中国科学: 地球科学 2015 年 第 45 卷 第 8 期: 1088 ~ 1108
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

桐柏-红安造山带的构造演化: 从大洋俯冲/增生到陆陆碰撞

刘晓春[①*], 李三忠[②], 江博明[③]

① 中国地质科学院地质力学研究所, 国土资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081;
② 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100;
③ 台湾大学地质科学系, 台北 106
* E-mail: liuxchqw@cags.ac.cn

收稿日期: 2014-11-20; 接受日期: 2015-05-26; 网络版发表日期: 2015-07-23
国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2015CB856104, 2009CB825006)、国家自然科学基金项目(批准号: 41472064, 40672047)和国土资源大调查项目(编号: 1212010711812)资助

摘要 桐柏-红安造山带位于秦岭与大别-苏鲁造山带之间, 因其完好地保存了古生代增生造山体系和古生代末-中生代碰撞造山体系而成为了解华北-华南陆块之间构造演化的关键地区. 近20年来的可利用研究资料表明, 桐柏-红安造山带显生宙的总体构造演化框架包括以下4个主要阶段: (1) 早古生代(490~420 Ma)大洋俯冲、岛弧增生与弧陆碰撞, 从而于早古生代末在华北陆块南缘形成一个新的安第斯型大陆边缘; (2) 晚古生代(340~310 Ma)大洋俯冲与增生, 进而在商丹-松扒断裂南侧形成变质时代相同, 但变质作用类型不同的"双变质带", 即被分割的武关-龟山中级变质杂岩带和熊店高压榴辉岩带; (3) 晚古生代末-早中生代(255~200 Ma)大陆俯冲与陆陆碰撞, 通过华南大陆岩板东深西浅的俯冲和多层次拆离/折返形成桐柏高压变质地体和红安高压/超高压变质地体; (4) 晚中生代(140~120 Ma)伸展、大规模岩浆侵位与构造挤出, 造成桐柏-红安-大别高压/超高压变质地体最终出露地表及东宽西窄的构造格局. 然而, 对每一构造演化阶段的具体细节以及早期地质历史的认识方面还存在着诸多争议和(或)难以解释的问题. 未来的研究除在桐柏-红安造山带继续开展深入细致的工作外, 还需与西部"软碰撞"的秦岭造山带和东部"硬碰撞"的大别-苏鲁造山带的研究紧密结合, 以期建立适合于整个秦岭-桐柏-红安-大别-苏鲁造山带从古生代到中生代的经典构造演化模型.

关键词
大洋俯冲
增生
大陆俯冲
碰撞
桐柏-红安造山带

一般将形成于汇聚板块边界的造山带划分为增生造山带(accretionary orogen)和碰撞造山带(collisional orogen)两类(Cawood 等, 2009). 增生造山带形成于大洋岩石圈的持续俯冲时期, 可进一步区分出后撤型(retreating)和推进型(advancing)两种, 分别以西太平洋沟-弧-盆体系和东太平洋安第斯造山带为代表; 碰

中文引用格式: 刘晓春, 李三忠, 江博明. 2015. 桐柏-红安造山带的构造演化: 从大洋俯冲/增生到陆陆碰撞. 中国科学: 地球科学, 45: 1088–1108
英文引用格式: 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: 1477–1496, doi: 10.1007/s11430-015-5145-z

撞造山带形成于大洋岩石圈俯冲结束的陆陆碰撞阶段, 最典型的例子是阿尔卑斯-喜马拉雅造山带. 由于陆陆碰撞之前涉及到洋盆关闭, 所以对一个大陆碰撞带而言, 先期的大洋俯冲和岛弧增生可能是一个必然的构造过程(O'Brien, 2001; 郑永飞等, 2009; Zheng, 2012). 这种复合造山作用常造成碰撞构造叠加在增生构造之上(Brown, 2007, 2008, 2009), 从而为重塑两期造山作用的精细构造过程增加了困难.

延绵 2000 多公里的秦岭-桐柏-红安-大别-苏鲁造山带是由华北和华南两大陆块碰撞所形成的典型碰撞造山带. 与世界上其他大陆碰撞带一样, 其最终碰撞之前也经历了长期的大洋俯冲/增生过程(张国伟等, 2001; Ratschbacher 等, 2003; Dong 等, 2011a; Wu 和 Zheng, 2013), 形成了南北分带的增生造山体系和碰撞造山体系(图 1; Liu X C 等, 2011a, 2013). 由于沿造山带横向上构造过程的差异及抬升的不均一性, 不同部位出露的构造单元有所差别. 东部大别-苏鲁地区代表造山带的根带, 超高压岩石和古老变质基底广泛出露, 但缺乏古生代增生变质岩系. 西部秦岭地区代表造山带的中浅构造层次, 保存了大量的显生宙(变质)地层, 但缺少中生代俯冲杂岩. 位于中部的桐柏-红安地区是连接秦岭和大别-苏鲁地区的构造纽带, 这里既保留了完好的增生构造单元, 碰撞构造单元也出露齐全, 而且, 增生造山体系并未受到后期碰撞造山事件的严重影响. 因此, 桐柏-红安造山带是了解华北-华南陆块之间从增生到碰撞构造演化的关键地区.

对桐柏-红安造山带的国际化研究主要始于红安地块中含柯石英榴辉岩的发现(Zhang 和 Liou, 1994; Cui 和 Wang, 1995), 嗣后人们针对这一地区的高压/超高压变质岩石开展了大量的岩石学、构造地质学和同位素年代学工作. 随着熊店石炭纪榴辉岩的识别(简平等, 1997, 2000)以及桐柏地区榴辉岩的发现(魏春景等, 1999), 大家的研究工作也逐渐西移, 并且研究的注意力已从单纯的大陆深俯冲作用转移到先期的大洋俯冲/增生以及从增生到碰撞的转化过程方面. 本文系统总结了国内外学者近20年来对桐柏-红安造山带的研究成果, 试图在阐明造山带不同构造单元属性的基础上, 探索华北-华南陆块之间从大洋俯冲/增生到陆陆碰撞的发展过程, 并对每一构造演化阶

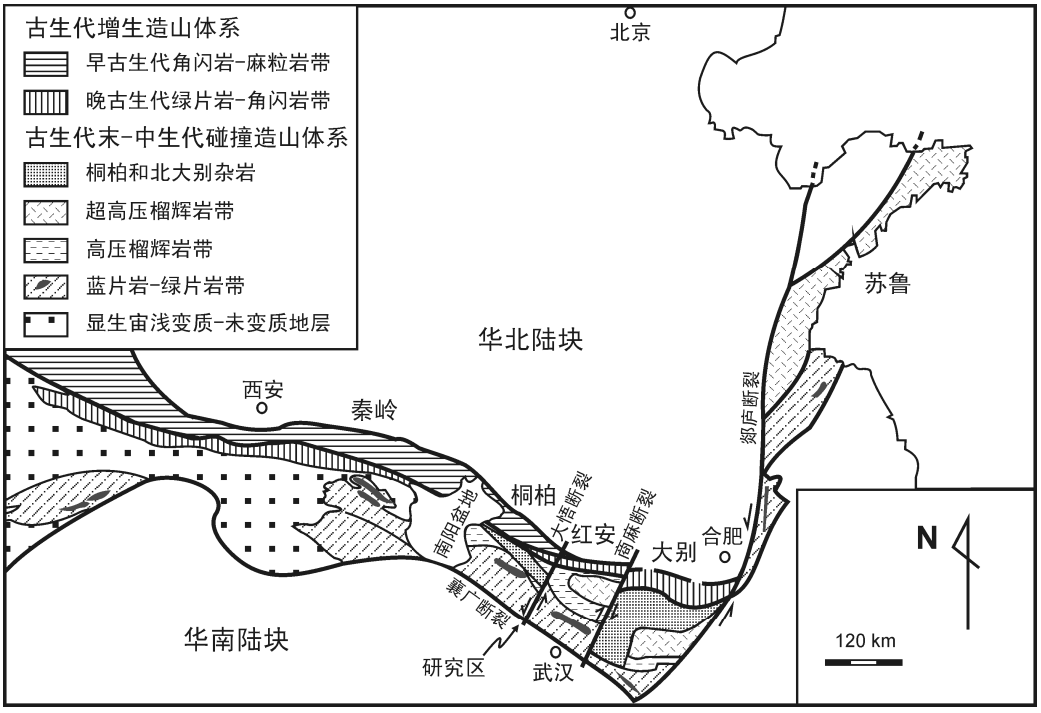

图 1　秦岭-桐柏-红安-大别-苏鲁造山带地质简图

修改自 Liou 等(1996)

段尚未解决或争议的问题进行了讨论和评述, 强调了秦岭-桐柏-红安-大别-苏鲁造山带横向对比研究的重要性.

1 古生代增生造山体系

古生代增生造山体系主要出露在桐柏-红安造山带的北部, 特别是在桐柏以北构造单元发育齐全, 主要包括宽坪岩群、二郎坪岩群、秦岭岩群、龟山杂岩和南湾复理石(图2). 这些构造单元与西侧秦岭造山带中的相同岩群可一一对应, 但在岩石组合、变形特征和变质条件等方面也存在一定的差别. 此外, 位于商丹断裂带北侧的秦岭地区出露有岛弧成因的丹凤岩群(Dong 等, 2011a, 2011b), 但是这类岩石在桐柏地区缺失.

宽坪岩群是桐柏-红安造山带最北部的构造单元, 其向北逆冲于华北陆块南缘之上(Liu X 等, 2012). 岩群的主体为一套角闪岩相变质基性火山岩、陆缘碎屑岩和碳酸盐岩, 在构造上可划分为由斜长角闪岩、二云片岩与大理岩互层组成的下单元和由二云片岩、长英质片麻岩夹斜长角闪岩、大理岩和石英岩组成的上单元. 变质基性火山岩具有 E-MORB 的地球化学特征(Liu 等, 2013). 根据对北秦岭宽坪岩群的同位素年代学研究, 具 N-MORB 属性的岩石形成时代为(943±6) Ma(第五春荣等, 2010), 而具有 E-MORB 属性的岩石形成于(611±13) Ma(闫全人等, 2008). 变质沉积岩中的碎屑锆石含有约 970 和约 790 Ma 两个重要 U-Pb 年龄峰值和一个约 2480 Ma 次级 U-Pb 年龄峰值, 表明宽坪岩群的碎屑物质应来自于北秦岭微陆块(Liu 等, 2013). 最年轻 U-Pb 年龄数据点的加权平均年龄为(577±6) Ma, 说明其沉积时代可能在新元古代晚期. 宽坪岩群下单元的峰期变质条件为 570~610℃、0.93~1.12 GPa, 上单元为 630~650℃、0.66~0.89 GPa, 变质热梯度明显反转(Liu X C 等, 2011a). 变质反应结构和石榴石的成分环带指示宽坪岩群两个单元的角闪岩相变质作用均具有顺时针的 *P-T* 演化轨迹, 反映了从地壳加厚到构造伸展的环境变化. 这期区域角闪岩相变质作用发生在约 440 Ma(Zhai 等, 1998; Liu X C 等, 2011a).

二郎坪岩群以两条南倾左旋韧性剪切带分别与宽坪岩群和秦岭岩群接触(Liu X 等, 2012), 其主要构造框架由一个巨大的背形构造(称朱庄背形)所主导, 北翼被黄岗闪长岩-花岗闪长岩体和桃园花岗闪长岩-花岗岩体所破坏. 我们将背形核部称下单元, 主要由变质酸性火山岩、细粒碎屑岩、大理岩夹变质基性火山岩组成; 背形两翼称上单元, 主要由变质基性火山岩、层状辉长岩、变质酸性火山岩和少量大理岩组成. 在两个单元变质酸性火山岩中获得的原岩年龄分别约为 440 和 490~470 Ma(Liu 等, 2013). 显然, 所谓朱庄背形反映的并非正常火山-沉积层序, 二者之间实际上被一条指向北的拆离断层所分割. 变质基性火山岩发育枕状构造和气孔、杏仁构造, 具有典型岛弧玄武岩的特征(Liu 等, 2013). 变质沉积岩中碎屑锆石的主要 U-Pb 年龄峰值约为 1700, 1100, 970, 800 和 455 Ma, 与秦岭岩群类似, 说明在晚奥陶世之后二郎坪岩群与秦岭微陆块已比较接近. 同位素年代学揭示, 具岛弧特征的黄岗和桃园岩体的侵位时代介于约 450~430 Ma 之间(江思宏等, 2009a; Liu 等, 2013; Wang 等, 2013a). 二郎坪岩群记录的变质演化相对简单, 其峰期 *P-T* 条件为 550~600℃, 0.63~0.77 GPa, 锆石 U-Pb 年龄记录了两组变质时代, 分别约为 440 和 360 Ma(Liu X C 等, 2011a, 2013).

秦岭岩群是一个被断裂围限的 3~5 km 宽的狭长构造带. 该岩群主要由花岗闪长质-花岗质正片麻岩、砂屑副片麻岩、变泥质岩、石英岩、大理岩和镁铁质麻粒岩组成, 这些岩石又被大规模花岗岩和花岗岩脉所侵入. 火成变质岩的原岩侵位年龄约为 490~470 Ma, 而晚期花岗岩和花岗岩脉的侵位时代集中在 430~425 Ma(Kröner 等, 1993; Liu X C 等, 2011a, 2013; Wang 等, 2011; 曲玮等, 2013). 副片麻岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄频率的主要峰值约在 490~450 Ma, 次要峰值约为 950~660 Ma, 其他散布在 2.6~1.0 Ga 之间(Wang 等, 2011). 由于在北秦岭的秦岭岩群中广泛存在含有 1.8~1.6 Ga 年龄碎屑锆石的变质沉积岩和 980~930 Ma 年龄的花岗质片麻岩, 所以一般认为秦岭岩群代表一个古老的、来自于华南陆块或与其具有相同构造属性的微陆块, 在早古生代转变成大陆弧(如张本仁等, 1998; 陆松年等, 2003; Ratschbacher 等, 2003)或者作为俯冲的微陆块(Wu 和 Zheng, 2013). 然而, 老于 490 Ma 的基底岩石在桐柏地区并未发现, 可能暗示桐柏地区的秦岭岩群属于北秦岭微陆块的边缘. 秦岭岩群是桐柏-红安造山带中变质级别最高的构造单元, 其变质条件一般达 770~830℃, 0.69~0.85 GPa(Liu X C 等, 2011a), 并在局部可能记

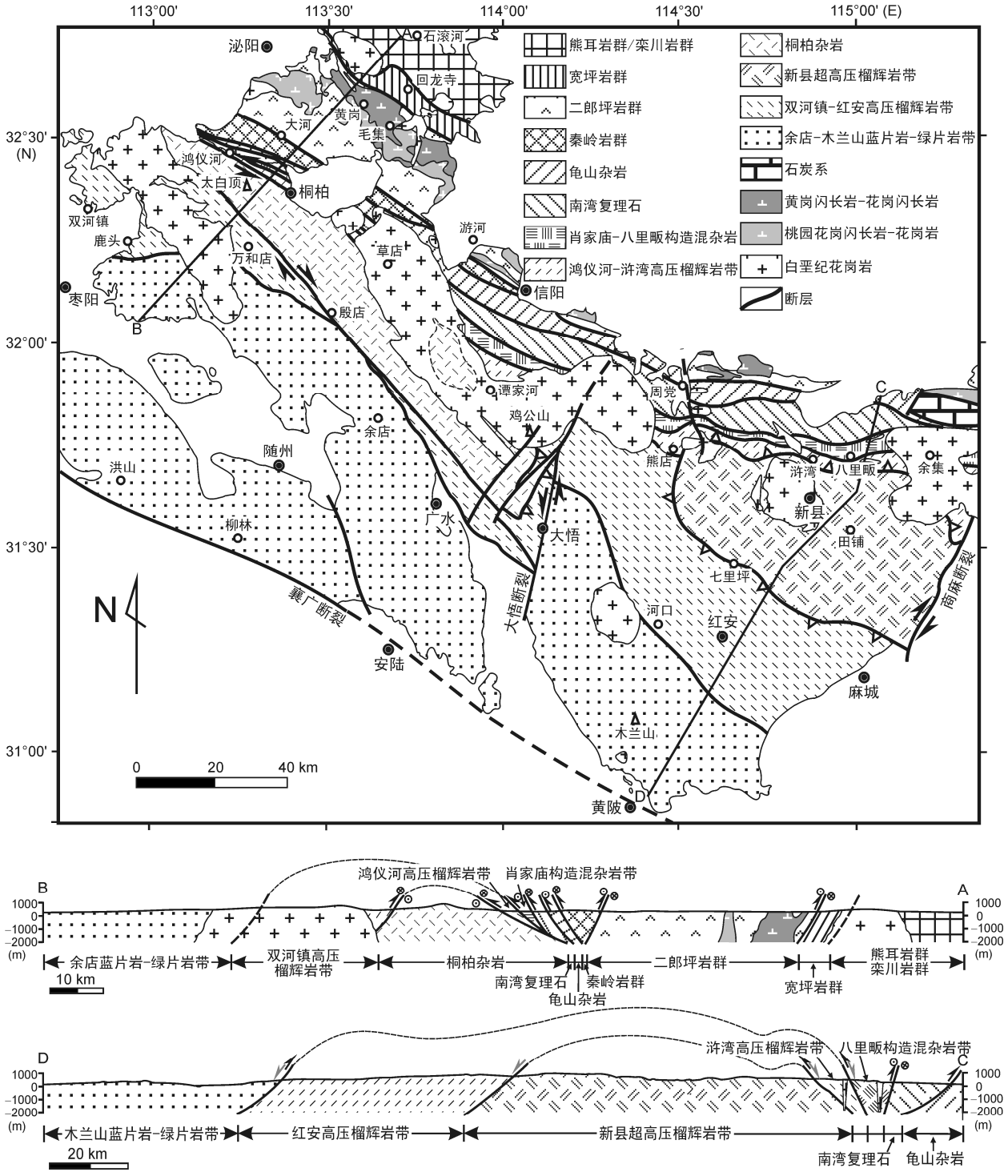

图 2　桐柏-红安造山带地质简图及横穿造山带示意性剖面图

修改自 Liu 等(2004a, 2004b, 2013)

录了超高温变质作用(920~950 ℃, 0.84~1.02 GPa; Xiang 等, 2012, 2014). 变质反应结构指示麻粒岩相岩石经历了逆时针的 *P-T* 演化, 包括 560~580℃, 0.83~0.85 GPa 的角闪岩相退变质作用和<550℃, <0.5 GPa

的绿片岩相叠加. 变质年龄数据主要集中在约 440~420 Ma, 少数延续到约 400 Ma.

龟山杂岩是从信阳群中解体出来的一个构造单元, 它位于松扒断裂南侧, 呈狭长带状分布. 龟山杂岩主要由角闪岩相变质基性岩(斜长角闪岩)、白云石英片岩和白云母构造片麻岩组成, 夹有变泥砂质岩、石英岩和少量变质酸性火山岩. 变形强烈, 从而形成各种眼球状斜长角闪岩或片麻岩(糜棱岩). 同位素年代学、地球化学和变质岩石学研究表明(Liu X C 等, 2011a, 2013), 龟山杂岩中的变质酸性火山岩形成于约 920 Ma, 变质基性火山岩形成于约 470 Ma, 后者显示了岛弧玄武岩的地球化学特征. 变质泥质岩中碎屑锆石主要 U-Pb 年龄峰值约在 2460, 1700, 1070, 970 和 790 Ma, 与二郎坪岩群非常相似, 最年轻的锆石 U-Pb 年龄((530±7) Ma)以及约 490~400 Ma 年龄锆石的缺乏表明其沉积时代为寒武纪. 变质石英岩中碎屑锆石的主要 U-Pb 年龄峰值约在 950, 800, 460 和 430 Ma, 其中最大峰值是约 435 Ma, 这一年龄图谱与南湾复理石基本一致, 可能同为泥盆纪复理石的组成部分. 所以, 龟山杂岩可能不代表一个岩石地层单位, 它实际上是秦岭大陆弧与弧前复理石的混杂体. 龟山杂岩经历了两期(阶段)变质演化, 峰期变质条件为 660~720℃, 0.91~1.15 GPa, 退变质 *P-T* 条件为 590~600℃, 0.63~0.69 GPa, 具有明显的降温减压的特征. 由石榴角闪岩中变质锆石和同变形伟晶岩脉中岩浆锆石限定的变质时代为 340~310 Ma(Liu X C 等, 2011a), 与角闪石的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄基本一致(Zhai 等, 1998).

南湾复理石相当于秦岭造山带中的刘岭群和大别造山带北侧的佛子岭群, 与龟山杂岩构造接触. 主体岩性是泥盆纪复理石建造, 由互层状的变质石英砂岩、泥质粉砂岩、泥质岩和少量硬砂岩组成, 发育韵律性的层理. 这套岩石的变质程度很浅, 达绿片岩-低角闪岩相, 已发现有泥盆纪微古植物化石(高联达和刘志刚, 1988). 南湾复理石中碎屑锆石的主要 U-Pb 年龄峰值约为 970, 840~810, 490~480, 445~440 和 410 Ma(Liu 等, 2013), 与佛子岭群和刘岭群的年代学图谱基本一致(Chen 等, 2003; Dong 等, 2013; 陈龙耀等, 2014), 所以将其归属于泥盆纪浊积岩建造应该没有异议. Yan 等(2012)对刘岭群的研究表明, 其内沉积岩中含有较多火山岩碎屑, 元素地球化学示踪表明其物源主要来源于秦岭大陆弧. 因此, 可以确定南湾复理石及其对应的刘岭群和佛子岭群应属于弧前盆地复理石建造, 而俯冲洋壳可能与华南陆块北缘的被动边缘相连. 南湾复理石中白云母的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 坪年龄为(262±2) Ma(刘晓春等, 2013), 与佛子岭群中白云母的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄(271~261 Ma; 牛宝贵等, 1994; Faure 等, 2003; Ratschbacher 等, 2006)基本一致, 说明其低级变质作用发生在晚二叠世.

2 古生代末-中生代碰撞造山体系

古生代末-中生代碰撞造山体系主要出露在桐柏-红安造山带的南部, 并构成红安造山带的主体部分. 该体系主要包括肖家庙-八里畈构造混杂岩带、鸿仪河-浒湾高压榴辉岩带、桐柏杂岩和新县超高压榴辉岩带、双河镇-红安高压榴辉岩带以及余店-木兰山蓝片岩-绿片岩带. 在宏观上, 桐柏和红安碰撞造山体系的基本构造样式是两个规模宏伟的, 分别以桐柏杂岩和超高压变质岩为核部并向西倾伏的不对称背形构造, 后期的伸展滑脱使其发展成现今所展示的穹隆.

肖家庙-八里畈构造混杂岩带与北部的泥盆纪复理石及南部的高压榴辉岩带均为构造接触. 其主体主要由白(绢)云钠长片麻岩、白云钠长石英片岩、绿片岩/绿帘角闪岩夹白云石英片岩组成, 含有大量变质辉长岩、闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩团块. 变质程度在桐柏地区仅为绿片岩相, 但红安地区达绿帘角闪岩相, 其变质 *P-T* 条件为 460~520℃, 0.91~1.01 GPa(Liu 等, 2004a). 岩石普遍经历了强烈韧性剪切变形作用的改造, 从而形成各种糜棱岩或糜棱岩化岩石. 由于在侵入岩块中获得的同位素年代学数据主要集中在新元古代, 因此一般认为这条构造混杂岩带是未被深俯冲的华南陆壳残片(Hacker 等, 2000; Liu 等, 2004b; 刘贻灿等, 2006, 2010). 然而, 在红安造山带西北角原定远组中, Li 等(1998)获得变质基性火山岩的全岩 Sm-Nd 和 Rb-Sr 年龄约为 445 Ma, 说明该构造带中还有早古生代物质加入. 在桐柏和红安地区获得该带白云母的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄分别为(256±1)和(242±2) Ma(黄少英等, 2006; Li 等, 2011), 代表其构造变形时代. 根据该带变质变形特点, 可将其与大别造山带北麓卢镇关杂岩类比.

鸿仪河-浒湾高压榴辉岩带沿桐柏山和大别山北坡呈狭长带状分布, 岩石的片麻理一般倾向北并陡

立, 主要指示正断下滑特征, 同时也保留了早期向南逆冲和晚期走滑的构造痕迹(刘晓春等, 2002). 主要组成岩石是眼球状花岗质糜棱岩, 其次为白云钠长片麻岩和白云钠长石英片岩夹二长浅粒岩, 局部夹大理岩团块. 榴辉岩及其退变产物石榴角闪岩以团块、透镜体或不规则条带产于白云钠长片麻岩和大理岩中. 基于常规地质温压计估算鸿仪河和浒湾榴辉岩带形成的 *P-T* 条件相似, 分别为 530~610℃, 1.7~2.0 GPa(刘晓春等, 2005; Liu 等, 2008)和 550~570℃, 2.1 GPa(Liu 等, 2004a), 但变质时代略有差异, 前者约为 255 Ma(Liu 等, 2008; Cheng 等, 2011), 后者约为 240 Ma(Liu X C 等, 2012). 此外, 在红安造山带西北角的熊店、胡家湾和苏家河等地还产出一些洋壳成因的榴辉岩, 其原岩年龄约为 425 Ma, 变质时代约 310 Ma, 并含有约 270~250 Ma 的石榴石 Sm-Nd 和 Lu-Hf 同位素年龄记录(简平等, 1997, 2000; Li 等, 2001; Sun 等, 2002; Cheng 等, 2009, 2013; Cheng 和 Vervoort, 2015; Wu 等, 2009; 刘小驰等, 2009; Liu X C 等, 2011b; Peters 等, 2013; Zhou 等, 2015), 峰期变质条件为 590~640℃, 2.0~2.4 GPa(Cheng 等, 2009; Zhou 等, 2014).

桐柏杂岩和新县超高压榴辉岩带虽产在相同的构造部位, 但二者的岩石组成和变质条件存在明显的差别. 桐柏杂岩构成桐柏山背形构造的核部, 其北、南两侧边界分别为左行和右行韧性剪切带. 杂岩的主体是一套强变形的粗粒花岗质岩石(约 80%), 其内发育一系列规模不等的变质岩包体(约 20%), 以细粒 TTG 质正片麻岩、副片麻岩和斜长角闪岩为主, 含少量大理岩和钙硅酸盐岩, 局部见退变榴辉岩露头. 榴辉岩相的 *P-T* 条件大致位于<700℃, >1.2 GPa 范围内, 而角闪岩相退变质发生在 660~700℃, 0.80~1.03 GPa(Liu 等, 2010). 变质基性-酸性侵入岩的原岩主要形成于 930~740 Ma, 变质年龄集中在 230~220 Ma, 变形花岗岩的侵位则发生在约 140 Ma(Liu 等, 2010; Cui 等, 2012). 新县超高压榴辉岩带构成新县背形构造的核部, 主要由钾长花岗质、二长花岗质和花岗闪长质片麻岩组成, 局部产出少量可能属于变质火山岩的细粒白云二长片麻岩夹磁铁二长浅粒岩. 榴辉岩丰富, 其中位于中南部的蓝晶石榴辉岩中含有柯石英或其假象, 峰期变质条件达 600~670℃, 2.6~3.2 GPa, 并具有顺时针演化的 *P-T* 轨迹(Liu 等, 2004a; Wei 等, 2010). 变质火成岩的原岩为新元古代, 而榴辉岩中的锆石记录了约 240, 225 和 213 Ma 等三组变质年龄, 分别对应于高压向超高压榴辉岩相转变、超高压向高压榴辉岩相转变和高压榴辉岩相向角闪岩相转变的时代(Liu 等, 2004b; Wu 等, 2008, 2011; Zhou 等, 2011).

双河镇-红安高压榴辉岩带主体为一套绿帘角闪岩相变质火山-沉积岩系, 以白云钠长片麻岩、白云二长片麻岩及磁铁二长浅粒岩为主, 间有白云石英片岩、大理岩和似层状或透镜状(含石榴)斜长角闪岩. 在桐柏地区双河镇以北大理岩占有较大优势, 在红安地区中部则产出一套二长花岗质片麻岩, 构成一个区域规模的倒转背形构造. 保存较好的榴辉岩以团块、透镜体或不规则条带产于白云钠长片麻岩、白云石英片岩、石墨片岩和大理岩中, 并在红安地区形成七里坪和七角山两条榴辉岩带. 不同榴辉岩带的峰期变质条件略有差别, 七里坪榴辉岩带为 530~560℃, 2.0~2.2 GPa, 七角山榴辉岩带为 490~510℃, 1.9~2.0 GPa, 而双河镇北部的榴辉岩为 460~560℃, 1.3~1.9 GPa(Liu 等, 2004a, 2008). 与鸿仪河-浒湾高压榴辉岩带相似, 双河镇和红安地区榴辉岩的变质时代也略有差别, 前者约为 255 Ma(Liu 等, 2008; Cheng 等, 2011), 后者约为 240 Ma(Cheng 等, 2010a).

余店-木兰山蓝片岩-绿片岩带位于桐柏-红安造山带的南侧, 北界为韧性剪切带, 南界以襄广断裂与华南陆块呈构造接触. 该带下部主要由新元古代双峰式变质火山-沉积岩系组成, 以白云钠长片岩、白云钠长石英片岩为主, 夹大量的钠长浅粒岩、白云石英片岩和绿片岩, 上部则为白(绢)云母片岩、白云石英片岩、绿片岩与大理岩互层, 并构成一个宽缓的向斜构造. 此外, 在红安地区西部还出露大磊山和双峰尖两个花岗片麻岩穹隆, 围绕穹隆发育一套浅海相含磷陆源碎屑沉积变质岩系, 以变质磷块岩-大理岩-石墨片岩-石英片岩-变质长石砂岩组合为特征. 蓝片岩相变质作用的 *P-T* 条件为 350~450℃, 0.7~1.0 GPa, 并普遍存在由蓝片岩相向绿片岩相的转变(刘晓春等, 1989; Liu 等, 2004a). 在蓝片岩中获得的矿物-全岩 Rb-Sr 等时线年龄和多硅白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄分别为(216±10)和(231±1) Ma (Jahn 等, 2005; Li 等, 2011), 应大致代表其变质时代.

3 早古生代大洋俯冲与弧陆碰撞

关于秦岭造山带在古生代时期的构造演化, 国

内一般接受的基本构造模型是张国伟等(1988, 2001)建立的沟-弧-盆构造体系, 即在早古生代华南陆块以北的洋壳向北俯冲过程中, 在秦岭形成大陆弧, 在二郎坪形成弧后盆地, 而宽坪岩群代表华北大陆边缘小洋盆沉积. 这一模型的重要假设前提是北秦岭地体是从华北陆块上分离出来的, 而后在早古生代末通过弧后盆地洋壳的双向俯冲关闭而发生了弧陆碰撞. 然而, 从可利用的资料看, 北秦岭地体的物质组成和地质事件序列与华北陆块存在明显的差别, 而与华南陆块具有密切的构造亲缘关系, 所以有相当一部分学者更倾向于其来源于华南陆块(如张本仁等, 1996, 1998; 陆松年等, 2003; Ratschbacher 等, 2003, 2006; Hacker 等, 2004). 在这些学者的模型中, 一般将二郎坪岩群视为一个洋内岛弧, 而宽坪岩群代表华北被动陆缘或增生楔(Ratschbacher 等, 2003)或弧后盆地沉积(陆松年等, 2003), 秦岭和二郎坪岛弧与华北南缘的碰撞则主要通过一系列大洋壳的向北俯冲来实现.

实际上, 宽坪岩群的时代和构造环境是建立秦岭造山带早古生代构造演化的关键之所在. 在上述两个模型中, 一个重要基础是均将宽坪岩群作为华北陆块南侧的一个构造单元来处理. 然而, 从近年来在变质沉积岩中获得的碎屑锆石的 U-Pb 年龄图谱看(第五春荣等, 2010; Zhu 等, 2011; Liu 等, 2013), 宽坪岩群中碎屑岩的物源应主要来自于秦岭微陆块, 这与二郎坪岩群有类似之处. 如果这一推论是正确的, 那么在宽坪岩群与华北陆块南缘之间应存在一个广阔的大洋盆地. 尽管宽坪岩群中变质基性岩的形成时代尚有早、晚新元古代, 甚至中元古代之争(闫全人等, 2008; 第五春荣等, 2010; Dong 等, 2014), 但地球化学研究已表明其形成于海相环境. 所以, 华北与华南陆块之间的真正界线应位于宽坪岩群以北, 即洛南-栾川断裂.

那么, 被古海洋所分隔的秦岭微陆块与华北陆块是何时拼贴在一起的? 对这一问题争议较大. Dong 等(2014)基于宽坪岩群 1.45 Ga N-MORB 的发现以及北秦岭地体中大量早新元古代(980~910 Ma)火成岩的产出, 提出宽坪洋约在 1000 Ma 开始向南俯冲到秦岭微陆块之下, 约在 900 Ma 与华北陆块碰撞对接在一起. 而后, 在早古生代初, 由于商丹洋的向北俯冲, 在已增生的华北南缘形成新的沟-弧-盆体系, 并在早古生代末再一次发生弧陆碰撞(图 3(a); Dong 等, 2011a). 二次碰撞模型可以解释来源于北秦岭的宽坪岩群与沟-弧-盆体系的不协和性, 但关于第一次碰撞尚需得到变质岩石学证据的支持, 同时宽坪岩群中新元古代 E-MORB 和沉积岩中年轻碎屑锆石的存在也需得到合理地解释. 与此不同, 吴元保等人(吴元保和郑永飞, 2013; Wu 和 Zheng, 2013; Wang 等, 2013b)为解释北秦岭超高压岩石的成因, 提出秦岭微陆块约在 800 Ma 从扬子陆块中分离出来, 在 490~480 Ma 通过陆-陆碰撞增生在华北陆块南缘. 在这个过程中, 北秦岭微陆块俯冲之前的古洋壳俯冲在华北陆块南缘形成以宽坪岩群为代表的构造增生楔, 而秦岭大陆地壳深俯冲到华北陆块之下形成超高压变质岩(图3(b)). 而后的过程与 Dong 等(2011a)的模型相似, 在 450~400 Ma 期间在华北南缘形成新的沟-弧-盆体系, 并由于古特提斯洋(即商丹洋)的向北俯冲导致弧后盆地关闭和弧陆碰撞.

我们基于桐柏造山带的变质岩石学、地球化学和同位素年代学研究, 并结合前人对秦岭造山带的研究资料, 推测华北-华南陆块之间从新元古代到早古生代的构造演化过程如下(图 3(c); Liu X C 等, 2011a, 2013): (1) 在新元古代罗迪尼亚裂解时期, 一个狭长的北秦岭微陆块从华南陆块中分离出来, 二者之间形成初始古特提斯洋, 微陆块北侧具有被动陆缘的性质, 接受沉积而形成宽坪岩群中的陆缘碎屑岩; (2) 在奥陶纪(490~470 Ma), 古特提斯洋向北俯冲引发大规模大陆弧岩浆作用, 使北秦岭微陆块转变成大陆弧, 宽坪岩群与北秦岭微陆块(弧)分离, 在其之间形成二郎坪弧后盆地; (3) 晚奥陶世(450 Ma)之后, 北部大洋的向南俯冲所引发的大陆弧岩浆作用导致黄岗闪长岩-花岗闪长岩体侵入, 并在弧间或弧前环境沉积一套火山岩-碎屑岩沉积(二郎坪岩群中的下单元); (4) 在志留纪(440~420 Ma), 秦岭和二郎坪弧与华北陆块南缘发生碰撞, 洋盆关闭, 下伏的宽坪岩群作为俯冲-增生杂岩记录了顺时针 *P-T* 轨迹, 其变质热梯度的反转可能与相对较热的黄岗杂岩上载有关, 而北秦岭大陆弧则发生了高温麻粒岩相变质作用. 这一时期, 古特提斯洋向北的持续俯冲不仅造成麻粒岩的逆时针 *P-T* 演化, 而且引发新一轮大规模大陆弧岩浆作用. 因此, 在秦岭微陆块增生到华北陆块南缘的同时, 在新增生大陆边缘形成一个安第斯型大陆岩浆弧.

由于在桐柏造山带中, 除在龟山杂岩中获得两

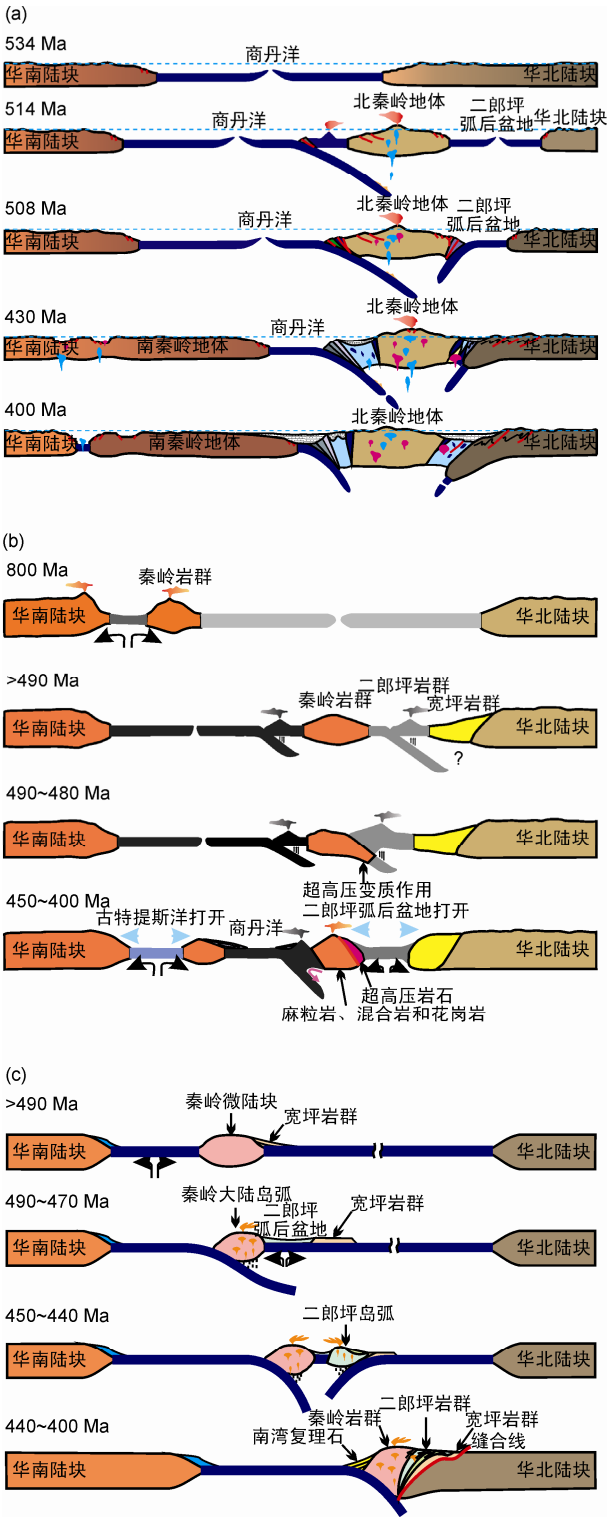

图 3　早古生代华北-华南陆块之间从大洋俯冲/增生到弧陆碰撞的构造演化示意图

(a) 秦岭造山带(Dong 等, 2011a); (b) 秦岭造山带(Wu 和 Zheng, 2013); (c) 桐柏造山带(Liu 等, 2013)

个新元古代的年龄外, 未发现老于 490 Ma 的岩浆和变质岩石, 所以我们的模型只强调了奥陶-志留纪从大洋俯冲、岛弧增生到弧陆碰撞的构造过程, 而未考虑晚寒武世的高压/超高压变质事件, 这是一个重要缺陷. 在秦岭微陆块与华北陆块之间大洋岩石圈的俯冲极性上, 我们倾向于少数学者提出的向南俯冲(如 Xue 等, 1996a, 1996b; Dong 等, 2011a, 2011b), 而未采用多数学者持有的向北俯冲观点(如 Okay 等, 1993; Ratschbacher 等, 2003, 2006; Hacker 等, 2004; Wu 和 Zheng, 2013)或双向俯冲模型(如张国伟等, 2001). 我们认为, 如果华北南缘存在一个北向的俯冲带, 那么难以解释如下几个地质事实: (1) 在华北陆块南缘缺少一个早古生代大陆弧岩浆带; (2) 构造分析表明宽坪岩群逆冲在华北板块之上; (3) 宽坪岩群发育顺时针演化的 *P-T* 轨迹, 证明其并非位于俯冲带的上盘. 桐柏北部各单元的构造样式以及侵入于二郎坪岛弧北缘的黄岗闪长岩-花岗闪长岩体具有岛弧地球化学特征的事实(Zhang 等, 1998; 张利等, 2001)似乎支持这种假设. 当然, 中生代时期太平洋板块西向俯冲到华北陆块之下, 在华北陆块东缘也未发现大陆岩浆弧(Zheng 等, 2013); 在洋壳俯冲过程中可能发生地壳拆离和推覆(Zheng 等, 2005; Tang 等, 2006), 这也可以解释宽坪岩群岩石逆冲到华北南缘之上; 宽坪岩群岩石出现顺时针演化 *P-T* 轨迹, 仅可作为洋壳俯冲过程中沉积岩受到变质作用的证据. 因此, 对这一问题的深入研究和进一步探索仍是必要的.

华北南缘晚古生代末弧陆碰撞模型建立的主要依据是秦岭、二郎坪和宽坪岩群变质时代的高度一致性(440~420 Ma; Liu X C 等, 2011a). 然而, 在二郎坪岩群中还曾获得(359±6)和(356±8) Ma 两个变质锆石 U-Pb 年龄(Liu X C 等, 2011a, 2013)以及多个 377~358 Ma 的白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 坪年龄(江思宏等, 2009b; Zhang 等, 2011; 我们未发表数据), 说明晚泥盆-早石炭世该区还存在一期重要地质事件. 如果华北陆块南缘这时属于安第斯型活动大陆边缘, 那么二郎坪岩群的构造部位相当于前陆(也称后陆)褶皱冲断带的地壳加厚区域(Cawood 等, 2009), 这一区域因放射性衰变产生的内部热可以引发区域变质作用(Le Pichon 等, 1997; McKenzie 和 Priestley, 2008; Brown, 2009). 或者, 这组年龄数据代表二郎坪弧后盆地的最终关闭时间. 在吴元保等人的模型中, 由于商丹洋

(古特提斯洋)的向北俯冲约在 450~400 Ma 形成新的二郎坪弧后盆地, 而后这一盆地在石炭纪关闭(吴元保和郑永飞, 2013; Wu 和 Zheng, 2013). 实际上, 在北秦岭地体中也曾获得一批 368~330 Ma 的黑云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄数据, Dong 等(2011c)将其解释为碰撞后多阶段缓慢抬升的反映, 但少量类似的锆石和独居石 U-Pb 年龄的获得可能暗示一个重新加热事件的存在(Bader 等, 2013a). 显然, 对这一问题也需要做进一步的调查和研究. 值得一提的是, 晚泥盆-早石炭世地质事件与围山城成矿带的金银多金属成矿作用关系密切, 这增加了对其深入研究的重要性.

4 晚古生代大洋俯冲与增生

在秦岭-桐柏-红安-大别-苏鲁造山带中, 相对于早古生代末的弧陆碰撞和早中生代的陆陆碰撞造山事件, 晚古生代的地质演化历史最不清晰. 任纪舜(1980, 1990, 1991)最早指出在商丹断裂南侧的中秦岭存在一个晚古生代构造带. 而后, Mattauer 等(1985)在商丹断裂南侧刘岭群(武关杂岩?)的变泥质岩中获得(314±6) Ma 的黑云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄, Zhai 等(1998)在龟山杂岩斜长角闪岩中获得两个角闪石 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄, 分别为(316±1)和(304±14) Ma, 从而证实秦岭造山带中确实存在晚古生代构造事件, 但这一构造事件的性质并不清楚. 近年来, 对桐柏-红安造山带北部龟山杂岩的研究取得重要进展, 确定龟山杂岩是秦岭大陆弧与弧前复理石的混杂体, 其在 340~310 Ma 经历了角闪岩相变质过程(Liu X C 等, 2011a, 2013). 同时, 对秦岭造山带商丹断裂南侧从刘岭群中解体出来的武关杂岩的研究表明, 该套以沉积岩为主体的中级变质杂岩中含有大陆弧成因变质火成岩, 包括原岩时代分别为(446±2) Ma 的斜长角闪岩、(368±3) Ma 的安山质片麻岩和(351±2) Ma 的糜棱岩化花岗岩脉, 其变质时代约为 320 Ma(Chen 等, 2014). 显然, 武关杂岩应是龟山杂岩的西延部分, 从而确定在秦岭-桐柏-红安-大别造山带中存在一条>500 km 的晚古生代中级变质带. 另一方面说明, 古特提斯洋(商丹洋)向秦岭大陆弧之下的俯冲作用可能从早奥陶世开始后并没有间断, 一直延续到石炭纪.

在晚古生代存在大洋俯冲的另一个证据主要来自于红安造山带北部熊店榴辉岩带的研究. 早期研究认为, 熊店榴辉岩具有大洋玄武岩的地球化学属性(Li 等, 2001; Fu 等, 2002), 但因其可能存在 Si 的富集交代作用而受到质疑(Jahn 等, 2005). 新的元素和同位素分析结果表明, 熊店榴辉岩确实具有类似 E-MORB 的 REE 特点、正的$\varepsilon_{Nd}(t)$值以及高的$\delta^{18}O$ 值(Fu 等, 2002), 微量元素显示 Pb 正异常和 Nb 负异常, 指示其原岩应为洋壳-岛弧过渡环境下的产物(Cheng 等, 2009; Zhou 等, 2015). 榴辉岩中的锆石具有较高的$\varepsilon_{Hf}(t)$值(平均 2.2)和与原岩形成年龄相近的亏损地幔 Hf 模式年龄(950~520 Ma), 由于锆石 Hf 同位素的稳定性, 这样的特征不可能是后期交代作用形成的, 而只可能指示它们的原岩来自于亏损地幔(Wu 等, 2009). 进一步对苏家河榴辉岩开展的地球化学研究工作表明, 苏家河榴辉岩的稀土配分模式为 LREE 亏损型, 未见高场强元素的亏损, $\varepsilon_{Nd}(t)$值介于 4.8~6.0 之间, 属于典型的 N-MORB 型玄武岩(Cheng 等, 2013), 这也是在熊店榴辉岩带中首次识别出 N-MORB 型洋壳, 与熊店榴辉岩的洋壳-岛弧过渡环境有所差异. 所以, 熊店榴辉岩带的原岩应主要是来自于亏损地幔成因的俯冲洋壳. 锆石 U-Pb 定年结果表明, 洋盆主要发育在晚志留世(约 425~410 Ma), 洋壳俯冲及高压变质作用发生在石炭纪(约 310 Ma), 锆石的微量元素特征以及其中的矿物包裹体类型为这一结论提供了具有说服力的证据(Sun 等, 2002; Wu 等, 2009; Zhou 等, 2015). 同时, 新的研究表明, 卷入到石炭纪俯冲的岩石可能也包含少量的陆壳成分(刘小驰等, 2009; Liu X C 等, 2011b; Cheng 和 Vervoort, 2015).

武关-龟山杂岩带与熊店榴辉岩带变质时代基本一致, 说明它们可能具有密切的成因联系. 然而, 一方面, 二者被泥盆纪南湾复理石和具有华南陆块属性的肖家庙-八里畈构造混杂岩带(见下文)所分隔; 另一方面, 熊店榴辉岩带产于三叠纪鸿仪河-浒湾高压榴辉岩带之中. 如果二者形成于同一种构造体制, 那么我们倾向于武关-龟山杂岩带形成于俯冲带上盘而发生中压变质作用, 而熊店榴辉岩带形成于俯冲带下盘而发生高压变质作用, 二者构成了一条变质作用类型不同但时代接近的"双变质带". 为此, 我们建立了如下晚古生代大洋俯冲/增生模型(Liu X C 等, 2011a, 2013). (1) 在石炭纪(340~310 Ma), 古特提斯洋继续向北俯冲到秦岭大陆弧之下, 在地壳深处约 75 km 发生高压变质而形成榴辉岩, 同时上覆的秦岭大陆弧南缘与部分弧前沉积物一起被携带至约

35~40 km 的深处而发生中 *P/T* 变质作用. 在这一俯冲/增生过程中, 一个重要的构造过程是经历高压变质的俯冲洋壳可能在抬升过程中发生了退变质, 但并未折返至地表, 而是滞留在秦岭弧之下形成一个增生楔. (2) 在二叠纪末-三叠纪(255~230 Ma)大陆俯冲过程中, 上覆的石炭纪俯冲增生楔又卷入到了俯冲大陆壳中, 而后二者一同被抬升至地表. 这一模型较好地解释了石炭纪榴辉岩为什么产出在三叠纪高压变质带中, 以及同时代的熊店榴辉岩带与武关-龟山杂岩带分离的原因.

然而, 在秦岭-桐柏-红安-大别造山带中, 大规模岛弧岩浆作用结束于志留-早泥盆世. 如果在石炭纪存在洋壳俯冲, 那么在一般情况下, 在武关-龟山杂岩带的北侧应有同期岛弧岩浆作用发生. 但到目前为止, 除在武关杂岩中发现了个别早石炭世花岗岩脉外(Chen 等, 2014), 在丹凤岩群、秦岭岩群和二郎坪岩群中尚未找到这期岩浆作用的记录, 这对秦岭-桐柏-红安-大别造山带中石炭纪大洋俯冲/增生模型的建立是一个不小的挑战. 根据石炭-二叠纪安山质火山岩在华北陆块内部的广泛产出, Ratschbacher 等(2006)曾推测岛弧岩浆作用可能已向北迁移, 但这种假设显然太过理想化, 缺少可靠的证据. 所以, 寻找石炭纪岛弧岩浆岩仍是今后研究工作中的一项重要任务, 工作的重点应限定在北秦岭变质地体, 特别是在岩浆岩广泛发育的秦岭岩群, 通过细致的同位素年代学工作能否在大量志留-泥盆纪岩体中解体出石炭纪的分子? 如果这一努力不能成功, 那么需对石炭纪岛弧岩浆作用的缺乏给出一个合理的解释.

另一方面, 在武关-龟山杂岩带中级变质岩石和熊店榴辉岩带高压变质岩石中都记录了两期(阶段?)变质演化. 在武关杂岩中, 两期变质反应结构广泛发育在变泥质岩和斜长角闪岩中, 其中的石榴石具有明显的两期生长特征(图 4(a)~(d)), 在变泥质岩中早期矿物组合含有白云母+蓝晶石±十字石, 晚期矿物组合含有细粒斑点状黑云母+夕线石. 在龟山杂岩中, 初步估算两期变质作用的 *P-T* 条件分别为 660~720℃, 0.91~1.15 GPa 和 590~660℃, 0.63~0.69 GPa(Liu X C 等, 2011a), 但这与武关杂岩的矿物组合演化不相适应. 在熊店榴辉岩中, 若干直径达 1.5~3.0 cm 的石榴石巨晶的边缘发育一个形成于放射状后成合晶之后的生长边, 内部则观察到裂隙愈合现象(图 4(e), (f)), 中细粒的石榴石成分也表现出两阶段演化的特征(Zhou 等, 2014). 在年代学图谱上, 两套岩石也都保留了两组年龄记录. 武关-龟山杂岩中角闪石和部分白云母的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄为 310~300 Ma, 而大部分白云母的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄与刘岭群和南湾复理石一致, 主要集中在 260~250 Ma(Zhai 等, 1998; 刘晓春等, 2013; Chen 等, 2014; 我们未发表数据). 与此类似, 熊店榴辉岩带的变质锆石年龄虽约为 310 Ma, 但石榴石-全岩 Lu-Hf 和 Sm-Nd 等时线年龄却集中在 270~250 Ma (Cheng 等, 2009, 2010b, 2013; Cheng 和 Vervoort, 2015; Brouwer 等, 2011). 目前尚不清楚两期变质与两组年龄是否为一一对应关系, 新的石榴石巨晶的 Lu-Hf 定年(核部约 274 Ma, 边部约 258 Ma; 我们未发表数据)也未能证实这种关系. 如果对应, 理想的构造模式是在南北大陆初始碰撞时, 位于俯冲带下盘的熊店榴辉岩带和位于上盘的武关-龟山杂岩带在晚二叠世均再次发生叠加变质. 显然这一假设尚需得到进一步研究工作的证实.

5 晚古生代末-早中生代大陆俯冲与陆陆碰撞

最新的研究结果表明, 华北与华南陆块的最终碰撞起始于晚二叠纪, 而非以前所认为的三叠纪, 主要证据包括: (1) 在桐柏造山带陆壳变质成因的榴辉岩中获得的锆石 U-Pb 和矿物-全岩 Rb-Sr 等时线年龄集中在约 255 Ma(Liu 等, 2008), 这一结果已被石榴石-全岩 Lu-Hf 定年方法所检验(Cheng 等, 2011); (2) 如前所述, 虽然熊店榴辉岩带的锆石 U-Pb 年龄约为 310 Ma, 但石榴石-全岩 Lu-Hf 和 Sm-Nd 等时线或石榴石-绿辉石结线年龄集中在 270~250 Ma(Jahn 等, 2005; Cheng 等, 2009, 2010b, 2013; Cheng 和 Vervoort, 2015; Brouwer 等, 2011), 说明这些洋壳榴辉岩又遭受到陆壳俯冲作用的影响; (3) 刘岭群、南湾复理石、佛子岭群以及部分武关-龟山杂岩中的白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄均集中在约 270~250 Ma(牛宝贵等, 1994; Faure 等, 2003; Ratschbacher 等, 2006; 刘晓春等, 2013; 我们未发表数据), 而这套复理石建造很可能代表俯冲带上盘的增生杂岩(Liu 等, 2013). 所以, 在桐柏-红安造山带中, 洋壳的连续俯冲可能跨越了至少约 60 Myr, 即从约 340~310 Ma 一直持续到约 270~250 Ma, 而后者大致代表华北-华南陆块之间洋-陆转换的时间.

华北-华南陆块之间大陆俯冲与陆陆碰撞的另一

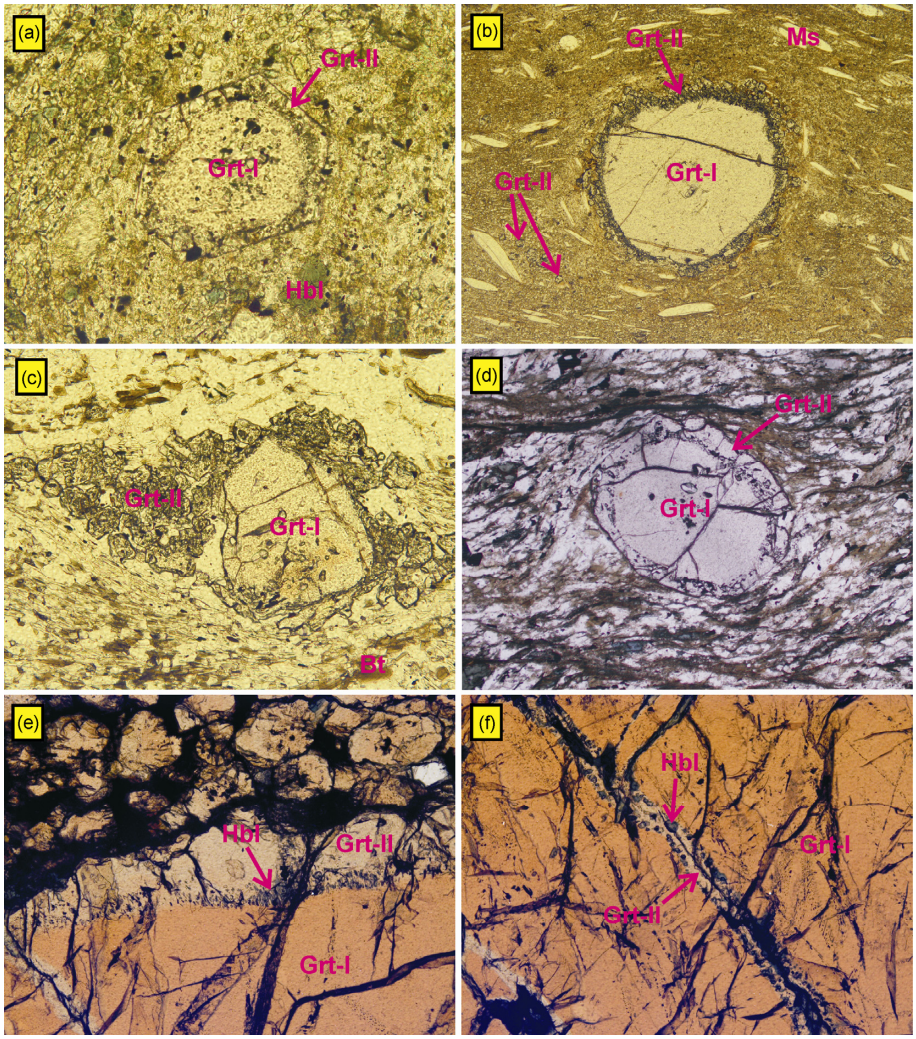

图 4　武关-龟山中级变质杂岩与熊店高压榴辉岩中石榴石的两期(阶段)生长

(a) 武关杂岩石榴角闪岩中石榴石的两期生长; (b), (c) 武关杂岩变泥质岩中石榴石的两期生长; (d) 龟山杂岩变泥质岩中石榴石的两期生长(Liu X C 等, 2011a); (e) 熊店榴辉岩中第二期石榴石生长边; (f) 熊店榴辉岩中石榴石的裂隙愈合现象. Bt, 黑云母; Grt, 石榴石; Hbl, 角闪石; Ms, 白云母

个特性是不同岩片(板)在俯冲和折返过程中的穿时性. 从白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年结果看, 桐柏造山带北部南湾复理石的冷却时代(因变质温度较低, 所以也近似代表变质时代)最早, 为(262±2) Ma(刘晓春等, 2013); 在南侧肖家庙构造混杂岩带中, 黄少英等(2006)获得的白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄为(256±1) Ma; 再向南, 由鸿仪河和双河镇两条榴辉岩带所代表的高压岩片Ⅰ的冷却时代约为 238 Ma(Liu 等, 2008), 这一年龄明显老于桐柏杂岩中由变质岩捕掳体所代表的高压岩片Ⅱ的变质时代(约 230~220 Ma). 这说明, 当高压岩片Ⅱ被俯冲到地壳深处并经受高压变质时, 其上覆的高压岩片Ⅰ已经折返到中上地壳的水平. 为此, 我们建立了桐柏地区二叠纪末-三叠纪大陆板片穿时俯冲拆离/折返构造模式(Liu 等, 2008, 2010; 刘晓春等, 2011, 2013), 即华南陆壳的前缘在俯冲过程中不断发生拆离, 后续的下盘俯冲同时造成上盘岩片向浅部连续折返, 与郑永飞等(2013)建立的大陆俯冲隧道过程中俯冲地壳的层状拆离和差异性依次折返模型类似. 简要过程为: 南湾复理石代表俯冲带上盘的增生楔, 由于华南大陆岩板的俯冲而约在 260 Ma 发生了浅变质作用; 由华南基底组成的肖家庙构造混杂岩代表被刮削在地壳浅部的俯冲增生杂岩,

只经历了绿片岩相-绿帘角闪岩相变质作用, 余店蓝片岩-绿片岩带可能属于该增生杂岩的下部岩片; 约在 255 Ma, 华南陆壳俯冲到最大深度并发生拆离形成高压岩片 Ⅰ, 其在向下俯冲过程中同时造成了上覆岩片的向上折返; 而后高压岩片 Ⅱ 开始俯冲, 并约在 230~220 Ma 到达榴辉岩相变质区域, 这一时期高压岩片 Ⅰ 已折返至中上地壳(图 5(a)). 在这一构造模型中, 一个重要假设是将余店蓝片岩-绿片岩带视作从北部缝合带中挤出的推覆体, 但这种假设显然需要进一步研究工作的检验.

红安造山带不同岩片的拆离/折返过程与桐柏造山带相似(Liu 等, 2004b), 其主要区别在于高压岩片之下是一个超高压岩片(图 5(b)). 然而, 两地相同岩片的变质年代却存在着系统的差别. 与肖家庙单元对应的八里畈构造混杂岩带中的白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄为(242±2) Ma(Li 等, 2011), 与前者相差约 15 Myr. 由浒湾和红安榴辉岩带所代表的高压岩片形成于约 240 Ma(Cheng 等, 2010a; Liu X C 等, 2012; Zhou 等, 2015), 也晚于桐柏造山带的高压岩片 Ⅰ 约 15 Myr. 位于其之下的超高压岩片虽然也有早期约 240 Ma 的年龄记录, 但其峰期变质时代约为 225 Ma(Wu 等, 2008, 2011; Zhou 等, 2011), 与桐柏造山带的高压岩片 Ⅱ 相近. 这些年代学数据说明, 至少在桐柏-红安造山带中未经历超高压变质的岩片于平行造山带的方向上也具有穿时性. 一种可能的解释是, 俯冲陆壳由于被动边缘凹凸程度的影响而在不同地区发生了不等时的俯冲/碰撞及其相应的变质作用. 但如果东西对应的高压岩片属于严格意义上的同一构造岩片,

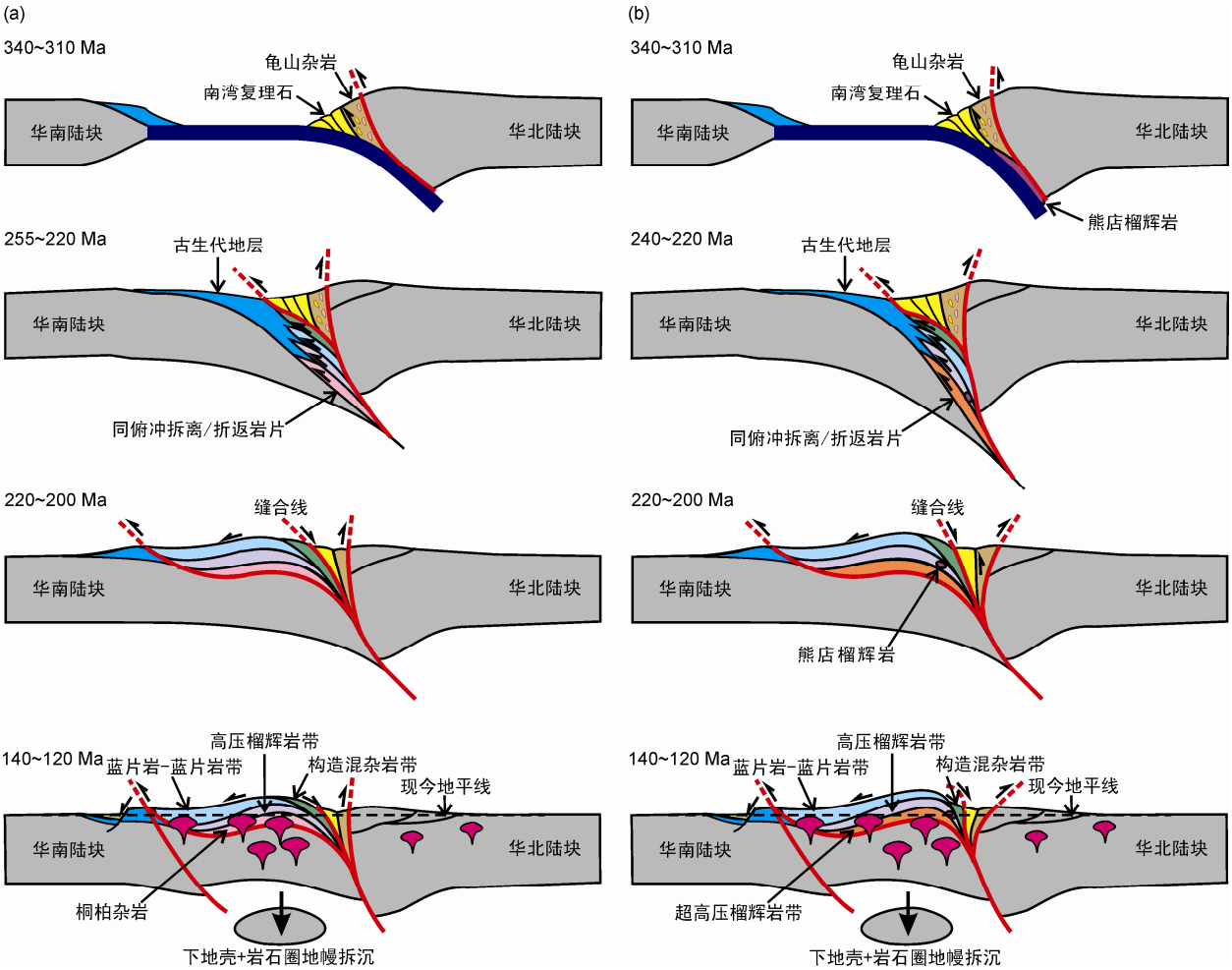

图 5　晚古生代-中生代华北-华南陆块之间从大洋俯冲/增生到陆陆碰撞的构造演化示意图

修改自 Liu 等(2004b, 2013)和刘晓春等(2013). (a) 桐柏造山带; (b) 红安造山带

似乎可以采用翘翘板式俯冲/折返模式来解释(刘晓春等, 2013), 即高压岩片西部约在 255 Ma 首先被俯冲到地壳深处, 此时在红安地区的同一岩片尚位于浅部, 而后当岩片东部约在 240 Ma 发生俯冲时, 岩片西部已被抬升到中上地壳水平. 同样, 构造混杂岩带也于这两个时期分别在桐柏和红安地区就位于上地壳深度. 俯冲岩板的角度向东逐渐变陡可能是这种翘翘板式俯冲/折返得以发生的主要诱因.

岩石学研究表明, 红安造山带超高压变质作用的峰期 *P-T* 条件低于大别和苏鲁造山带(Zhang 和 Liou, 1994; Eide 和 Liou, 2000; Liu 等, 2004a; Liu 和 Ye, 2004; Liu 等, 2006; Wei 等, 2010), 再向西则只有高压变质岩石产出. 一般认为, 这种变质条件的规律性变化缘于造山带向西抬升幅度逐渐变小, 致使超高压岩石在秦岭和桐柏造山带未能出露于地表(如 Zhang 和 Liou, 1994; Hacker 等, 2000; Zhang 等, 2004; Ernst 等, 2007). 然而, 对桐柏杂岩的研究表明, 无论其 NWW-SEE 向伸展的背形构造(穹窿)样式、变形花岗岩+TTG 质片麻岩占优势的变质岩石组合、约 230~220 Ma 榴辉岩/角闪岩相变质以及约 140 Ma 的部分熔融和大规模花岗岩侵入事件, 均可与北大别杂岩相对比(Liu 等, 2010), 其主要差别在于桐柏杂岩处于相对低温低压的变质环境. 如果象 Pb 同位素成分所揭示的那样(张宏飞等, 2001; Zhang 等, 2002, 2003, 2004), 桐柏杂岩中的变质岩包体代表俯冲的中地壳岩石, 那么代表上地壳岩石的超高压岩片似应出现在桐柏杂岩和上覆的高压岩片 I 之间, 但事实并非如此. 所以, 这种变质 *P-T* 环境向西逐渐变低的趋势以及桐柏造山带超高压岩石的缺乏可能缘于华南陆块向西渐浅的俯冲(Liu 等, 2010; 刘晓春等, 2011), 大陆深俯冲作用只局限于红安-大别-苏鲁造山带. 实际上, 桐柏杂岩已出露于地表的本身已证明其抬升幅度至少不低于红安造山带.

6 晚中生代伸展与构造挤出

受我国(亚洲)东部早白垩世区域性伸展作用的影响, 桐柏-红安-大别造山带在这一时期也有大规模的岩浆作用发生. 变形和未变形花岗岩以及少量基性-超基性岩石的侵位时间主要介于 140~120 Ma 之间(Xue 等, 1997; Jahn 等, 1999; Bryant 等, 2004; Zhao 等, 2005; Xie 等, 2006; Xu 等, 2007; 赵子福和郑永飞, 2009; Liu 等, 2010; Cui 等, 2012). 从各种片麻岩中获得的角闪石和白云母的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄范围为 135~119 Ma(Webb 等, 1999; 许光和王二七, 2010; Cui 等, 2012), 说明主期伸展构造变形几乎与岩浆侵入作用同时发生. 构造地质学研究表明, 这期构造变形具有统一的, 上部指向 NWW 的 NWW-SEE 向矿物拉伸线理(Webb 等, 1999, 2001; Faure 等, 1999; Ratschbacher 等, 2000; Lin 等, 2009; Li 等, 2009, 2010; 林伟等, 2013). 桐柏杂岩南北两条边界韧性剪切带具有相反的运动学指向, 分别为大型右行和左行韧性剪切带, 而杂岩的东端发育低角度近南北向韧性剪切变形带(Webb 等, 1999, 2001; Liu X 等, 2011; Cui 等, 2012). 因此, 桐柏杂岩实际上被一个顺造山带的韧性剪切带所围限, 这个韧性剪切带及杂岩体内部韧性变形运动学指示了一个早白垩世由 NWW 向 SEE 方向的构造挤出, 致使高压/超高压变质岩石沿着造山带的方向向上抬升约 10~15 km(Hacker 等, 1995; Ratschbacher 等, 2000), 并最终形成楔形桐柏-红安-大别高压/超高压变质地体. 同时, 桐柏-红安-大别高压/超高压变质地体向东的构造挤出还直接导致了南阳断陷盆地的形成(许光和王二七, 2010), 而郯庐断裂的左行平移使苏鲁造山带与秦岭-桐柏-红安-大别造山带发生错位. 所以, 秦岭-桐柏-红安-大别-苏鲁造山带的现今构造框架和构造组合样式是早白垩世构造伸展的结果.

7 桐柏-红安造山带与秦岭和大别-苏鲁造山带的对比

如前所述, 桐柏造山带北部的古生代增生造山体系与西部秦岭造山带具有较好的对应关系, 其主要差别在于丹凤岩群的缺失以及秦岭岩群中缺少新元古代侵入体和约 500 Ma 高压/超高压变质作用的记录. 尽管二郎坪岩群在红安造山带北部仍有出露, 但秦岭大陆弧似乎已尖灭. 由于大别造山带的北部被合肥盆地所覆盖, 而苏鲁造山带又与华北陆块呈断层接触, 所以这一地区在早中生代是已增生的华北陆块南缘与华南陆块碰撞还是两个古老陆块的直接碰撞尚存在不同的看法(郑永飞等, 2009, 2013; Zheng, 2012). 然而, 碎屑锆石 U-Pb 年代学及地球化学研究表明, 不仅大别造山带北部的佛子岭群的物源来自于古生代活动大陆边缘(Chen 等, 2003), 位于红安和大别造山带交界部位的石炭纪沉积岩的物源也来自

于大陆弧环境(Li 等, 2004; 李任伟等, 2005; 杨栋栋等, 2012). 因此, 类似于北秦岭的早古生代大陆弧或活动大陆边缘可能在大别造山带北部仍然存在. 也就是说, 在这一地区早中生代大陆深俯冲作用发生时的上覆地幔楔仍属于古生代大陆弧地幔, 而非古老的克拉通地幔. 然而, 根据胶莱盆地早白垩世沉积岩的碎屑锆石资料, 这一大陆弧可能没有延伸到苏鲁造山带北侧(Xie 等, 2012), 从而在早中生代发生了两个古老陆块的"硬碰撞"(hard collision).

桐柏-红安-大别-苏鲁造山带中的古生代末-中生代碰撞造山体系被大悟、商麻和郯庐断裂分割为四个块体, 虽然它们在构造单元组成、构造样式、变质条件和变质时代等方面存在某些差异, 但块体之间具有较好的对应和衔接关系. 然而, 越过南阳盆地向西进入到南秦岭构造带, 这种对应关系已基本上不复存在. 从大地构造位置上, 桐柏高压变质地体似乎与陡岭杂岩相连, 但最新的研究表明, 陡岭杂岩是一个被大量新元古代(约 730~700 Ma)闪长岩-花岗闪长岩-花岗岩侵入的、经历新元古代(约 820~780 Ma)变质的新太古代(约 2.5 Ga)岩片(胡娟等, 2013; Bader 等, 2013b; Liu 和 Zhang, 2013; Wu 等, 2014). 虽然 Bader 等(2013b)在副片麻岩和侵入体中识别出几颗三叠纪锆石, 但我们在副片麻岩中获得的黑云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄仍为新元古代((814±4)和(790±4) Ma; 我们未发表数据), 说明早中生代构造-变质事件对其影响非常微弱. 南秦岭构造带与桐柏-红安-大别-苏鲁造山带其他方面的显著差别主要表现在: (1) 保存有大量的显生宙浅变质或未变质地层; (2) 缺少除低温高压蓝片岩之外, 以榴辉岩为特征的高压/超高压变质岩石; (3) 含有一个三叠纪中低压高角闪岩相-麻粒岩相的热穹窿(即佛坪群; 魏春景等, 1998; 魏春景和张翠光, 2002; 杨崇辉等, 1999; 李三忠等, 2003; Dong 等, 2012); (4) 三叠纪侵入体在宁陕断裂以西广泛分布. 上述地质特征常见于增生造山带中, 通常是两大陆块或弧-陆"软碰撞"(soft collision)的反映. 如此看来, 早中生代秦岭-桐柏-红安-大别-苏鲁造山带在横向上可能有东部"硬碰撞"、西部"软碰撞"之别.

此外, 在南秦岭构造带可能还存在另一条早中生代板块缝合带, 即勉略断裂带(Meng 和 Zhang, 1999, 2000; 张国伟等, 2001, 2003; Li 等, 2007). 在张国伟等(2001, 2003)为秦岭造山带构建的早中生代三个板块沿两条俯冲带碰撞造山的模式中, 勉略断裂带代表华南陆块与(南)秦岭微陆块之间的缝合线, 其向东与桐柏-红安-大别造山带南缘的襄广断裂相接. 虽然对勉略缝合带中蛇绿岩时代和成因的认识尚有争议(如冯益民等, 2004; 闫全人等, 2007; 李瑞保等, 2009), 但西秦岭大量三叠纪花岗岩的产出及其时空演化特征似乎支持这里存在一个向北的大洋俯冲带(Li 等, 2015). 然而, 在襄广断裂北侧, 目前尚未发现三叠纪侵入体的踪迹, 也未找到与勉略蛇绿岩匹配的岩石, 所以我们怀疑勉略缝合带是否象有些学者推测的那样, 向东掩盖在大巴山推覆体之下(相当于宁陕断裂的位置)而与商丹断裂相接(Meng 等, 2005; 胡健民等, 2011)? 与此相关的一个重要科学问题是, 出露于造山带南部的三叠纪蓝片岩-绿片岩带的形成到底与哪条缝合带有关? 由于本文研究的重点是桐柏-红安造山带中的中高级变质单元, 所以对蓝片岩-绿片岩带的关注不多. 这一构造单元在宏观上构成一个宽缓的向斜, 在桐柏造山带南部具有向南逆冲的性质, 但在红安造山带南部却以向南倾斜为主, 所以我们将其作为由北部缝合线挤出的推覆体来处理. 然而, 这条低温高压变质带是否也有可能与勉略缝合带的俯冲/增生作用有关(Li 等, 2007, 2010, 2011)? 显然, 这一问题需要进一步的深入研究来加以解决.

一般来讲, 两个大陆板块的最终碰撞常常形成规模宏大的碰撞造山带, 其长度可达几千甚至上万公里, 形成过程可能持续几十至几百个百万年. 两大陆块碰撞之前其间岛弧或微陆块的存无和多少、陆块边界的不规则性以及不同位置构造驱动力的差异, 都可造成碰撞构造体制沿造山带方向(横向)上的差异, 包括俯冲碰撞的穿时性以及"软碰撞"和"硬碰撞"之别. 那么, 如何以造山带中现存的地质体来恢复两大陆块之间构造演化的全过程, 这是地质学家必须努力完成的任务. 对秦岭-桐柏-红安-大别-苏鲁造山带而言, 要想解决上述提及的地质问题, 横向对比研究显得尤为重要, 特别是对差别较大的南秦岭构造带的深入研究急需开展. 实际上, 对秦岭-桐柏-红安-大别-苏鲁造山带的研究程度一直是不均衡的. 在超高压变质岩石被发现之前, 国内外的研究注意力主要集中在北秦岭古生代造山带上, 对造山带从中元古代到古生代的构造发展历史进行了详细的刻画. 超高压变质岩石在大别-苏鲁地区被发现之后, 科学家们的研究兴趣又迅速转移到这种世界罕见的岩石上, 中生代大陆深俯冲和碰撞作用的研究得以深入.

但从总体上看, 对南秦岭构造带中生代大地构造环境的研究相对比较薄弱, 对许多问题的解释也存在很大争议, 从而影响到秦岭-桐柏-红安-大别-苏鲁造山带从古生代到中生代完整构造演化模型的建立. 因此, 以南秦岭构造带中生代构造演化为主要研究目标, 并通过与桐柏-红安-大别-苏鲁造山带中生代碰撞过程的对比来探索沿造山带方向板块俯冲体制的转变机理, 可能会对这条巨型造山带的现今构造样式给出一个合理的回答.

8 结论

从大洋俯冲/增生到陆陆碰撞是一个大陆碰撞造山带的一般构造过程, 这一过程可能持续几十至几百个百万年. 秦岭-桐柏-红安-大别-苏鲁造山带是地球上最典型的大陆碰撞带之一, 它记录了华北与华南两个大陆块之间从新元古代到中生代的长期演化历史. 作为这条巨型造山带的重要组成部分, 桐柏-红安造山带既完好地保存了早期增生造山体系, 也完整地出露了晚期碰撞造山体系, 因而成为揭示华北-华南陆块之间构造演化的理想地区. 研究表明, 桐柏-红安造山带不同时代的地质体从北向南由老到新有规律的排列, 反映其构造演化经历了早古生代(490~420 Ma)的大洋俯冲、岛弧增生与弧陆碰撞、晚古生代(340~310 Ma)的大洋俯冲与增生、晚古生代末-早中生代(255~200 Ma)的大陆俯冲与陆陆碰撞以及晚中生代(140~120 Ma)的岩浆侵入与构造挤出, 陆陆碰撞之前的增生过程持续的时间超过 200 Myr. 桐柏-红安造山带中的碰撞造山体系与东部大别-苏鲁造山带具有较好的对应和衔接关系, 但与秦岭造山带中缺少高压/超高压变质岩石的南秦岭构造带具有显著的差别. 所以, 未来在南秦岭构造带开展与大洋俯冲/增生和大陆俯冲/碰撞密切相关的研究十分必要, 以探索秦岭-桐柏-红安-大别-苏鲁造山带沿造山带方向板块俯冲体制(俯冲东深西浅、碰撞东硬西软)的转变机理, 进而为大陆板块构造的理论研究提供重要信息.

致谢 两位审稿人和郑永飞主编对本文提出了建设性的修改意见, 在此一并致谢.

参考文献

陈龙耀, 罗玉凌, 刘晓春, 曲玮, 胡娟. 2014. 南秦岭刘岭群砂岩碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其构造意义. 地质通报, 33: 1363–1378

第五春荣, 孙勇, 刘良, 张成立, 王洪亮. 2010. 北秦岭宽坪岩群的解体及新元古代 N-MORM. 岩石学报, 26: 2025–2038

冯益民, 曹宣铎, 张二朋. 2004. 勉县-略阳带大地构造属性之探讨. 地质论评, 50: 295–303

高联达, 刘志刚. 1988. 河南信阳群南湾组徽体化石的发现及其地质意义. 地质论评, 34: 421

胡健民, 孟庆任, 陈虹, 武国利, 渠洪杰, 高卫, 陈文. 2011. 秦岭造山带内宁陕断裂带构造演化及其意义. 岩石学报, 27: 657–671

胡娟, 刘晓春, 陈龙耀, 曲玮, 李怀坤, 耿建珍. 2013. 扬子克拉通北缘约 2.5 Ga 岩浆事件: 来自南秦岭陡岭杂岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据. 科学通报, 58: 3579–3588

黄少英, 徐备, 王长秋, 湛胜, 邓荣敬. 2006. 桐柏造山带几何学、运动学和演化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 36: 242–251

简平, 杨巍然, 李志昌, 周慧芳. 1997. 大别山西部熊店加里东期榴辉岩——同位素年代学的证据. 地质学报, 71: 133–141

简平, 刘敦一, 杨巍然, Williams I S. 2000. 大别山西部河南罗山熊店加里东期榴辉岩锆石特征及 SHRIMP 分析结果. 地质学报, 74: 259–264

江思宏, 聂凤军, 方东会, 刘翼飞. 2009a. 河南桐柏围山城地区侵入岩年代学与地球化学特征. 地质学报, 83: 1011–1029

江思宏, 聂凤军, 方东会, 刘翼飞, 张万益, 许东青, 张志军. 2009b. 河南桐柏围山城地区主要金银矿床的成矿年代学研究. 矿床地质, 28: 63–72

李瑞保, 裴先治, 丁仨平, 李佐臣, 冯建赟, 孙雨, 张亚峰, 刘战庆. 2009. 西秦岭南缘勉略带琵琶寺基性火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 地质学报, 83: 1612–1623

李任伟, 孟庆任, 李双应. 2005. 大别山及邻区侏罗和石炭纪时期盆-山耦合: 来自沉积记录的认识. 岩石学报, 21: 1133–1143

李三忠, 赖绍聪, 张国伟, 李亚林, 程顺有. 2003. 秦岭勉(县)略(阳)缝合带及南秦岭地块的变质动力学研究. 地质科学, 38: 137–154

林伟, 冀文斌, 石永红, 褚杨, 李秋立, 陈泽超, 刘飞, 王清晨. 2013. 高压-超高压变质岩石多期构造折返: 以桐柏-红安-大别造山带为例. 科学通报, 58: 2259–2265

刘晓春, 康维国, 周高志, 韩守荣. 1989. 桐柏山-大别山南缘蓝片岩主要矿物研究及变质作用演化. 长春地质学院学报(鄂皖蓝片岩带地质专辑), 41–56

刘晓春, 李三忠, 刘建民, 董树文, 薛怀民, 曲玮. 2002. 西大别横穿造山带实测地质剖面的基本构造样式. 地质通报, 21: 536–540

刘晓春, 娄玉行, 董树文. 2005. 桐柏山地区低温榴辉岩变质作用的 *P-T* 轨迹. 岩石学报, 21: 1081–1093
刘晓春, 江博明, 李三忠, 崔建军, 刘鑫, 娄玉行, 曲玮. 2011. 桐柏高压变质地体: 对桐柏-大别-苏鲁高压/超高压变质带构造框架和俯冲/折返机制的制约. 岩石学报, 27: 1151–1162
刘晓春, 江博明, 李三忠. 2013. 大陆岩板俯冲与折返的穿时性: 桐柏造山带晚二叠-三叠纪高压变质地体提供的制约. 科学通报, 58: 2251–2258
刘小驰, 吴元保, 汪晶, 彭敏, 焦文放. 2009. 西大别浒湾变质带洋壳和陆壳耦合俯冲的锆石 U-Pb 年龄纪录及其动力学意义. 岩石学报, 25: 2209–2223
刘贻灿, 李曙光, 古晓峰, 侯振辉. 2006. 北淮阳王母观橄榄辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 科学通报, 51: 2175–2180
刘贻灿, 刘理湘, 古晓峰, 李曙光, 刘佳, 宋彪. 2010. 大别山北淮阳带西段新元古代浅变质花岗岩的发现及其大地构造意义. 科学通报, 55: 2391–2399
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. 194
牛宝贵, 富云莲, 刘志刚, 任纪舜, 陈文. 1994. 桐柏-大别山主要构造热事件及 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 地质定年研究. 地球学报, 15: 20–34
曲玮, 刘晓春, 胡娟, 李怀坤, 耿建珍. 2013. 桐柏地区秦岭岩群中碱性岩脉的锆石 U-Pb 年龄: 对麻粒岩相变质时代的约束. 岩石学报, 29: 3080–3086
任纪舜, 姜春发, 张正坤, 秦德余. 1980. 中国大地构造及其演化. 北京: 科学出版社. 124
任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚, 刘凤仁. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社. 205
任纪舜, 张正坤, 牛宝贵, 刘志刚. 1991. 论秦岭造山带——中朝与扬子陆块的拼合过程. 见: 叶连俊, 钱祥麟, 张国伟, 主编. 秦岭造山带学术讨论会论文选集. 西安: 西北大学出版社. 99–110
魏春景, 杨崇辉, 张寿广, 李荣社. 1998. 南秦岭佛平地区麻粒岩的发现及其地质意义. 科学通报, 43: 982–985
魏春景, 吴玉新, 倪云燕, 陈斌, 王式洸, 常宗广. 1999. 河南桐柏地区榴辉岩的特征及其地质意义. 科学通报, 44: 1882–1885
魏春景, 张翠光. 2002. 陆-陆碰撞造山带中压型变质作用的 *P-T* 轨迹——以南秦岭佛坪地区为例. 岩石矿物学杂志, 21: 356–362
吴元保, 郑永飞. 2013. 华北陆块古生代南向增生与秦岭-桐柏-红安造山带构造演化. 科学通报, 58: 2246–2250
许光, 王二七. 2010. 桐柏杂岩的中生代隆升机制及其与南阳盆地沉降的耦合关系. 地质科学, 45: 626–652
闫全人, 王宗起, 闫臻, 向忠全, 陈隽璐, 王涛. 2007. 秦岭勉略构造混杂带康县-勉县段蛇绿岩块-镁铁质岩块的 SHRIMP 年代及其意义. 地质论评, 53: 755–764
闫全人, 王宗起, 闫臻, 王涛, 陈隽璐, 向忠金, 张宗清, 姜春发. 2008. 秦岭造山带宽坪群中的变铁镁质岩的成因、时代及其构造意义. 地质通报, 27: 1475–1492
杨崇辉, 魏春景, 张寿广, 李惠民, 万渝生, 李荣社. 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: 173–179
杨栋栋, 李双应, 赵大千, 王松, 杜叶龙, 赵万维. 2012. 大别山北缘石炭系碎屑岩地球化学及碎屑锆石年代学分析及其对物源区大地构造属性判别的制约. 岩石学报, 28: 2619–2628
张本仁, 张宏飞, 赵志丹, 凌文黎. 1996. 东秦岭及邻区壳幔地球化学分区和演化及其大地构造意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 26: 201–208
张本仁, 韩吟文, 许继峰, 欧阳建平. 1998. 北秦岭新元古代前属扬子板块的地球化学证据. 高校地质学报, 4: 369–382
张国伟, 等. 1988. 秦岭造山带形成及其演化. 西安: 西北大学出版社. 192
张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉, 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社. 885
张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 郭安林, 孟庆任, 刘少锋, 程顺有, 姚安平, 张宗清, 裴先治, 李三忠. 2003. 秦岭-大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带. 中国科学 D 辑: 地球科学, 33: 1121–1135
张宏飞, 高山, 张本仁. 2001. 大别山地壳结构的 Pb 同位素地球化学示踪. 地球化学, 30: 395–401
张利, 周炼, 王林森, 凌文黎. 2001. 桐柏北部黄岗侵入杂岩岛弧构造环境的厘定. 矿物岩石地球化学通报, 20: 245–247
赵子福, 郑永飞. 2009. 俯冲大陆岩石圈重熔: 大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩成因. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39: 888–909
郑永飞, 叶凯, 张立飞. 2009. 发展板块构造: 从洋壳俯冲到大陆碰撞. 科学通报, 54: 1799–1803
郑永飞, 赵子福, 陈伊翔. 2013. 大陆俯冲隧道过程: 大陆碰撞过程中的板块界面相互作用. 科学通报, 58: 2233–2239
Bader T, Franz L, Ratschbacher L, de Capitani C, Webb A A G, Yang Z, Pfänder J A, Hofmann M, Linnemann U. 2013a. The heart of China revisited: II Early Paleozoic (ultra)high-pressure and (ultra)high-temperature metamorphic Qinling orogenic collage. Tectonics, 32: 922–947
Bader T, Ratschbacher L, Franz L, Yang Z, Hofmann M, Linnemann U, Yuan H L. 2013b. The heart of China revisited: I. Proterozoic tectonics of the Qin mountains in the core of supercontinent Rodinia. Tectonics, 32: 661–687
Brouwer F M, Groen M, Nebel O, Wijbrans J R, Qiu H N, Yang Q J, Zhao L H, Wu Y B. 2011. Coherence of the Dabie Shan UHPM terrane investigated by Lu-Hf and $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of eclogites. In: Dobrzhinetskaya L F, Faryad S W, Wallis S, et al., eds. UHP Metamorphism, 25

Years After Findings of Coesite and Diamond. Amsterdam: Elsevier. 325–357

Brown M. 2007. Metamorphic conditions in orogenic belts: A record of secular change. Inter Geol Rev, 49: 193–234

Brown M. 2008. Characteristic thermal regimes of plate tectonics and their metamorphic imprint throughout Earth history. In: Condie K, Pease V, eds. When Did Plate Tectonics Begin? Geol Soc Am Spec Pap, 440: 97–128

Brown M. 2009. Metamorphic patterns in orogenic systems and the geological record. In: Cawood P A, Kröner A, eds. Earth Accretionary Systems in Space and Time. Geol Soc London Spec Pub, 318: 37–74

Bryant D L, Ayers J C, Gao S, Miller C F, Zhang H F. 2004. Geochemical, age, and isotopic constraints on the location of the Sino-Korean/Yangtze suture and evolution of the Northern Dabie complex, east central China. Geol Soc Am Bull, 116: 698–717

Cawood P A, Kroner A, Collins W J, Kusky T M, Mooney W D, Windley B F. 2009. Accretionary orogens through Earth history. In: Cawood P A, Kröner A, eds. Earth Accretionary Systems in Space and Time. Geol Soc London Spec Pub, 318: 1–36

Chen F K, Guo J H, Jiang L L, Siebel W, Cong B, Satir M. 2003. Provenance of the Beihuaiyang lower-grade metamorphic zone of the Dabie ultrahigh-pressure collisional orogen, China: Evidence from zircon ages. J Asian Earth Sci, 22: 343–352

Chen L Y, Liu X C, Qu W, Hu J. 2014. U-Pb zircon ages and geochemistry of the Wuguan complex in the Qinling orogen, central China: Implications for the late Paleozoic tectonic evolution between the Sino-Korean and Yangtze cratons. Lithos, 192-195: 192–207

Cheng H, King R L, Nakamura E, Vervoort J D, Zheng Y F, Ota T, Wu Y B, Kobayashi K, Zhou Z Y. 2009. Transitional time of oceanic to continental subduction in the Dabie orogen: Constraints from U-Pb, Lu-Hf, Sm-Nd and Ar-Ar multichronometric dating. Lithos, 110: 327–342

Cheng H, DuFrane S A, Vervoort J D, Nakamura E, Li Q L, Zhou Z Y. 2010a. The Triassic age for oceanic eclogites in the Dabie orogen: Entrainment of oceanic fragments in the continental subduction. Lithos, 117: 82–98

Cheng H, DuFrane S A, Vervoort J D, Nakamura E, Zheng Y F, Zhou Z Y. 2010b. Protracted oceanic subduction prior to continental subduction: New Lu-Hf and Sm-Nd geochronology of oceanic-type high-pressure eclogite in the western Dabie orogen. Am Miner, 95: 1214–1223

Cheng H Zhang C, Vervoort J D, Wu Y B, Zheng Y F, Zheng S, Zhou Z Y. 2011. New Lu-Hf geochronology constraints the onset of continental subduction in the Dabie orogen. Lithos, 121: 41–54

Cheng H, Zhang Z, Vervoort J D, Zhou Z Y. 2013. New Lu-Hf and Sm-Nd geochronology constraints the subduction of oceanic crust during the Carboniferous-Permian in the Dabie orogen. J Asian Earth Sci, 63: 139–150

Cheng H, Vervoort J D. 2015. Combined geochemistry and geochronology constrains coupled subduction of oceanic and continental crust in the Huwan shear zone, central China. Am Miner, 100: 181–194

Cui J J, Liu X C, Dong S W, Hu J M. 2012. U-Pb and $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology of the Tongbai complex, central China: Implications for Cretaceous exhumation and lateral extrusion of the Tongbai-Dabie HP/UHP terrane. J Asian Earth Sci, 47: 155–170

Cui W Y, Wang X Y. 1995. Eclogites of southern Henan and northern Hubei Provinces, central China. Island Arc, 4: 347–361

Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, Liu X M, Genser J, Hauzenberger C. 2011a. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis. J Asian Earth Sci, 41: 213–237

Dong Y P, Zhang G W, Hauzenberger C, Neubauer F, Yang Z, Liu X M. 2011b. Paleozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: Evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks. Lithos, 122: 39–56

Dong Y P, Genser J, Neubauer F, Zhang G W, Liu X M, Yang Z, Heberer B. 2011c. U-Pb and $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronological constraints on the exhumation history of the North Qinling terrane, China. Gondwana Res, 19: 881–893

Dong Y P, Liu X M, Zhang G W, Chen Q, Zhang X N, 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, Liu X M, Neubauer F, Zhang G W, Tao N, Zhang Y G, Zhang X N, Li W. 2013. Timing of Paleozoic amalgamation between the North China and South China Blocks: Evidence from detrital zircon U-Pb ages. Tectonophysics, 586: 173–191

Dong Y P, Yang Z, Liu X M, Zhang X N, He D F, Li W, Zhang F F, Sun S S, Zhang H F, Zhang G W. 2014. Neoproterozoic amalgamation of the Northern Qinling terrain to the North China Craton: Constraints from geochronology and geochemistry of the Kuanping ophiolite. Precambrian Res, 255: 77–95

Eide E A, Liou J G. 2000. High-pressure blueschists and eclogites in Hong'an: A frame work for addressing the evolution of high- and ultrahigh-pressure rocks in central China. Lithos, 52: 1–22

Ernst W G, Tsujimori T, Zhang R, Liou J G. 2007. Permo-Triassic collision, subduction-zone metamorphism, and tectonic exhumation along the East Asian continental margin. Ann Rev Earth Planet Sci, 35: 73–110

Faure M, Lin W, Shu L S, Sun Y, Schärer U. 1999. Tectonics of the Dabieshan (eastern China) and possible exhumation mechanism of ultra high-pressure rocks. Terra Nova, 11: 251–258

Faure M, Lin W, Schärer U, Shu L S, Sun Y, Arnaud N. 2003. Continental subduction and exhumation of the UHP rocks: Structural and

geochronological insights from the Dabieshan (East China). Lithos, 70: 213–241
Fu B, Zheng Y F, Touret J L R. 2002. Petrological, isotopic and fluid inclusion studies of eclogites from Sujiahe, NW Dabie Shan (China). Chem Geol, 187: 107–128
Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L E, Dong S W. 1995. What brought them up? Exhumation of the Dabie Shan ultrahigh-pressure rocks. Geology, 23: 743–746
Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L E, McWilliams M O, Ireland T, Calvert A, Dong S W, 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
Hacker B R, Ratschbacher L, Liou J G. 2004. Subduction, collision and exhumation in the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen. In: Malpas J, Fletcher C J N, Ali J R, et al., eds. Aspects of the Tectonic Evolution of China. Geol Soc London Spec Pub, 226: 157–175
Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, Tsai C H. 1999. Crustal-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. Chem Geol, 157: 119–146
Jahn B M, Liu X C, Yui T F, Morin N, Coz B L M. 2005. High-pressure/ultrahigh-pressure eclogites from the Hong'an Block, east-central China: Geochemical characterization, isotope disequilibrium and geochronological controversy. Contrib Mineral Petrol, 149: 499–526
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
Le Pichon X, Henry P, Goffe B. 1997. Uplift of Tibet: From eclogites to granulites-implications for the Andean Plateau and the Variscan belt. Tectonophysics, 273: 57–76
Li N, Chen Y J, Santosh M, Pirajno F. 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 R W, Li S Y, Jin F Q, Wan Y S, Zhang S K. 2004. Provenance of Carboniferous sedimentary rocks in the northern margin of Dabie Mountains, central China and the tectonic significance: Constraints from trace elements, mineral chemistry and SHRIMP dating of zircons. Sediment Geol, 166: 245–264
Li S G, Han W, Huang F, Zheng Y F. 1998. Sm-Nd and Rb-Sr ages and geochemistry of volcanics from the Dingyuan formation in Dabie Mountains, central China: Evidence to the Paleozonic magmatic arc. Sci Geol Sin, 7: 461–470
Li S G, Huang F, Nie Y H, Han W L, Long G, Li H M, Zhang S Q, Zhang Z H. 2001. Geochemical and Geochronological constraints on the suture location between the North and South China Blocks in the Dabie orogen, central China. Phys Chem Earth, 26: 655–672
Li S Z, Kusky T M, Wang L, Zhang G W, Lai S C, Liu X C, Dong S W, Zhao G C. 2007. Collision leading to multiple-stage large-scale extrusion in the Qinling orogen: Insights from the Mianlue suture. Gondwana Res, 12: 121–143
Li S Z, Kusky T M, Liu X C, Zhang G W, Zhao G C, Wang L, Wang Y J. 2009. Two-stage collision-related extrusion of the western Dabie HP-UHP metamorphic terranes, central China: Evidence from quartz *c*-axis fabrics and structures. Gondwana Res, 16: 294–309
Li S Z, Kusky T M, Zhao G C, Liu X C, Zhang G W, Kopp H, Wang L. 2010. Two-stage Triassic exhumation of HP-UHP terranes in the western Dabie orogen of China: Constraints from structural geology. Tectonophysics, 490: 267–293
Li S Z, Kusky T M, Zhao G C, Liu X C, Wang L, Kopp H, Hoernle K, Zhang G W, Dai L M. 2011. Thermochronological constraints on two-stage extrusion of HP/UHP terranes in the Dabie-Sulu orogen, east-central China. Tectonophysics, 504: 25–42
Lin W, Shi Y, Wang Q. 2009. Exhumation tectonics of the HP-UHP orogenic belt in eastern China: New structural-petrological insights from the Tongcheng massif, eastern Dabieshan. Lithos, 109: 285–303
Liou J G, Zhang R Y, Wang X M, Eide E A, Ernst W G, Maruyama S. 1996. Metamorphism and tectonics of high-pressure and ultra-high-pressure belts in the Dabie-Sulu region, China. In: Yin A, Harrison M T, eds. The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge: Cambridge University Press. 300–344
Liu J B, Ye K. 2004. Transformation of garnet epidote amphibolite to eclogite, western Dabie Mountains, China. J Metamorph Geol, 22: 383–394
Liu, J B, Ye K, Sun M. 2006. Exhumation *P-T* path of UHP eclogites in the Hong'an area, western Dabie Mountains, China. Lithos, 89: 154–173
Liu J B, Zhang L M. 2013. Neoproterozoic low to negative $\delta^{18}O$ volcanic and intrusive rocks in the Qinling Mountains and their geological significance. Precambrian Res, 230: 138–167
Liu X, Li S Z, Suo Y H, Liu X C, Dai L M, Santosh. 2011. Structural anatomy of the exhumation of high-pressure rocks: Constraints from the Tongbai Collisional Orogen and surrounding units. Geol J, 46: 156–172
Liu X, Li S Z, Suo Y H, Liu X C, Dai L M, Santosh. 2012. Structural analysis of the northern Tongbai Metamorphic Terranes, Central China: Inplications for Paleozoic accretionary process on the southern margin of the North China Craton. J Asian Earth Sci, 47: 143–154
Liu X C, Wei C J, Li S Z, Dong S W, Liu J M. 2004a. Thermobaric structure of a traverse across western Dabieshan: Implications for collision

tectonics between the Sino-Korean and Yangtze cratons. J Metamorph Geol, 22: 361–379

Liu X C, Jahn B M, Liu D Y, Dong S W, Li S Z. 2004b. SHRIMP U-Pb zircon dating of a metagabbro and eclogites from western Dabieshan (Hong'an block), China, and its tectonic implications. Tectonophysics, 394: 171–192

Liu X C, Jahn B M, Dong S W, Lou Y X, Cui J J. 2008. High-pressure metamorphic rocks from Tongbaishan, central China: U-Pb and $^{40}Ar/^{39}Ar$ age constraints on the provenance of protoliths and timing of metamorphism. Lithos, 105: 301–318

Liu X C, Jahn B M, Cui J J, Li S Z, Wu Y B, Li X H. 2010. Triassic retrograded eclogites and Cretaceous gneissic granites in the Tongbai Complex, central China: Implications for the architecture of the HP/UHP Tongbai-Dabie-Sulu collision zone. Lithos, 119: 211–237

Liu X C, Jahn B M, Hu J, Li S Z, Liu X, Song B. 2011a. Metamorphic patterns and SHRIMP zircon ages of medium-to-high grade rocks from the Tongbai orogen, central China: Implications for multiple accretion/collision processes prior to terminal continental collision. J Metamorph Geol, 29: 979–1002

Liu X C, Jahn B M, Li S Z, Liu Y S. 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

Liu X-C, Wu Y B, Gao S, Wang J, Peng M, Gong H J, Liu Y S, Yuan H L. 2011b. Zircon U-Pb and Hf evidence for coupled subduction of oceanic and continental crust during the Carboniferous in the Huwan shear zone, western Dabie orogen, central China. J Metamorph Geol, 29: 233–249

Liu X-C, Wu Y B, Gao S, Peng M, Wang J, Wang H, Gong H J, Yuan H L. 2012. Triassic high-pressure metamorphism in the Huwan shear zone: Tracking the initial subduction of continental crust in the whole Dabie orogen. Lithos, 136-139: 60–72

Mattauer M, Matte P, Malavieille 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

McKenzie D M, Priestley K. 2008. The influence of lithospheric thickness variations on continental evolution. Lithos, 102: 1–11

Meng Q R, Zhang G W. 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: controversy and reconciliation. Geology, 27: 123–126

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

Meng Q R, Wang E, Hu J M. 2005. Mesozoic sedimentary evolution of the northwest Sichuan basin: implication for continued clockwise rotation of the South China block. Geol Soc Am Bull, 117: 396–410

O'Brien P J. 2001. Subduction followed by collision: Alpine and Himalayan examples. Phys Earth Planet Int, 127: 277–291

Okay A I, Sengör A M C, Satir M. 1993. Tectonics of an ultrahigh-pressure metamorphic terrane: The Dabie Shan/Tongbai Shan orogen, China. Tectonics, 12: 1320–1334

Peters T J, Ayers J C, Gao S, Liu X M. 2013. The origin and response of zircon in eclogite to metamorphism during themulti-stage evolution of the Huwan Shear Zone, China: Insights from Lu-Hf and U-Pb isotopic and trace element geochemistry. Gondwana Res, 23: 726–747.

Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, McWilliam M, Ireland T, Dong S W, Calvert A, Chateigner D, Wenk H R. 2000. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault. J Geophys Res, 105: 13303–13338

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

Ratschbacher L, Franz L, Enkelmann E, Jonckheere R, Pörschke A, Hacker B R, Dong S W, Zhang Y Q. 2006. The Sino-Korean-Yangtze suture, the Huwan detachment, and the Paleozoic-Tertiary exhumation of (ultra)high-pressure rocks along the Tongbai-Xinxian-Dabie Mountains. In: Hacker B R, McClelland W C, Liou J G, eds. Ultrahigh-pressure Metamorphism: Deep Continental Subduction. Geol Soc Am Spec Pap, 403: 45–75

Sun W D, Williams I S, Li S G. 2002. Carboniferous and Triassic eclogites in the western Dabie Mountains, east-central China: Evidence for protracted convergence of the North and South China Blocks. J Metamorph Geol, 20: 873–886

Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, Gong B. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating, C and O isotopes for impure marbles in the Jiaobei terrane of the Sulu orogen: Implication for its tectonic affinity. Precambrian Res, 144: 1–18

Wang H, Wu Y B, Gao S, Zhang H F, Liu X-C, Gong H J, Peng M, Wang J, Yuan H L. 2011. Silurian granulite-facies metamorphism, and coeval magmatism and crustal growth in the Tongbai orogen, central China. Lithos, 125: 249–271

Wang H, Wu Y B, Qin Z W, Zhu L Q, Liu Q, Liu X C, Gao S, Wijbrans J R, Zhou L, Gong H J, Yuan H L. 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

Wang H, Wu Y B, Gao S, Liu X C, Liu Q, Qin Z W, Xie S W, Zhou L, Yang S H. 2013b. Continental origin of eclogites in the North Qinling terrane and its tectonic implications. Precambrian Res, 230: 13–30

Webb L E, Hacker B R, Ratschbacher L, Dong S W. 1999. Thermochronologic constraints on deformation and cooling history of high- and ultrahigh-pressure rocks in the Qinling-Dabie orogen, eastern China. Tectonics, 18: 621–638

Webb L E, Ratschbacher L, Hacker B R, Dong S W. 2001. Kinematics of exhumation of high- and ultrahigh-pressure rocks in the Hong'an and Tongbai Shan of the Qinling-Dabie collisional orogen, eastern China. In: Hendrix M S, Davis G A, eds. Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation. Geol Soc Am Memoir, 194: 413–434

Wei C J, Li Y J, Yu Y, Zhang J S. 2010. Phase equilibria and metamorphic evolution of glaucophane-bearing UHP eclogites from the Western Dabieshan Terrane, Central China. J Metamorph Geol, 28: 647–666

Wu Y B, Gao S, Zhang H F, Yang S H, Jiao W F, Liu Y S, Yuan H L. 2008. Timing of UHP metamorphism in the Hong'an area, western Dabie Mountains, China: Evidence from zircon U-Pb age, trace element and Hf isotope composition. Contrib Mineral Petrol, 155: 123–133

Wu Y B, Hanchar J M, Gao S, Sylvester P J, Tubrett M, Qiu H N, Wijbrans J R, Brouwer F M, Yang S H, Yang Q J, Liu Y S, Yuan H L. 2009. Age and nature of eclogites in the Huwan shear zone, and the multi-stage evolution of the Qinling-Dabie-Sulu orogen, central China. Earth Planet Sci Lett, 277: 345–354

Wu Y B, Gao S, Liu X C, Wang J, Peng M, Gong H J, Yuan H L. 2011. Two-stage exhumation of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the western Dabie Orogen, central China. J Geol, 119: 15–31

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

Wu Y B, Zhou G G, Gao S, Liu X C, Qin Z W, Wang H, Yang J Z, Yang S H. 2014. Petrogenesis of Neoarchean TTG rocks in the Yangtze Craton and its implication for the formation of Archean TTGs. Precambrian Res, 254: 73–86

Xiang H, Zhang L, Zhong Z Q, Santosh, M, Zhou H W, Zhang H F, Zheng J P, Zheng S. 2012. Ultrahigh-temperature metamorphism and anticlockwise *P-T-t* path of Paleozoic granulites from north Qinling-Tongbai orogen, central China. Gondwana Res, 21: 559–576

Xiang H, Zhong Z Q, Li Y, Qi M, Zhou H W, Zhang L, Zhang Z M, Santosh M. 2014. Sapphirine-bearing granulites from the Tongbai orogen, China: Petrology, phase equilibria, zircon U-Pb geochronology and implications for Paleozoic ultrahigh temperature metamorphism. Lithos, 208-209: 446–461

Xie S W, Wu Y B, Zhang Z M, Qin Y C, Liu X C, Wang H, Qin Z W, Liu Q, Yang S H. 2012. U-Pb ages and trace elements of detrital zircons from Early Cretaceous sedimentary rocks in the Jiaolai Basin, north margin of the Sulu UHP terrane: Provenances and tectonic implications. Lithos, 154: 346–360

Xie Z, Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, Wang Z R, Chen J F, Liu X M, Wu F Y. 2006. Mineral isotope evidence for the contemporaneous process of Mesozoic granite emplacement and gneiss metamorphism in the Dabie orogen. Chem Geol, 231: 214–235

Xu H J, Ma C Q, Ye K. 2007. Early Cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry. Chem Geol, 240: 238–259

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

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

Xue F, Rowley D B, Tucker R D, Peng Z X. 1997. U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the North Dabie complex, eastern Dabie Shan, China. J Geol, 105: 744–753

Yan Z, Wang Z Q, Yan Q R, Wang T, Guo X Q. 2012. Geochemical constraints on the provenance and depositional setting of the Devonian Liuling Group, East Qinling Mountains, central China: Implications for the tectonic evolution of the Qinling orogenic belt. J Sediment Res, 82: 9–20

Zhai X M, Day H W, Hacker B R, You Z D. 1998. Paleozoic metamorphism in the Qinling orogen, Tongbai Mountains, central China. Geology, 26: 371–374

Zhang H F, Gao S, Zhang L, Zhong Z Q, Ling W L, Wang L S. 1998. Granulite genesis and tectonic evolution in Tongbai area: Single zircon evaporation ages and Nd isotopic geochemistry. J China Univ Geosci, 9: 174–179

Zhang H F, Gao S, Zhong Z Q, Zhang B R, Zhang L, Hu S H. 2002. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: Constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh pressure metamorphic belt, China. Chem Geol, 186: 281–299

Zhang H F, Zhang B R, Zhong Z Q, Suo S T, Zhang H Z, Wang L S. 2003. Pb isotopic geochemical study on the crustal structure of Tongbai Shan. Progress Natural Sci, 13: 63–68

Zhang H F, Zhong Z Q, Gao S, Zhang B R, Zhang L, Hu S H, Hou Q Y. 2004. Pb and Nd isotopic composition of the Jigongshan granite:

Constraints on crustal structure of Tongbaishan in the middle part of the Qinling-Tongbai-Dabie orogenic belt, central China. Lithos, 73: 215–227

Zhang J, Chen Y J, Yang Y, Deng J. 2011. Lead isotope systematics of the Weishancheng Au-Ag belt, Tongbai Mountains, central China: Implications for ore genesis. Inter Geol Rev, 53: 656–676

Zhang R Y, Liou J G. 1994. Coesite-bearing eclogite in Henan Province, central China: Detailed petrography, glaucophane stability and *P-T* path. Eur J Mineral, 6: 217–233

Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, Wu Y B, Chen F K, Jahn B M. 2005. Zircon U-Pb age, element and C-O isotope geochemistry of post-collisional mafic-ultramafic rocks from the Dabie orogen in east-central China. Lithos, 83: 1–28

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. Inter Geol Rev, 47: 851–871

Zheng Y F. 2012. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. Chem Geol, 328: 5–48

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

Zhou L G, Xia Q X, Zheng Y F, Chen R X. 2011. Multistage growth of garnet in ultrahigh-pressure eclogite during continental collision in the Dabie orogen: Constrained by trace elements and U-Pb ages. Lithos, 127: 101–127

Zhou L G, Xia Q X, Zheng Y F, Hu Z C. 2014. Polyphase growth of garnet in eclogite from the Hong'an orogen: Constraints from garnet zoning and phase equilibrium. Lithos, 206-207: 79–99

Zhou L G, Xia Q X, Zheng Y F, Chen R X, Hu Z C, Yang Y H. 2015. Tectonic evolution from oceanic subduction to continental collision during the closure of Paleotethyan ocean: Geochronological and geochemical constraints from metamorphic rocks in the Hong'an orogen. Gondwana Res, http: //dx.doi.org/10.1016/j.gr.2014.03.009.

Zhu X Y, Chen F K, Li S Q, Yang Y Z, Nie H, Siebel W, Zhai M G. 2011. Crustal evolution of the North Qinling terrain of the Qinling Orogen, China: Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition. Gondwana Res, 20: 194–204