科学通报 2013 年 第 58 卷 第 23 期：2323 ~ 2329
进 展 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

北秦岭早古生代大陆碰撞过程中的花岗岩浆作用

张成立[①*], 刘良[①], 王涛[②], 王晓霞[③], 李雷[①④], 龚齐福[①⑤], 李小菲[①④]

① 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;
② 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
③ 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
④ 西北有色地质研究院, 西安 710054;
⑤ 核工业二〇三研究所, 咸阳 712000
* 联系人, E-mail: clzhang@nwu.edu.cn

2013-05-21 收稿, 2013-07-08 接受, 2013-08-07 网络版发表
国家重点基础研究发展计划(2009CB825003, 2009CB825006)和大陆动力学国家重点实验室自主研究课题资助

摘要 北秦岭构造带早古生代花岗岩类的锆石 U-Pb 年代学统计结果表明, 早古生代期间存在~500, ~450 和~420 Ma 三个峰期的花岗岩浆活动, 它们分别对应于该构造带~500 Ma 的高压-超高压变质作用、~450 Ma 的中压麻粒岩相和~420 Ma 的角闪岩相退变质作用, 代表了早古生代期间该构造带经历的一次大陆碰撞及两次与抬升过程有关的岩浆作用. 结合区域地质背景和高压-超高压变质作用研究成果综合分析, 三期花岗岩浆作用是早古生代期间秦岭微陆块向北俯冲消减过程中, 在~500 Ma 与华北陆块对接挤压致使构造加积楔沉积物部分熔融, 以及与碰撞后阶段~450 Ma 加厚地壳发生拆沉和~420 Ma 由挤压向伸展转换过程所对应的岩浆活动.

关键词
锆石 U-Pb 定年
花岗岩类
高压-超高压变质
构造演化
北秦岭

秦岭造山带夹持于中国扬子和华北两大陆块之间, 东连桐柏-大别、西接祁连和昆仑造山带, 构成了中国中央造山系的重要组成部分. 20 世纪 80 年代以来, 国内外地质学家对该造山带构造演化开展了大量研究, 确定该造山带为一历经多期构造演化、最终于中生代早期中国南北两大板块碰撞形成的复合造山带, 形成由商-丹和勉-略两条缝合带分隔的北部北秦岭(包括华北陆块南缘)、中部南秦岭和南部扬子陆块北缘构造带的构造格局[1~3]. 然而, 有关该造山带早期构造演化, 特别是商丹缝合带形成演化过程涉及的秦岭古洋盆俯冲消减闭合和碰撞过程与时限至今仍未得到很好的限定. 最近, 在对北秦岭构造带高压-超高压变质作用进行了二十余年的持续研究后, 有关北秦岭高压-超高压变质岩的时空分布及其属性等取得明显进展[4~15], 确定它们为早古生代期间北秦岭构造带发生陆壳深俯冲的产物[16]. 这一认识的提出, 为探讨秦岭造山带古洋盆消减闭合及碰撞过程与时限提供了重要约束条件.

研究表明, 由大洋俯冲到大陆俯冲和碰撞, 在消减板块发生高压-超高压变质作用的同时, 俯冲板片在俯冲隧道内的不同深度发生拆离, 或在洋陆过渡带发生板片断离而折返[17,18], 并由于消减或折返板片进变质和退变质过程中发生脱水和热状态的改变, 而发生俯冲、碰撞和碰撞后花岗岩浆作用[19,20]. 因此, 大陆碰撞造山带不同时代和成因花岗岩浆作用的研究可有效揭示和限定大洋俯冲消减闭合直至大陆俯冲碰撞和折返过程的时限. 有鉴于此, 我们选择北秦岭构造带高压-超高压变质岩典型发育地区的陕西丹凤至河南西峡早古生代花岗岩进行系统的综合研究, 结合高压-超高压变质岩研究成果, 探讨了北秦岭早

引用格式: 张成立, 刘良, 王涛, 等. 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, 2013, 58: 2323–2329
英文版见: Zhang C L, Liu L, Wang T, et al. Granitic magmatism related to early Paleozoic continental collision in the North Qinling belt. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-013-6064-z

古生代大陆碰撞及嗣后造山带演化过程中的花岗岩浆作用, 为重建秦岭造山带早古生代构造演化过程提供了制约.

1 北秦岭地质概况

北秦岭构造带南以商丹缝合带与南秦岭构造带分割、北以洛南-栾川断裂带与华北地块南缘构造带相隔, 由北向南依次由被不同断裂或韧性剪切带分割的宽坪、二郎坪、秦岭以及丹凤等岩群构成, 它们成叠置岩片成狭长带状东西延伸达千余公里(图 1). 其中, 宽坪岩群由绿片岩、云母石英片岩和石英大理岩组成, 石英片岩碎屑锆石年龄限定它们形成于新元古代晚期-早古生代早期[21]; 二郎坪岩群为一套经绿片岩-低角闪岩相变质的弧后盆地型火山-沉积岩建造, 侵入其中的花岗岩形成于 490~480 Ma 之间[22], 证明它们形成于 490 Ma 之前. 秦岭岩群由片麻岩、变粒岩、大理岩和斜长角闪岩组成, 由其碎屑锆石 U-Pb 年龄主要分布于 1.2~1.9 Ga 之间[21,23]和片麻状花岗岩 950 Ma 的原岩形成年龄[24]推断, 它们形成于 950 Ma 前的新元古代早期. 丹凤岩群由低角闪岩相变质的岛弧火山-沉积岩组成, 并被后期辉长岩所侵入. 由其沉积岩中最年轻碎屑锆石 U-Pb 年龄为 827 Ma[21], 侵入其中的岩湾辉长岩形成于 517 Ma[25], 限定丹凤群形成于 827~517 Ma 之间的新元古代晚期-早古生代早期. 此外, 北秦岭不同构造单元还侵入了早古生代花岗岩体[26]和深熔岩脉, 并在豫陕交界地区的秦岭岩群中发育变质峰期年龄为~500 Ma 的多个高压-超高压岩块[16], 表明北秦岭是秦岭造山带新元古代-早古生代构造演化过程形成的重要构造带.

2 北秦岭早古生代花岗岩

北秦岭构造带早古生代花岗岩在豫陕交界的陕西丹凤、河南西峡地区最为发育和具代表性, 按照野外地质特征可划分为 3 种类型.

(1) 侵入秦岭群中的花岗岩体. 它们强烈变形发育片麻理、伴有深熔花岗岩脉形成, 岩体呈大岩基出露于西峡北部的漂池村一带, 由二长花岗岩构成, 主要矿物组成为: 钾长石(~35%)、斜长石(~30%)、石英(~25%)、黑云母(~15%)和少量角闪石(3%). 该岩体获得 496.1±4.2 Ma (MSWD=1.6)的形成年龄, 与王涛等人[26]获得 495±6 Ma 的年龄在误差范围一致. 同时, 漂池村南和丹凤涌峪秦岭群片麻岩中两个深熔花岗岩脉体获得了 501.2±4.2 Ma (MSWD=1.7)和 501.4±8.1 Ma (MSWD=5.5)的形成年龄, 与陆松年等人[27]获得的 500 Ma 花岗岩脉的年龄和王涛等人[24]在漂池岩体南花岗岩脉获得的 497±12 Ma 的年龄在误差范围一致, 共同代表了北秦岭古生代最早一期地壳深熔和花岗岩浆侵入事件.

(2) 侵入秦岭、二郎坪及丹凤岩群中的岩基或岩株. 岩体变形较弱, 部分岩体发育一定的片麻理, 主要由二长花岗岩、花岗闪长岩和少量黑云母花岗岩构成, 包括侵入秦岭和丹凤群中的留仙坪、宽坪、枣园、灰池子和商南岩体和侵入二郎坪岩群中的四棵树岩体等. 矿物组合为: 钾长石(25%~40%)、斜长石(30%~35%)、石英(25%~30%)、角闪石(8%~15%)和黑云母(5%~10%)及少量不透明矿物. 该类花岗岩分别获得留仙坪岩体 449.9±8.4 Ma (MSWD=8.6)、宽坪岩体 452.8±2.0 Ma (MSWD=1.5)、枣园岩体 456.1±1.9 Ma (MSWD=1.3)、灰池子岩体 445.6±6.1 Ma 和四棵树岩体 464.1±4.6 Ma 及 468.5±4.1 Ma 的形成年龄[22]. 此外, 区内还发育黄柏岔和上马石含石榴石二云母花岗岩体, 它们主要由钾长石(~40%)、斜长石(~20%)、石英(25%~30%)、白云母(~8%)和少量黑云母(~5%)及石榴石(~5%)组成, 形成年龄为 447.8±2.5 Ma (MSWD =3.5)~445.7±5.3 Ma (MSWD=2.4). 同时, 在丹凤资峪地区侵入丹凤岩群中的资峪辉长岩获得 432.2±2.3 Ma (MSWD=2.3)的形成年龄, 与同属一带的拉鸡庙(422±7 Ma)和四方台(460±29 Ma)辉长岩[28,29]代表同期基性岩浆的侵入活动, 它们与 450 Ma 左右的花岗岩浆活动一道, 反映一期最为强烈的壳源花岗岩浆和幔源基性岩浆侵入的构造岩浆热事件.

(3) 侵入秦岭群和漂池岩体中的小岩株或岩脉. 岩石无任何变形, 主要由块状淡色花岗岩构成, 矿物组合为: 钾长石(~40%)、斜长石(~18%)、石英(~30%)、白云母(~8%)和少量石榴石(5%). 其中, 安吉坪白云母花岗岩体获得 416.7±1.8 Ma (MSWD=0.84)的形成年龄, 侵入漂池岩体中的淡色花岗岩脉的形成年龄为 411.7±3.7 Ma (MSWD=3.9), 代表了北秦岭早古生代最晚一期花岗岩浆活动.

3 花岗岩浆活动及其与构造事件的对应性

有关北秦岭构造演化历史的早期研究认为, 早古生代秦岭洋盆沿商丹一线向北俯冲消减, 北秦岭

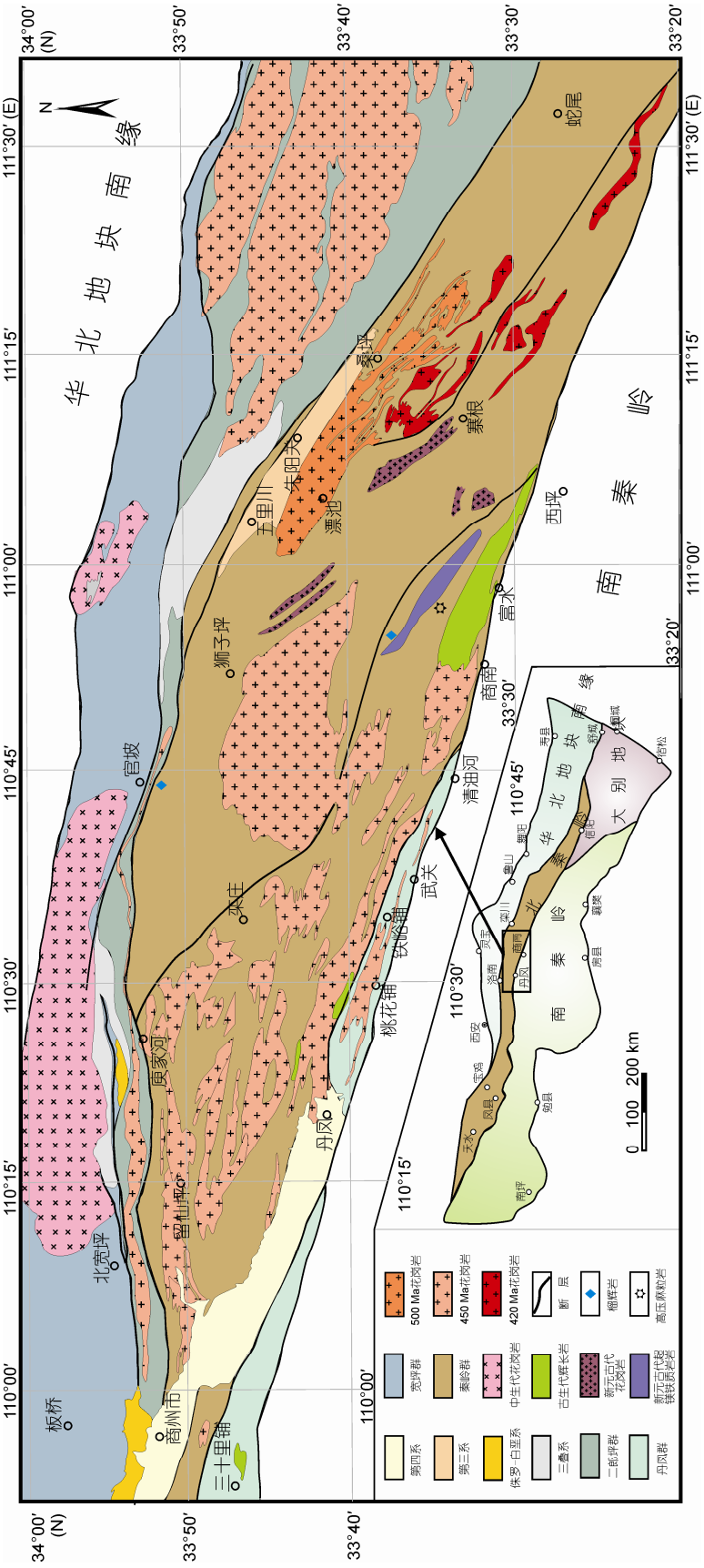

图 1 商丹地区北秦岭地质简图

成为一具沟-弧-盆体系特征的活动大陆边缘, 至古生代中期洋盆闭合, 此后在石炭纪仅有残余海盆发育[1,3,30,31]. 近年来, 随着新成果的积累和大量高质量同位素年代学数据的获得, 出现了秦岭古洋盆自新元古代末 600 Ma形成至 520 Ma开始俯冲消减[21], 此后相继发生多期弧-陆碰撞, 并在泥盆纪秦岭洋盆沿商丹一线最终闭合[1,13,25,32,33]的认识. 最近, 北秦岭~500 Ma 高压-超高压变质及~450 Ma 麻粒岩相和~420 Ma 角闪岩相退变质作用和陆壳深俯冲的确定[8,11~16], 证明了北秦岭高压-超高压岩石经历了由陆壳俯冲-深俯冲及其之后的两次抬升的构造演化过程[14~16]. 同时, 高压-超高压岩石发育区早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄统计结果揭示, 该区存在 500, 452 和 420 Ma 三期(图 2)与高压-超高压岩石峰期变质和两期退变质时代高度一致的花岗岩浆作用, 代表了洋盆闭合、华北陆块与秦岭微陆块碰撞及其之后的两期退变质作用相关的构造岩浆热事件.

第一期(~500 Ma)花岗岩与陆壳深俯冲的高压-超高压变质时代一致[16], 它们与同期深熔岩脉均强烈变形发生片麻理化, 代表一期挤压环境下地壳深熔及花岗岩浆侵入事件. 该期花岗岩富硅(SiO_2 = 71.01%~71.62%)、碱(K_2O+Na_2O=8.14%~8.43%), 高铝(Al_2O_3 =15.41%~15.73%; A/CNK=1.05~1.09), 贫钙(CaO=1.56%~1.91%)和镁(MgO=0.48%~0.73%; Mg#= 43.19~48.01), 为过铝质钙碱性系列岩石, 与 S 型花岗岩相同. 它们具中等负 Eu 异常、LREE 富集的右倾稀土模式, 富集 LILE、亏损 HFSE(Nb, Ta 和 Ti)以及 Sr 和 P. 具有高($^{87}Sr/^{86}Sr)_i$比值(0.72123~0.72710)、低 $\varepsilon_{Nd}(t)$值(−9.3~−10.6)(图 3), 全岩 Nd 模式年龄 T_{DM2}= 1.82~2.15 Ga. 锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$也很低(−27.54~−6.21), T_{DM2} =1.59~2.66 Ga. 深熔岩脉锆石也有低的 $\varepsilon_{Hf}(t)$值 (−17.05~−0.53), T_{DM2}=1.25~2.14 Ga. 同时, 岩体中出现相当数量的元古代继承锆石, 一致指示它们为古老地壳物质部分熔融的产物. 然而, 该期花岗岩内除出现 1.0~2.5 Ga 的继承锆石外, 还存在 650~850 Ma 的新元古代继承锆石, 这与北秦岭存在 1462 和 927 Ma 两个峰值[21]而无 650~850 Ma 年龄的记录明显不同, 显然证明它们并非秦岭岩群物质风化再造的产物. 有关 650~850 Ma 地质事件的年龄在南秦岭及华南陆块北缘均有大量报道[34~37], 并在南秦岭出现了华北陆块与北秦岭均缺失的 840~670 Ma 年龄记录[21]. 因此表明, 该期花岗岩的原岩物质除北秦岭构造带秦岭岩群外, 还有部分南秦岭基底物质的加入. 合理的解释是, 它们的源岩主要为碎屑沉积岩, 在~500 Ma 南秦岭微陆块向北深俯冲于华北克拉通南缘北秦岭之下时发生部分熔融. 因而在北秦岭出现了花岗岩浆作用与超高压变质作用事件基本同时发生.

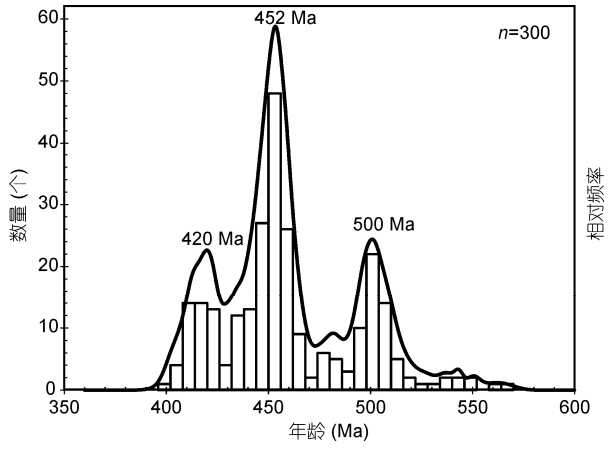

图 2 北秦岭花岗岩锆石 U-Pb 年龄分布图

第二期(~452 Ma)花岗岩侵位与本区首次抬升和麻粒岩相变质时代[16]一致, 广泛分布于北秦岭, 代表早古生代最为强烈的一期花岗岩浆活动. 该期花岗岩以二长花岗岩和花岗闪长岩为主, 并出现少量石榴石云母花岗岩. 其中, 二长花岗岩和花岗闪长岩的硅含量变化大(SiO_2=64.31%~75.32%), 高碱(K_2O+Na_2O=6.01%~10.45%)、富钠(Na_2O/K_2O=0.48~3.89)、铝(Al_2O_3=13.67%~17.87%; A/CNK=1.01~1.17), 低铁(FeO^T=0.34%~3.88%)、镁(MgO=0.09%~1.39%; $Mg^{\#}$= 25.69~52.17), 属钙碱性-高钾钙碱性过铝质岩类. 它们具中等和偏低的轻重稀土分馏及负到正的铕异常 (Eu/Eu*=0.48~1.47), 微量元素相对富集 LILE, 中度亏损 HFSE(Nb, Ta, Ti)和 P 等. ($^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 中等偏高 (0.70237~0.70972)、具正和略偏负的 $\varepsilon_{Nd}(t)$值(−6.26~ 0.21), 全岩 Nd 模式年龄 T_{DM2}=1.17~1.20 Ga; 锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$为中等偏负到正值(−11.7~8.6), T_{DM2}=0.84~2.56 Ga, 指示这些花岗岩源区除与第一期花岗岩有类似的地壳物质外还有新生地壳物质加入. 区内同期资峪辉长岩有十分一致的 Si_2O(48.16%~48.66%), 高钠 (Na_2O=2.29%~2.81%)、低钾(K_2O=0.22%~0.27%), 富镁(MgO=9.12%~9.74%)、铁(FeO^T=6.53%~7.60%), 具平坦的稀土模式、略微富集的 LILEs、明显的 Pb 正异常和 Nb, Ta 负异常, 显示了俯冲消减带之上幔源岩浆特征. 它们相对低($^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 比值(0.70353~

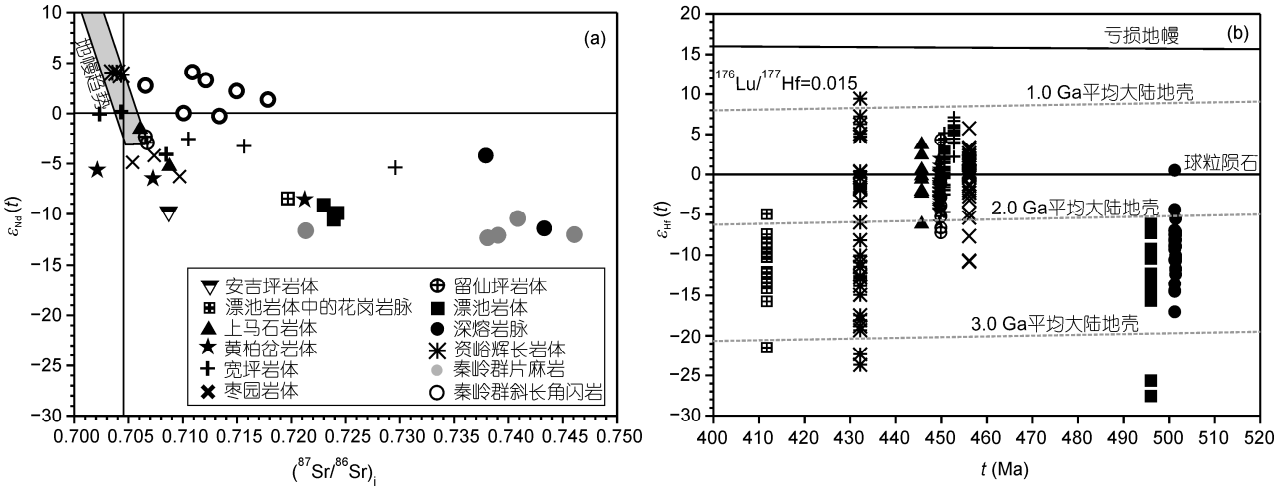

图 3　北秦岭花岗岩 Sr-Nd 同位素(a)以及 Hf 同位素组成(b)图解

0.70434)、高 $\varepsilon_{Nd}(t)$值(3.98~4.10), 而锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$值变化很大(−23.7~9.6)(图 3), 结果全岩 Nd 与锆石 Hf 同位素组成之间发生脱耦. 对这种类型的脱耦有两种解释: (1) 略亏损幔源岩浆上侵过程与陆壳物质发生了高程度混染, 往往是消减洋壳断离引发的消减带之上地幔岩浆上侵过程受陆壳物质混染的结果, 代表一次消减洋壳断离引发的消减带之上地幔岩浆活动; (2) 俯冲地壳衍生流体交代上覆地幔楔[17], 流体中含有古老的碎屑锆石, 被交代橄榄岩为新生岩石圈地幔, 由此俯冲隧道壳幔反应产生的地幔源区发生部分熔融形成镁铁质岩浆就会具有相对亏损的全岩 Sr-Nd 同位素组成, 但变化较大的亏损和富集锆石 Hf 同位素组成的特点. 北秦岭资峪辉长岩锆石出现变化很大、由负到正的 $\varepsilon_{Nd}(t)$, 以及基本一致的 Si_2O 和 LREE 与 LILEs 无明显增加, 表明它们是俯冲隧道中壳幔反应改造后的地幔源区发生部分熔融的镁铁质岩浆侵入的结果. 此外, 区内同期石榴石云母花岗岩明显高 SiO_2 (70.03%~76.75%), Al_2O_3 变化大(12.86%~15.53%; A/CNK=0.99~1.16), 富碱(K_2O+Na_2O= 7.42%~8.85%), 低铁(FeO^T=0.34%~3.05%)、镁(MgO= 0.04%~1.50%; $MgO^{\#}$=20.57~51.98), 轻重稀土中度分馏、弱到中等 Eu 负异常(Eu/Eu*=0.12~0.79), 富 Rb, 亏损 Th, Ba, Sr 和 Ti, 具 S 型花岗岩特点. 它们高$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 比值(0.70605~0.70855)、低 $\varepsilon_{Nd}(t)$值(−4.99~−1.22)(图 3), 全岩 Nd 模式年龄 T_{DM2}=1.59~1.29 Ga; 锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$值变化于−6.2~5.0 之间(图 3), T_{DM2}=1.01~1.54 Ga, 指示这些花岗岩为中元古代富铝沉积岩部分熔融的产物, 并可能有幔源物质的加入. 另一方面, 部分花岗闪长岩体, 如留仙坪岩体显示了强烈的轻重稀土分馏, 弱 Eu 异常及高 Sr 和 Sr/Y、低 Y 和 Sr/Y 的加厚陆壳熔融的埃达克质岩石特点, 指示北秦岭这次强烈的花岗岩浆活动形成于碰撞后陆壳增厚背景下. 这次构造活动可能是由于俯冲板片断离引起俯冲隧道发生壳幔反应改造后的地幔岩浆侵入和增厚陆壳抬升, 结果不同深度源区物质发生部分熔融形成花岗岩浆的侵入, 局部有幔源岩浆参与.

第三期(~420 Ma)花岗岩浆作用与本区第二次抬升和角闪岩相退变质时代[16]相当, 它们呈无任何变形的小岩体侵入秦岭岩群中, 并以块状高钾钙碱性淡色花岗岩为主. 这些花岗岩高硅(SiO_2=73.96%~74.22%)、高碱(K_2O+Na_2O=8.70%~9.0%), 富铝(Al_2O_3 =14.01%~14.43%; A/CNK=1.07~1.17), 高铁 (FeO^T= 0.39%~1.21%)、低镁(MgO=0.10%~0.15%; Mg#= 21.72~36.08), 属高钾钙碱性过铝质岩类. 轻重稀土弱到中等分馏、强烈 Eu 负异常(Eu/Eu*=0.13~0.37), 微量元素富集 LILEs, 相对亏损 Ba, Sr, Nb, Ta, Ti 和 P, 反映了高度分异演化的花岗岩特征.同位素组成具有中等偏高的$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 比值(0.70882~0.72047)和负 $\varepsilon_{Nd}(t)$值(−17.70~−7.65)(图3), Nd 模式年龄 T_{DM2}= 1.97~1.78 Ga; 锆石具负的 $\varepsilon_{Hf}(t)$值(−21.1~−5.1)(图3), T_{DM2}= 1.46~2.29 Ga, 一致指示它们主要为中元古代和部分古元古代地壳物质熔融的产物. 根据该期花岗岩强烈分异、富钾的特征推断, 它们是非挤压伸展环境下陆壳物质熔融岩浆较强分异演化的结果, 其形成指

示构造活动已明显减弱.

4 小结

综上所述, 北秦岭早古生代三期花岗岩浆活动分别与~500 Ma 陆壳深俯冲、~450 Ma 碰撞地壳增厚及其嗣后的~420 Ma 地壳抬升三期构造事件相对应. 其中, ~500 Ma 侵位花岗岩为大陆碰撞过程中 S 型花岗岩浆作用的产物, 其源岩可能是秦岭微陆块与华北克拉通之间的构造加积楔沉积岩. ~452 Ma 侵位花岗岩可能是深俯冲陆壳物质脱水熔融的产物, 具体涉及俯冲汇聚使得陆壳增厚的同时, 俯冲板片断离、地幔楔物质部分熔融形成基性岩浆上侵, 并诱发陆壳物质部分熔融, 继而在地幔岩浆的参与下形成北秦岭最为广泛的二长和花岗闪长岩类的岩浆作用. 同时, 挤压造成上部地壳物质逆冲叠置和含水矿物脱水, 诱发了表壳泥质沉积岩的部分熔融, 形成富铝的花岗岩类. 此后, 到~420 Ma 挤压汇聚作用明显减弱, 陆壳进一步抬升并向伸展转化, 地壳活动性随之降低, 从而在相对稳定的环境下, 陆壳物质部分熔融的花岗岩浆得以充分演化分异, 形成了高分异淡色花岗岩体, 标志着~420 Ma 北秦岭开始进入相对稳定的造山后构造演化阶段.

参考文献

1 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 秦岭造山带的结构构造. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1995, 25: 994–1003
2 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 2001. 1–855
3 Meng Q R, Zhang G W. Geological framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, Central China. Tectonophysics, 2000, 323: 183–196
4 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. 科学通报, 1994, 39: 2013
5 刘良, 周鼎武. 东秦岭商南松树沟高压基性麻粒岩的发现及初步研究. 科学通报, 1994, 39: 1599–1601
6 刘良, 周鼎武, 董云鹏, 等. 东秦岭松树沟高压变质基性岩石及其退变质作用的 *P-T-t* 演化轨迹. 岩石学报, 1995, 11: 127–136
7 刘良, 周鼎武, 王焰. 东秦岭杂岩中的长英质高压麻粒岩及其地质意义初探. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, 26(增刊): 56–63
8 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. 地质学报, 2002, 76: 484–495
9 杨经绥, 刘福来, 吴才来, 等. 中央碰撞造山带中两期超高压变质作用: 来自含柯石英锆石的定年证据. 地质学报, 2003, 4: 463–477
10 陈丹玲, 刘良, 孙勇, 等. 北秦岭松树沟高压基性麻粒岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 科学通报, 2004, 49: 1901–1908
11 陈丹玲, 刘良. 北秦岭松树沟榴闪岩中锆石的 SHRIMP 和 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其意义. 地学前缘, 2011, 18: 158–168
12 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. 岩石学报, 2011, 27: 1179–1190
13 Wang H, Wu Y B, Gao S, et al. Eclogite origin and timings in the North Qinling terrane, and their bearing on the amalgamation of the South and North China Blocks. J Metamorph Geol, 2011, 29: 1019–1031
14 Cheng H, Zhang C, Vervoort J D, et al. Geochronology of the transition of eclogite to amphibolite facies metamorphism in the North Qinling orogen of central China. Lithos, 2011, 125: 969–983
15 Cheng H, Zhang C, Vervoort J D, et al. Timing of eclogite facies metamorphism in the North Qinling by U-Pb and Lu-Hf geochronology. Lithos, 2012, 136-139: 46–59
16 刘良, 廖小莹, 张成立, 等. 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, 2013, 29: 1634–1656
17 Zheng Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. Chem Geol, 2012, 328: 5–48
18 郑永飞, 张立飞, 刘良, 等. 大陆深俯冲与超高压变质研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32: 135–158
19 郑永飞. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别-苏鲁造山带为例. 科学通报, 2008, 53: 2129–2152
20 Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, et al. Origin of postcollisional magmatic rocks in the Dabie orogen: Implications for crust-mantle interaction and crustal architecture. Lithos, 2011, 126: 99–114
21 Shi Y, Yu J H, Santosh M. Tectonic evolution of the Qinling orogenic belt, Central China: New evidence from geochemical, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes. Precambrian Res, 2013, 231: 19–60
22 雷敏. 秦岭造山带东部花岗岩成因及其与造山带构造演化的关系. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 2010. 46–81
23 陆松年, 陈志宏, 相振群, 等. 秦岭岩群副变质岩碎屑锆石年龄谱及其地质意义. 地学前缘, 2006, 13: 303–310
24 王涛, 张宗清, 王彦斌, 等. 秦岭造山带新元古代同碰撞花岗岩变形及其时代限定——强变形岩体与弱变形脉体的锆石 SHRIMP 年龄证据. 地质学报, 2005, 79: 220–231

25 Dong Y P, Zhang G W, Hauzenberger C, et al. Palaeozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: Evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks. Lithos, 2011, 122: 39–56
26 王涛, 王晓霞, 田伟, 等. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 949–971
27 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 等. 秦岭造山带中-新元古代地质演化及对 Rodinia 超级大陆事件的响应. 北京: 地质出版社, 2003. 1–194
28 刘军锋, 孙勇, 孙卫东. 秦岭拉鸡庙镁铁质岩体锆石 LA-ICP-MS 年代学研究. 岩石学报, 2009, 25: 320–330
29 刘军锋, 孙勇, 李洪英, 等. 北秦岭四方台基性-超基性杂岩锆石 LA-ICP-MS 年代学研究. 岩石矿物学杂志, 2012, 31: 524–530
30 Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, et al. Tectonics of the Qinling (Central China): Tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history. Tectonophysics, 2003, 366: 1–53
31 Gao S, Zhang B R, Gu X M, et al. Silurian-Devonian provenance changes of South Qinling basins: Implications for accretion of the Yangtze (South China) to the North China cratons. Tectonophysics, 1995, 250: 183–197
32 Wu Y B, Zheng Y F. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China. Gondwana Res, 2013, 23: 1402–1428
33 Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis. J Asian Earth Sci, 2011, 41: 213–237
34 李怀坤, 陆松年, 陈志宏, 等. 南秦岭造山带裂谷型火山岩的锆石 U-Pb 年代学. 地质通报, 2003, 22: 775–781
35 凌文黎, 任邦方, 段瑞春, 等. 南秦岭武当山群、耀岭河群及基性侵入岩群锆石 U-Pb 同位素年代学及其地质意义. 科学通报, 2007, 52: 1445–1456
36 Xiao L, Zhang H F, Ni P Z, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of early Neoproterozoic mafic-intermediate intrusions from NW margin of the Yangtze Block, South China: Implication for tectonic evolution. Precambrian Res, 2007, 54: 221–235
37 Zhao J H, Zhou M F, Zheng J P, et al. Neoproterozoic crustal growth and reworking of the Northwestern Yangtze Block: Constraints from the Xixiang dioritic intrusion, South China. Lithos, 2010, 120: 439–452