中国科学: 地球科学 2015 年 第 45 卷 第 8 期: 1109 ~ 1125
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

专题: 大陆俯冲带

评 述

秦岭造山带花岗质岩浆作用与造山带演化

王晓霞[①*], 王涛[②], 张成立[③]

① 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;
② 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
③ 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安 710069;
* E-mail: xiaoxiawang@hotmail.com

收稿日期: 2015-04-08; 接受日期: 2015-06-29; 网络版发表日期: 2015-07-23
国家自然科学基金项目(批准号: 40872054, 41172062, 41430209)、国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2009CB825006, 2009CB825003)、国土资源大调查项目(编号: 1212011120990, 12120113094000, 1212011120135, 1212010811033)和教育部创新团队发展计划项目资助

摘要 秦岭复合造山带是探讨多期岩浆与造山作用关系的典型地区, 已进行了不少研究和总结, 但一些认识仍然不同. 本文试图在前人研究的基础上, 再做一些总结和讨论. 依据最新的锆石年龄分期、相应的岩石组合和变形特征等, 秦岭造山带花岗质岩浆作用主要可以分为新元古代(979~711 Ma)、古生代(507~400 Ma)、早中生代(250~185 Ma)和晚中生代(160~100 Ma). 其中, 新元古代花岗质岩浆作用分为 979~911, 894~815 和 759~711 Ma 三个阶段, 分别对应强变形 S 型(花岗质片麻岩)、弱变形 I 型到无变形 A 型花岗岩, 显示同碰撞(979~911 Ma)到后碰撞(894~815 Ma)和碰撞后(759~711 Ma)伸展裂解的花岗岩浆演化特点, 可能是扬子-塔里木克拉通等中国古老陆块新元古代构造岩浆事件在秦岭古老地块的反映, 该地块卷入到显生宙秦岭造山带中, 故新元古代岩浆事件并非为秦岭造山作用的产物. 古生代花岗质岩浆作用也可划分为 507~470, 460~422 和 415~400 Ma 三个演化阶段, 早期阶段伴随超高压变质作用; 三个阶段分别解释为俯冲、同碰撞和后碰撞环境. 早中生代花岗质岩浆作用可分为两个阶段: 早期(250~235 Ma)以石英闪长岩、花岗闪长岩等 I 型为主; 晚期(235~185 Ma)以花岗闪长岩、二长花岗岩为主, 显示 I, I-A 和 A 型花岗岩的演化特点, 并出现环斑结构花岗岩. 秦岭早中生代花岗质岩石的年龄和主要地球化学指标(如 A/CNK、K_2O/Na_2O 和 $\varepsilon_{Nd}(t)$)显示, 垂直俯冲-碰撞带方向没有极性变化, 因此, 不宜用俯冲解释全部花岗岩, 而解释为形成于勉略洋俯冲到闭合—扬子克拉通与秦岭地块碰撞环境. 晚中生代花岗质岩浆作用也可分为 160~130 和 120~100 Ma 两个阶段, 显示从 I 型—I-A 过渡型—A 型的演变趋势, 与中国东部侏罗纪与白垩纪之交的挤压向伸展转变的花岗质岩浆演化趋势一致, 可能属于同一环太平洋岩浆带, 与古太平洋俯冲的远程陆缘或陆内效应有关.

关键词
花岗岩
锆石年龄
岩浆演化
构造
秦岭造山带

秦岭造山带是华北克拉通与扬子克拉通长期汇聚形成的复合造山带(Mattauer等, 1985; Kröner等, 1993; Meng和Zhang 1999; 张国伟等, 2001; Dong等, 2011b, 2015; Wu和Zheng, 2013), 经历了新元古代、古生代、早中生代和晚中生代四次造山作用及构造运动, 相应发生了四期花岗质岩浆作用, 成为探讨花岗

中文引用格式: 王晓霞, 王涛, 张成立. 2015. 秦岭造山带花岗质岩浆作用与造山带演化. 中国科学: 地球科学, 45: 1109–1125
英文引用格式: 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: 1497–1512, doi: 10.1007/s11430-015-5150-2

岩与造山作用关系的典型地区. 前人对这些花岗岩的研究主要集中于单个岩体和一些地区某一时期岩浆带的研究(如, Sun等, 2002; 张成立等, 2008; 王晓霞等, 2011; 王涛等, 2009; Wang等, 2008, 2011b; Dong等, 2011a; 张成立等, 2013; Li等, 2015, 以及其中的参考文献). 对整个造山带花岗岩的系统总结和综合研究也做过一些探索(如卢欣祥, 1991, 2000). 近年来, 随着测试技术和研究程度的提高, 对秦岭花岗岩的研究积累了大量的年代学、地球化学和同位素数据, 为系统总结该造山带花岗质岩石的时空分布、岩石组合以及源区特征演变奠定了基础, 为从岩浆作用演化的角度系统探索造山精细演化过程提供了条件. 因此, 不少学者对秦岭新元古代-中生代花岗岩(Wang等, 2013), 特别是古生代(王涛等, 2009; Wu和Zheng, 2013; 张成立等, 2013)和早中生代(张成立等, 2008; 陈衍景, 2010; Li等, 2015)花岗质岩石的演变及其与造山过程的关系进行了总结, 提出了新的认识; 但有些认识还不一致, 如古生代花岗质岩浆演化的阶段划分及其构造环境解释, 早中生代花岗质岩浆是俯冲环境还是俯冲到碰撞环境的演变, 这些都需要进一步深入探讨. 本文在前人研究的基础上, 依据新的锆石年龄、元素地球化学和同位素地球化学数据统计分析, 试图进一步深入探索和总结秦岭造山带花岗质岩石的时空分布、岩浆成因、物源特征及其演变规律, 进而对造山过程进行精细的约束.

1 秦岭造山带及花岗质岩石的基本特征

秦岭造山带是中国大陆中央造山带(系)的主要组成部分, 位于其中段(Zheng等, 2013). 对该造山带构造单元的划分认识目前还不尽一致, 有从板块构造角度划分的(如, Matture等, 1985; 许志琴等, 1988; 张国伟等, 1988, 1996, 2001; Meng和Zhang, 1999, 2000; Wu和Zheng, 2013; Dong等, 2011b), 也有从大地构造相单元划分的(如王宗起等, 2009). 目前大多数研究者认同该造山带是由2个主缝合带(商丹和勉略缝合带)和3个块体(北秦岭及华北克拉通南缘、扬子克拉通北缘及二者间的秦岭地块)组成(图1). 在北秦岭, 沿商丹带北侧分布有早元古代秦岭杂岩或秦岭群, 主要由角闪岩相变质岩系及变质变形岩体组成(游振东和索书田, 1991; 王涛等, 1997), 其东段北缘发育古生代榴辉岩等超高压变质岩(胡能高等, 1994; 杨经绥等, 2003), 南缘发育古生代高压麻粒岩和退变榴辉岩(陈丹玲等, 2004; 陈丹玲和刘良, 2011; 刘良等, 1996, 2013; Liu等, 2010, 以及其引用文献). 秦岭杂岩北侧为由蛇绿岩、火山-沉积岩组成的二郎坪群(孙勇等, 1996), 其北为由绿片岩、角闪岩及变质碎屑岩组成的宽坪群. 秦岭杂岩及商丹带南侧为古

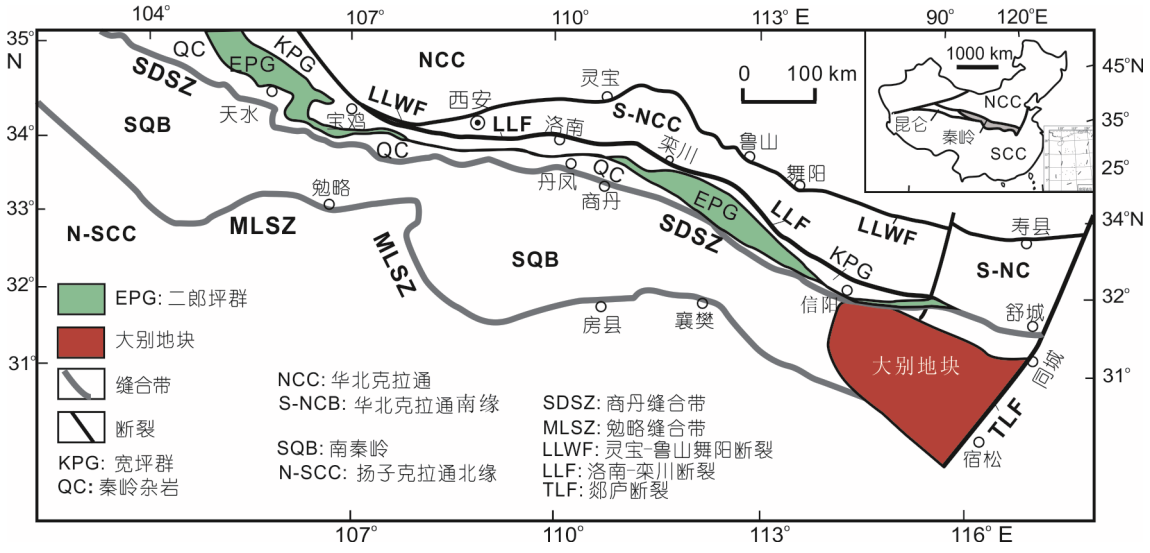

图 1 秦岭构造框架

据 Dong 等(2011b)

生代丹凤群和刘岭群, 丹凤群由蛇绿岩、火山-沉积岩组成(张国伟等, 2001), 刘岭群主体为浅变质沉积岩系, 是秦岭地块的主要组成部分.

秦岭造山带岩浆作用非常发育(图2), 新元古代、古生代和中生代的构造岩浆热事件基本奠定了秦岭造山带演化进程的主体构造格架. 新元古代时期, 主流研究观点认为, 秦岭造山带可能经历了陆块汇聚与裂解, 形成了较为强烈的构造变形和岩浆事件(如, Kröner等, 1993; Xue等, 1996b; 陆松年等, 2004; 王涛等, 1999, 2005; Wang等, 2013). 古生代时期, 在北秦岭发生(沿商丹带和二郎坪一线)的俯冲增生及碰撞, 形成广泛的花岗质岩浆作用等构造岩浆热事件(如, Ratschbacher等, 2003; 王涛等, 2005, 2009; 张成立等, 2013; Wang等, 2013; Dong等, 2015). 早中生代(三叠纪), 整个秦岭造山带, 特别是西、南秦岭经历了强烈的构造岩浆热事件(如, Sun等, 2002; 张成立等, 2008; Wang等, 2013), 晚中生代构造岩浆热事件集中发育于东秦岭(卢欣祥, 1991, 2000; 王晓霞等, 2011; Wang X X等, 2013, 2015), 形成巨量的侏罗纪-白垩纪花岗质侵入岩(图2).

2　新元古代花岗质岩浆作用及其对碰撞作用的启示

2.1　新元古代三个阶段花岗质岩体的时代、变形及成因

依据岩体地质和锆石U-Pb年龄资料, 秦岭新元古代花岗质岩浆作用可以分为979~911, 894~815和759~711 Ma三个阶段(图3)(Wang等, 2013).

第一阶段花岗质岩石主要分布在北秦岭的秦岭杂岩中, 为强变形的S型花岗岩, 岩石类型主要为二云母二长花岗岩; 其$^{87}Sr/^{86}Sr(t)$比值为0.706~0.7227, $\varepsilon_{Nd}(t)$较低, 为–4.93~–4.23; T_{DM2}为2.21~1.99 Ga, 与秦岭群片麻岩相似, 显示其源区在组成上与该片麻岩一致. 代表性岩体如牛角山花岗质片麻岩体(959 Ma, 王涛等, 1998, 2005).

第二阶段花岗质岩石在北秦岭的秦岭杂岩和南秦岭均有出露, 为变形的I型花岗岩, 岩石类型为花岗闪长岩和二长花岗岩, 晚期可见A型花岗岩, 岩石类型为正长花岗岩. 该期花岗岩的$\varepsilon_{Nd}(t)$值变化较大, 有的与早中元古代地壳的组成一致, 有的与亏损地幔类似. 代表性岩体如蔡凹和德河岩体(张成立等, 2004; Chen等, 2006).

第三阶段花岗质岩石分布在南秦岭, 为无变形的I型和A型花岗岩, 岩石类型为石英闪长岩、花岗闪长岩和碱性花岗岩. 部分花岗质岩石的$\varepsilon_{Nd}(t)$值介于早中元古代地壳与球粒陨石之间, 有的介于球粒陨石与亏损地幔值之间. 代表性岩体如吐雾山岩体(卢欣祥等, 1999).

2.2　新元古代三阶段花岗质岩石发育的构造背景——同碰撞到碰撞后?

该阶段北秦岭新元古代花岗质岩石的构造环境可以解释为有从同碰撞向后碰撞及碰撞后演化的趋势(张成立等, 2004; Wang等, 2013), 其主要证据如下:

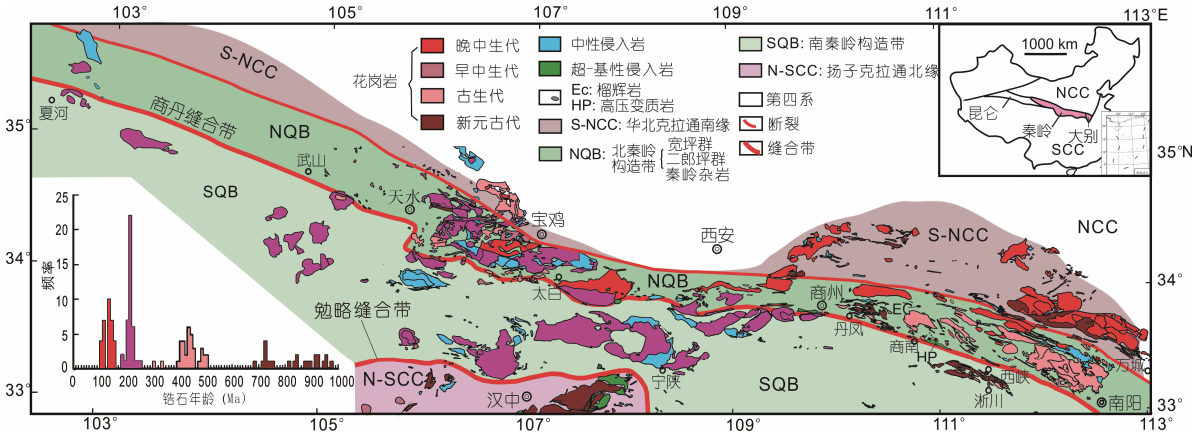

图 2　秦岭造山带花岗质岩石的分布特征

据 Wang 等(2013)

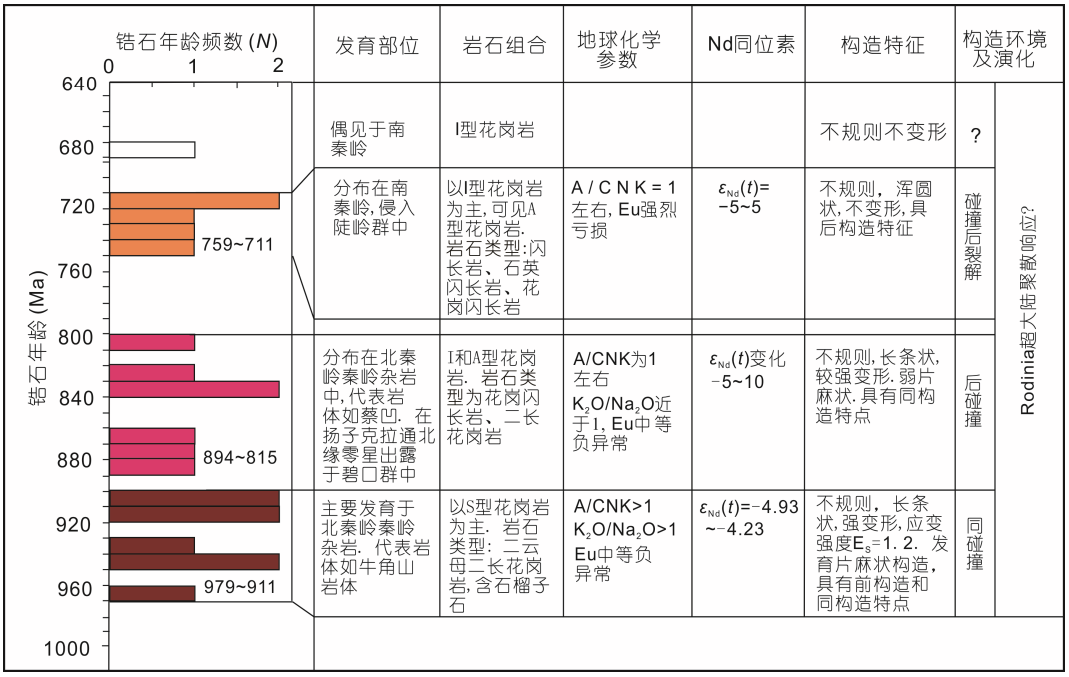

图 3　新元古代花岗岩演化特征

年龄资料来源于 Wang 等(2013), 原始年龄资料见该文所引参考文献

(1) 岩石类型证据. 第一阶段(979~911 Ma)主要为二长花岗岩, 矿物组合中出现了白云母和石榴子石等富铝矿物, 岩石为钙碱性系列, 过铝质, 富钾, 岩石的成因类型为典型的S型花岗岩. 第二阶段(894~815 Ma)的岩石类型主要为花岗闪长岩, 二长花岗岩, 比第一个阶段的偏基性, 岩石为钙碱性, 以准铝质为主, 可见过铝质, 以具I型特征的花岗岩为主, 也有S型花岗岩. 到了第三阶段(759~711 Ma)花岗质岩石基本上为I型花岗岩, 同时出现了A型花岗岩, 在矿物组合上出现了碱性暗色矿物.

(2) 构造变形证据. 第一阶段花岗岩变形强烈, 形成花岗质片麻岩体或片麻状花岗岩体, 而且变形主要发生于 955~929 Ma(王涛等, 2005), 关键证据是, 959 Ma强变形的花岗质片麻岩被弱变形的929 Ma的花岗岩脉侵入, 说明在955~930 Ma发生过强烈区域变形, 将花岗质岩体改造成花岗质片麻岩体. 同时这些岩体中发育岩浆流动→高温固态流动连续过渡的变形特点, 也是同构造岩体及同侵位变形的特征(王涛等, 1998). 这些特征表明该阶段花岗质岩石是在这一强烈变形过程中形成的, 显示同碰撞花岗岩的特点. 之后及第二阶段(894~815 Ma)变形较弱, 或没有变形, 从更加宏观的尺度上限定秦岭造山带在新元古代(959~900 Ma)发生过区域变形作用.

(3) 岩石成因类型演化证据. 在秦岭造山带中, 新元古代花岗质岩石总体上从早到晚有由S—I—A的演化趋势, 具体到北秦岭, 从979~815 Ma由S—I—S、A型的演化; 在南秦岭从759~711 Ma有由I—A型的演化趋势. 这一总体演化趋势与一般同碰撞到后碰撞及碰撞后岩浆作用的演化趋势一致.

(4) 其他佐证. 在北秦岭造山带还鉴别出一些新元古代1000~973 Ma 的基性侵入岩, 显示俯冲环境特征, 解释为俯冲产物(张宗清等, 2006).

上述花岗质岩石的性质和变形演变特征及区域地质背景一致显示, 秦岭造山带在新元古代的花岗质岩浆活动可以解释为同碰撞(979~911 Ma)到后碰撞(894~815 Ma)及碰撞后伸展裂解(759~711 Ma)的演化过程. 新元古代强变形的侵入体((920~900 Ma) 也出现在西秦岭西部, 解释为汇聚及同碰撞构造环境(裴先治等, 2007). 大别-苏鲁造山带发育有780~680 Ma花岗岩, 被认为形成于裂解环境(如Wu等, 2004; Zheng等, 2004, 2005, 2009; 许志琴等, 2006; Tang等, 2008). 因此, 新元古代构造岩浆事件在秦岭造山带

乃至整个中央造山带都有发育. 需要指出的是, 该时期岩浆作用是在古生代-中生代为主体的秦岭造山带中鉴别的残留的早期岩浆记录. 从岩浆作用和变形特征的演变, 显示具有同碰撞到后碰撞的特征. 再考虑到前人的认识(陆松年等, 2003), 本文也推测是同碰撞到后碰撞环境. 但是至于谁和谁碰撞, 现在难以追索, 只能做一些探讨和推测.

实际上, 在中国大陆, 特别是扬子-塔里木克拉通及周缘、阿拉善地块等, 新元古代构造岩浆事件普遍发育(如耿元生和周喜文, 2010; 胡霭琴等, 2010; 陆松年等, 2003; Zhang和Zheng, 2013; Zheng等, 2013), 一般将其均解释为陆块汇聚与裂解的产物(如, 张传林等, 2012; Wang等, 2003; 陆松年等, 2003, 2004). 在环扬子陆块及其江南古陆还发育晚期无变形花岗质岩体和A型花岗岩(759~711 Ma)及基性岩, 与Rodinia超大陆的裂解有关(如Li等, 2008; Wang等, 2010), 或者俯冲碰撞后的伸展(如Zheng等, 2008). 因此, 秦岭新元古代岩浆事件及其可能的碰撞到碰撞后裂解的环境可能与扬子等华南陆块聚散有关, 属于该陆块群汇聚与裂解的产物, 据此一些学者认为秦岭杂岩(也称之为北秦岭单元)是从华南陆块裂解出来的(如陆松年等, 2003; Wu和Zheng, 2013). 在这个时期, 秦岭杂岩代表的微陆块没有确凿证据显示沿宽坪群位置与华北克拉通碰撞, 因此, 秦岭造山带的新元古代岩浆活动记录有可能是从裂解的古生代冈瓦纳超大陆内早期记录的事件继承而来的. 近年来, 在华北克拉通内部、南北缘也发现了零星的新元古代岩浆岩(如翟明国等, 2014), 包括朝鲜Nangrim地块北部的含角闪石花岗岩(1195 Ma, Zhao等, 2006). 但这些岩浆发育很少, 似乎主要是与裂解有关的记录, 没有明确的代表大陆聚合过程的岩浆岩记录(翟明国等, 2014). 总体看, 秦岭新元古代花岗岩浆事件, 与扬子-塔里木克拉通及周缘、阿拉善地块等同期岩浆事件类似, 也与中国大陆周边如波罗的海东南部、印度东部等发生的新元古代岩浆作用类似(如, Boger等, 2000; Jayananda等, 2000), 可能都是Rodinia超大陆聚散的响应(如Zheng等, 2013). 因此, 秦岭新元古代构造岩浆事件应该属于冈瓦纳属性超大陆裂解后微陆块的一部分, 与Rodinia超大陆的聚散有关. 它们不属于以古生代-中生代造山作用为特征的秦岭造山带.

3 古生代三阶段岩浆作用与深俯冲到碰撞过程

3.1 古生代三阶段花岗质岩体的构造型式、成因与演变

依据锆石U-Pb年龄的分期和每期的岩石组合特征, 并考虑相关的变形、变质等地质背景(见下), 古生代花岗质岩石也可以划分为三个阶段: 507~470, 460~422和415~400 Ma(图4)(Wang等, 2009, 2013; 张成立等, 2013).

第一阶段(507~470 Ma)主要发育于北秦岭东段(商南一带)秦岭杂岩中, 岩石组合以I型花岗岩为主, S型花岗岩次之, 侵位于秦岭杂岩, 主要岩石类型为片麻状花岗闪长岩、片麻状(英云)闪长岩、斜长花岗岩, 其Sr/Y比值为50~123. 具有较高的$\varepsilon_{Nd}(t)$值(1.5~1.9), 较低的$^{87}Sr/^{86}Sr(t)$(一般为0.7030~0.7042), 显示有较多的新生陆壳组分参与. S型花岗质岩体侵位于秦岭群中, 以漂池岩体为代表, 发育片麻状构造, 岩石类型多为二长花岗岩, 地球化学上具Ba相对于Rb和Th的亏损的特征. 其$\varepsilon_{Nd}(t)$=−8.8~−8.2, 模式年龄T_{DM2}=1.92~1.73Ga, 与继承核锆石的年龄一致, 且与秦岭杂岩中的一些岩石的年龄(2.07~1.90 Ga)相近. 锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$值均为负值, 一般为−13.8~−5.9, T_{DM}^{C}=2.33~1.84 Ga, 也与秦岭群的年龄相似, 表明S型花岗岩的源区物质类似于秦岭群的地壳物质. 该时期还发育基性侵入岩, 以富水基性杂岩为代表(500~476 Ma, Zhang等, 2015). 另外, 在秦岭群中还发育大量褶皱变形的浅色花岗质脉体, 代表了陆壳岩石深融的产物(张成立等, 2013), 指示该期花岗质岩浆作用与陆壳深熔作用密切相关.

第二阶段(460~422 Ma)是秦岭古生代花岗质岩石的主体, 遍布于整个北秦岭, 主要发育于北秦岭的东部, 侵入于秦岭群、二郎坪群和丹凤群. 其中, 早期(455~450 Ma)形成的岩体规模较小, 晚期(450~422 Ma)的规模大, 形态多为椭圆状或不规则状. 该阶段花岗质岩体伴生有基性岩侵入(时限为443~434 Ma). 花岗质岩石主要为I型, 岩石类型以黑云母花岗闪长岩为主, 其次为英云闪长岩、石英闪长岩、二长花岗岩, 它们的$^{87}Sr/^{86}Sr(t)$=0.7036~0.706, 多数岩体的$\varepsilon_{Nd}(t)$为正值, 变化于−1.5~1, $Mg^{\#}$为0.30~0.52, 亏损高场强元素(Nb, Zr和Ti), 且Cr含量偏低(<129 ppm).



图 4　古生代花岗演化特征

年龄资料来源 Wang 等(2009, 2013), 主要原始年龄资料见这些文献中的参考文献, 部分年龄资料据张成立等(2013)

这些特征与基性榴辉岩部分熔融的熔体(Rapp, 1995; Rapp等, 2008)很相似, 另一方面, 一些岩体如灰池子岩体, 大量继承锆石的存在以及其变化极大的Hf同位素组成, 支持其成因以幔源物质加入的下地壳深熔为主.

第三阶段(415~400 Ma)主要发育于北秦岭中段, 岩石组合以I型花岗岩为主. 岩石类型有闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩. 与第二阶段花岗质岩石相比, 该阶段岩石显示较低的$^{87}Sr/^{86}Sr(t)$值(0.7049~0.706)、较高的$\varepsilon_{Nd}(t)$值(−2.3~5.1), $Mg^{\#}$一般为0.3~0.49, Cr一般为7~14 ppm, 闪长岩为9~434 ppm, 变化较大. 其成因可以解释为幔源岩浆混染了较少的古老壳源物质; 其中, 年轻(幔源)的组分可能来源于新底侵基性岩浆, 或者来源就位于造山带根部的早期基性岩. 该阶段花岗质岩体的弱变形和不变形特征, 也与后碰撞相对弱的挤压或弱伸展构造环境一致.

3.2　古生代三阶段岩浆作用的构造环境讨论——俯冲-碰撞

秦岭古生代的构造特征是沿着商丹(Meng和Zhang, 1999, 2000; Dong等, 2011b)或二郎坪(如, Xue等, 1996a, 1996b; Ratschbacher等, 2003)缝合带发生了俯冲或碰撞, 但对其具体的时间和过程还不清. 这三个阶段花岗质岩石的组合和演化, 揭示了三个阶段的造山作用过程.

第一阶段寒武纪-早奥陶世(507~470 Ma)岩浆主要发育于北秦岭东段, 以I型花岗岩为主, 并有部分S型花岗岩产出. 该时期, 在秦岭杂岩北缘发生(含金刚石)榴辉岩等(超)高压变质(胡能高等, 1994; 杨经绥等, 2003; Yang等, 2005). 在南缘及中部发育陆壳物质的超高压作用(~500 Ma, Liu等, 2010), 解释为板块俯冲及碰撞. 从岩浆角度, 该时期的基性岩(如富水杂岩, Zhang等, 2015)和I型花岗岩具有弧岩浆的特点, 可以解释为俯冲环境. 问题是发育~500 Ma的S型花岗质岩浆与超高压变质几乎同期, 其解释较为复杂, 至少有两种解释. 一种解释是, 大陆的深俯冲即大陆碰撞(如张成立等, 2013), 这意味着大洋已经消失, 但该时期商丹洋(古特提斯洋)没有消失的证据, 是否有可能是另一个小的洋盆消失, 而导致的局部的陆块碰撞, 这还需要进一步的证据. 另一种解释是弧陆碰撞(如Wu和Zheng, 2013), 即秦岭杂岩块体(也称之为北秦岭单元)与二郎坪弧的碰撞. 但是, 该模式不好解释秦岭杂岩南缘的超高压变质, 而且一个很小的陆块(秦岭杂岩)仅仅靠弧陆碰撞俯冲到一

个(二郎坪)岩浆弧之下发生超高压变质的可能性较小. 我们提出以下解释: 在古特提斯洋(商丹洋)和可能的二郎坪洋双向俯冲下, 北秦岭陆壳(小陆块)一部分被拖曳进入深部, 发生深融形成壳源花岗质岩浆(如Wang等, 2013)和南北缘的超高压变质, 即发生的俯冲陆缘的深俯冲. 按照这种解释, 该时期的一部分可能的二郎坪岩浆弧和秦岭杂岩的岩浆弧都属于古特提斯大洋的巨型岩浆弧, 在持续俯冲下, 秦岭杂岩为代表的一部分小块体被俯冲拖曳到深部发生超高压变质, 并几乎同时或在随后的抬升过程中发生深融, 形成S型花岗岩, 同时也可能伴随秦岭小陆块与二郎坪弧的弧陆碰撞. 目前提出的绝大多数秦岭造山带模型(如Wu和Zheng, 2013; Dong等, 2011b, 2015)都显示该时期古特提斯洋(商丹洋)并没有关闭, 与本文提出解释一致.

另外, 第二段花岗岩显示碰撞环境, 也为第一阶段为俯冲环境提供了作证. 第二阶段花岗岩多为椭圆状或不规则状, 显示弱变形特点. 一些花岗岩如灰池子岩体还显示埃达克质特点, 解释为加厚地壳产物, 与碰撞或后碰撞环境一致(李伍平等, 2001). 值得注意的是, 该时期, 在秦岭杂岩中几个详细填图的花岗质岩体均显示有年轻的岩石单元位于岩体的东部, 即显示岩浆有向东迁移的特点; 秦岭杂岩变质作用显示具有明显的降压特征; 构造填图和解析还显示, 秦岭杂岩北侧及朱夏构造带为右行逆冲, 南侧的商丹构造带为左行逆冲. 这些岩浆作用、变质和构造变形一致揭示了秦岭杂岩向西侧向挤出抬升(王涛等, 2005), 佐证了碰撞挤出的构造环境, 即商丹洋已经闭合、两侧块体碰撞及商丹缝合带基本形成.

4　早中生代岩浆作用: 秦岭地块和扬子克拉通俯冲或碰撞的结果

4.1　早中生代两阶段岩浆作用及其性质

秦岭早中生代(三叠纪)岩浆作用非常发育, 所形成的花岗质岩石主要分布在西秦岭和南秦岭, 在东秦岭西段也有一些出露. 根据42个锆石U-Pb年龄统计(图5和6)和岩石组合特征, 并结合构造背景(见下), 秦岭早中生代花岗质岩浆活动大体上可划分为250~235和235~185 Ma两个阶段.

第一阶段花岗质岩石主要出露在西秦岭的西部, 在西秦岭中南部零星出露, 为I型花岗岩, 岩石类型主要为石英闪长岩和斜长花岗岩, 岩石的$\varepsilon_{Nd}(t)$为–9.5~–6.31, 部分岩石显示较高的Sr/Y比值(金维浚等, 2005; 张成立等, 2008).

第二阶段是早中生代花岗质岩石的主体, 集中发育于225~200 Ma期间, 广泛发育于西秦岭和南秦岭, 在东秦岭零星出露. 岩石成因类型为I型, I-A过渡型, 可见A型. 岩石类型主要为石英二长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩, 同时伴随有煌斑岩脉的侵入

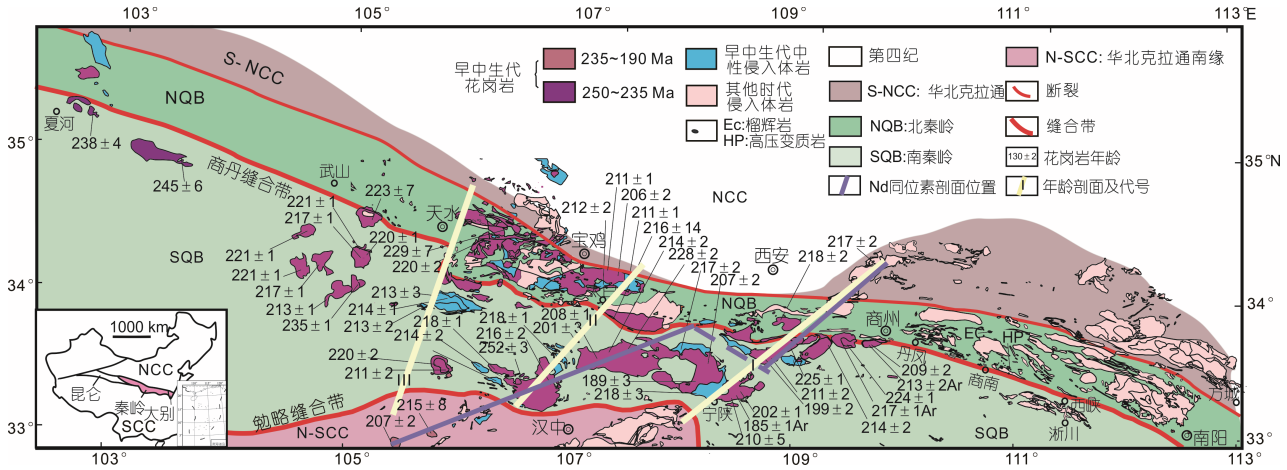

图 5　秦岭造山带早中生代花岗岩锆石年龄及分布特征

年龄资料来源 Wang 等(2013), 主要原始年龄资料见该文中的参考文献, 部分来源于孟旭阳等(2013)、吕星球等(2014)、聂政融等(2015)、王顺安等(2015)和杨阳等(2015)

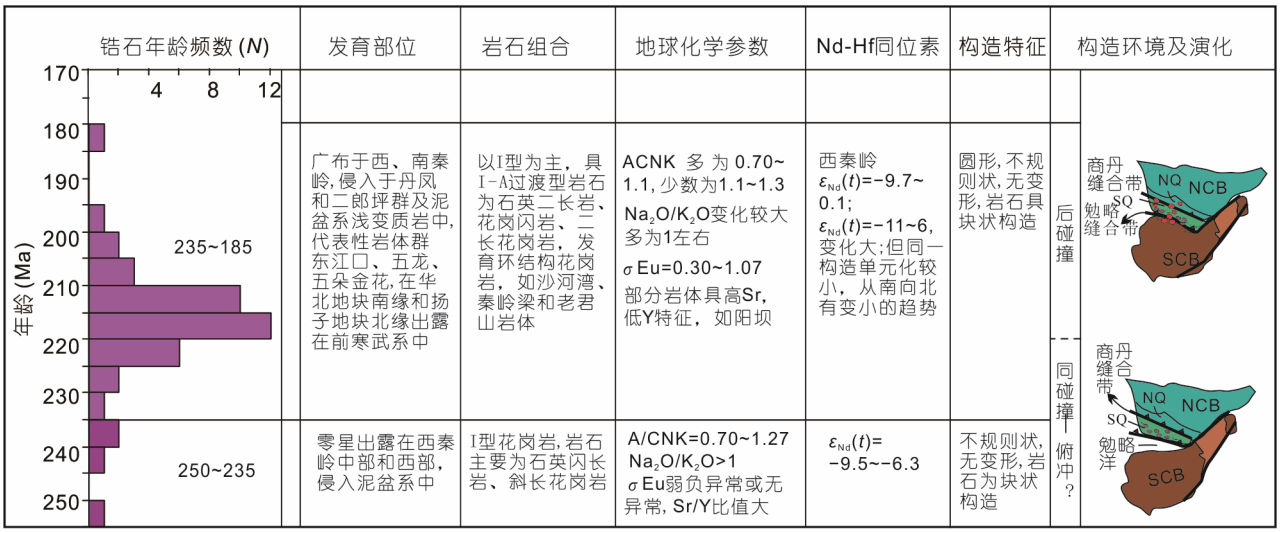

图 6 早中生代花岗岩演化特征

资料来源同图 4

(Wang等, 2007), 显示了双峰式岩浆组合特点. 该期花岗质岩石的Sr-Nd同位素组成变化较大, $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$=0.70419~0.70989; $\varepsilon_{Nd}(t)$=−9.7~0.1, $\varepsilon_{Hf}(t)$一般在−11~6 (Jiang等, 2010; Qin等, 2010; 弓虎军等, 2009a, 2009b), T_{DM2}为中元古代到新元古代, 但位于华北克拉通南缘的该期花岗质岩石的$\varepsilon_{Nd}(t)$和$\varepsilon_{Hf}(t)$值很低, T_{DM2}为太古宙(Ding等, 2011; 齐秋菊等, 2012), 均显示它们的源区以古老的壳源物质为主, 但不同块体中花岗质岩石的源区组成存在差异(Wang等, 2013).

值得指出的是, 早中生代特别是第二阶段花岗质岩石中还发育一些具有埃达克质特点的花岗岩体和环斑结构花岗岩. 埃达克质岩石主要形成于第二阶段(235~215 Ma), 略早于正常花岗岩体(225~210 Ma)(张成立等, 2008). 环斑结构和A型花岗岩的形成时间最晚(217~200 Ma)(Wang等, 2013). 这些岩石的性质和结构特征演化可能提供了重要的构造背景信息.

4.2 早中生代两阶段岩浆作用的构造环境讨论——俯冲还是碰撞?

对秦岭早中生代花岗质岩石构造环境仍存在着不同的认识. 一般解释为同造山(Sun等, 2002)或碰撞环境(卢欣祥, 2000). 多数研究者进一步将第一阶段花岗质岩石解释为勉略洋向北俯冲的产物; 第二阶段解释为同碰撞-后碰撞的产物(如, 张成立等, 2008; Dong等, 2011a, 2011b; Wang等, 2013). 还有学者将所有秦岭早中生代花岗质岩石都解释为中特斯提洋(勉略洋)向北俯冲, 并认为有从南向北的岩浆成分极性变化, 如由过铝质S型花岗岩到准铝质I型花岗岩变化(陈衍景, 2010; Li等, 2015).

为了进一步验证这些假设和认识, 本文统计分析了横穿秦岭造山带三条早中生代花岗质岩体剖面的年龄和地球化学参数. 从年龄统计分析结果看(图7), 从扬子克拉通北缘-南秦岭-北秦岭-华北克拉通南缘, 早中生代花岗质岩石的年龄分布没有显示由南向北变新的趋势(甚至似乎还相反, 如图7中的III剖面). 这与一般俯冲特别是平板俯冲作用下岩浆向内陆迁移的规律不同, 显然还缺乏与俯冲作用直接相关的岩浆时间向内陆迁移证据.

在上述三条横穿秦岭造山带年龄剖面的基础上, 对每一条剖面上的岩石地球化学参数的统计分析显示, 从南秦岭-北秦岭-华北克拉通南缘没有显示出成分极性的变化趋势, 如, 铝饱和度(A/CNK)(图8)和K_2O/Na_2O比值(图9). 事实是, 在三条剖面中, 南秦岭花岗岩的A/CNK变化较大, 从准铝质到过铝质, 以弱过铝质为主; 北秦岭不同剖面变化情况不同, 但总体上比南秦岭变化小, A/CNK值多在1左右; 南秦岭花岗质岩石的K_2O/Na_2O值变化范围也较大, 但不同剖面上的变化特征相似, 而北秦岭不同剖面上的变

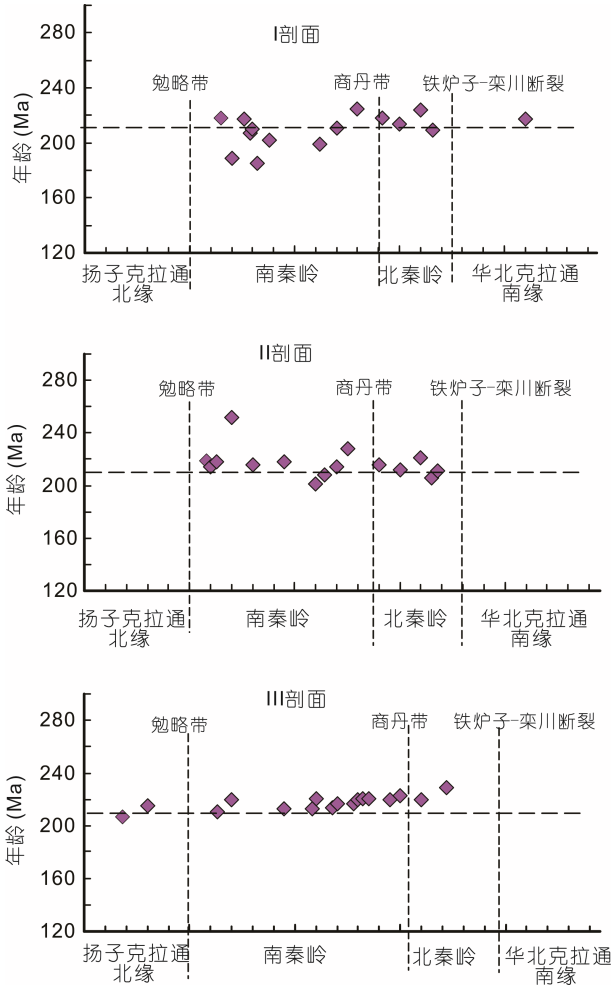

图 7　横跨造山带早中生代花岗岩年龄的变化特征

剖面位置见图 6; 资料来源同图 4

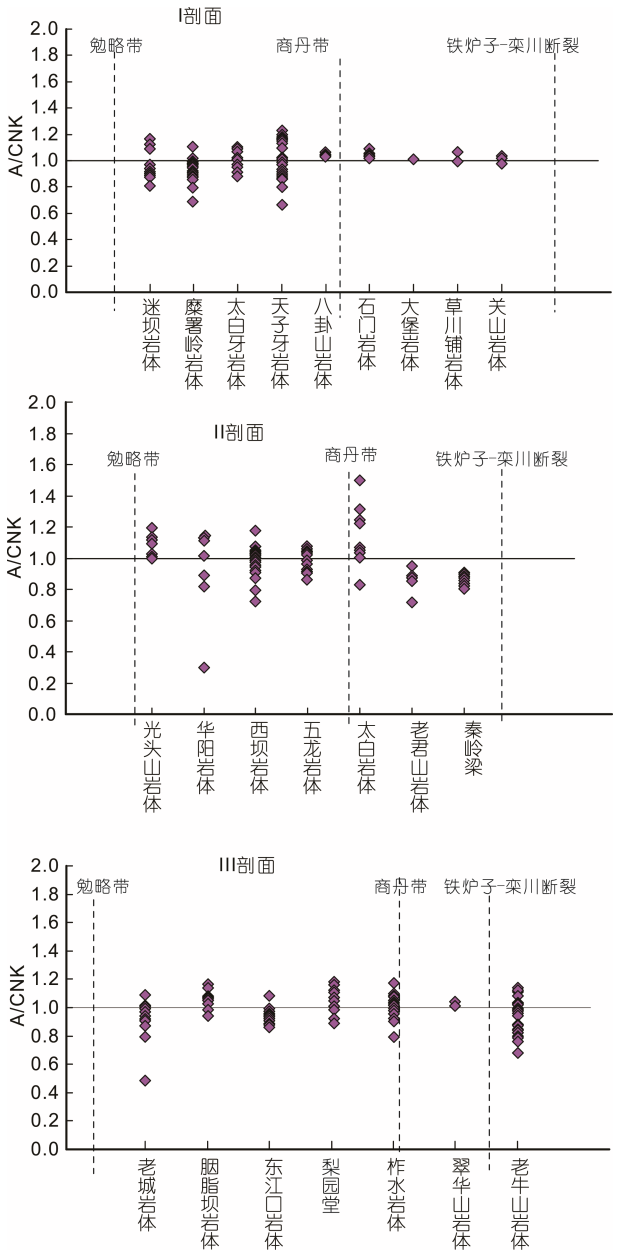

图 8　横跨造山带早中生代花岗质岩石 A/CNK 的变化特征

剖面位置见图 6; 资料来源: 金勤海等(1990); 校培喜等(2000); 张彦等(2002); 王晓霞等(2003); 胡建民等(2004); 李淼等(2004); 张宏飞等(2005); 张成立等(2005, 2002); 李注苍等(2005); 毕明波等(2006); Zhang 等(2006); 李永军等(2006, 2007); 秦江峰等(2007); 王娟等(2008); 弓虎军等(2009a, 2009b); Qin 等(2009); 田伟等(2009); 秦江峰(2010); Jiang 等(2010); 骆金诚等(2010); Ding 等(2011); Liu 等(2011); Wang 等(2011); 魏均启(2011); 齐秋菊等(2011); Dong 等(2012); 王艳芬等(2012); Yang 等(2012); 刘哲东等(2013); 孟旭阳等(2013); 任厚州等(2014); 刘春花等(2014); Xiao 等(2014); 周争艳等(2015); 吕星球(2015)

化情况不同, 在I剖面上K_2O/Na_2O比值大于1, 而在II和III剖面上以小于1为主, 华北克拉通南缘花岗岩的K_2O/Na_2O比值变化也较大, 大于1者居多(图9). 值得指出的是, 尽管I剖面总体上, 从南秦岭到北秦岭, K_2O/Na_2O比值似乎略有升高的趋势, 但是在商丹带以南, 即真正勉略洋俯冲所影响的地块, K_2O/Na_2O比值没明显升高的变化趋势.

重要的是, 花岗质岩石的$\varepsilon_{Nd}(t)$值由南向北总体上似乎是变小, 没有显示出陆壳物源减少(即由过铝质S型花岗岩到准铝质I型花岗岩变化特点), 而显示相反的变化特征. 例如, 横穿秦岭造山带早中生代花岗岩的同位素特征(图10)显示, 从南秦岭到华北克拉通南缘, 花岗岩$\varepsilon_{Nd}(t)$值明显逐渐变小, 但在同一构造

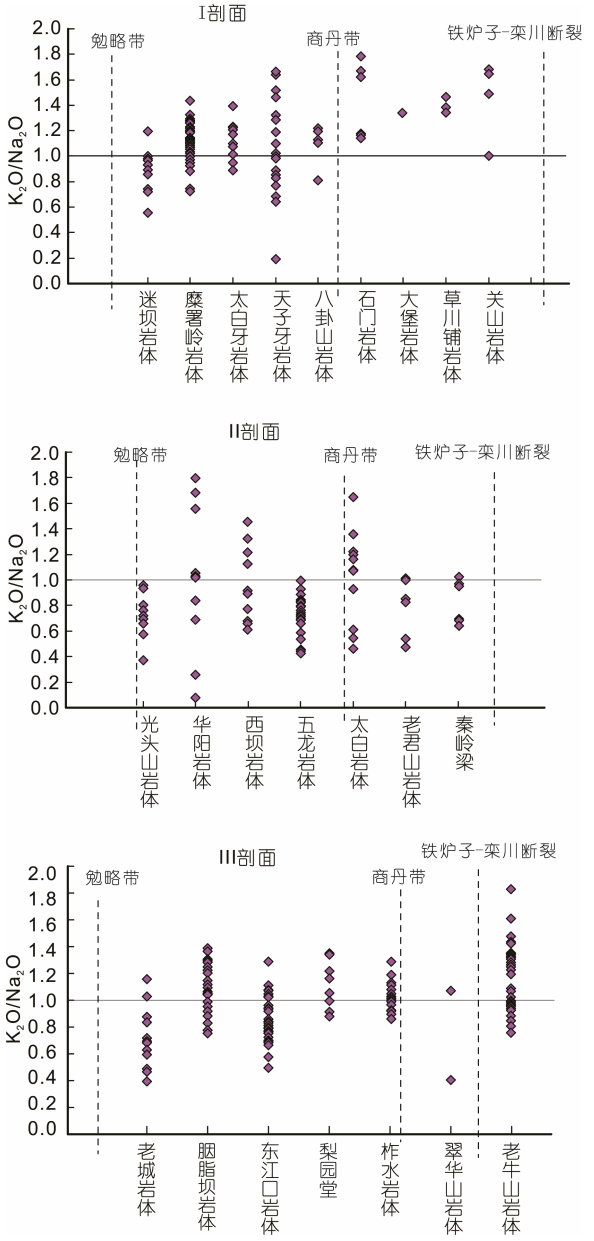

图 9　横跨造山带早中生代花岗质岩石 K_2O/Na_2O 的变化特征

剖面位置见图 6; 资料来源同图 8

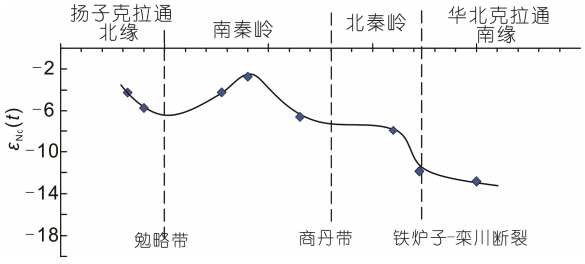

图 10　横跨造山带早中生代花岗岩 Nd 同位素变化特征

剖面位置见图 6, 图中剖面虚线部分表示剖面的平移; 资料来源于 Wang 等(2013)

块体中, 其变化相对较小. 从大地构造背景看, 这明显是受不同块体深部物质组成性质的制约: 即$\varepsilon_{Nd}(t)$值最低的花岗岩分布区为最老的华北克拉通南缘.

这些地球化学特征实际上也受控于岩石类型. 从南秦岭到北秦岭不同地区花岗质岩石的类型分析来看, 每个地区岩体大都具有石英二长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩组合, 似乎从南到北, 岩石类型的规律变化不明显, 相应地也就没有成分极性显示. 所有上述年龄、岩石类型和地球化学特征都没有显示很好的与俯冲有关的极性. 需要指出的是, 分析成分极性空间变化, 最好是在同一组成相似的构造单元. 而穿越不同的构造单元, 花岗岩的成分往往受所在块体深部物质组成控制, 而不是俯冲过程的控制. 以前曾认为, 北秦岭古生代花岗质岩石由南向北有俯冲极性变化(如骆庭川等, 1993). 但后来越来越多的研究显示, 这个规律不明显或者没有(如卢欣祥, 1998).

实际上, 在时间上, 秦岭各个块体和地区早中生代花岗质岩石的岩石类型和地球化学成分明显可以分为两个阶段, 显示了同一个地点, 在时间上的演化特点. 早期阶段主要为石英闪长岩、石英二长岩、花岗闪长岩; 晚期阶段主要为二长花岗岩及环斑结构花岗岩. 这种演变趋势解释为俯冲到碰撞似乎更为合理(张成立等, 2008; Wang等, 2013; Dong等, 2011a). 还应该注意的是, 不能仅仅依据地球化学特征判别构造环境. 以下的岩体构造型式、变形特征、岩石组合、地球化学特征及区域背景综合分析显示, 第二阶段花岗岩质岩石形成于同碰撞晚期或后碰撞构造环境.

(1) 岩体地质. 花岗岩体未变形, 且切割区域构造线, 似乎有钉合岩体的特点(如, 韩宝福等, 2010), 显示后构造岩体特征. 例如, 沙河湾环斑结构花岗岩体切割商丹断裂带; 光头山岩体侵位于勉略断裂带中(图1).

(2) 岩石组合. 早期以石英闪长岩、石英二长岩为主, 晚期主要为二长花岗岩, 部分花岗质岩石具有环斑结构, 如沙河湾、老君山和秦岭梁岩体(年龄为209~214 Ma, 卢欣祥等, 1996; Wang等, 2011b). 一般

认为具有这种结构的花岗岩形成于伸展或稳定的构造环境(如Haapala和Rämö, 1999). 岩石成因类型从早到晚有从I到I、I-A和A型的变化趋势.

(3) 早中生代的花岗质岩体发育同时代岩浆暗色包体(Wang等, 2011b, 张成立等, 2008; Qin等, 2010), 同时伴随有同时代的煌斑岩脉(~219 Ma, Wang等, 2007)侵入, 显示出双峰式岩浆组合.

(4) 地球化学特征. 在同一构造块体中, 花岗质岩石的$\varepsilon_{Nd}(t)$值随着时间变新而变大, 即年轻组分不断增加, 这种演变特征与从同碰撞到后碰撞, 底侵作用不断增加的背景相一致(Wang等, 2013).

(5) 在大别地区陆壳物质高压变质时限为246~244 Ma(Ames等, 1993, 1996; Li等, 1993; Hacker等, 2000; 刘福来和薛怀民, 2007), 一致认为同碰撞至少发生在245 Ma左右(如郑永飞, 2008). 考虑到大别山到秦岭的距离不是很远, 从大别山地区的点碰撞(在大别山)到秦岭的剪刀状全面碰撞的时间差(张国伟等, 2001)应该不是很长. 因此, 在中、西秦岭以及沿勉略带的碰撞峰期时间也应该相差不长, 而且有证据显示在242~221 Ma(李曙光等, 1996), 且主要在中三叠世(拉丁期, 234~227 Ma, 张国伟等, 2001). 秦岭中生代第二阶段225~185 Ma花岗质岩石比碰撞峰期晚了近10~30 Ma, 比碰撞初期可能就更晚了. 另外, 勉县北部高压基性麻粒岩折返的退变质年龄为214 Ma左右(梁莎等, 2013), 也佐证后碰撞环境.

5　晚中生代岩浆作用: 板内岩浆事件

5.1　晚中生代两阶段岩浆作用及其性质

秦岭晚中生代花岗质岩浆作用也非常发育, 主要分布在东秦岭, 广泛出露在华北克拉通南缘和北秦岭, 形成大岩基和小岩株两类岩体, 在南秦岭零星出露有小岩株. 依据锆石U-Pb年龄分期和岩石组合, 秦岭晚中生代花岗质岩浆作用可以划分为160~130和120~100 Ma两个阶段(图11)(王晓霞等, 2011; Wang等, 2013).

第一阶段(160~130 Ma)在华北克拉通南缘该阶段的花岗质岩石以I型为主, 可见I-A过渡型. 大岩体的岩石类型主要为二长花岗岩, 其次为花岗闪长岩和石英闪长岩, 岩体中岩浆暗色包体发育. 小岩体的岩性主要为钾长花岗斑岩和花岗斑岩. $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$变化大, 介于0.69800~0.72205; $\varepsilon_{Nd}(t)$值低, 为−24.4~−11.8, 模式年龄较大, T_{DM2}=2.06~1.65Ga. 锆石的$\varepsilon_{Hf}(t)$=−37.7~−5.7, 集中在−23.4~−5.7, T_{DM}^{C}为3.5~1.6

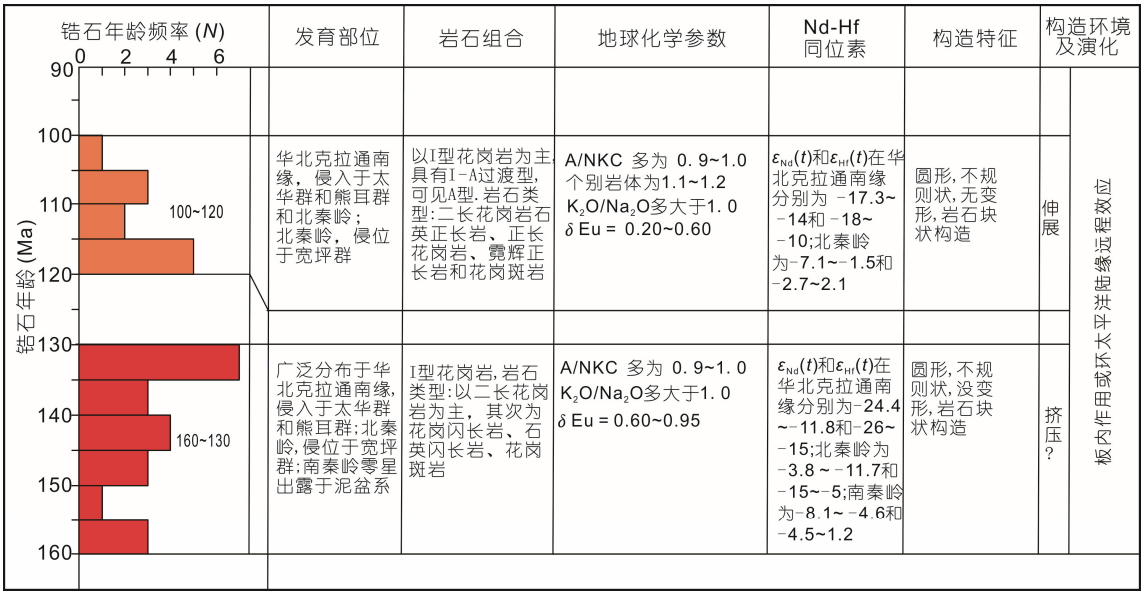

图 11　晚中生代花岗岩演化特征

年龄资料来源 Wang 等(2013), 原始年龄资料见这些文献的参考文献

Ga, 主要为2.7~1.6 Ga.

在北秦岭构造带, 该阶段花岗质岩石以二长花岗岩为主, 显示I型特征. 在同位素组成上, $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$ = 0.70573~0.70815, $\varepsilon_{Nd}(t)$=−11.7~−3.8, 显示了$^{87}Sr/^{86}Sr(t)$较低, $\varepsilon_{Nd}(t)$变化较大的特征. 模式年龄变化较大, T_{DM2}=0.99~1.57 Ga. 锆石的$\varepsilon_{Hf}(t)$=−17.4~−7.3, T_{DM}^{C}为2.3~1.7Ga.

在南秦岭构造带, 该阶段花岗质岩石为闪长岩、石英闪长岩和花岗斑岩, 以I型为特征. 在同位素组成上, $\varepsilon_{Nd}(t)$变化较小, 为−8.1~−4.6, 模式年龄变化也较小, T_{DM2}=1.28~1.12 Ga.

第二阶段(120~100 Ma)花岗质岩石在华北克拉通南缘以I-A过渡型和I型花岗岩为主, 可见A型花岗岩. 大岩体以二长花岗岩为主, 小岩体为石英闪长玢岩、角闪石英正长岩、正长花岗岩、霓辉正长岩和花岗斑岩主. 在同位素组成上, $\varepsilon_{Nd}(t)$较低, 为−17.3~−14.0, 模式年龄较大, T_{DM2}=1.88~1.70 Ga.

在北秦岭, 该阶段的岩石类型为二长花岗岩和钾长花岗岩, 具有I型特征. 在同位素组成上, 它们的$^{87}Sr/^{86}Sr(t)$=0.70492~0.70688, $\varepsilon_{Nd}(t)$=−7.1~−1.5, 模式年龄T_{DM2}变化于1.65~0.79 Ga.

秦岭晚中生代花岗质岩石的$\varepsilon_{Nd}(t)$和$\varepsilon_{Hf}(t)$变化较大, $\varepsilon_{Nd}(t)$=−18.7~−1.5, $\varepsilon_{Hf}(t)$=−26.3~0.1. 花岗质岩体的Nd和Hf同位素填图(Wang等, 2015)显示, 同一构造单元中晚中生代花岗质岩石的$\varepsilon_{Nd}(t)$和$\varepsilon_{Hf}(t)$相对一致, 表明秦岭晚中生代花岗质岩石的Nd和Hf同位素组成明显受构造单元深部物质组成控制(王晓霞等, 2011; Wang等, 2013, 2015). 从华北克拉通南缘到南秦岭$\varepsilon_{Nd}(t)$和$\varepsilon_{Hf}(t)$有明显的增高趋势, 反映了其深部物质从华北克拉通南缘到北秦岭有变年轻的趋势(Wang X X等, 2013, 2015).

5.2 晚中生代两阶段岩浆作用的构造背景——环太平洋带?

秦岭晚中生代花岗质岩石从早到晚从I型向I-A过渡型再向A型演变的特征, 可能揭示了构造环境的变化, 可能是侏罗纪与白垩纪之交由挤压向伸展转变的体现. 而这一构造体制的转换与大别造山带(马昌前等, 2003)、中国东部(董树文等, 2007)乃至东北亚地区该时期的构造体制转换与岩浆演变特征(Wang T等, 2011a, 2012, 2015)具有一致性. 这也说明, 该时期秦岭造山带和整个中国东部乃至整个东北亚可能处于同一大陆动力学体系中. 秦岭地区晚中生代(侏罗纪-白垩纪)构造岩浆的演化是整个中国东部构造岩浆演化的一部分, 可能是环太平洋巨型岩浆带的一部分, 为陆缘远程效应或板内岩浆作用产物. 岩浆带的方向与古太平洋带不同可能是岩浆沿着秦岭-大别造山带原有的薄弱地带侵位的结果(王涛等, 2014).

6 结论

依据花岗质岩石的锆石年龄、岩石组合、成因类型演变、变形特征及其区域地质背景, 本文进一步厘定了秦岭造山带花岗质岩浆演化的阶段和构造背景, 总结如下:

(1) 秦岭造山带新元古代花岗质岩石显示由强变形S型花岗岩(979~911 Ma)经弱变形I型花岗岩(894~815 Ma)到不变形A型花岗岩(759~711 Ma)的演变规律, 与同碰撞-后碰撞的环境一致, 显示秦岭古老地块记录了类似于华南及邻区古陆块发育的新元古代构造岩浆事件, 可能是Rodinia超大陆聚散的响应. 该古老地块卷入到了显生宙秦岭造山带, 其新元古代岩浆事件并非秦岭造山作用的产物.

(2) 秦岭古生代岩浆作用可以划分为三阶段(507~470, 460~422和415~400 Ma), 对应古特提斯洋(商丹洋)和二郎坪洋双向俯冲到碰撞过程. 早期(507~470 Ma)发育S和I型花岗岩及壳源深融, 伴随具有弧岩浆特点的基性岩侵位及陆壳物质超高压变质作用, 可能是商丹洋俯冲过程俯冲陆缘(北秦岭陆壳)被拖曳到深部所致; 亦或是秦岭杂岩小陆块与华北克拉通碰撞发生深俯冲的结果. 中期(460~422 Ma)花岗质 岩石以I型为主, 一些岩体侵位中心的东移特点, 与秦岭杂岩向西挤出抬升特点一致揭示了挤压碰撞环境. 之后(415~400 Ma)花岗质岩石形成于后碰撞抬升环境.

(3) 秦岭早中生代花岗岩浆作用分两阶段(250~240和225~185 Ma). 第一阶段花岗质岩石以I型为特点, 可能形成于勉略洋(中特提斯洋)俯冲闭合同碰撞环境; 第二阶段以I型、I-A型为特点, 一些花岗质岩石具有埃达克质(235~215 Ma)和环斑结构花岗岩(210~217 Ma)的特征, 形成于同碰撞晚期或后碰撞环

境. 从第一到第二阶段, 有从I型向I-A过渡演化趋势. 从勉略俯冲碰撞带向北, 所有秦岭早中生代花岗质岩石没发现向北俯冲导致的在年龄和成分上的极性变化.

(4) 秦岭晚中生代花岗质岩石也可分为两阶段(158~130和120~100 Ma). 从早到晚有从I型向I-A过渡型再向A型演变趋势, 可能是晚侏罗世与早白垩世之交由挤压向伸展转变的体现. 它们可能是环太平洋巨型岩浆带的一部分, 为陆缘远程效应或板内岩浆作用的产物. 秦岭晚中生代岩浆带NW向展布与NE向古太平洋岩浆带不同, 可能是岩浆沿秦岭-大别造山带NW向原有构造薄弱带侵位的缘故.

致谢　在秦岭花岗岩的研究过程中卢欣祥教授级高工、张国伟院士、肖庆辉研究员给予了帮组和学术指导, 评审人和郑永飞主编提出了建设性的修改建议, 在此一并表示感谢.

参考文献

毕明波, 李永军, 杨俊泉. 2006. 西秦岭柴家庄、八卦山和天子山花岗岩体地球化学特征. 甘肃地质, 15: 42–46
陈丹玲, 刘良, 孙勇, 等. 2004. 北秦岭松树沟高压基性麻粒岩锆石的LA-ICP-MS U-Pb定年及其地质意义. 科学通报, 49: 1901–1908
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: 159–169
陈衍景. 2010. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用. 中国地质, 37: 854–866
董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 王涛, 胡建民, 陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释. 地质学报, 81: 1449–1461
弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 李犇, 郭波. 2009a. 南秦岭沙河湾、曹坪和柞水岩体锆石U-Pb年龄、Hf同位素特征及其地质意义. 岩石学报, 25: 248–264
弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 李犇, 郭波, 王建其. 2009b. 南秦岭地体东江口及其基性包体的锆石U-Pb年龄和Hf同位素组成. 岩石学报, 25: 3029–3042
韩宝福, 郭召杰, 何国琦. 2010. “钉合岩体”与新疆北部主要缝合带的形成时限. 岩石学报, 26: 2233–2246
胡霭琴, 韦刚健, 江博明, 张积斌, 邓文峰, 陈林丽. 2010. 天山0.9 Ga新元古代花岗岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及其构造意义. 地球化学, 39: 197–212
胡建民, 崔建堂, 孟庆仁, 赵长缨. 2004. 秦岭柞水岩体锆石U-Pb年龄及其地质意义. 地质评论, 50: 323–329
胡能高, 赵东林, 徐柏青, 等. 1994. 北秦岭含柯石英榴辉岩的发现及其意义. 科学通报, 39: 2013
耿元生, 周喜文 2010. 阿拉善地区新元古代岩浆事件及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 29: 779–795
金勤海, 鞠党辰. 1990. 陕西太白南部西坝复式岩体的成因及其与双王金矿床的关系. 现代地质, 4: 65–76
金维浚, 张旗, 何登发, 贾秀勤. 2005. 西秦岭埃达克岩的SHRIMP定年及其构造意义. 岩石学报, 21: 959–966
李淼, 张成立, 苑克增, 晏云翔. 2004. 南秦岭迷坝岩体的地球化学特征及其地质意义. 西北大学学报(自然科学版), 34: 325–330
李曙光, Jagoutz E, 肖益林, 葛宁洁, 陈移之. 1996. 大别山一苏鲁地体超高压变质年代学——I_{Sr}-N d同位素体系. 中国科学D辑: 地球科学, 26: 249–257
李伍平, 王涛, 王晓霞. 2001. 北秦岭灰池子花岗质复式岩体的源岩讨论. 地球科学——中国地质大学学报, 26: 269–278
李永军, 李锁成, 杨俊泉, 刘静, 温志亮, 杨忠民. 2006. 西秦岭党川地区花岗岩体的“解体”及同位素年龄证据. 矿物岩石地球化学通报, 24: 114–120
李永军, 刘静, 李金宝, 杨俊泉. 2007. 西秦岭党川花岗岩基的岩石化学特征. 矿物岩石地球化学通报, 25: 115–120
李注苍, 李永军, 曾俊杰, 冯备战, 毕明波, 杨俊泉. 2005. 西秦岭糜署岭岩浆混合花岗岩地球化学特征及构造意义. 地球科学与环境学报, 27: 12–16
梁莎, 刘良, 张成立, 杨永成, 杨文强, 康磊, 曹玉亭. 2013. 南秦岭勉略构造带高压基性麻粒岩变质作用及其锆石U-Pb年龄. 岩石学报, 29: 1659–1674
刘春花, 吴才来, 郜源红, 雷敏, 秦海鹏, 李名则. 2014. 南秦岭东江口、柞水和梨园堂花岗岩类锆石LA-ICP-MS U-Pb年代学与锆石Lu-Hf同位素组成. 岩石学报, 30: 2402–2420
刘福来, 薛怀民. 2007. 苏鲁-大别超高压岩石中锆石SHRIMP U-Pb定年研究——综述和最新进展. 岩石学报, 23: 2737–2756
刘良, 周鼎武, 王焰, 等. 1996. 东秦岭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, 26(增刊): 56–63
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, 5: 1634–1656

刘哲东, 孙丰月, 马芳芳, 张本龙. 2013. 陕西南秦岭柞水岩体锆石U-Pb年龄、岩石地球化学特征及其地质意义. 世界地质, 32: 236–243
卢欣祥. 1991. 东秦岭花岗岩. 见: 叶连俊, 钱祥麟, 张国伟, 主编. 秦岭造山带学术讨论会论文集. 西安: 西北大学出版社. 250–260
卢欣祥. 1998. 秦岭花岗岩揭示的秦岭构造演化过程——秦岭花岗岩研究进展. 地球科学进展, 2: 213–214
卢欣祥, 董有, 常秋岭, 肖庆辉, 李晓波, 王晓霞. 1996. 秦岭印支期沙河湾奥长环斑花岗岩及其动力学意义. 中国科学D辑: 地球科学, 26: 244–248
卢欣祥, 董有, 尉向东, 肖庆辉, 李晓波, 张宗清. 1999. 东秦岭吐雾山A型花岗岩的时代及其构造意义. 科学通报, 44: 875–978
卢欣祥. 2000. 秦岭花岗岩大地构造图. 西安: 地图出版社
陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 等. 2004. 秦岭造山带中-新元古代(早期)地质演化. 地质通报, 23: 107–112
陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 郝国杰, 周红英, 郭进京, 牛广华, 相振群. 2003. 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
吕星球, 王晓霞, 柯昌辉, 李金宝, 杨阳, 孟旭阳, 聂政融, 章培春. 2014. 北秦岭太白花岗岩体LA-ICP-MS锆石U-Pb测年及其地质意义. 矿床地质, 33: 37–52
骆金诚, 赖绍聪, 秦江峰, 李海波, 李学军, 臧文娟. 2010. 南秦岭晚三叠世胭脂坝岩体的地球化学特征及地质意义. 地质评论, 56: 792–800
骆庭川, 张宏飞, 张本仁. 1993. 北秦岭丹凤-西峡地区古岛弧花岗岩类成分极性及原因探讨. 地球科学, 18: 67–72
马昌前, 杨坤光, 明厚利, 林广春. 2003. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间: 花岗岩的证据. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 817–827
孟旭阳, 王晓霞, 柯昌辉, 李金宝, 杨阳, 吕星球. 2013. 南秦岭华阳花岗岩锆石U-Pb年龄、地球化学和Hf同位素研究: 对五龙岩体群成因的约束. 地质通报, 11: 1704–1719
聂政融, 王晓霞, 柯昌辉, 杨阳, 吕星球, 王顺安, 李金宝. 2015. 西秦岭中川岩体年代学、元素地球化学、Sm-Nd同位素及其与金成矿的关系. 岩石学报, 出版中
裴先治, 丁仨平, 张国伟, 刘会彬, 李佐臣, 李王晔, 刘战庆, 孟勇. 2007. 西秦岭北缘新元古代花岗质片麻岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其地质意义. 地质学报, 81: 772–786
齐秋菊, 王晓霞, 柯昌辉, 李金宝. 2012.华北地块南缘老牛山杂岩体时代、成因及地质意义——锆石年龄、Hf同位素和地球化学新证据. 岩石学报, 28: 279–301
秦江峰, 赖绍聪, 李永飞. 2007. 南秦岭勉县-略阳缝合带印支期光头山埃达克质花岗岩的成因及其地质意义. 地质通报, 26: 466–471
秦江峰. 2010. 秦岭造山带晚三叠世花岗岩类成因机制及深部动力学背景. 博士学位论文. 西安: 西北大学
任厚州, 裴先治, 刘成军, 李佐臣, 李瑞保, 魏博, 陈伟男, 王元元, 胥晓春, 刘图杰, 陈有炘. 2014. 西秦岭天水地区太白花岗岩体LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄、地球化学特征及其地质意义. 地质通报, 33: 1041–1054
孙勇, 卢欣祥, 韩松, 等. 1996. 北秦岭早古生代二郎坪蛇绿岩片的组成和地球化学. 中国科学D辑: 地球科学, 26(增刊): 49–55
田伟, 董申保, 陈咪咪, 朱文萍. 2009. 南秦岭印支期花岗岩带的“地幔印记”. 地学前缘, 16: 119–128
王婧, 张宏飞, 徐旺春, 蔡宏明. 2008. 西秦岭党川地区花岗岩的成因及其构造意义. 地球科学——中国地质大学学报, 33: 474–486
王娟, 李鑫, 赖绍聪, 秦江峰. 2008. 印支期南秦岭西茬河、五龙岩体成因及构造意义. 中国地质, 35: 207–216
王顺安, 王晓霞, 柯昌辉, 杨阳, 聂政融, 吕星球, 李金宝. 2015. 西秦岭闾井花岗岩体锆石U-Pb年龄、岩石地球化学及其意义. 矿物岩石杂志, 出版中
王涛, 胡能高, 裴先治, 等. 1997. 秦岭造山带核部杂岩的组成、构造格局及演化. 地球学报, 18 : 345–351
王涛, 李伍平, 王晓霞. 1998. 秦岭杂岩牛角山花岗质片麻岩体锆石U-Pb同位素年龄及其地质意义. 中国区域地质, 17: 262–265
王涛, 王晓霞, 田伟, 张成立, 李伍平, 李舢. 2009. 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: 地球科学, 39: 949–971
王涛, 张宗清, 王晓霞, 王彦斌, 张成立. 2005. 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, 79: 220–231
王涛, 张国伟, 王晓霞, 李伍平. 1999. 一种可能的多陆块、小洋盆、弱俯冲的动力学特征及其花岗岩演化特点——以秦岭造山带核部花岗岩为例. 南京大学学报, 35: 659–667
王晓霞, 王涛, 卢欣祥, 肖庆辉. 2003. 北秦岭老君山和秦岭梁环斑结构花岗岩及构造环境——一种可能的造山带型环斑花岗岩. 岩石学报, 19: 650–660
王晓霞, 王涛, 齐秋菊, 李舢. 2011. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义. 岩石学报, 27: 1573–1593
王宗起, 闫全人, 闫臻, 王涛, 姜春发, 高联达, 李秋根, 陈隽璐 、张英利 , 刘平, 谢春林, 向忠金. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分. 地质学报, 83: 1527–1546
王艳芬, 邵毅, 蒋少涌, 张遵忠, 胡建, 肖娥, 戴宝章, 李海勇. 2012. 陕西老牛山印支期高Ba-Sr花岗岩成因及其构造指示意义. 高校地质

学报, 18: 133–149
魏均启. 2011. 天水李子园地区碎石子金矿床地质特征及成矿规律研究. 硕士学位论文. 西安: 长安大学
校培喜, 张俊雅, 王洪亮, 雷鸿晏. 2000. 北秦岭太白岩体岩石谱系单位划分及侵位时代确定. 西北地质科学, 21: 37–45
许志琴, 卢一伦, 汤耀庆, 张治洮. 1988. 东秦岭复合山链的形成. 北京: 中国环境科学出版. 1–193
许志琴, 刘福来, 戚学祥, 张泽明, 杨经绥, 曾令森, 梁凤华. 2006. 南苏鲁超高压变质地体中罗迪尼亚超大陆裂解事件的记录. 岩石学报, 22: 1745–1760
杨经绥, 刘福来, 吴才来, 等. 2003. 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, 77: 463–477
杨阳, 王晓霞, 柯昌辉, 聂政融, 王顺安, 吕星球, 李金宝. 2015. 西秦岭碌础坝花岗岩体锆石U-Pb年龄、岩石地球化学及岩浆混合成因. 矿物岩石杂志, 出版中
游振东, 索书田. 1991. 造山带核部杂岩变质过程与构造解析——以东秦岭为例. 武汉: 中国地质大学出版社
翟明国, 胡波, 彭澎, 赵太平. 2014. 华北中-新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件. 地学前缘, 21: 100–119
张成立, 罗静兰, 李淼, 王煜. 2002. 东秦岭西坝花岗岩体及其脉岩的地球化学特征. 西北大学学报(自然科学版), 32: 384–388
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: 2323–2329
张成立, 刘良, 张国伟, 王涛, 陈丹玲, 袁洪林, 柳小明, 晏云翔. 2004. 北秦岭新元古代后碰撞花岗岩的确定及其构造意义. 地学前缘, 11: 33–42
张成立, 张国伟, 晏云翔, 王煜. 2005. 南秦岭勉略带北光头山岩体群的成因及其构造意义. 岩石学报, 21: 711–720
张成立, 王涛, 王晓霞. 2008. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境. 高校地质学报, 14: 304–316
张传林, 李怀坤, 王洪燕. 2012. 塔里木地块前寒武纪地质研究进展评述.地质论评, 58: 923–936
张宏飞, 靳兰兰, 张利, Nigel HARRIS, 周炼, 胡圣虹, 张本仁. 2005. 西秦岭花岗岩类地球化学和Pb-Sr-Nd同位素对基底性质及其构造属性的限制. 中国科学D辑: 地球科学, 35: 914–92
张国伟, 梅志超, 李桃红. 1988. 秦岭造山带的南部古被动大陆边缘. 见: 张国伟, 等, 著. 秦岭造山带的形成及其演化. 西安: 西北大学出版社. 86–98
张国伟, 孟庆任, 于在平, 孙勇, 周鼎武, 郭安林. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征. 中国科学D辑: 地球科学, 26: 193–200
张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社
张宗清, 张国伟, 刘敦一, 等. 2006. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学. 北京: 地质出版社
张彦, 陈文, 郭彦如. 2002. 迷坝花岗岩形成时的构造环境判别及$^{40}Ar/^{39}Ar$年代学研究. 地质评论, 48(增刊): 110–114
郑永飞. 2008. 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, 53: 2129–2152
周争艳, 杨家喜, 徐涛, 聂丽娟, 孙兰兰. 2015. 西秦岭天水地区早中生代草川铺花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义. 地球科学与环境学报, 37: 11–20
Ames L, Tilton G R, Zhou G. 1993. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites. Geology, 21: 339–342
Ames L, Zhou G Z, Xiong B C. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. Tectonics, 15: 472–489
Boger S D, Carson C J, Wilson C J L, Fanning C M. 2000. Neoproterozoicdeformation in the Radok Lake region of the northern Prince Charles Mountains, east Antarctica: Evidence for a single protracted orogenic event. Precambrian Res, 104: 1–24
Chen Z H, Lu S N, Li H K, Li H M, Xiang Z Q, Zhou H Y, Song B. 2006. Constraining the role of the Qinling orogen in the assembly and break-up of Rodinia: Tectonic implications for Neoproterozoic granite occurrences. J Asian Earth Sci, 28: 99–115
Ding L X, Ma C Q, Li W J, Paul T. Robinson, Deng X D, Zhang C, Xu W C. 2011. Timing and genesis of the adakitic and shoshonitic intrusions in the Laoniushan complex, southern margin of the North China Craton: Implications for post-collisional magmatism associated with the Qinling Orogen. Lithos, 126: 212–232
Dong Y P, Liu X M, Zhang G W, Chen Q, Zhang X N, Li W, Yang C. 2011b. Triassic diorites and granitoids in the Foping area: Constraint on the conversion from subduction to collision in the Qinling orogen, China. J Asian Earth Sci, 47: 123–142
Dong Y P, Zhang G W, Neubaue R F, Liu X M, Genser J. 2011a. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis. J Asian Earth Sci, 41: 213–237
Dong Y P, Liu X M, Zhang G W, Chen Q, Zhao X M, Li W, Yang C. 2012. Triassic diorites and granitoids in the Foping area: Constraints on the conversion from subduction to collision in the Qinling orogen, China. J Asian Earth Sci, 47: 123–142
Dong Y P, Zhang X N, Liu X M, Li W, Chen Q, Zhang G W, Zhang H F, Yang Z, Sun S S, Zhang F F. 2015. Propagation tectonics and multiple accretionary processes of the Qinling Orogen. J Asian Earth Sci 104: 84–98
Haapala I, Rämö O T. 1999. Rapakivi granite and related rocks: An introduction. Precambrian Res, 95: 1–7
Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, McWilliams M O, Ireland T, Calvert A, Dong S, Wenk H R, Chateigner D. 2000. Exhumation of

ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing. J Geophys Res, 105: 13339–13364

Jayananda M, Moyen J F, Martin H, Peucat J J, Auvray B, Mahabaleswar B. 2000. Late Archaean (2550–2520 Ma) juvenile magmatism in the Eastern Dharwar craton, southern India: Constraints from geochronology, Nd-Sr isotopes and whole rock geochemistry. Precambrian Res, 99: 225–254

Jiang Y H, Jin G D, Liao S Y, Zhou Q, Zhao P. 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: 183–197

Kröner A, Zhang G W, Sun Y. 1993. Granulites in the Tongbai area, Qinling belt, China: Geochemistry, petrology, single zircon geochronology, and implications for the tectonic evolution of eastern Asia. Tectonics, 12: 245–255

Li N, Chen Y J, Santosh M, Pirajno Franco. 2015. Compositional polarity of Triassic granitoids in the Qinling Orogen, China: Implication for termination of the northernmost paleo-Tethys. Gondwana Res, 27: 244–257

Li S G, Xiao Y L, Liu D L. 1993. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. Chem Geol, 109: 89–111

Li X H, Li W X, Li Z X, Liu Y. 2008. 850–790 Ma bimodal volcanic and intrusive rocks in northern Zhejiang, south China: A major episode of continental rift magmatism during the breakup of Rodinia. Lithos, 102: 341–357

Liu L, Yang J X, Chen D L, Wang C, Zhang C L , Yang W Q, Cao Y T. 2010. Progress and controversy in the study of HP-UHP metamorphic terranes in the west and middle central China orogen. J Earth Sci, 21: 581–597

Liu S W, Li Q G, Tian W, Wang Z Q, Yang P T, Wang W, Bai X, Guo R R. 2011. Petrogenesis of Indosinian granitoids in Middle-Segment of south Qinling tectonic belt: Constranits from Sr-Nd isotopic systematics. Acta Geol Sin-Engl Ed, 85: 610–628

Mattauer M, Matte P, Malavielle J, Tapponnier P, Maluski H, Xu Z Q, Lu Y L, Tang Y Q. 1985. Tectonics of the Qinling belt: Build up and evolution of eastern Asia. Nature, 317: 496–500

Meng Q R, Zhang G W. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling-Dabie orogen, central China. Tectonophysics, 323: 183–196

Meng Q R, Zhang G W. 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation. Geology, 27: 1–96

Qin J F, Lai S C, Diwu C R, Ju Y J, Li Y F. 2010. Magma mixing origin for the postcollisional adakitic monzogranite of the Triassic Yangba pluton, northwesternmargin of the South China Block: Geochemistry, Sr-Nd isotopic, zircon U-Pb dating and Hf isotopic evidences. Contrib Mineral Petrol, 159: 389–409

Qin J F, Lai S C, Rodney G, Diwu C R, Ju Y J, Li Y F. 2009. Geochemical evidence for origin of magma mixing for the Triassic monzonitic granite and its enclaves at Mishuling in the Qinling orogen (central China). Lithos, 112: 259–276

Rapp R P, Yaxley G M, Norman M D. 2008. Continent formation in the Archean and chemical evolution of the cratonic lithosphere. The 9th International Kimberlite Conference Extended Abstract, No. 9IKC-A-00341

Rapp R P. 1995. Amphibole-out phase boundary in partially melted metabasalt, its control over liquid fraction and composition and source permeability. J Geophys Res, 100: 15601–15610

Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, Webb L E, Crimmer J C, McWilliams M O, Ireland T, Dong S, Hu J. 2003. Tectonics of the Qinling (Central China): Tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history. Tectonophysics, 366: 1–53

Sun W D, Li S G, Chen Y D, Li Y J. 2002. Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, central China: Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie orogenic belt. J Geol, 110: 457–468

Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, Gong B, Zha X P, Liu X M. 2008. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the tectonic affinity of the Jiaodong terrane in the Sulu orogen, China. Precambrian Res, 161: 389–418

Wang Q, Wymance D, Li Z X, Baoa Z W, Zhao Z H, Wang Y X, Jian P, Yange Y H, Chen L L. 2010. Petrology, geochronology and geochemistry of ~780 Ma A-type granites in South China: Petrogenesis and implications for crustal growth during the breakup of the supercontinent Rodinia. Precambrian Res, 178: 185–208

Wang T, Guo L, Zhang L, Yang G D, Zhang J J, Tong Y, Ye K, Tomurhuu D. 2015. Timing and evolution of late Mesozoic granitoid magmatisms in the Mongol-Okhotsk belt and its adjacent areas, NE Asia: Implications for transition from contractional thickened to extensional thinning crust and geodynamic settings. J Asian Earth Sci, 97: 365–392

Wang T, Guo L, Zheng Y D, Donskaya T, Dmitry Gladkochub, Zeng L S. 2012. Timing and processes of late Mesozoic mid-lower-crustal extension in continental NE Asia and implications for the tectonic setting of the destruction of the North China Craton: Mainly constrained by zircon U-Pb ages from metamorphic core complexes. Lithos, 154: 315–345

Wang T, Wang X X, Zhang G W, Pei X Z, Zhang C L. 2003. Remnants of a Neoproterozoic collisional orogenic belt in the core of the Phanerozoic Qinling-Dabie orogenic belt (China). Gondwana Res, 26: 699–710

Wang T, Zheng Y D, Zhang J J, Zeng L S, Donskaya T, Guo L, Li J B. 2011a. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes. Tectonics, 30, doi: 10.1029/2011TC002896

Wang X X, Wang T, Castro A, Pedreira R, Lu X X, Xiao Q H. 2011b. Triassic granitoids of the Qinling orogen, central China: Genetic relationship of enclaves and rapakivi-textured rocks. Lithos, 126: 369–387

Wang X X, Wang T, Haapala I. 2008. *P-T* conditions of crystallization and origin of plagioclase-mantled alkali feldspar megacrysts in the Mesozoic granitoids in the Qinling orogen (China). Lithos, 103: 289–308

Wang X X, Wang T, Jahn B M, Hu N G, Chen W. 2007. Tectonic significance of Late Triassic post-collisional lamprophyre dykes from the Qinling Mountains (China): ^{40}Ar-^{39}Ar dating, trace element and Sr-Nd, isotope characteristics. Geol Mag, 144: 1–12

Wang X X, Wang T, Ke C H, Yang Y, Li J B, Li H Y, Qi Q J, Lv X Q. 2015. Nd-Hf isotopic mapping of Late Mesozoic granitoids in the East Qinling orogen, central China: Constrainton the basements of terranes and distribution of Mo mineralization. J Asian Earth Sci, 103: 169–183

Wang X X, Wang T, Zhang C L. 2013. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling Orogen, China: Constraints on orogenic process. J Asian Earth Sci, 72: 129–151

Wu Y B, Zheng Y F, Zhou J B. 2004. Neoproterozoic granitoid in northwest Sulu and its bearing on the North China-South China Block boundary in east China. Geophys Res Lett, 31: L07616, doi: 10.1029/2004GL019785

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 Res, 23: 1402–1428

Xiao B, Li Q G, Liu S W, Wang Z Q, Yang P T, Cheng J L, Xu X Y. 2014. Highly fractionated late Triassic I-type granites and related molybdenum mineralization in the Qinling orogenic belt: Geochemical and U-Pb-Hf and Re-Os isotope constraints. Ore Geol Rev, 56: 220–233

Xue F, Kröner A, Reischmann T, Lerch M F. 1996a. Palaeozoic pre- and post collision calc-alkaline magmatism in the Qinling orogenic belt, central China, a documented by zircon ages on granitoid rocks. J Geol Soc, 153: 409–417

Xue F, Lerch M F, Kröner A, Reischmann T. 1996b. Tectonic evolution of the East Qinling Mountains, China, in the Palaeozoic: A review and new tectonic mode. Tectonophysics, 253: 271–284

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. Int Geol Rev, 47: 327–343

Yang P T, Liu S W, Li Q G, Wang Z Q, Wang R T, Wang W. 2012. Geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopic systematicsof the Ningshan granitoid batholith, middle segement of the south Qinling belt, Central China: Constraints on petrogenesis and geodynamic processes. J Asian Earth Sci, 61: 166–186

Zhang H F, Zhang B R, Nigel Harris, Zhang L, Chen Y L, Chen N S, Zhao Z D. 2006. U-Pb zircon SHRIMP ages, geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of intrusive rocks from the Longshan-Tianshui area in the southeast corner of the Qinlian orogenic belt, China: Constraints on petrigenesis and tectonic affinity. J Asian Earth Sci, 27: 751–764

Zhang S B, Zheng Y F. 2013. Formation and evolution of Precambrian continental lithosphere in South China. Gondwana Res, 23: 1241–1260

Zhang H F, Yu H, Zhou D W, Zhang J, Dong Y P, Zhang G W. 2015. The meta-gabbroic complex of Fushui in north Qinling orogen: A case of syn-subduction mafic magmatism. Gondwana Res, 28: 262–275

Zhao G C, Cao L, Wilde S A, Sun M, Choe W J, Li S. 2006. Imlications basaed on the first SHRIMP U-Pb zircon dating on Precambrian granitoids rocks in North Korea. Earth Planet Sci Lett, 251: 365–370

Zheng Y F, Wu Y B, Chen F K, Gong B, Li L, Zhao Z F. 2004. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. Geochim Cosmochim Acta, 68: 4145–4165

Zheng Y F, Zhou J B, Wu Y B, Xie Z. 2005. Low-grade metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: A passive-margin accretionary wedge deformed during continent subduction. Int Geol Rev, 47: 851–871

Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, Zhang S B. 2008. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China. Precambrian Res, 163: 351–383

Zheng Y F, Chen R X, Zhao Z F. 2009. Chemical geodynamics of continental subduction-zone metamorphism: Insights from studies of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) core samples. Tectonophysics, 475: 327–358

Zheng Y F, Xiao W J, Zhao G C. 2013. Introduction to tectonics of China. Gondwana Res, 23: 1189–1206