 北秦岭超高压榴辉岩中长英质脉体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地球科学, 43(2): 389-400.

are characterized by low LREE contents, relatively high HREE patterns, and significant negative Eu anomalies, suggesting the hydrous melts formed during the amphibolite-facies retrogression. The weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 494 ± 10 Ma of these zircons is similar to the age of the peak UHP metamorphism (490.4 ± 5.8 Ma) of the NQ unit, within the analytical error. Based on the above observations, we suggest that the NQ terrane underwent fast exhumation after deep subduction in the Early Paleozoic, and released hydrous melts derived from partial melting during exhumation, which was triggered by the significant amphibolite-facies retrogression.

Key words: North Qinling; felsic vein; zircon U-Pb age; zircon trace element; fast exhumation; geochemistry; geochronology.

0 引言

板块俯冲是地壳物质进入地幔的重要地球动力学机制,同时也是壳幔相互作用最为强烈的地区之一(Chopin, 2003; Zheng *et al.*, 2003; Manning, 2004; Hermann *et al.*, 2013; Spandler and Pirard, 2013).在碰撞造山带中,大陆地壳在俯冲洋壳的牵引拖曳下发生深俯冲至地幔深度,经历超高压变质作用并产生多种类型的高压—超高压变质岩石(Chopin *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2015).随后由于俯冲拆离,陆壳岩石进入俯冲隧道并在角力流和浮力作用下发生折返,其间少量含水矿物降压脱水以及名义上无水矿物的结构水和分子水释放,产生多种类型的变质流体并在板片—地幔界面发生显著的壳幔相互反应(Manning, 2004; Hermann *et al.*, 2006, 2013; Zheng *et al.*, 2007; Zheng, 2009; Spandler and Pirard, 2013; Liu *et al.*, 2014; Zheng and Hermann, 2014).其中超高压岩石发生较小规模的部分熔融,形成长英质熔体并以浅色脉体形式存在于榴辉岩和相关岩石中(Hermann *et al.*, 2006; Zong *et al.*, 2010; Cheng *et al.*, 2011; Zheng *et al.*, 2011).这些含水熔体不仅对超高压岩石的元素和同位素行为有着重要的影响,而且能够显著降低超高压岩石的力学强度,从而促使俯冲板片的拆离和快速折返(Auzanneau *et al.*, 2006; Hermann *et al.*, 2006, 2013; Labrousse *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2016).对生长于超高压岩石脉体中锆石的研究,一方面可以确定成脉流体活动的时间,为寄主岩石的折返提供时限制约;另一方面可以通过锆石的地球化学组成等来反演流体的成分和性质,进而恢复超高压岩石的俯冲折返过程(Gebauer *et al.*, 1997; Bingen *et al.*, 2004; Rubatto and Hermann, 2007; Zheng *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2009; Zong *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2011; Cheng *et al.*, 2011; Hermann *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2016).

秦岭—桐柏—红安—大别—苏鲁造山带是中国最重要的碰撞造山带,由华北板块、华南板块以及两

者之间众多的岛弧和微陆块经过多阶段拼合作用形成(Cheng *et al.*, 2011, 2012; Wang *et al.*, 2011a; Bader *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2013, 2016; Wu and Zheng, 2013; Dong and Santosh, 2016).在板块汇聚过程中发育多期高压—超高压变质作用,由早到晚分别为早古生代、石炭纪和三叠纪(Wang *et al.*, 2011a; Wu and Zheng, 2013).目前的研究普遍表明,三叠纪时期的超高压变质事件记录了华南与华北板块的最终拼合,而石炭纪的高压变质作用主要来自于古特提斯洋向北俯冲(Wu and Zheng, 2013).在北秦岭地区广泛记录的早古生代超高压变质作用是整个造山带内最古老的超高压变质记录,代表了华南和华北板块之间最早的弧—陆碰撞事件(Wu and Zheng, 2013).众多学者对该造山带开展了广泛的研究,但对于北秦岭早古生代的超高压变质事件的变质峰期、退变质折返的时间和过程仍存在争议(Yang *et al.*, 2003, 2005; Cheng *et al.*, 2011, 2012; Wang *et al.*, 2011a, 2014; Bader *et al.*, 2013; Wu and Zheng, 2013; 刘良等, 2013; Liu *et al.*, 2016; Yu *et al.*, 2016).Liu *et al.* (2013, 2016)认为北秦岭超高压变质岩在约 500 Ma 经历深俯冲作用,之后连续发生两期折返抬升并分别在 470~450 Ma 和 420~400 Ma 经历角闪岩相和麻粒岩相退变质作用.而 Bader *et al.* (2013)、Wang *et al.* (2011a, 2014)和 Wu and Zheng (2013)认为北秦岭超高压变质岩在约 490 Ma 达到峰期榴辉岩相变质作用后,在 10~20 Ma 内发生快速折返至地壳浅部,该地区所报道的约 420 Ma 的麻粒岩相变质作用可能与商丹洋向北俯冲诱发的基性岩浆底侵作用有关(Wang *et al.*, 2011b, 2013a; Xiang *et al.*, 2012).本文在北秦岭官坡南部石架沟地区选取了一组侵位于榴辉岩和片麻岩之间的长英质脉体,对其中的锆石进行内部结构、微量元素和 U-Pb 年龄综合研究,试图对北秦岭早古生代超高压变质作用及折返抬升的构造演化过程提供进一步制约的依据.

1 区域地质背景及样品

秦岭—桐柏—红安—大别—苏鲁造山带是我国重要的地质与地理分界线,其形成与演化记录了华北克拉通与华南陆块长期多阶段的拼合过程(Wang *et al.*, 2011a; Cheng *et al.*, 2011, 2012; Bader *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2013; Wu and Zheng, 2013; Dong and Santosh, 2016; Liu *et al.*, 2016). 其中秦岭造山带位于最西侧,以商丹缝合带为界划分为北秦岭和南秦岭(王浩和吴元保, 2013; 杨文涛和杜远生, 2017)(图 1). 南秦岭出露有零星分布的太古代基底、元古代的裂谷火山沉积岩以及震旦纪—三叠纪浅变质巨厚的沉积盖层,具有与华南陆块北缘相似的岩石组合特征(Wu and Zheng, 2013). 北秦岭自北向南可划分为宽坪群、二郎坪群和秦岭群(王浩和吴元保, 2013). 宽坪群主要由云母片岩、石英岩、大理岩和角闪岩构成,变质相为绿片岩相—高角闪岩相. 研究表明宽坪群具有与秦岭群相似的物源,可能于早古生代拼贴于华北克拉通南缘(Liu *et al.*, 2013; Wu and Zheng, 2013). 二郎坪群是一套以低级变质为主的变火山岩和变沉积岩组合,原岩主要为超基

性岩、基性—中性火山岩和深成岩脉、细粒碎屑岩以及夹置其中的浊积岩和含寒武—志留纪化石的燧石条带,保存有早古生代洋内弧到弧后盆地演化过程的记录(Liu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2013a; Wu and Zheng, 2013). 秦岭群可分为两套岩石组合,下部由遭受强烈变质变形的黑云斜长片麻岩、麻粒岩、角闪岩以及含石墨的薄层大理岩和花岗质侵入体构成,上部主要为轻微折叠的厚层大理岩. 秦岭群岩石变质程度普遍为角闪岩相,局部可达麻粒岩相,并伴随强烈深熔混合岩化、多期次变形和岩浆侵入作用(Wu and Zheng, 2013).

过去十年中,在秦岭群北部、中部和南部都发现有多种类型的高压—超高压变质岩,包括官坡、双槐树地区的(超)高压榴辉岩,清油河、寨根地区的退变质榴辉岩、石榴角闪岩和石榴辉石岩,以及松树沟地区的高压麻粒岩和石榴辉石岩等(Cheng *et al.*, 2011, 2012; Wang *et al.*, 2011a, 2013b, 2014; Bader *et al.*, 2013; 刘良等, 2013; Liu *et al.*, 2016). 在官坡、清油河等地的榴辉岩和斜长角闪岩中发现柯石英和金刚石包裹体等特征矿物,指示秦岭群岩石发生深俯冲并经历超高压变质作用(Yang *et al.*,

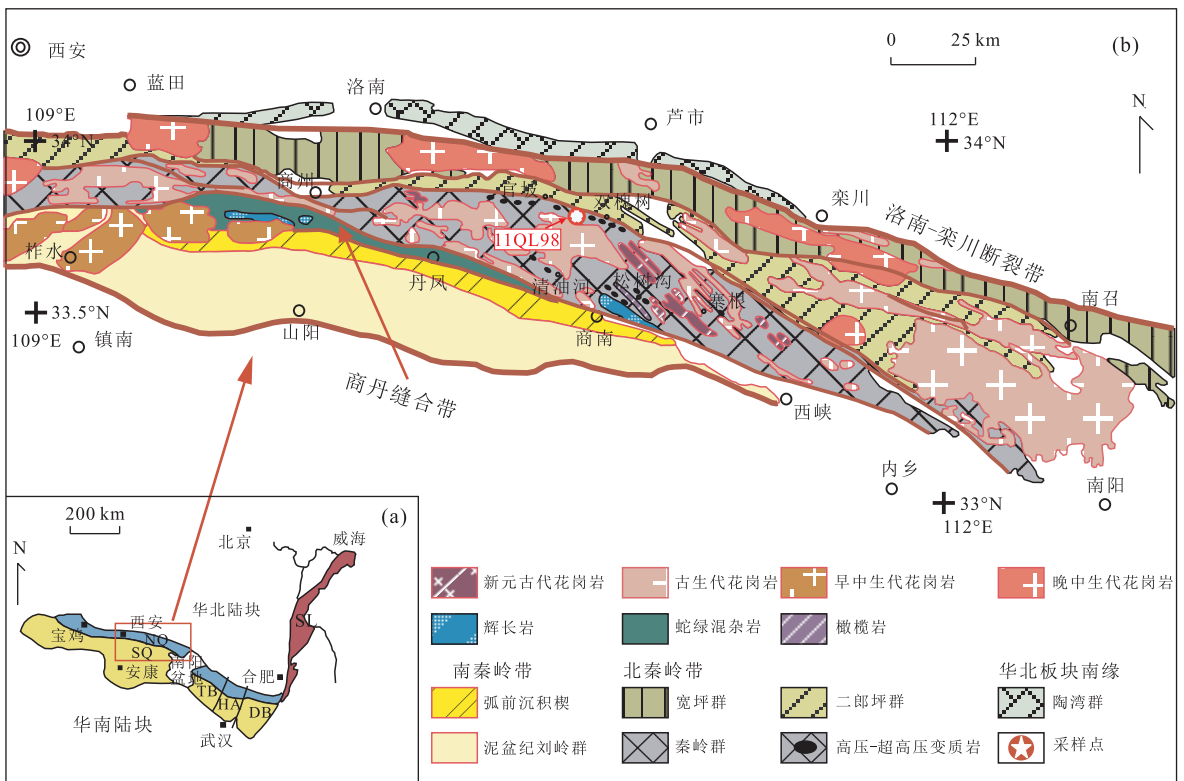


图 1 北秦岭地区地质简图

Fig.1 Geological sketch of the North Qinling terrane

NQ.北秦岭地区, SQ.南秦岭地区, TB.桐柏地区, HA.红安地区, DB.大别地区, SL.苏鲁地区;据 Wang *et al.*(2014)修改

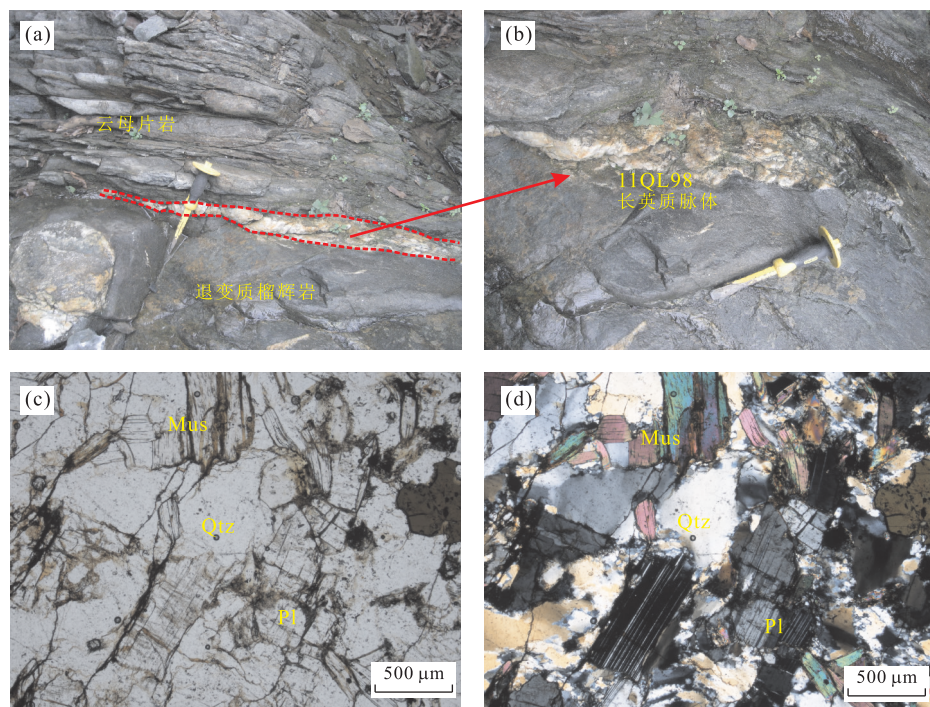


图 2 北秦岭长英质脉样品 11QL98 野外及显微结构照片

Fig.2 Field photographs and micrographs of felsic vein 11QL98 in the North Qinling terrane

Mus.白云母;Qtz.石英;Pl.斜长石

2003,2005; Wang *et al.*, 2014; 宫相宽等, 2016). 大量的年代学结果表明, 秦岭群岩石经历多期变质作用, 包括 500~480 Ma 的榴辉岩相变质作用 (Cheng *et al.*, 2011, 2012; Wang *et al.*, 2011a, 2013b, 2014; Bader *et al.*, 2013; 刘良等, 2013; Yu *et al.*, 2016)、470~450 Ma 的角闪岩相变质作用以及 420~400 Ma 的麻粒岩相变质作用 (Wang *et al.*, 2011a, 2011b; 李晔等, 2012; 刘良等, 2013; Yu *et al.*, 2016). 然而对于这三期变质作用之间的关系尚不明确, 由此演绎出的构造演化模型也存在不同 (Wang *et al.*, 2011a; Bader *et al.*, 2013; 刘良等, 2013; Wu and Zheng, 2013; Liu *et al.*, 2016). 经传统温压计和变质相图计算, 得到 2.25~2.8 GPa 和 680~770 °C 的榴辉岩相峰期变质温压条件 (张建新等, 2009; Cheng *et al.*, 2012), 结果略低于石英-柯石英转变线温压条件.

本文样品 11QL98 采自官坡南部石架沟地区 (33° 49' 59.40" N, 110° 49' 6.90" E) 一个宽为 10~20 cm、长为 2~3 m 的斜长石石英脉中 (图 2a, 2b). 脉体介于退变质榴辉岩和云母片岩之间, 顺层侵入二者的接触界面中. 云母片岩具有明显的片理, 片理方向平行于脉体; 而退变质榴辉岩呈块状构造. 脉体主要矿物组成为石英 (50%)、斜长石 (30%) 和白云母 (15%), 含有

少量副矿物为锆石、榍石和独居石等 (图 2c, 2d).

2 分析方法

笔者从约 2 kg 的样品中通过磁选和重液分选方法挑选出锆石, 然后在双目显微镜下选择透明、无裂隙且具有代表性的锆石颗粒制成环氧树脂样品靶, 磨至锆石颗粒中心部位后抛光, 对抛光后样品进行 CL 显微结构观察, 并在此基础上选择合适的锆石颗粒进行 U-Pb 年龄测定和微量元素分析.

锆石 U-Pb 同位素组成分析在中国科学院地质与地球物理研究所离子探针实验室的 Cameca IMS-1280 型二次离子质谱仪 (SIMS) 上进行, 详细的分析流程见 Li *et al.* (2009). 使用强度为 10 nA 的一次 O^{2-} 离子束通过 -13 kV 加速电压后轰击样品表面, 束斑大小约为 $20 \times 30 \mu\text{m}$. 二次离子经过 60 eV 能量窗过滤, 质量分辨率约为 5400. U-Th-Pb 同位素组成采用标准锆石 Plésovice ($337.13 \pm 0.37 \text{ Ma}$) (Sláma *et al.*, 2008) 进行标定, 清湖标样 (李献华等, 2013) 作为未知样品和测定样品同时分析, 监控分析质量. 普通 Pb 采用实测的 ^{204}Pb 含量进行校正. 单个数据点的误差均为 1σ , 样品年龄加权平均值的误差为 2σ . U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex_ver3.

23(Ludwig,2003)完成.

锆石微量元素含量在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)使用 LA-ICP-MS 分析完成.激光剥蚀系统(LA)采用德国公司的 GeoLas 2005,四级杆质谱(ICP-MS)采用美国公司的 Agilent 7500a.激光剥蚀过程中选用氦气作为载气,氩气作为补偿气.样品分析采用单点剥蚀,剥蚀孔径为 $32\ \mu\text{m}$,剥蚀频率为 10 Hz,激光输出能量为 50 mJ.选用多个 USGS 参考玻璃(BCR-2G, BIR-1G)作为多外标,Si 作为内标进行锆石微量元素定量计算.具体的仪器操作条件和数据处理方法参考文献 Liu *et al.*(2010).

3 结果

样品 11QL98 中锆石无色透明,具有非常完好的晶形,呈棱柱状(长宽比为 $2:1\sim 4:1$),粒径为 $100\sim 300\ \mu\text{m}$ (图 3).阴极发光(CL)图像显示大部分锆石阴极发光较弱,内部发育有振荡环带、面状分带或无明显分带特征.笔者对这些锆石进行了 9 个点的 U-Pb 年龄测定,分析结果见表 1、图 4.分析点具有低的 Th 含量($0.48\times 10^{-6}\sim 44.0\times 10^{-6}$)和较高的 U 含量($298\times 10^{-6}\sim 4\ 797\times 10^{-6}$),从而导致极低的 Th/U 比值($0.001\sim 0.023$).锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化范围为 $512\pm 7\sim 427\pm 6\ \text{Ma}$,其中分析点 #1、#2 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄($427\pm 6\ \text{Ma}$, $465\pm 7\ \text{Ma}$)明显偏低,可能是受后期变质作用影响,发生铅丢失所致.去掉这两个分析点,其余 7 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布较为集中($512\pm 7\sim 481\pm 7\ \text{Ma}$),加权平均年龄为 $494\pm 10\ \text{Ma}$ (MSWD = 2.2),该年龄应代表长英质脉体的形成时间.

在 U-Pb 定年的基础上,笔者对其中的 7 颗锆石进行了微量元素分析,分析结果见表 2、图 5.长英质脉中产出的锆石均表现出轻稀土元素(LREE)亏损、重稀土元素(HREE)相对富集的稀土元素配分模式.分析点 #4 具有较低的稀土元素含量($\sum\text{REE}=61.3\times 10^{-6}$, $\sum\text{HREE}=59.1\times 10^{-6}$),其余各点均具有较高的稀土元素含量($\sum\text{REE}=429\times 10^{-6}\sim 1\ 724\times 10^{-6}$, $\sum\text{HREE}=409\times 10^{-6}\sim 1\ 691\times 10^{-6}$).锆石的重稀土元素表现为逐步富集的特征($\text{Yb}_\text{N}/\text{Gd}_\text{N}=21\sim 113$),配分模式呈左倾状.锆石表现出弱的 Ce 正异常($\delta\text{Ce}=0.97\sim 2.22$),除分析点 #2 具有 Eu 正异常($\delta\text{Eu}=2.17$)外,其他分析点都表现出明显的 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.39\sim$

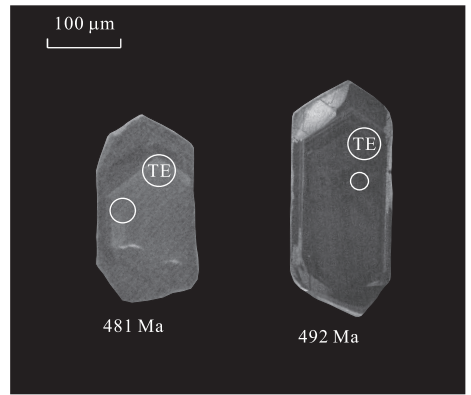


图 3 北秦岭长英质脉样品 11QL98 中典型锆石的阴极发光图像

Fig.3 CL images of typical zircon crystals in felsic vein 11QL98 in the North Qinling terrane

0.87).锆石中 Y 含量为 $82.3\times 10^{-6}\sim 2\ 955\times 10^{-6}$, Nb 含量为 $0.17\times 10^{-6}\sim 2.29\times 10^{-6}$, Ta 含量为 $0.19\times 10^{-6}\sim 1.70\times 10^{-6}$, Nb/Ta 比值为 $0.90\sim 2.87$.锆石中 Ti 含量为 $2.84\times 10^{-6}\sim 17.3\times 10^{-6}$,平均含量为 8.58×10^{-6} ,通过计算得出锆石 Ti 温度为 $640\sim 800\ ^\circ\text{C}$,平均温度为 $720\ ^\circ\text{C}$.笔者在利用锆石 Ti 含量温度计计算锆石形成温度过程中,鉴于样品内含有石英和金红石,将 SiO_2 和 TiO_2 的活度值设为 1,具体参数设计及计算过程参考 Ferry and Watson(2007).球粒陨石标准化数据引自 McDonough and Sun(1995).

4 讨论

4.1 锆石成因及长英质脉体的性质

研究表明,在俯冲带变质作用的不同阶段(进变质、峰期变质、退变质)可存在多种类型的变质流体,主要分为富水流体、含水熔体和超临界流体,这些变质流体在不同俯冲深度下的成分和性质存在显著的差异(Manning, 2004; Hermann *et al.*, 2006, 2013; Wu *et al.*, 2009; Zheng *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2014; Zheng and Hermann, 2014).其中富水流体形成于较低的温压条件,具有较强的流动性和较低的粘滞度,但是其对稀土元素(REE)和高场强元素(HFSE)的溶解和携带能力较弱(Hermann *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2014).而含水熔体形成的温压条件较高,其含水量较低,具有较高的粘滞度和低的流动性(Hermann *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2014).相比于富水流体,含水熔体中的熔/流体活动性元素含量较

表 1 北秦岭长英质脉样品 11QL98 SIMS 锆石 U-Pb 年龄测定结果

Table 1 Zircon U-Pb isotopic data obtained by SIMS for felsic vein 11QL98 from the North Qinling terrane

分析点	U(10 ⁻⁶)	Th(10 ⁻⁶)	Th/U	$f_{206}(\%)$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\sigma(\%)$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm\sigma(\%)$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm\sigma(\%)$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\sigma(\text{Ma})$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm\sigma(\text{Ma})$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm\sigma(\text{Ma})$
1	704	1.44	0.002	0.14	0.056 08	1.45	0.529 24	2.11	0.068 4	1.53	455.4	31.9	431.3	7.4	426.8	6.3
2	3 130	20.4	0.007	0.72	0.056 62	1.06	0.584 30	1.85	0.074 9	1.51	476.6	23.3	467.2	6.9	465.3	6.8
3	1 862	5.38	0.003	0.20	0.057 60	0.74	0.615 33	1.67	0.077 5	1.50	514.4	16.2	486.9	6.5	481.1	7.0
4	2 576	2.29	0.001	0.39	0.056 85	0.86	0.615 13	1.73	0.078 5	1.50	485.8	18.8	486.8	6.7	487.0	7.0
5	1 332	26.0	0.020	0.08	0.057 34	0.78	0.622 88	1.69	0.078 8	1.50	504.6	17.0	491.7	6.6	488.9	7.1
6	298	0.48	0.002	0.05	0.056 35	1.52	0.616 52	2.13	0.079 4	1.50	466.0	33.2	487.7	8.3	492.3	7.1
7	3 018	4.14	0.001	0.02	0.056 98	0.53	0.632 25	1.59	0.080 5	1.50	490.9	11.7	497.5	6.3	498.9	7.2
8	1 873	44.0	0.023	0.11	0.056 93	0.67	0.640 58	1.64	0.081 6	1.50	488.9	14.7	502.7	6.5	505.7	7.3
9	4 797	10.4	0.002	0.21	0.057 39	0.53	0.653 35	1.59	0.082 6	1.50	506.4	11.6	510.5	6.4	511.5	7.4

表 2 北秦岭长英质脉样品 11QL98 中锆石微量元素(10⁻⁶)分析结果Table 2 Trace elements (10⁻⁶) analyses for zircon in felsic vein 11QL98 from the North Qinling terrane

分析点	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U	Ti	T(°C) [†]	ΣREE	ΣHREE	(Yb/Gd) _N	δEu
1	2 955	2.29	2.75	10.1	1.45	8.99	6.67	3.08	46.6	20.5	248	87.8	381	73.0	707	126	17 838	1.70	45.9	2 484	17.3	800	1 723	1 690	18.8	0.39
2	471	0.96	1.35	5.24	0.98	5.85	3.38	3.43	6.65	2.44	30.8	13.6	75.0	18.5	214	48.2	11 456	0.33	5.35	1 062	6.20	703	429	409	39.8	2.17
3	997	0.72	0.18	0.83	0.11	0.79	0.67	0.33	5.15	3.07	55.2	27.9	161	39.2	471	105	14 487	0.27	2.41	1 480	4.00	667	870	868	113	0.39
4	82.3	0.17	0.09	0.54	0.13	0.50	0.70	0.23	1.63	0.47	6.17	2.29	11.0	2.45	29.0	6.10	14 033	0.19	1.81	632	2.84	640	61.3	59.1	22.0	0.64
5	1 804	1.19	0.97	5.31	0.57	3.94	3.12	4.27	31.1	12.9	150	52.9	241	50.8	517	97.1	13 673	0.80	19.5	820	11.5	760	1 171	1 153	20.5	0.86
6	1 780	0.92	0.21	2.31	0.23	1.42	2.12	1.70	23.1	10.8	139	52.3	243	50.1	527	103	13 494	0.78	16.9	705	11.1	756	1 156	1 148	28.1	0.46
7	1 025	0.83	1.11	4.65	0.60	5.52	2.49	1.51	8.96	3.99	62.6	29.6	167	43.1	528	116	13 147	0.32	6.71	1 341	7.04	714	975	959	72.8	0.87

注:†T 值据 Ferry and Watson (2007) 锆石中 Ti 含量温度计算。

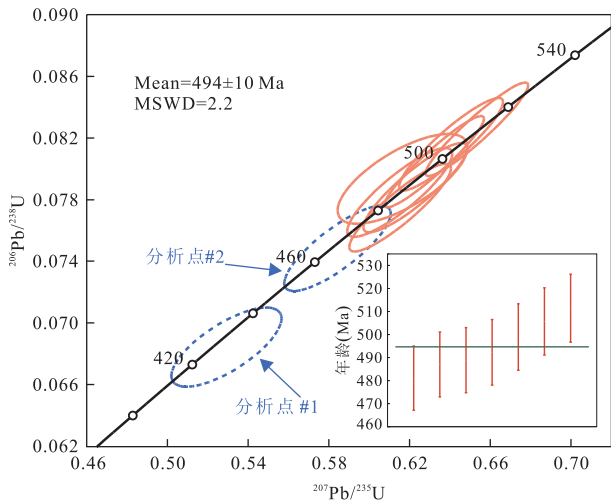


图 4 北秦岭长英质脉样品 11QL98 锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig.4 The concordia diagram for U-Pb ages of zircon grains in felsic vein 11QL98 from the North Qinling terrane

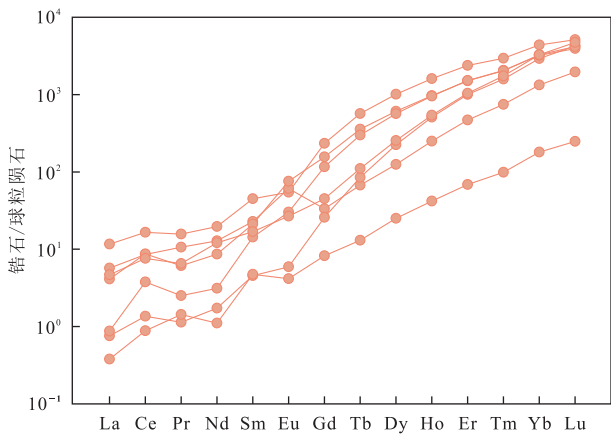


图 5 北秦岭长英质脉样品 11QL98 锆石球粒陨石标准化稀土元素配分模式

Fig. 5 The chondrite-normalized REE pattern of zircon grains in felsic vein 11QL98 from the North Qinling terrane

球粒陨石标准化值据 McDonough and Sun(1995)

高,可达富水流体的 5~10 倍(Hermann *et al.*, 2013).随着温度和压力的进一步提高,富水流体中的溶质组分含量逐渐升高,与之共存的含水熔体中水含量也逐渐升高,当温压条件超过临界值时,二者完全混溶成为超临界流体(Hermann *et al.*, 2006).不同性质的熔\流体产生的脉体类型会不一样(Liu *et al.*, 2014),熔体作用常常产生长英质脉体,流体或超临界流体作用往往形成石英脉和变质复合脉体(Zheng *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2016).另外,由于在流体环境中 U 较 Th 具有更强

的活动性,从而导致新生锆石普遍具有较低的 Th/U 比值和较低的 REE 和 HSFE 含量及较低的形成温度(Wu and Zheng, 2004; Zheng *et al.*, 2007; 刘小驰等, 2009; Wu *et al.*, 2009).与生长自富水流体环境中的变质锆石相比,含水熔体中的新生锆石通常具有较高的 HREE 和 HFSE 含量,在 REE 元素配分模式上表现出 LREE 亏损而 HREE 富集的特征,而且往往具有更高的锆石形成温度等(Zheng *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2016).

本文的锆石采自长英质脉体 11QL98,且锆石具有完好的棱柱状晶形,内部发育弱的振荡环带、面状分带或无明显分带特征,显著区别于围岩榴辉岩中的锆石形态,表明长英质脉体中的锆石不是从围岩中捕获的,而是在脉体形成过程中生长结晶出来的(Vavra *et al.*, 1996; Gebauer *et al.*, 1997; 刘小驰等, 2009; Wu *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2016).同时,锆石具有高的 HREE 和 Y 含量、高 U 低 Th 含量以及极低的 Th/U 比值,表现出成脉流体对 HREE 和 HFSE 较好的溶解和携带能力,进一步说明锆石生长自含水熔体(Vavra *et al.*, 1996; Hermann *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2014).这些变质锆石具有 LREE 亏损、HREE 富集的配分模式,显著区别于生长自榴辉岩相变质条件下的锆石中近平坦的 HREE 配分特征,而与角闪岩相下变质锆石的稀土元素配分模式基本一致(Hermann *et al.*, 2001; Wu and Zheng, 2004; Zong *et al.*, 2010).榴辉岩相下石榴石可以作为一种稳定存在的矿物大量富集 HREE,导致与之平衡的变质锆石相对亏损 HREE(Rubatto, 2002; Rubatto and Hermann, 2003; Bingen *et al.*, 2004; Wu and Zheng, 2004).而在向角闪岩相转变的退变质过程中,石榴石发生分解或没有新的石榴石产生,致使该环境下新生长的变质锆石逐步富集 HREE(Hermann *et al.*, 2001; Zong *et al.*, 2010).另外,长英质脉体中的锆石具有较明显的 Eu 负异常,表明锆石生长时有斜长石形成(Hermann *et al.*, 2001; Rubatto, 2002; Rubatto and Hermann, 2003; Bingen *et al.*, 2004; Wu and Zheng, 2004).因此,本文认为含水熔体形成于角闪岩相的退变质阶段.通过对锆石中 Ti 含量进行温度计算,得到含水熔体形成时的温度为 720 °C,这与该地区所报道的角闪岩相退变质作用的温度条件基本一致(张建新等, 2009; Cheng *et al.*, 2012).结合上述特征,笔者认为该地区深俯冲陆壳经历了近等温降压的折返过程(Bader *et al.*,

2013),导致其中含水矿物降压脱水和\或保存在名义上无水矿物中的结构羟基和分子水释放,造成角闪岩相的退变质作用(Auzanneau *et al.*, 2006; Zong *et al.*, 2010),并且引发板片部分熔融产生含水熔体(Hermann *et al.*, 2006; Zheng *et al.*, 2007; Zheng, 2009),含水熔体经结晶作用形成了长英质脉体。

4.2 长英质脉体的形成时间

前人通过 LA-ICP-MS/SIMS U-Pb 年代学和石榴石+全岩 Lu-Hf 等时线定年等方法对北秦岭超高压变质作用开展了一系列年代学研究。Yang *et al.* (2003, 2005)最先报道了北秦岭官坡地区长英质片麻岩和含金刚石副片麻岩的锆石 U-Pb 年龄,分别为 511 ± 35 Ma 和 507 ± 38 Ma。由于该年龄具有较大的分析误差,因此这些年龄不能精确地限定超高压变质作用的峰期时代。随后,Cheng *et al.* (2011, 2012)、Wang *et al.* (2011a, 2013b)、刘良等 (2013)、陈丹玲等 (2015)对官坡、双槐树、清油河和松树沟等地区的榴辉岩、榴闪岩和石榴辉石岩等进行了大量的锆石 U-Pb 定年分析,得到的变质年龄范围为 $507.0 \pm 8.7 \sim 485.8 \pm 3.8$ Ma,在这些锆石中发现有石榴石、绿辉石和多硅白云母等矿物包裹体,指示了榴辉岩相变质作用的时代。Cheng *et al.* (2012)对双槐树榴辉岩进行全岩 Lu-Hf 等时线年龄分析,得到年龄结果为 516.4 ± 5.8 Ma,因为其样品中石榴石具有典型生长环带,故该年龄应代表进变质作用的时代。由于缺乏柯石英和金刚石等超高压指示性矿物,以上众多年龄结果均无法对秦岭地区超高压作用的峰期变质时代进行有效的限定。Wang *et al.* (2014)对秦岭群中部斜长角闪岩开展的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果为 490.4 ± 5.8 Ma,在变质锆石中发现有原生的金刚石包裹体,指示了北秦岭榴辉岩的峰期变质时代。最近,同样在秦岭群中部大寺沟地区的斜长角闪岩中发现有柯石英矿物包裹体(宫相宽等, 2016),进行锆石 U-Pb 分析得到了近一致的年龄结果(496.9 ± 2.5 Ma)。

本文对长英质脉 11QL98 中的锆石进行 SIMS U-Pb 定年分析,得到 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 494 ± 10 Ma (MSWD=2.2)。由于锆石生长自板片部分熔融形成的含水熔体中认为该熔体形成于超高压变质岩石从榴辉岩相向角闪岩相的退变质作用阶段(Auzanneau *et al.*, 2006),故此年龄应指示深俯冲陆壳折返过程中角闪岩相退变质作用的时期。这一退变质年龄与北秦岭地区所报道的榴辉岩相超高压变质作用的峰期年龄在误差范围内基本一致,表明

超高压变质岩石在较短时间内即可完成从峰期榴辉岩相变质到角闪岩相退变质的转变,深俯冲板片在 <10 Ma 内发生快速折返(Wang *et al.*, 2014)。Hermann *et al.* (2001)在哈萨克斯坦 Kokchetav 岩块的副片麻岩和含白云石变碳酸盐岩中得到了近一致的锆石 U-Pb 年龄,分别为 527 ± 5 Ma、 528 ± 8 Ma 和 526 ± 5 Ma,而这些年龄各自代表了超高压变质作用峰期和麻粒岩相、角闪岩相退变质阶段的时期。Massonne *et al.* (2007)对德国 Saxonian Erzgebirge 地区含金刚石长英质岩中的变质锆石核部、幔部及边部进行 SHRIMP U-Pb 定年,得到年龄结果为 337.0 ± 2.7 Ma、 336.8 ± 2.8 Ma 和 330.2 ± 5.8 Ma,指示了岩石处于地幔、上地壳及近地表不同深度的时期。另外,在西阿尔卑斯的 Dora Maira 地区(Gebauer *et al.*, 1997)和巴布亚新几内亚东南部的 D'Entrecasteaux 群岛(Monteleone *et al.*, 2007)等地同样获得了相似的研究成果。这种现象在世界范围内与秦岭造山带规模类似的超高压变质带的研究中多见报道(Zheng *et al.*, 2003; Kylander-Clark *et al.*, 2012),深俯冲的小型超高压板片可以在 <10 Ma 内发生快速折返。显著区别于中国东部的大别-苏鲁造山带(Zheng *et al.*, 2003)及挪威的西片麻岩省(Kylander-Clark *et al.*, 2009)等大型碰撞造山带的相对缓慢折返(20~30 Ma)。

本文中的长英质脉体形成于深俯冲板片降压折返过程中部分熔融产生的含水熔体,而含水熔体的出现能够有效地降低陆壳岩石的粘滞度并促进俯冲板片内部的拆离解耦,同时含水熔体还能对超高压岩石的折返起到润滑剂的作用,从而引发或加速俯冲板片的折返(Labrousse *et al.*, 2011; Hermann *et al.*, 2013)。因此,笔者认为秦岭群超高压变质岩石受折返过程中部分熔融产生的含水熔体影响,显著改变了岩石的力学性质和折返机制,促使深俯冲板片发生快速折返(Hermann *et al.*, 2001; Auzanneau *et al.*, 2006; Labrousse *et al.*, 2011)。结合前人研究成果,本文认为北秦岭地体在约 490 Ma 发生超高压变质作用后发生了快速折返。

4.3 构造指示意义

目前对于北秦岭的榴辉岩退变质作用发生的时间及其地质响应还存在较大的争论。因此,不同学者对于该地区早古生代构造演化过程提出了不同的模型与假说(Cheng *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011a, 2014; 李晔等, 2012; Bader *et al.*, 2013; Wu and Zheng, 2013; Dong and Santosh, 2016; Liu *et al.*,

2016; Yu *et al.*, 2016). Liu *et al.* (2016) 认为北秦岭高压—超高压变质岩石是商丹洋向北俯冲拖曳南秦岭部分新元古代陆壳物质在 500~485 Ma 发生陆壳俯冲—深俯冲作用的产物, 之后受俯冲板片拆离及软流圈上涌作用影响, 在 470~450 Ma 和 420~400 Ma 连续发生两期折返抬升, 并分别经历高角闪岩相和麻粒岩相的退变质作用. Bader *et al.* (2013) 把秦岭群划分为两部分, 其北部在约 500 Ma 与二郎坪洋内弧发生深俯冲作用, 产生超高压变质岩石, 而后在约 470 Ma 折返至地壳浅部; 南部在 520~47 Ma 经历三期洋内俯冲事件, 依次形成秦岭群南部高压榴辉岩、松树沟基性麻粒岩和富水杂岩侵入体, 并导致丹凤洋盆持续向北俯冲及最终的闭合. 受丹凤扩张脊向北俯冲影响, 在秦岭群形成峰期为约 430 Ma 的大规模岩浆活动以及 420~400 Ma 的高温麻粒岩相变质作用. 在 Wang *et al.* (2011a, 2014) 和 Wu and Zheng (2013) 提出的构造模型中, 同样地将北秦岭早古生代的演化历史划分为若干阶段, 提出在晚寒武纪和早志留纪共发生两期弧—陆碰撞事件. 北秦岭微陆块向北俯冲于二郎坪弧之下, 在约 490 Ma 经历超高压变质作用, 随后发生快速折返并覆盖在秦岭群基底之上 (Wang *et al.*, 2011a, 2013b, 2014). 之后, 在 450~400 Ma, 古特提斯商丹洋向北俯冲于北秦岭地体之下, 在弧后伸展过程中由岩石圈减薄作用诱发玄武质岩浆底侵, 并进一步导致约 420 Ma 的麻粒岩相变质作用和部分熔融作用, 强烈改造秦岭群变质岩石 (Wang *et al.*, 2011b, 2013a; Xiang *et al.*, 2012).

碰撞造山带的形成和演化往往具有比较复杂的过程, 可能包括多期次的俯冲和折返 (Hermann *et al.*, 2001; Kylander-Clark *et al.*, 2012). 因此, 很容易将造山带形成过程中并不相关的变质活动联系在一起, 尤其是时间间隔较小的变质事件更易被解释为同一期变质事件的不同阶段, 从而对正确理解造山带构造演化造成阻碍 (李晔等, 2012). 本文研究表明, 北秦岭地体经历深俯冲超高压变质作用后, 随即发生快速折返至地壳浅部, 并伴随角闪岩相退变质作用 (Wang *et al.*, 2011a). 这标志着北秦岭早古生代第一期弧—陆碰撞事件基本结束, 同时也说明后期叠加的约 420 Ma 麻粒岩相高温变质作用并非是 Liu *et al.* (2016) 认为的该期构造运动作用的结果, 而应归结于本地区其他的构造事件 (李晔等, 2012). 可能是后一期古特提斯洋向北俯冲作用的影响 (Wang *et al.*, 2011b, 2013a; Xiang *et al.*, 2012; Dong and Santosh, 2016), 与北秦岭

地区第二期弧—陆碰撞事件相关 (Wu and Zheng, 2013; Wang *et al.*, 2014).

5 结论

(1) 北秦岭官坡超高压榴辉岩中的长英质脉体形成于深俯冲板片折返过程中, 由受角闪岩相退变质作用引发的部分熔融所产生的含水熔体经结晶作用而形成.

(2) 长英质脉体的形成时代为 494 ± 10 Ma, 与秦岭群超高压变质作用的年代基本一致, 因此, 笔者认为北秦岭地体在深俯冲之后发生快速折返.

致谢: SIMS 锆石 U-Pb 年龄测定得到李献华研究员的帮助, LA-ICP-MS 锆石微量元素含量测定得到胡兆初教授的帮助, 在此一并表示衷心的感谢. 同时感谢两位匿名审稿人的宝贵意见和建议!

References

- Auzanneau, E., Vielzeuf, D., Schmidt, M. W., 2006. Experimental Evidence of Decompression Melting during Exhumation of Subducted Continental Crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152 (2): 125–148. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0104-5>
- Bader, T., Franz, L., Ratschbacher, L., et al., 2013. The Heart of China Revisited: II Early Paleozoic (Ultra)high-Pressure and (Ultra)high-Temperature Metamorphic Qinling Orogenic Collage. *Tectonics*, 32 (4): 922–947. <https://doi.org/10.1002/tect.20056>, 2013
- Bingen, B., Austrheim, H., Whitehouse, M. J., et al., 2004. Trace Element Signature and U-Pb Geochronology of Eclogite-Facies Zircon, Bergen Arcs, Caledonides of W Norway. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147 (6): 671–683. <https://doi.org/10.1007/s00410-004-0585-z>
- 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).
- Chen, Y. X., Zheng, Y. F., Chen, R. X., et al., 2011. Metamorphic Growth and Recrystallization of Zircons in Extremely ^{18}O -Depleted Rocks during Eclogite-Facies Metamorphism: Evidence from U-Pb Ages, Trace Elements, and O-Hf Isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75 (17): 4877–4898. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.06.003>
- 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): 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>
- Chopin, C., 2003. Ultrahigh-Pressure Metamorphism: Tracing Continental Crust into the Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 212(1—2): 1 — 14. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00261-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00261-9)
- 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>
- Ferry, J. M., Watson, E. B., 2007. New Thermodynamic Models and Revised Calibrations for the Ti-in-Zircon and Zr-in-Rutile Thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(4): 429 — 437. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0201-0>
- Gebauer, D., Schertl, H. P., Brix, M. R., et al., 1997. 35 Ma Old Ultrahigh-Pressure Metamorphism and Evidence for Very Rapid Exhumation in the Dora Maira Massif, Western Alps. *Lithos*, 41(1—3): 5 — 24.
- 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).
- Hermann, J., Rubatto, D., Korsakov, A., et al., 2001. Multiple Zircon Growth during Fast Exhumation of Diamondiferous, Deeply Subducted Continental Crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(1): 66 — 82. <https://doi.org/10.1007/s004100000218>
- Hermann, J., Spandler, C., Hack, A., et al., 2006. Aqueous Fluids and Hydrous Melts in High-Pressure and Ultrahigh Pressure Rocks: Implications for Element Transfer in Subduction Zones. *Lithos*, 92(3—4): 399 — 417. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.03.055>
- Hermann, J., Zheng, Y. F., Rubatto, D., 2013. Deep Fluids in Subducted Continental Crust. *Elements*, 9(4): 281 — 287. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.4.281>
- Kylander-Clark, A. R. C., Hacker, B. R., Johnson, C. M., et al., 2009. Slow Subduction of a Thick Ultrahigh-Pressure Terrane. *Tectonics*, 28(2): 365 — 374. <https://doi.org/10.1029/2007TC002251>
- Kylander-Clark, A. R. C., Hacker, B. R., Mattinson, C. G., 2012. Size and Exhumation Rate of Ultrahigh-Pressure Terranes Linked to Orogenic Stage. *Earth and Planetary Science Letters*, 321 — 322(3): 115 — 120. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.036>
- Labrousse, L., Prouteau, G., Ganzhorn, A. C., 2011. Continental Exhumation Triggered by Partial Melting at Ultrahigh Pressure. *Geology*, 39(12): 1171 — 1174. <https://doi.org/10.1130/G32316.1>
- Li, X. H., Liu, Y., Li, Q. L., et al., 2009. Precise Determination of Phanerozoic Zircon Pb/Pb Age by Multicollector SIMS without External Standardization. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(4): 573 — 575. <https://doi.org/10.1029/2009GC002400>
- Li, X. H., Tang, G. Q., Guo, B., et al., 2013. Qinghu Zircon: A Working Reference for Microbeam Analysis of U-Pb Age and Hf and O Isotopes. *Chinese Science Bulletin*, 58(36): 1954 — 1961 (in Chinese).
- Li, Y., Zhou, H. W., Zhong, Z. Q., et al., 2012. Two Eopaleozoic Metamorphic Events in North Qinling: Petrology and Zircon U-Pb Geochronology Evidences from Basic Rocks in the Songshugou Area. *Earth Science*, 37(S1): 111 — 124 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.S1.011>
- Liu, L., Liao, X. Y., Zhang, C. L., et al., 2013. Multi-Metamorphic Timings of HP-UHP Rocks in the North Qinling and Their Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1634 — 1656 (in Chinese with English abstract).
- 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.earscirev.2016.05.005>
- 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. *Tectonophysics*, 599: 67 — 88. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.04.003>
- Liu, X. C., Wu, Y. B., Gao, S., et al., 2014. Record of Multiple Stage Channelized Fluid and Melt Activities in Deeply Subducted Slab from Zircon U-Pb Age and Hf-O Isotope Compositions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 144: 1 — 24. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.08.016>
- Liu, X. C., Wu, Y. B., Gong, H. J., et al., 2009. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Composition of a Quartz Vein in Ultrahigh-Pressure Eclogite from the Western Dabie Orogen. *Chinese Science Bulletin*, 54(10): 1449 — 1454 (in Chinese).
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interac-

- tions in the Trans-North China Orogen; U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Ludwig, K.R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00; A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publications, Berkeley.
- Manning, C., 2004. The Chemistry of Subduction-Zone Fluids. *Earth and Planetary Science Letters*, 223(1-2): 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.04.030>
- Massonne, H.J., Kennedy, A., Nasdala, L., et al., 2007. Dating of Zircon and Monazite from Diamondiferous Quartzofeldspathic Rocks of the Saxonian Erzgebirge-Hints at Burial and Exhumation Velocities. *Mineralogical Magazine*, 71(4): 407-425. <https://doi.org/10.1180/minmag.2007.071.4.407>
- McDonough, W.F., Sun, S.S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4): 223-253.
- Monteleone, B.D., Baldwin, S.L., Webb, L.E., et al., 2007. Late Miocene-Pliocene Eclogite Facies Metamorphism, D'Entrecasteaux Islands, SE Papua New Guinea. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(2): 245-265. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2006.00685.x>
- Rubatto, D., 2002. Zircon Trace Element Geochemistry: Partitioning with Garnet and the Link between U-Pb Ages and Metamorphism. *Chemical Geology*, 184(1-2): 123-138.
- Rubatto, D., Hermann, J., 2003. Zircon Formation during Fluid Circulation in Eclogites (Monviso, Western Alps): Implications for Zr and Hf Budget in Subduction Zones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(12): 2173-2187. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)01321-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)01321-2)
- Rubatto, D., Hermann, J., 2007. Zircon Behaviour in Deeply Subducted Rocks. *Elements*, 3(1): 31-35.
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D.J., et al., 2008. Plešovice Zircon—A New Natural Reference Material for U-Pb and Hf Isotopic Microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1-2): 1-35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>
- Spandler, C., Pirard, C., 2013. Element Recycling from Subducting Slabs to Arc Crust: A Review. *Lithos*, 170-171(6): 208-223. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.02.016>
- Vavra, G., Gebauer, D., Schmid, R., et al., 1996. Multiple Zircon Growth and Recrystallization during Polyphase Late Carboniferous to Triassic Metamorphism in Granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): An Ion Microprobe (SHRIMP) Study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 122(4): 337-358.
- Wang, H., Wu, Y.B., 2013. Early Paleozoic HP-UHP Metamorphism of the Qinling Orogen. *Chinese Science Bulletin*, 58(22): 2124-2131 (in Chinese).
- 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. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(9): 1019-1031. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2011.00955.x>
- 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. *Lithos*, 125(1-2): 249-271. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.02.010>
- Wang, H., Wu, Y.B., Qin, Z.W., et al., 2013a. Age and Geochemistry of Silurian Gabbroic Rocks in the Tongbai Orogen, Central China: Implications for the Geodynamic Evolution of the North Qinling Arc-Back-Arc System. *Lithos*, 179: 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.07.021>
- Wang, H., Wu, Y.B., Gao, S., et al., 2013b. Continental Origin of Eclogites in the North Qinling Terrane and Its Tectonic Implications. *Precambrian Research*, 230(2): 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>
- Wu, Y.B., Gao, S., Zhang, H.F., et al., 2009. U-Pb Age, Trace-Element, and Hf-Isotope Compositions of Zircon in a Quartz Vein from Eclogite in the Western Dabie Mountains: Constraints on Fluid Flow during Early Exhumation of Ultrahigh-Pressure Rocks. *American Mineralogist*, 94(2-3): 303-312. <https://doi.org/10.2138/am.2009.3042>
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554-1569. <https://doi.org/10.1360/04wd0130>
- 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>
- 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. *Gondwana Research*, 21(2-3): 559-576. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.07.002>

- Yang, J. S., Liu, F. L., Wu, C. L., et al., 2005. Two Ultrahigh Pressure Metamorphic Events Recognized in the Central Orogenic Belt of China: Evidence from the U-Pb Dating of Coesite-Bearing Zircons. *International Geology Review*, 47: 327 – 343. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.47.4.327>
- 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. *Terra Nova*, 15 (6): 370 – 379. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2003.00511.x>
- Yang, J. Z., Liu, X. C., Wu, Y. B., et al., 2015. Zircon Record of Ocean-Continent Subduction Transition Process of Dulan UHPM Belt, North Qaidam. *Journal of Earth Science*, 26 (5): 617 – 625. <https://doi.org/10.1007/s12583-015-0585-0>
- Yang, W. T., Du, Y. S., 2017. Geochemistry of Mudstones from Mesozoic Jiyuan Basin, West Henan: Implications for Provenance Analysis. *Earth Science*, 42 (1): 53 – 67 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.004>
- Yu, H., Zhang, H. F., Li, X. H., et al., 2016. Tectonic Evolution of the North Qinling Orogen from Subduction to Collision and Exhumation: Evidence from Zircons in Metamorphic Rocks of the Qinling Group. *Gondwana Research*, 30: 65 – 78. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.07.003>
- Zhang, J. X., Yu, S. Y., Meng, F. C., et al., 2009. Paired High-Pressure Granulite and Eclogite in Collision Orogens and Their Geodynamic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (9): 2050 – 2066 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. J., Wu, Y. B., Liu, X. C., et al., 2016. Distinct Zircon U-Pb and O-Hf-Nd-Sr Isotopic Behaviour during Fluid Flow in UHP Metamorphic Rocks: Evidence from Metamorphic Veins and Their Host Eclogite in the Sulu Orogen, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 34 (4): 343 – 362. <https://doi.org/10.1111/jmg.12184>
- Zheng, Y. F., Fu, B., Gong, B., et al., 2003. Stable Isotope Geochemistry of Ultrahigh Pressure Metamorphic Rocks from the Dabie-Sulu Orogen in China: Implications for Geodynamics and Fluid Regime. *Earth-Science Reviews*, 62 (1): 105 – 161. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00133-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00133-2)
- Zheng, Y. F., Gao, T. S., Wu, Y. B., et al., 2007. Fluid Flow during Exhumation of Deeply Subducted Continental Crust: Zircon U-Pb Age and O-Isotope Studies of a Quartz Vein within Ultrahigh-Pressure Eclogite. *Journal of Metamorphic Geology*, 25 (2): 267 – 283. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00696.x>
- Zheng, Y. F., 2009. Fluid Regime in Continental Subduction Zones: Petrological Insights from Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks. *Journal of the Geological Society*, 166 (4): 763 – 782. <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-016R>
- Zheng, Y. F., Xia, Q. X., Chen, R. X., et al., 2011. Partial Melting, Fluid Supercriticality and Element Mobility in Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks during Continental Collision. *Earth-Science Reviews*, 107 (3–4): 342 – 374. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.04.004>
- Zheng, Y. F., Hermann, J., 2014. Geochemistry of Continental Subduction-Zone Fluids. *Earth, Planets and Space*, 66 (1): 1 – 16. <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-93>
- Zong, K. Q., Liu, Y. S., Hu, Z. C., et al., 2010. Melting-Induced Fluid Flow during Exhumation of Gneisses of the Sulu Ultrahigh-Pressure Terrane. *Lithos*, 120 (3–4): 490 – 510. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.09.013>

附中文参考文献

- 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, 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.
- 李献华, 唐国强, 龚冰, 等, 2013. QingHu (清湖) 锆石: 一个新的 U-Pb 年龄和 O, Hf 同位素微区分析工作标样. *科学通报*, 58 (20): 1954 – 1961.
- 李晔, 周汉文, 钟增球, 等, 2012. 北秦岭早古生代两期变质作用: 来自松树沟基性岩岩石学及锆石 U-Pb 年代学的记录. *地球科学*, 37 (S1): 111 – 124. doi: 10.3799/dqkx.2012.S1.011
- 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.
- 刘小驰, 吴元保, 弓虎军, 等, 2009. 西大别超高压榴辉岩中石英脉锆石年龄和 Hf 同位素组成. *科学通报*, 54 (10): 1449 – 1454.
- 王浩, 吴元保, 2013. 秦岭造山带早古生代高压-超高压变质作用. *科学通报*, 58 (22): 2124 – 2131.
- 杨文涛, 杜远生, 2017. 豫西济源盆地中生代泥岩地球化学特征对物源区的指示. *地球科学*, 42 (1): 53 – 67. doi: 10.3799/dqkx.2017.004
- 张建新, 于胜尧, 孟繁聪, 等, 2009. 造山带中成对出现的高压麻粒岩与榴辉岩及其地球动力学意义. *岩石学报*, 25 (9): 2050 – 2066.