

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.266>



# 秦岭造山带古生代岩浆作用及地球动力学意义

吴元保

中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 秦岭造山带记录了华南华北板块聚合的完整过程. 古生代岩浆岩记录了造山过程中的壳幔相互作用和造山带演化的动力学过程. 古生代的中基性岩浆岩揭示了俯冲隧道内变质脱水交代岩石圈地幔过程, 其中富水基性杂岩为富钾基性岩, 地球化学特征显示其地幔源区经历了洋壳沉积物的交代; 看丰沟岩体为高镁闪长岩, 地球化学特征显示其来自经历俯冲流体交代的地幔源区. 通过对古生代岩浆岩的研究发现, 其具有明显的时空分布规律, 它们对应于原特提斯洋俯冲、后撤、前进和回转等过程. 所以壳幔相互作用发生在原特提斯洋俯冲过程中.

**关键词:** 秦岭造山带; 古生代; 岩浆作用; 地球动力学.

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2019)12-4173-05

收稿日期: 2019-09-02

## Paleozoic Magmatism in the Qinling Orogen and Its Geodynamic Significance

Wu Yuanbao

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

**Abstract:** The Qinling orogen records the whole amalgamation of the North China and South China blocks. The Paleozoic magmatism in the Qinling orogen registers crust-mantle interaction and geodynamics of the orogeny. In this paper, we give a brief review of the Paleozoic magmatism. Intermediate-mafic magmatic rocks derived from the metasomatic mantle reveal fluid activities in the subducted channel. The Fushui mafic complex is enriched in K, and its mantle source has been metasomatized by subducted oceanic sediment. The Kanfenggou pluton belongs to high-Mg diorite. It is inferred by the geochemical characteristics that the mantle sources of the Kanfenggou pluton have experienced subducted fluid metasomatism. The results show that they exhibit a clear spatio-temporal variation, which might be caused by the subduction, retreat, advancement, and rollback of the Proto-Tethys oceanic plate. Therefore we suggest that the Paleozoic crust-mantle interaction was induced by the subduction of the Proto-Tethys ocean.

**Key words:** Qinling orogen; Paleozoic; magmatism; geodynamics.

板块汇聚过程中的造山作用包括洋壳俯冲引起的增生造山和陆壳俯冲引起的碰撞造山两个阶段(Cawood *et al.*, 2009). 在增生造山过程中, 由于洋壳的俯冲、弧陆碰撞及俯冲板块的后撤和回转等过程, 导致大量的大洋弧和大陆弧岩浆岩的形成并记录了不同阶段壳幔相互作用的信息(Zheng, 2019). 这些岩浆作用呈现一定的时空分布规律, 因

此, 我们可以通过这些岩浆岩的时空分布规律来重溯增生造山作用的地球动力学过程(Wu and Zheng, 2013; Hu *et al.*, 2019). 秦岭—桐柏造山带是一个典型的多阶段演化的复合造山带, 以商丹缝合带为界, 秦岭—桐柏造山带可以进一步划分为北秦岭和南秦岭造山带, 分别发育有古生代的增生造山带和中生代的陆陆碰撞造山带(图 1). 其中北秦岭

基金项目: 国家“973”计划项目(No.2015CB856106).

作者简介: 吴元保(1971—), 男, 教授, 主要从事造山带岩石地球研究. ORCID: 0000-0001-7770-6093. E-mail: yuanbaowu@cug.edu.cn

引用格式: 吴元保, 2019. 秦岭造山带古生代岩浆作用及地球动力学意义. 地球科学, 44(12):4173-4177.

造山带从北到南可以进一步划分为宽坪单元、二郎坪单元和北秦岭单元(张国伟等, 2001; Ratschbacher *et al.*, 2003; Dong *et al.*, 2011; Wu and Zheng, 2013; Liu *et al.*, 2015, 2016). 宽坪单元为增生杂岩单元包括残留的原特提斯洋洋壳和大陆基底部分; 北秦岭单元是在经历了约 490 Ma 的超高压变质作用的新元古代陆壳基底上发展起来的古生代安第斯型的大陆弧; 二郎坪单元夹持于这两个单元之间, 为洋弧—弧后盆地的单元(Ratschbacher *et al.*, 2003; Bader *et al.*, 2013; Wu and Zheng, 2013). 我们对秦岭—桐柏造山带北部增生造山带中古生代典型岩浆岩进行了系统的锆石 U-Pb 年代学和地球化学的研究, 厘定了这些岩浆岩的性质及其记录的俯冲带壳幔相互作用过程, 并根据其时空分布特征确定了古大洋俯冲与大陆俯冲之间的时空演化关系, 限定了秦岭造山带增生造山作用的动力学过程.

## 1 古生代岩浆岩的时空分布规律

秦岭群主要有榴辉岩、片岩、片麻岩、麻粒岩和大理岩等变质岩石, 其原岩主要为新元古代岩浆岩或变质岩, 经历了约 490 Ma 的高压—超高压变质作用(Wang *et al.*, 2011), 并有大量古生代岩浆岩侵入

其中. 北秦岭单元最早的岩浆作用为富水基性杂岩体, 锆石 U-Pb 定年显示其形成年龄为 488~484 Ma (Wang *et al.*, 2014; ). 对漂池 S 型花岗岩详细的锆石 U-Pb 定年结果显示, 其形成年龄为约 470 Ma, 并包含有约 490 Ma 的高压—超高压变质作用形成的锆石核(Qin *et al.*, 2014), 表明其形成于北秦岭高压—超高压岩石的折返阶段. 以灰池子 I 型花岗岩为代表的花岗岩形成于约 440~410 Ma, 代表了原特提斯洋俯冲形成的安第斯型陆弧的主要组成部分(Qin *et al.*, 2015).

二郎坪群主要由中基性变质火山岩和变沉积岩组成, 并发育有大量的花岗岩, 到目前尚未发现有古老的基底物质(Dong *et al.*, 2011; Wu and Zheng, 2013). 这些变质火山岩被 488~470 Ma 的岩浆侵入, 表明最早的基性岩浆活动时间可能早于 490 Ma(Xue *et al.*, 1996). 其基性岩浆活动有两期, 其中早期的主要表现为岛弧玄武岩(IAB)的特征, 而晚期则表现为洋中脊玄武岩(MORB)的特征(Sun *et al.*, 1996). 通过对与这些基性岩浆岩互层的酸性火山灰夹层的锆石 U-Pb 定年发现, 早期的基性岩浆岩持续到约 465 Ma(Zhao *et al.*, 2012); 而晚期基性岩中的酸性火山岩夹层的时间为约 435 Ma (Hu *et al.*, 2019), 暗示其形成时间为约 440 Ma. 二

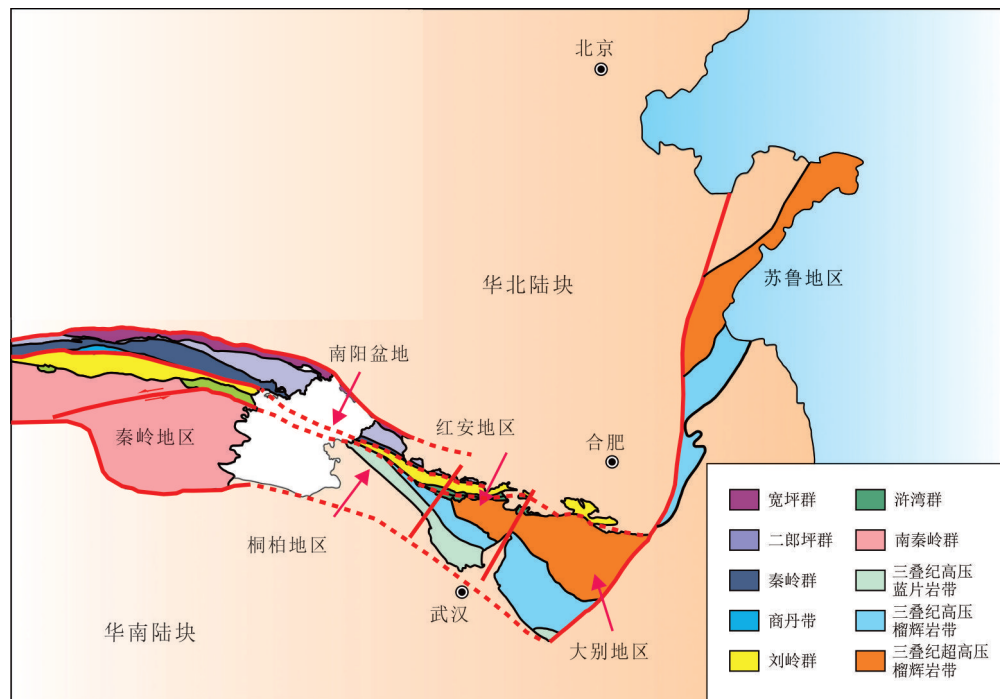


图 1 秦岭—桐柏—大别造山带构造简图

Fig.1 Schematic geological map of the Qinling-Tongbai-Dabie orogenic belt

据 Wu and Zheng(2013)修改

郎坪单元的花岗岩岩浆作用为 470~420 Ma, 其中 470~460 Ma 的花岗岩表现为富 Na 的特征, 而 440~420 Ma 的岩浆岩则不同程度表现出富 K 的特征 (Wang *et al.*, 2016). 宽坪单元的古生代岩浆岩以桐柏造山带的黄岗岩体为代表, 形成时代为约 440 Ma (Wang *et al.*, 2017).

## 2 典型岩体记录壳幔相互作用过程

在造山过程中, 拆离的大洋或大陆地壳碎块和岩片在俯冲隧道内变质脱水和部分熔融, 产生富水流体和含水熔体, 在板片—地幔界面既有物理混合也有化学反应, 形成地幔交代岩石 (Zheng, 2012). 这些地幔交代岩石发生部分熔融, 会形成不同类型的中基性岩浆岩, 通过这些中基性岩浆岩的研究可以回溯曾经发生在俯冲隧道中的地幔交代过程 (Zheng *et al.*, 2019).

Wang *et al.* (2014) 对北秦岭成于 488~484 Ma 的富水杂岩进行了系统的元素和同位素地球化学研究, 确定了其源区性质及其在俯冲隧道中的交代过程. 富水基性杂岩具有明显的富钾特征, 其  $K_2O$  含量为 0.99%~5.19% 及高的  $K_2O/Na_2O$  比值 (0.36~2.06), 属于钾玄岩系列, 并且具有非常富集大离子亲石元素 (例如 Ba、U、Th 和 Sr) 和 Pb 以及亏损高场强元素的特征. 它们具有高的初始  $^{87}Sr/^{86}Sr$  同位素组成 (0.710 0~0.715 1), 负的全岩  $\epsilon_{Hf}(t)$  值 (-3.97~-5.68), 负到稍正的全岩 (-2.24~2.38) 和锆石 (-2.85~0.34)  $\epsilon_{Hf}(t)$  值, 以及高于正常地幔的锆石  $\delta^{18}O$  值 ( $6.86\text{‰} \pm 0.13\text{‰}$ ). 这些元素和同位素特征表明富水杂岩来自受到了俯冲物质交代的富集岩石圈地幔. 特别说明, 富水基性杂岩的 Hf-Nd 同位素发生明显的脱偶现象, 即  $\epsilon_{Hf}(t)$  值显著偏离了正常地幔样品的 Hf-Nd 同位素关系 ( $\epsilon_{Hf}(t) = 1.59 \times \epsilon_{Nd}(t) + 1.28$ ) (Chauvel *et al.*, 2008),  $\Delta\epsilon_{Hf}$  值表示实际  $\epsilon_{Hf}(t)$  偏离由  $\epsilon_{Nd}(t)$  计算的  $\epsilon_{Hf}(t)$  的大小, 其  $\Delta\epsilon_{Hf}$  值为 3.85~5.37. 由于锆石是岩石中 Hf 的主要载体, 且具有非常低的 Lu/Hf 比值, 在沉积过程中锆石的分离或富集过程可以导致 Hf-Nd 同位素脱偶 (Vervoort *et al.*, 2011). 正的  $\Delta\epsilon_{Hf}$  值和高于正常地幔锆石  $\delta^{18}O$  值要求交代的物质为贫锆石的洋壳沉积物 (图 2) (Wang *et al.*, 2014). 因此, 富水基性杂岩的形成是来自原特提斯洋壳俯冲过程中, 俯冲隧道中洋壳沉积物交代的地幔楔部分熔融的产物.

Abdallsamed *et al.* (2017) 对二郎坪单元看丰

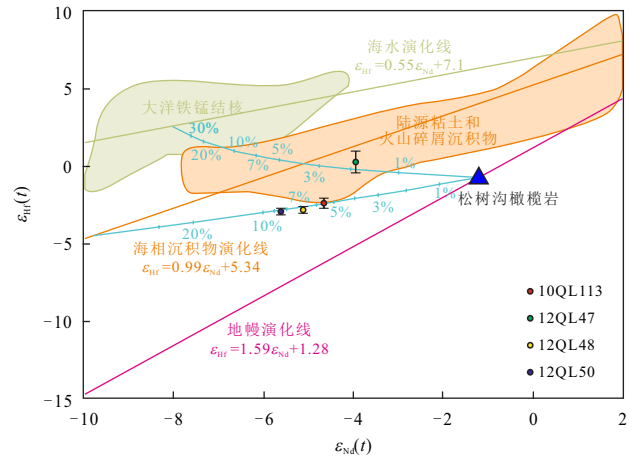


图 2 富水基性杂岩 Hf-Nd 同位素组成

Fig. 2 Hafnium vs. Nd isotope compositions for the Fushui mafic complex

引自 Wang *et al.* (2014)

沟岩体进行了系统的锆石 U-Pb 定年和岩石地球化学研究. 锆石 U-Pb 定年结果表明其形成年龄为约 440 Ma. 看丰沟岩体具有中等的  $SiO_2$  (60.48%~64.67%) 和  $K_2O$  (1.21%~2.10%) 含量, 具有高的  $Al_2O_3$  (15.44%~16.51%)、 $Na_2O$  (4.01%~4.81%) 和  $MgO$  (2.30%~3.44%) 含量, 属于高镁闪长岩. 微量元素上它们具有非常高的 Ba ( $524 \times 10^{-6}$ ~ $1\ 132 \times 10^{-6}$ ) 和 Sr ( $684 \times 10^{-6}$ ~ $980 \times 10^{-6}$ ) 含量, 富集大离子亲石元素, 亏损重稀土和高场强元素, 高 (La/Yb)<sub>N</sub> 比值和弱的 Eu 异常, 具有赞岐岩的地球化学特征. 它们具有高  $Mg^{#}$  (53.35~56.66)、Cr ( $45.8 \times 10^{-6}$ ~ $93.3 \times 10^{-6}$ ) 和 Ni ( $28.2 \times 10^{-6}$ ~ $48.2 \times 10^{-6}$ ) 及高 LILE 的含量, 指示它们来自俯冲流体交代的富集岩石圈地幔. 看丰沟岩体具有相对亏损的同位素特征, 全岩初始  $^{87}Sr/^{86}Sr$  值较低 (0.704 4~0.704 7) 和正的全岩  $\epsilon_{Nd}(t)$  值 (0.31~4.21) 以及正的锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$  值 (7.3~8.3). 这些同位素特征表明交代流体来自俯冲洋壳脱水, 且交代作用发生的时间与岩石的形成时间相差不大.

## 3 秦岭造山带增生造山作用的动力学过程

根据上述不同单元岩浆活动的时空分布规律, 结合区域变质作用特点, 我们可以得出秦岭造山带古生代增生造山作用的如下 4 个过程 (图 3) (Hu *et al.*, 2019).

(1) 在 490 Ma 之前, 原特提斯洋及其中的微陆

图 3 北秦岭造山带古生代构造演化

Fig.3 Sketch model showing the Paleozoic evolution of the North Qinling orogenic belt

引自 Hu *et al.* (2019)

块发生北向俯冲,形成了以二郎坪单元为主的大洋岛弧,并跟随发生北秦岭单元的超高压变质作用;(2)在北秦岭单元和二郎坪岛弧发生弧-陆碰撞后,俯冲板块带发生跃迁到北秦岭单元的南缘.由于造山过程中地壳的加厚,导致该时期仅在北秦岭单元的南缘形成以~488~484 Ma 富水基性杂岩为代表的岛弧岩浆岩;(3)漂池 S 型花岗岩的形成,指示造山带厚的岩石圈根部在约 470 Ma 发生垮塌,导致岛弧岩浆作用向北迁移,在二郎坪单元形成约 470~440 Ma 的弧岩浆作用;(4)随着俯冲作用的进行,原特提斯俯冲洋壳发生回转,导致弧岩

浆作用从二郎坪单元向南迁移至北秦岭单元,在北秦岭单元形成安第斯型大陆弧,并且伴随着二郎坪单元弧后盆地的打开.其中看丰沟岩体岩体记录的二郎坪地幔交代作用可能发生在原特提斯洋俯冲在二郎坪洋弧地幔之下,而富水基性杂岩记录的北秦岭地幔交代作用可能是原特提斯洋发生跃迁之后交代北秦岭岩石圈地幔的结果.

致谢:感谢郑永飞院士在成文过程中的指导和帮助!

## References

- Abdallsamed, M.I.M., Wu, Y.B., Zhang, W.X., et al., 2017. Early Paleozoic High-Mg Granodiorite from the Erlangping Unit, North Qinling Orogen, Central China: Partial Melting of Metasomatic Mantle during the Initial Back-Arc Opening. *Lithos*, 288–289: 282–294. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.07.016>
- 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*, 32:922–947. <https://doi.org/10.1002/tect.20056>
- Cawood, P.A., Kröner, A., Collins, W.J., et al., 2009. Accretionary Orogens through Earth History. In: Cawood, P. A., Kröner, A., eds., *Earth Accretionary Systems in Space and Time. Geological Society, London, Special Publications*, 318:1–36.
- Chauvel, C., Lewin, E., Carpentier, M., et al., 2008. Role of Recycled Oceanic Basalt and Sediment in Generating the Hf-Nd Mantle Array. *Nature Geoscience*, 1(1):64–67.
- 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.jseaes.2011.03.002>
- Hu, P., Wu, Y.B., Zhang, W.X., et al., 2019. Timing of the Erlangping Back-Arc Basin in the Qinling Orogen, Central China and Its Tectonic Significance. *Terra Nova*, 31(5), 458–464. <https://doi.org/10.1111/ter.12415>
- Liu, L., Liao, X., Wang, Y., 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.
- 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.
- Qin, Z. W., Wu, Y. B., Siebel, W., et al., 2015. Genesis of Adakitic Granitoids by Partial Melting of Thickened Lower Crust and Its Implications for Early Crustal Growth: A Case Study from the Huichizi Pluton, Qinling Orogen, Central China. *Lithos*, 238:1–12.
- Qin, Z. W., Wu, Y. B., Wang, H., et al., 2014. Geochronology, Geochemistry, and Isotope Compositions of Piaochi S-Type Granitic Intrusion in the Qinling Orogen, Central China: Petrogenesis and Tectonic Significance. *Lithos*, 202: 347–362. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.06.006>
- Ratschbacher, L., Hacker, B. R., Calvert, A., et al., 2003. Tectonics of the Qinling (Central China): Tectonostratigraphy, Geochronology, and Deformation History. *Tectonophysics*, 366:1–53.
- Sun, Y., Lu, X. X., Han, S., et al., 1996. Composition and Formation of Palaeozoic Erlangping Ophiolitic Slab, North Qinling: Evidence from Geology and Geochemistry. *Science in China (Series D)*, 39:50–59.
- Vervoort, J. D., Plank, T., Prytulak, J., 2011. The Hf-Nd Isotopic Composition of Marine Sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(20): 5903–5926. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.07.046>
- Wang, H., Wu, Y. B., Gao, S., et al., 2011. 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.
- Wang, H., Wu, Y. B., Gao, S., et al., 2016. Continental Growth through Accreted Oceanic Arc: Zircon Hf-O Isotope Evidence for Granitoids from the Qinling Orogen. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 182:109–130.
- Wang, H., Wu, Y. B., Li, C. R., et al., 2014. Recycling of Sediment into the Mantle Source of K-Rich Mafic Rocks: Sr-Nd-Hf-O Isotopic Evidence from the Fushui Complex in the Qinling Orogen. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 168(4):1062.
- Wang, H., Wu, Y. B., Yang, J. H., et al., 2017. Crustal Basement Controls Granitoid Magmatism, and Implications for Generation of Continental Crust in Subduction Zones: A Sr-Nd-Hf-O Isotopic Study from the Paleozoic Tongbai Orogen, Central China. *Lithos*, 282–283: 298–315. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.03.014>
- 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.
- Xue, F., Lerch, M. F., Kröner, A., et al., 1996. Tectonic Evolution of the East Qinling Mountains, China, in the Palaeozoic: A Review and New Tectonic Model. *Tectonophysics*, 253(3–4):271–284.
- Zhang, G. W., Zhang, B. R., Yuan, X. C., et al., 2001. Qinling Orogenic Belt and Continent Dynamics. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhao, J., Chen, D. L., Tan, Q. H., et al., 2012. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating of Basic Volcanics from Erlangping Group of the North Qinling, Eastern Qinling Mountains and Its Geological Implications. *Earth Science Frontiers*, 19(4):118–125.
- Zheng, Y. F., 2012. Metamorphic Chemical Geodynamics in Continental Subduction Zones. *Chemical Geology*, 328: 5–48. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.02.005>
- Zheng, Y. F., 2019. Subduction Zone Geochemistry. *Geoscience Frontiers*, 10(4):1223–1254.
- Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., Chen, R. X., 2019. Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks in the Dabie-Sulu Orogenic Belt: Compositional Inheritance and Metamorphic Modification. *Geological Society, London, Special Publications*, 474(1):89–132.

#### 附中文参考文献

- 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.