

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.236>



南秦岭佛坪片麻岩穹隆变质作用及与岩浆作用的关系

陈龙耀¹, 刘志慧^{1,2}, 刘晓春¹, 刘树文³

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081
2. 河北环境工程学院环境科学系, 河北秦皇岛 066102
3. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

摘要: 南秦岭佛坪片麻岩穹隆是国内片麻岩穹隆的典型代表之一, 记录了碰撞造山到后造山伸展等多阶段构造演化信息, 对揭示秦岭造山带早中生代构造演化具有重要的意义. 岩石组合、岩相学、矿物化学和传统温压计研究表明, 佛坪片麻岩穹隆具有明显的变质分带特征, 以穹隆核部为中心, 向南北两侧的盖层变质温度逐渐降低, 压力并没有出现随地温梯度的相应变化. 不同类型岩石的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和变泥质岩的独居石 SHRIMP U-Pb 定年给出了一致的变质时代, 为 206~196 Ma. 结合南秦岭早中生代岩浆作用研究, 认为佛坪片麻岩穹隆递进变质作用与三叠纪末期的岩浆底辟有关, 片麻岩穹隆形成于后碰撞伸展环境.

关键词: 南秦岭构造带; 佛坪; 片麻岩穹隆; 变质分带; 岩石学.

中图分类号: P581; P586

文章编号: 1000-2383(2019)12-4178-08

收稿日期: 2019-08-25

Metamorphism and Its Relation of Magmatism of the Foping Gneiss Dome in the South Qinling Tectonic Belt

Chen Longyao¹, Liu Zhihui^{1,2}, Liu Xiaochun¹, Liu Shuwen³

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China
2. Department of Environmental Sciences, Hebei University of Environmental Engineering, Qinghuangdao 066102, China
3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: The Foping gneiss dome in the South Qinling tectonic belt is one of the most typical gneiss domes. The gneiss dome has records the multi-stage tectonic evolution from syn-collision orogeny to post-orogenic extension, and therefore is critical to understanding the Early Mesozoic tectonic evolution of the Qinling orogen. The studies on field work, petrography, mineral chemistry, and conventional geothermobarometry show that Foping gneiss dome has typical metamorphic zoning, with metamorphic temperature gradually decreasing from the Precambrian basement in the core to the sedimentary covers in the north and south flanks. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of different types of rocks and monazite SHRIMP U-Pb dating of the metapelites give a consistent metamorphic age of ca. 206–196 Ma. In combination with the investigation of Early Mesozoic granitoids in the South Qinling tectonic belt, the authors infer that the metamorphism of the Foping gneiss dome was induced by Late Triassic magmatic diapir in a post-collisional extensional setting.

Key words: South Qinling tectonic belt; Foping; gneiss dome; progressive metamorphic zone; petrology.

基金项目: 国家重大基础研究发展规划项目(No.2015CB856104); 国家自然科学基金项目(No.41872059).

作者简介: 陈龙耀(1988—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事变质岩石学研究. ORCID: 0000-0002-1400-9220. E-mail: chenlongyao1220@163.com

引用格式: 陈龙耀, 刘志慧, 刘晓春, 等, 2019. 南秦岭佛坪片麻岩穹隆变质作用及与岩浆作用的关系. 地球科学, 44(12):4178–4185.

秦岭—桐柏—大别—苏鲁造山带是一个典型性陆—陆碰撞造山带,经历了早古生代增生造山、中生代碰撞造山及白垩纪以来的陆内造山过程(许志琴等,1998;张国伟等,2001;Dong *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013, 2015; Wu and Zheng, 2013; Dong and Santosh, 2016). 其中,桐柏—大别地区广泛产出高压/超高压岩石,代表了深俯冲陆壳的基底. 南秦岭地区则缺少以榴辉岩为特征的高压/超高压岩石,广泛发育大面积显生宙中—低级变质地层,可能代表了俯冲板片的盖层. 因此,如果大别—苏鲁地区是研究地幔深度大陆俯冲和壳幔相互作用理想地区,那么南秦岭可能是研究地壳层次大陆俯冲与折返的重要场所.

从变质岩石学研究的角度来看,南秦岭构造带最显著的特征是发育有中压递增变质带,宏观上表现为以佛坪片麻岩穹隆为中心,由内向外依次为夕线石带、十字石—蓝晶石带、石榴石带、黑云母带,并在穹隆核部产出有低压麻粒岩(陕西省地质矿产局,1989;魏春景等,1998;Wei *et al.*, 1999;翟刚毅,2000;张国伟等,2015). 佛坪片麻岩穹隆位于此中压递增变质带的夕线石带,且是国内片麻岩穹隆的典型代表之一,记录了从碰撞造山到后造山伸展等多阶段构造演化信息. 通常而言,片麻岩穹隆是与岩浆作用(或混合岩化作用)密切相关的穹隆状构造,在世界范围内几乎出露在所有的造山带折返中,反映了所在地区地壳的大幅度抬升(Eskola, 1948; Amato, 1994; Vanderhaeghe, 2004; Whitney *et al.*, 2004;许志琴和马绪宣,2015). 因此,佛坪片麻岩穹隆的研究对揭示秦岭造山带中生代构造演化具有重要的意义.

1 区域地质背景

秦岭造山带西连祁连造山带,东接桐柏—大别造山带,延伸超过 1500 km. 该造山带北以洛南—栾川断裂为界,南以勉略—巴山—襄广断裂带为界(图 1). 根据板块构造模式,一般以商丹断裂带为界将秦岭造山带的主体分为北秦岭和南秦岭两个构造带(Mattauer *et al.*, 1985; Hsü *et al.*, 1987;许志琴等,1998;王清晨等,1989). 在东西方向上,则以宝鸡—成都铁路为界,秦岭造山带又可分为西秦岭和东秦岭. 北秦岭构造带北以洛南—栾川断裂为界与华北板块南缘相隔,南以商丹断裂带与南秦岭构造带相隔. 主要由前寒武纪基底(秦岭岩群)、新元

古代变质沉积岩和变质火山岩(宽坪岩群)、早古生代变质火山岩系(二郎坪岩群和丹凤岩群)以及早古生代变质程度较低的沉积地层组成(Dong *et al.*, 2011; Dong and Santosh, 2016),此外还包含有新元古代早期(980~910 Ma)、早古生代(507~400 Ma)和中生代晚期(250~180 Ma)侵入的花岗岩类(Wang *et al.*, 2015). 南秦岭构造带主要由零星出露的前寒武纪结晶基底(陡岭杂岩、佛坪群、武当群和耀岭河群)和大面积的未变质—浅变质早古生代—三叠纪沉积地层所组成(张国伟等,2001; Dong *et al.*, 2011; Dong and Santosh, 2016),此外还包含有呈带状分布的早中生代岩体(Dong *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015; Deng *et al.*, 2016; Hu *et al.*, 2017a, 2018). 早中生代岩体主要包括西秦岭地区中川—糜署岭—迷坝—何家庄岩体和东秦岭地区的东江口岩体群、五龙岩体群和光头山岩体群;岩浆作用大致可分为 3 个阶段:250~235 Ma、235~210 Ma 和 210~190 Ma,主体的岩浆作用发生在约 225~200 Ma(刘树文等,2011;Li *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015; Dong and Santosh, 2016;黄倩雯等,2018).

2 佛坪片麻岩穹隆物质构成

佛坪地区位于东、西秦岭的交汇地段(张国伟等,2001),以高级变质岩(包括混合岩、麻粒岩等)的穹状隆起出露为特点,上覆为变质沉积盖层,外被中生代侵入岩大面积围限(图 1),具有片麻岩穹隆的典型特征. 本文将佛坪片麻岩穹隆分为穹隆核部、穹隆盖层和外围盖层. 穹隆核部位于佛坪县城和龙草坪地区,前者发育一套石榴黑云斜长片麻岩—刚玉黑云斜长片麻岩—斜长角闪岩组合,前人称之为佛坪岩群;后者则为角闪斜长片麻岩—黑云斜长片麻岩组合,前人称之为龙草坪片麻岩套(陕西省地质矿产局,1999). 穹隆核部经历了角闪岩相—麻粒岩相的变质作用,并发育大量与深熔作用有关的花岗伟晶岩脉和条带(魏春景等,1998). 穹隆盖层分布于县城隆起和龙草坪隆起核部外围,主要由石墨大理岩、条带状石墨石英岩、含石榴夕线黑云斜长片麻岩等组成,前人称之为长角坝岩群(陕西省地质矿产局,1999). 由于遭受了多期多层次构造作用的改造,原始沉积叠覆关系已遭彻底改造破坏,仅表现为构造岩片的叠置关系和穹隆盖层与核部之间的脆—韧性断层接触(陕西省地质调查院,

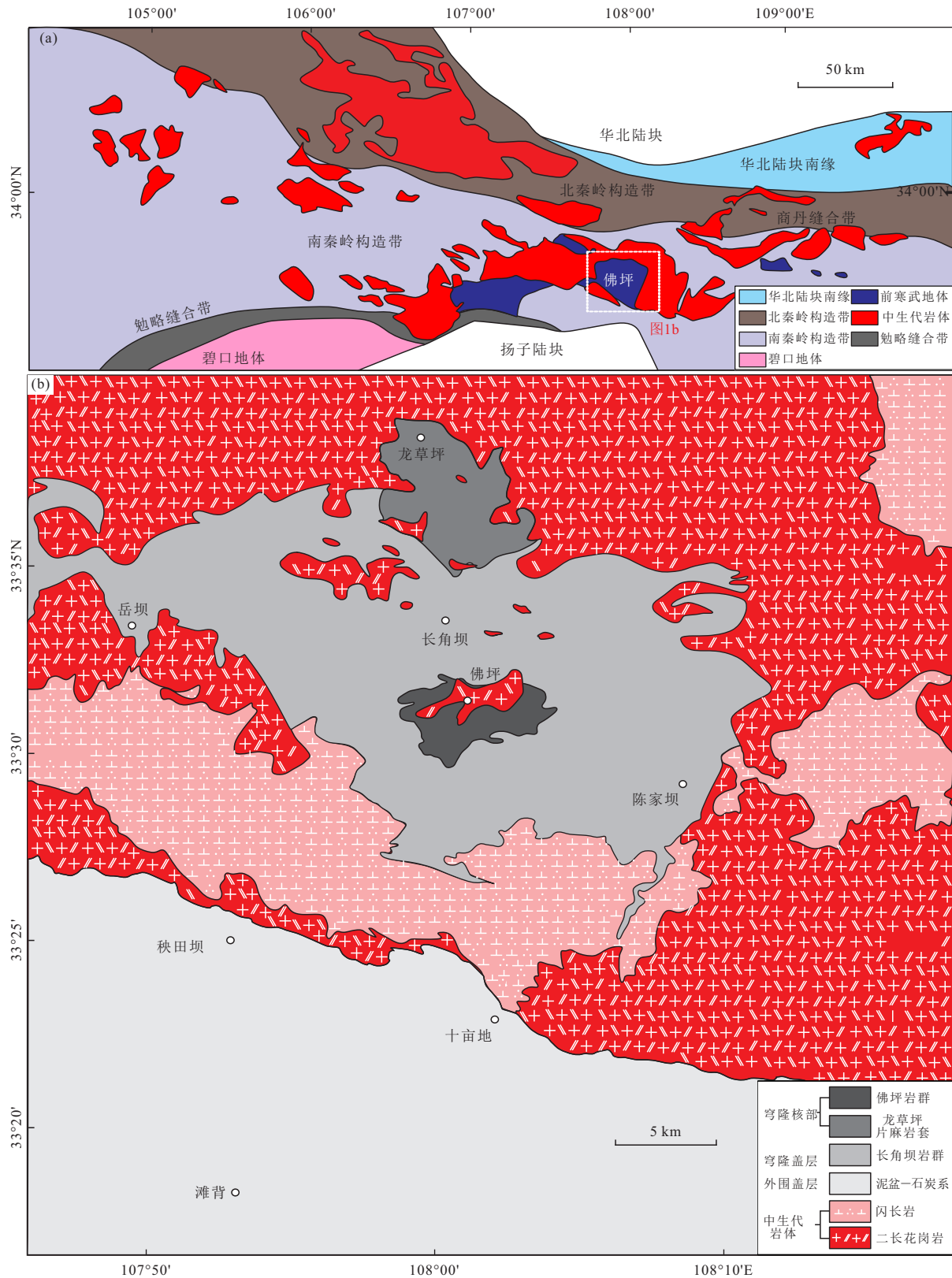


图 1 秦岭造山带大地构造简图(a)与佛坪地区地质简图(b)

Fig.1 Geological sketch map of the Qinling orogen (a);simplified geological map of the Foping area (b)

a 据 Dong *et al.*(2011)修改;b 据陕西省地质矿产局(1999)

2017). 穹隆南侧外围盖层的岩石组成主要以二云石英片岩为主, 夹含石墨二云石英片岩、含夕线石榴云母石英片岩, 局部夹炭质片岩、炭硅质片岩和中一薄大理岩(陕西省地质调查院, 2017). 佛坪岩群和龙草坪片麻岩套普遍被认为是南秦岭典型的太古代基底, 长角坝岩群属于中元古代基底, 而南侧的外围盖层为志留—泥盆系. 通过我们的碎屑锆石年代学研究发现, 佛坪岩群的形成时代为中元古代和新元古代, 龙草坪片麻岩套中仅很少一部分地层的时代为新元古代, 大部分地层形成时代为泥盆纪, 其中发育的大量混合岩化现象并不是古老基底的证据, 而可能是三叠纪岩体的侵入所造成热变质(刘志慧等, 2018). 长角坝岩群的形成时代为泥盆纪, 南侧外围盖层的形成时代为泥盆纪和石炭纪(刘志慧等, 2018). 在此基础上, 我们重新厘定了佛坪地区的地层格架, 穹隆核部主要由中—新元古代基底和一部分泥盆纪盖层所构成, 穹隆盖层为大面积分布的泥盆纪盖层, 外围盖层由泥盆—石炭纪盖层所构成(表 1).

佛坪地区早中生代岩体主要包括北侧的龙草坪岩体、南侧的西岔河岩体、西侧的华阳岩体以及东侧的五龙岩体、老城岩体和胭脂坝岩体, 统称为五龙岩体群(刘树文等, 2011; Dong *et al.*, 2012; Qin *et al.*, 2013; Wang, F., *et al.*, 2014; Wang, X.X., *et al.*, 2015; Dong and Santosh, 2016; Lu *et al.*, 2016; Hu *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2018). 其岩性组合为石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩和似斑状二长花岗岩、黑云母二长花岗岩等(刘树文等 2011). 其中, 石英闪长岩和花岗闪长岩表现为渐变过渡关

系, 似斑状二长花岗岩和黑云母二长花岗岩表现为渐变过渡关系. 同时, 二长花岗岩单元与闪长岩单元具有明显的侵入接触关系, 野外可见二长花岗岩的岩脉侵入到石英闪长岩和花岗闪长岩中(刘树文等 2011; Hu *et al.*, 2018). 早期石英闪长岩、英云闪长岩和花岗闪长岩形成时代约为 235~207 Ma, 经历了明显的变形改造, 发育与区域构造片理一致的片麻理(刘树文等 2011; Qin *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015; Dong and Santosh, 2016; Lu *et al.*, 2016; Hu *et al.*, 2018). 晚期似斑状二长花岗岩和黑云母二长花岗岩形成时代约为 210~200 Ma, 表现为块状构造或者微弱的片麻理(刘树文等 2011; Qin *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015; Dong and Santosh, 2016; Hu *et al.*, 2018). 地球化学和 Sr-Nd-Hf-O 同位素研究表明, 早期的闪长岩单元形成于俯冲和同碰撞环境, 晚期的花岗岩单元形成于同碰撞向伸展转化的阶段(刘树文等, 2011; Dong *et al.*, 2012; Qin *et al.*, 2013; Wang, F., *et al.*, 2014; Wang, X.X., *et al.*, 2015; Dong and Santosh, 2016; Lu *et al.*, 2016; ; Hu *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2018).

3 佛坪片麻岩穹隆变质分带特征及变质时代

佛坪片麻岩穹隆具有明显的变质分带特征, 从穹隆核部到盖层, 麻粒岩相—高角闪岩相—低角闪岩相变质带呈同心环状向外展布(翟刚毅, 2000). 麻粒岩仅出露于佛坪县城南侧河岸中, 主要为中酸性麻粒岩夹少量基性麻粒岩, 呈条带状或者透镜状产

表 1 佛坪片麻岩穹隆地层时代划分及同位素年代学结果

Table 1 Geochronological data and stratigraphic classification of the Foping gneiss dome

位置	单元	地层格架重建 (刘志慧等, 2018)	样品号	岩性	锆石(Ma) (刘志慧等, 2019)	独居石(Ma) (笔者未发表数据)
外围盖层	晚古生代盖层	泥盆—石炭系	YX09-7	变泥质岩		203 ± 2
			YX17-3	变泥质岩		199 ± 2
穹隆盖层	长角坝岩群	泥盆系	FP14-3	变泥质岩		204 ± 2
			YX02-3	同变形花岗岩	206~202	
			YX05-1	变泥质岩		203 ± 1
穹隆核部	龙草坪片麻岩套	泥盆系	FP02-2	混合岩淡色体	204 ± 2	
			FP07-2	伟晶岩脉	201 ± 2	
	佛坪岩群	中元古代—新元古代基底	FP19-8	二辉麻粒岩	202 ± 7	
			FP24-5	变泥质岩	196 ± 2	197 ± 2
			FP26-3	变泥质岩	198 ± 2	205 ± 1

于黑云斜长片麻岩中.岩相学上穹隆核部中含石榴石变泥质岩中矿物组合为石榴石+黑云母+夕线石+斜长石+钾长石+石英,并没有原生的白云母,但是可见白云母完全转化为夕线石的现象.穹隆盖层和南侧盖层中含石榴石变泥质岩中矿物组合为石榴石+黑云母+夕线石±白云母+斜长石+石英,穹隆盖层中可见白云母向夕线石的不完全转化,且在外围盖层的最南侧可见石榴石+黑云母+白云母的平衡共生现象.矿物化学上,从穹隆核部、穹隆盖层到南侧外围盖层,石榴子石中镁铝榴石的含量逐渐降低,黑云母的 Ti 含量逐渐降低、Fe 含量逐渐升高.运用传统温压计估算得到,穹隆核部变质条件为 680~730 °C、0.43~0.56 GPa,穹隆盖层变质条件为 630~660 °C、0.37~0.47 GPa,南侧外围盖层的变质条件为 600~660 °C、0.34~0.58 GPa(除了最北侧一个样品给出的 P - T 条件为 670~680 °C、0.41~0.46 GPa)(我们未发表的数据).

前人对佛坪片麻岩穹隆变质时代的研究比较薄弱.杨崇辉等(1999)通过 TIMS 锆石 U-Pb 定年方法获得了一个年龄数据,其中 3 颗锆石的加权平均年龄为 221 ± 4 Ma,而 4 颗锆石的下交点年龄为 218 ± 14 Ma.最近,Zhang *et al.*(2018)通过对佛坪地区混合岩的研究,解析出了研究区两期~210 Ma 和~195 Ma 部分熔融事件.显然,更精确、全面的同位素定年是非常有必要的.我们通过对片麻岩穹隆中混合岩淡色体、伟晶岩脉、同变形花岗岩、麻粒岩以及变泥质岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年得出,穹隆核部、穹隆盖层和外围盖层具有一致的变质时代,约为 206~196 Ma(表 1)(刘志慧等,2019).同时,穹隆核部、穹隆盖层和外围盖层中变泥质岩独居石 SHRIMP U-Pb 定年也给出了一致的年龄,约为 205~197 Ma(表 1)(我们未发表的数据).

佛坪片麻岩穹隆变质作用研究表明,佛坪地区经历了角闪岩相—麻粒岩相的变质作用,地热梯度约为 34~38 °C/km,具有明显的变质分带特征.以穹隆核部为中心,变质温度向南北两侧盖层逐渐降低,但是并没有出现压力随地温梯度的相应变化,说明变质作用与岩浆侵位有关.同时,锆石和独居石年代学结果显示,无论是穹隆核部、穹隆盖层还是外围盖层均具有一致的变质时代,且不同变质级别的层位得到的变质时代也是一致的,递增变质及部分熔融的时代为 206~196 Ma.这一变质—深熔时代与佛坪地区最晚一期的后碰撞岩浆作用时代

(210~200 Ma,以华阳岩体为代表;Hu *et al.*,2018)一致.因此岩浆作用可能是形成佛坪递增变质作用的主要成因.

4 佛坪片麻岩穹隆的成因

现阶段,对秦岭造山带碰撞过程的研究多依赖于早中生代岩浆作用的研究,并由此提出了不同的俯冲和碰撞演化模型.其中,在碰撞时限上主要有 3 种认识:晚三叠世(<220 Ma;Jiang *et al.*,2010;Dong *et al.*,2012;Lu *et al.*,2016)、中—晚三叠世(240~225 Ma;Qin *et al.*,2013;Wang *et al.*,2015;Deng *et al.*,2016;Hu *et al.*,2017a)和三叠纪之后(<200 Ma;Li *et al.*,2015).由于俯冲相关的岩浆作用与碰撞相关的岩浆作用在地球化学上具有相似性,因此,仅仅通过岩浆地球化学来判别俯冲和碰撞环境会产生不确定性.一些基本的地质事实则可能为碰撞时限提供强有力的证据.扬子板块北缘三叠纪前陆盆地中非海相沉积开始于约 227 Ma(Liu *et al.*,2005).出露于勉略缝合带的光头山岩体,属于典型的“钉合岩体”,其形成时代约为 224~218 Ma,表明勉略洋的关闭发生在 224 Ma 之前(Deng *et al.*,2016).因此我们认为在秦岭造山带华北与扬子板块的碰撞发生在 225 Ma 之前.而对秦岭造山带早中生代伸展(后碰撞阶段)的时限有比较一致的共识,均认为发生在约 210~180 Ma(Dong *et al.*,2012;Qin *et al.*,2013;Wang *et al.*,2015;Deng *et al.*,2016;Zhang *et al.*,2018;Hu *et al.*,2018).一些其他的地质证据也支持这一结论,如:(1)南秦岭中生代花岗岩在~210~180 Ma 发生了快速的抬升和折返(Wang *et al.*,2014);(2)基于三叠纪岩体地球化学指标(Sr/Y 和 La/Yb)研究,南秦岭地壳减薄起始于~210 Ma(Hu *et al.*,2017b).

根据南秦岭早中生代岩浆作用和佛坪地区变质—岩浆作用特征,我们提出有关佛坪片麻岩穹隆的形成过程模式:(1)~210 Ma 以前,同碰撞环境下俯冲板片发生断离和脱水作用,引发了上覆岩石圈地幔的部分熔融,随着俯冲板片断离和岩石圈地幔熔融的持续发生,加厚下地壳发生拆沉,~210 Ma 之后地壳发生了明显的减薄,构造体制进入挤压向伸展转换阶段,岩石圈地幔来的镁铁质岩浆侵位至中、下地壳并提供热量,进而引发了中、下地壳的部分熔融,造成了后续(210~200 Ma)更大规模的花岗质岩浆作用(图 2a);(2)花岗质岩浆必然向上运

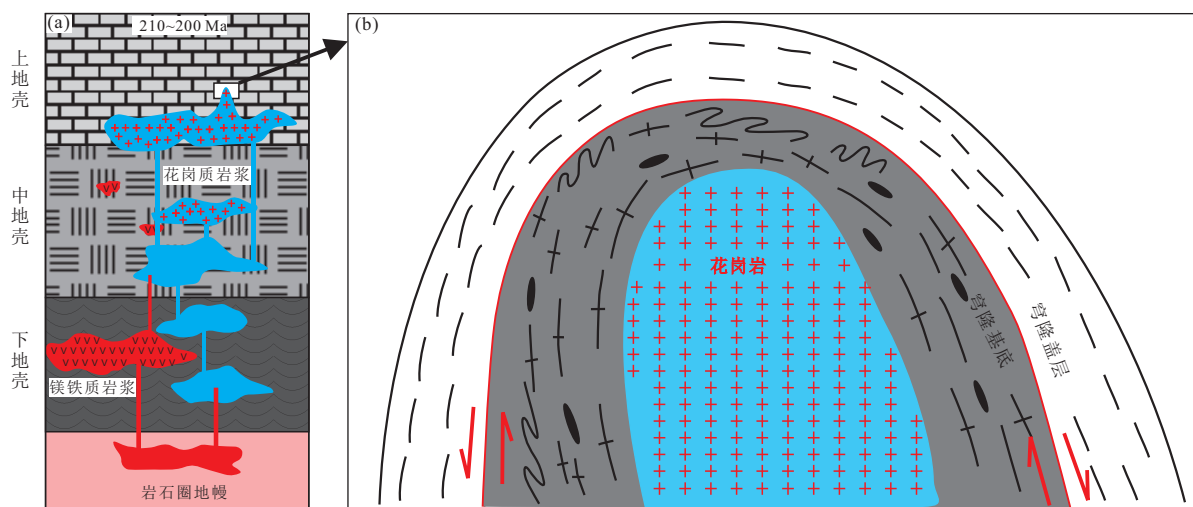


图 2 佛坪片麻岩穹隆成因模式图

Fig.2 Schematic diagram showing the formation of the Foping gneiss dome

a 据 Hu et al.(2018)

移并侵位至上地壳,进而发生底辟作用,造成了佛坪片麻岩穹隆的显著抬升,同时引发岩体上覆及周围地层角闪岩相—麻粒岩相的变质作用和递增变质带的产生(图 2b)。

致谢:感谢郑永飞院士和吴元保教授对本文提出的建设性意见;感谢审稿人对本文提出的宝贵意见。

References

- Amato, J.M., Wright, J.E., Gans, P.B., et al., 1994. Magmatically Induced Metamorphism and Deformation in the Kigluak Gneiss Dome, Seward Peninsula, Alaska. *Tectonics*, 13(3):515–527. <https://doi.org/10.1029/93tc03320>
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Shaanxi Province, 1989. The Region Geology of Shaanxi Province. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Shaanxi Province, 1999. The People's Republic of China Regional Geological Survey Report of Foping, 1: 200 000 (I48E015024). Bureau of Geology and Mineral Resources of Shaanxi Province, Xi'an(in Chinese).
- Deng, Z.B., Liu, S.W., Zhang, W.Y., et al., 2016. Petrogenesis of the Guangtoushan Granitoid Suite, Central China: Implications for Early Mesozoic Geodynamic Evolution of the Qinling Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 30: 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.07.012>
- Dong, Y.P., Liu, X.M., Zhang, G.W., et al., 2012. Triassic Diorites and Granitoids in the Foping Area: Constraints on the Conversion from Subduction to Collision in the Qinling Orogen, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 123–142. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2011.06.005>
- Dong, Y.P., Santosh, M., 2016. Tectonic Architecture and Multiple Orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Gondwana Research*, 29(1):1–40.
- Dong, Y.P., Zhang, G.W., Neubauer, F., et al., 2011. Tectonic Evolution of the Qinling Orogen, China: Review and Synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3):213–237. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2011.03.002>
- Eskola, P.E., 1948. The Problem of Mantled Gneiss Domes. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 104(1–4): 461–476.
- Huang, Q.W., Shi, Y., Liu, M.H., et al., 2018. Geochronology and Geochemistry of the Shahewan and Caoping Granites in South Qinling and Their Significance. *Earth Science*, 43(Suppl. 2): 81–102(in Chinese with English abstract).
- Hsü, K.J., Wang, Q.C., Li, J.L., et al., 1987. Tectonic Evolution of Qinling Mountains, China. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 80(3):735–752.
- Hu, F.Y., Ducea, M.N., Liu, S.W., et al., 2017b. Quantifying Crustal Thickness in Continental Collisional Belts: Global Perspective and a Geologic Application. *Scientific Reports*, 7: 7058. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07849-7>
- Hu, F.Y., Liu, S.W., Ducea, M.N., et al., 2017a. The Geochemical Evolution of the Granitoid Rocks in the South Qinling Belt: Insights from the Dongjiangkou and Zhashui Intrusions, Central China. *Lithos*, 278–281: 195–214. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.01.021>

- Hu, F. Y., Liu, S. W., Ducea, M. N., et al., 2018. Interaction among Magmas from Various Sources and Crustal Melting Processes during Continental Collision: Insights from the Huayang Intrusive Complex of the South Qinling Belt, China. *Journal of Petrology*, 59(4): 735–770. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy042>
- Jiang, Y. H., Jin, G. D., Liao, S. Y., et al., 2010. Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints on the Origin of Late Triassic Granitoids from the Qinling Orogen, Central China: Implications for a Continental Arc to Continent-Continent Collision. *Lithos*, 117(1–4): 183–197. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.02.014>
- Li, N., Chen, Y. J., Santosh, M., et al., 2015. Compositional Polarity of Triassic Granitoids in the Qinling Orogen, China: Implication for Termination of the Northernmost Paleo-Tethys. *Gondwana Research*, 27(1): 244–257. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.09.017>
- Liu, S. F., Steel, R., Zhang, G. W., 2005. Mesozoic Sedimentary Basin Development and Tectonic Implication, Northern Yangtze Block, Eastern China: Record of Continent-Continent Collision. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(1): 9–27. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2004.01.010>
- Liu, S. W., Yang, P. T., Li, Q. G., et al., 2011. Indosinian Granitoids and Orogenic Processes in the Middle Segment of the Qinling Orogen, China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(6): 1928–1943 (in Chinese with English abstract).
- 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., Li, S. Z., Jahn, B. M., 2015. Tectonic Evolution of the Tongbai-Hong'an Orogen in Central China: From Oceanic Subduction/Accretion to Continent-Continent Collision. *Science China: Earth Sciences*, 58(9): 1477–1496.
- Liu, Z. H., Chen, L. Y., Qu, W., et al., 2019. Early Mesozoic Metamorphism, Anataxis and Deformation of Foping Area in South Qinling Belt: Constrains from U-Pb Zircon Dating. *Acta Geoscientica Sinica*, 40(4): 545–562 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. H., Luo, M., Chen, L. Y., et al., 2018. Stratigraphic Framework and Provenance Analysis in the Foping Area, the South Qinling Tectonic Belt: Constraints from LA-ICP-MS U-Pb Dating of Detrital Zircons from the Metasedimentary Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 34(5): 1484–1502 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y. H., Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., 2016. Geochemical Constraints on the Source Nature and Melting Conditions of Triassic Granites from South Qinling in Central China. *Lithos*, 264: 141–157. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.08.018>
- Mattauer, M., Matte, P., Malavieille, J., et al., 1985. Tectonics of the Qinling Belt: Build-up and Evolution of Eastern Asia. *Nature*, 317: 496–500. <https://doi.org/10.1038/317496a0>
- Qin, J. F., Lai, S. C., Li, Y. F., 2013. Multi-Stage Granitic Magmatism during Exhumation of Subducted Continental Lithosphere: Evidence from the Wulong Pluton, South Qinling. *Gondwana Research*, 24(3–4): 1108–1126. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.02.005>
- Shaanxi Institute of Geological Survey. 2017. The Regional Geology of China—Shaanxi Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Vanderhaeghe, O., 2004. Structural Development of the Naxos Migmatite Dome. In: Whitney, D. L., Teyssier, C., Siddoway, C. S., eds., Gneiss Domes in Orogeny. *The Geological Society of America*, 380: 211–227. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2380-9.211>
- Wang, F., Zhu, R. X., Hou, Q. L., et al., 2014. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Thermochronology on Central China Orogen: Cooling, Uplift and Implications for Orogeny Dynamics. *Geological Society, London, Special Publications*, 378(1): 189–206. <https://doi.org/10.1144/sp378.3>
- Wang, Q. C., Sun, S., Li, J. L., et al., 1989. The Tectonic Evolution of the Qinling Mountain Belt. *Scientia Geologica Sinica*, 24(2): 129–142 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. X., Wang, T., Zhang, C. L., 2015. Granitoid Magmatism in the Qinling Orogen, Central China and Its Bearing on Orogenic Evolution. *Science China: Earth Sciences*, 58(9): 1497–1512.
- Wei, C. J., Yang, C. H., Zhang, S. G., 1999. Metamorphism of the East Sector of the Southern Qinling Orogenic Belt and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 73(1): 65–77.
- Wei, C. J., Yang, C. H., Zhang, S. G., et al., 1998. Discovery of Granulite from the Foping Area in Southern Qinling Mountains and Its Geological Significance. *Chinese Science Bulletin*, 43(9): 982–985 (in Chinese).
- Whitney, D. L., Teyssier, C., Vanderhaeghe, O., 2004. Gneiss Domes and Crustal Flow. In: Whitney, D. L., Teyssier, C., Siddoway, C. S., eds., Gneiss Domes in Orogeny. *The Geological Society of America*, 380: 1–20
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2013. Tectonic Evolution of a Com-

- posite 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>
- Xu, Z. Q., Lu, Y. L., Tang, Y. Q., 1988. The Formation of the East Qinling Mountain Chain—Deformation, Evolution and Plate Dynamics. China Environmental Science Press, Beijing (in Chinese).
- Xu, Z. Q., Ma, X. X., 2015. The Chinese Phanerozoic Gneiss Domes: Subduction-Related Type, Collision-Related Type and Combination Type of Subduction-Collision. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12): 3509-3523 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C. H., Wei, C. J., Zhang, S. G., et al., 1999. U-Pb Zircon Dating of Granulite Facies Rocks from the Foping Area in the Southern Qinling Mountains. *Geological Review*, 45(2): 173-179 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, G. Y., 2000. Analysis of Metamorphism and Tectonic Dynamics of Domes in Foping County of East Qinling. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 20(2): 86-90 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., 2015. The Mianlue Tectonic Zone of the Qinling Orogen and China Continental Tectonic. Science Press, Beijing (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., Li, S. Q., Fang, B. W., et al., 2018. Zircon U-Pb Ages and Geochemistry of Migmatites and Granites in the Foping Dome: Evidence for Late Triassic Crustal Evolution in South Qinling, China. *Lithos*, 296-299: 129-141. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.10.024>
- 体年代学、地球化学特征及其构造意义. *地球科学*, 43(增刊2): 81-102.
- 刘树文, 杨朋涛, 李秋根, 等, 2011. 秦岭中段印支期花岗质岩浆作用与造山过程. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(6): 1928-1943.
- 刘志慧, 陈龙耀, 曲玮, 等, 2019. 南秦岭地区早古生代变质-深熔-变形作用的锆石 U-Pb 年代学制约. *地球学报*, 40(4): 545-562.
- 刘志慧, 罗敏, 陈龙耀, 等, 2018. 南秦岭佛坪地区地层格架与物源分析: 变质沉积岩中碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年提供的制约. *岩石学报*, 34(5): 1484-1502.
- 陕西省地质矿产局, 1989. 陕西省区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 陕西省地质矿产局, 1999. 中华人民共和国区域地质调查报告——1: 50 000 佛坪县幅 (I48E015024). 西安: 陕西省地质矿产局.
- 陕西省地质调查院, 2017. 中国区域地质志——陕西志. 北京: 地质出版社.
- 王清晨, 孙枢, 李继亮, 等, 1989. 秦岭的大地构造演化. *地质科学*, 24(2): 129-142.
- 魏春景, 杨崇辉, 张寿广, 等, 1998. 南秦岭佛坪地区麻粒岩的发现及其地质意义. *科学通报*, 43(9): 982-985.
- 许志琴, 卢一伦, 汤耀庆, 1998. 东秦岭复合山链的形成——变形、演化及板块动力学. 北京: 中国环境科学出版社.
- 许志琴, 马绪宣, 2015. 中国大陆显生宙俯冲型、碰撞型和复合型片麻岩穹窿(群). *岩石学报*, 31(12): 3509-3523.
- 杨崇辉, 魏春景, 张寿光, 等, 1999. 南秦岭佛坪地区麻粒岩相岩石锆石 U-Pb 年龄. *地质论评*, 45(2): 173-179.
- 翟刚毅, 2000. 东秦岭佛坪穹隆变质作用与构造动力学分析. *矿物岩石*, 20(2): 86-90.
- 张国伟, 2015. 秦岭勉略构造带与中国大陆构造. 北京: 科学出版社.
- 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.

附中文参考文献

黄倩雯, 时毓, 刘明辉, 等, 2018. 南秦岭沙河湾和曹坪花岗岩