

秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用

陈衍景^{1,2}

(1. 北京大学造山带与地壳演化重点实验室, 北京 100871;
2. 中国科学院广州地球化学成矿动力学重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 秦岭造山带以其独特的大地构造位置、复杂的地质演化和丰富的矿产资源而成为地质科学研究的焦点, 科学家已经基本清楚了其大地构造格局和地质演化轮廓, 共识其在印支期(三叠纪; 251~199.6 Ma)彻底实现了由海盆向大陆造山带的转变。但是, 盆山转变的过程细节、洋盆闭合的时间、三叠纪大地构造属性以及相关的岩浆作用和成矿作用研究薄弱, 认识分歧较多。笔者通过综合分析地质、地球物理、地球化学、矿产资源等方面的研究成果, 认为三叠纪的秦岭恰似现今地中海, 并存着洋陆俯冲和陆陆碰撞, 并逐渐由洋陆俯冲转变为陆陆碰撞体制; 秦岭古特提斯洋于 230~200 Ma 期间自东向西拉链式缝合, 扬子陆块与华北-秦岭联合大陆之间的碰撞造山作用接踵而至; 三叠纪的秦岭构造背景并非单一的陆陆碰撞, 更非过去认为的造山后或碰撞后。秦岭印支期岩浆作用强烈, 形成了埃达克岩、钙碱性花岗岩、高钾钙碱性花岗岩、碱性岩、疑似奥长环斑花岗岩、碳酸岩等多种岩浆岩; 它们自勉略缝合带向北显示分带性, 依次是: 阳山-胭脂坝过铝质 S 型或改造型花岗岩带、南秦岭高镁埃达克质的钙碱性花岗岩带、北秦岭高钾钙碱性花岗岩带、华北克拉通南缘碱性岩-碳酸岩带; 印支期岩浆作用的复杂性、多样性、空间分带性和成分极性等特点无法用陆陆碰撞或碰撞后构造体制来解释, 而应是勉略洋板块向北俯冲的结果。秦岭印支期成矿作用长期被忽视, 但最近已发现有重要经济价值的印支期矿床类型有碳酸岩脉型、造山型和斑岩型钼矿床, 卡林型-类卡林型、造山型和斑岩-爆破角砾岩型金矿床, 造山型银多金属矿床, 表明在洋陆俯冲向陆陆碰撞转变体制的成矿作用强烈、成矿类型多样, 印支期矿床的找矿潜力较大。

关键词: 秦岭造山带; 古特提斯洋; 岩浆岩; 矿床; 洋陆俯冲; 大陆碰撞

中图分类号: P534.51; P61 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2010)04-0854-12

1 秦岭造山-成矿带的研究意义和问题

秦岭造山带横亘于中国大陆腹地, 大地构造上联接华北(中朝)和扬子克拉通, 是古亚洲构造域(或阿勒泰系)与特提斯构造域的转换带^[1]; 自东向西, 它穿越东部伸展构造区和西部挤压构造区, 是研究挤压构造与伸展构造交替、转换和叠合现象及其机制的关键地区; 在地质发展史上, 它经历了复杂而长达 $\gg 3.0$ Ga 漫长的地质演化, 发育了自新太古代至今的各地质时期的地层, 完整地记录了大陆裂解-洋盆产生、大洋消减-大陆增生、大陆碰撞、大陆内

部构造演化等过程, 是研究岩石圈板块运动不同阶段转换、继承、演化的理想地区^[2]。因此, 秦岭造山带是认识中国陆区乃至东亚大陆构造和古特提斯洋演化的钥匙^[3-4], 也是认识超大陆事件的关键地区^[5-6]。

秦岭造山带独特的构造位置, 长期而复杂的地质演化, 强烈而富有特色的地质作用, 造就了类型丰富而具有特色的矿产资源。西秦岭(陕甘川)是世界第二大卡林型-类卡林型金矿省^[7], 蕴含阳山世界级超大型金矿(>300 t Au); 华北克拉通南缘的华熊地块(小秦岭、熊耳山等地体)是中国第二大造山型金矿集中区和黄金产地^[8]; 东秦岭钼矿带是世界第一大钼矿省^[9], 蕴含 6 个超大型钼矿床和一批大中型钼

收稿日期: 2010-07-20; 改回日期: 2010-08-20

基金项目: 国家 973 计划项目“华北大陆边缘造山过程与成矿”(2006CB403508)和国家自然科学基金项目(40730421, 40425006)资助。

作者简介: 陈衍景, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 主要从事矿床学研究; E-mail: yjchen@pku.edu.cn; gigyjchen@126.com。

矿床;秦岭是全球性三大汞锑矿带之一的秦岭—西
 亚汞锑矿带的重要组成部分^[9],以公馆—青洞沟汞
 锑矿田为代表;自 20 世纪 70 年代发现破山银多金
 属矿床^[10]以来,河南东秦岭新发现了 1 个超大型和
 10 个大型银多金属矿床,使东秦岭成为中国最重要的
 银(伴铅锌)矿省,也是世界首例、最重要的造山型
 银铅锌成矿省^[9];南秦岭蕴含中国最重要的陕甘铅
 锌矿田和钼矿田(毒重石/重晶石)(图 1)。以上表明,
 秦岭造山带确属中国最重要的矿产资源储集地,被
 誉为中国的“金腰带”。

秦岭造山带以其独特的地质地理位置、复杂的
 地质现象和丰富的矿产资源而颇受学者们重视、研
 究,几代人的努力使秦岭造山带的地质研究程度高,
 问题认识深刻,现象描述准确,在约 100 年的中国地
 质科学发展史中扮演着中国地质学、成矿学理论的
 策源地和地质学家成长的摇篮。最新研究表明,秦岭
 造山带构造格局总体表现为“三块两缝”的特征,即
 华北、南秦岭和扬子陆块以及商丹和勉略缝合带^[3];
 地球化学研究揭示出造山带内部不同块体的区域不
 均一性^[11];古特提斯洋在秦岭造山带自东向西闭合,
 最终完成于晚三叠世^[12];中生代秦岭造山带发生强
 烈的拆离滑脱和陆内俯冲作用^[13-14];造山带结构为
 不对称扇形的蘑菇云朵状,岩石圈深、中、浅部的构
 造方向不同,显示立交桥结构的特点^[15];造山带侧向
 缩短作用在侏罗纪仍然非常强烈,但结束于侏罗纪
 与白垩纪之交^[16];127 Ma 之前的造山期区域挤压背

景下的伸展构造作用系由花岗岩浆穹隆作用诱发,
 而 127 Ma 之后的造山后伸展构造则由岩石圈引张
 减薄引起^[17];虽然同碰撞花岗岩浆活动始于 220
 Ma,但碰撞体制的花岗质岩浆活动和热液成矿作用
 主要发生于侏罗纪—白垩纪之交^[2,18]。尽管如此,仍
 有一些重要问题尚未解决^[6],特别是:

(1)秦岭燕山期大规模花岗岩浆活动和成矿作用
 已是不争的事实,而关于印支期成矿作用报道甚少,
 是否存在印支期成矿作用?

(2)秦岭造山带在晚古生代发生了勉略洋甚至商
 丹洋的俯冲消减作用^[3,12],为何罕见或不见晚古生代
 的岩浆弧火山岩、侵入岩以及相关斑岩型、浅成低温
 热液型矿床和弧前增生楔环境的造山型矿床?晚古
 生代的岩浆弧在哪里?

(3)在总体缺乏晚古生代岩浆弧的前提下,何以
 确定三叠纪花岗岩类属于同碰撞^[19]乃至碰撞后^[20]的
 岩浆岩?秦岭三叠纪花岗岩类究竟具有什么样的岩
 石学、地球化学特征?究竟是大陆碰撞前的岩浆弧产
 物,还是大陆碰撞体制挤压背景抑或是后碰撞或造
 山后陆内拉张/伸展背景的岩浆岩?

(4)三叠纪(200~251 Ma),特别是早中三叠世
 (228~251 Ma)的构造背景究竟是碰撞前的洋—陆俯
 冲体制^[8, 12, 21]?陆陆碰撞造山体制^[3, 22-23]?还是碰撞后
 的拉张或伸展背景^[11, 20, 24],甚至碰撞后的陆内造山阶
 段?很多学者主张三叠纪进入碰撞后的陆内构造演
 化阶段,但为何在南秦岭和扬子北缘仍然大量发育

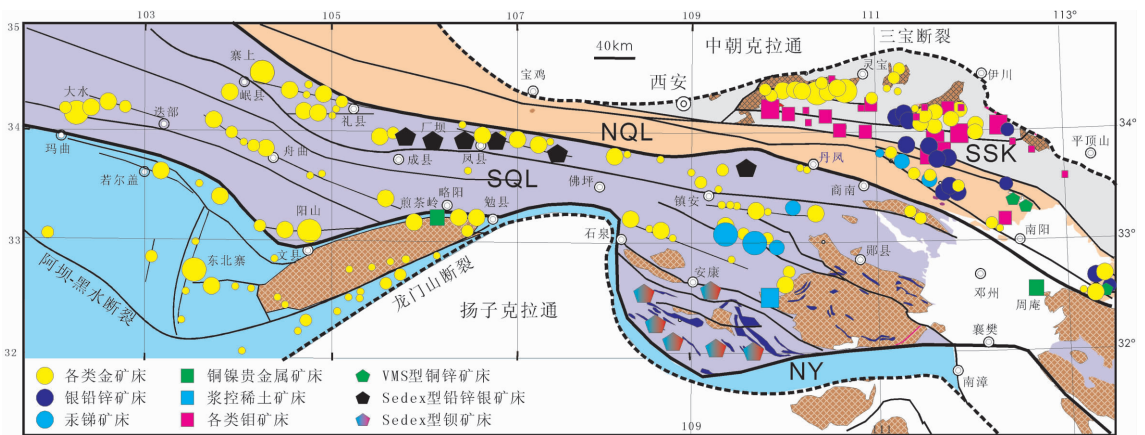


图 1 秦岭造山带构造格局和矿床分布示意图

SSK—中朝克拉通南缘活动带;NQL—北秦岭增生造山带;SQL—南秦岭地块;NY—扬子北缘活动带(褶皱带)

Fig.1 Tectonic framework of and ore-system distribution in Qinling orogen

SSK—Southern marginal mobile belt of Sinokorea craton; NQL—Northern Qinling accretionary orogenic belt; SQ—
 South Qinling block (micro-continent); NY—Northern marginal mobile belt (fold-and-thrust belt) of Yangtze Craton

与二叠纪整合接触的三叠纪海相地层?

针对上述秦岭地区的问题,笔者开展了综合研究并获得了一些进展或认识,借本文简单介绍,以期抛砖引玉。

2 三叠纪的秦岭——现今的地中海: 洋陆俯冲转为陆陆碰撞

目前,学者们共识秦岭洋或古特提斯洋北支在古生代末—三叠纪期间自东向西逐渐闭合,扬子与华北陆块之间的碰撞造山也必然自东向西始于古生代末—三叠纪,大别—苏鲁地区的陆陆碰撞至少始于 240 Ma,并在 240~220 Ma 期间发生超高压变质作用^[4]。但是,关于印支期(三叠纪:251~199.6 Ma)秦岭地区的构造背景却认识不一。笔者认为秦岭地区在三叠纪处于由洋陆俯冲体制向陆陆碰撞体制转变时期,在晚三叠世扬子陆块与华北—秦岭联合大陆自东向西缝合、碰撞,理由如下:

(1) 古地磁研究揭示三叠纪之前扬子与华北属于两个彼此独立的陆块,白垩纪中期以后二者之间的相对位置基本未变,而 T-K₁ 期间发生强烈的造山带地壳缩短、陆块旋转等^[16,25](图 2~3);地震等地球物理研究证明,秦岭造山带的造山作用发生在晚三叠世—早白垩世期间^[15]。

(2) 区域地球化学研究表明,南秦岭与北秦岭在中生代之前差异较大,中生代及其后差异大幅度地减小^[11]。

(3) 秦岭地区海相沉积作用在泥盆纪—三叠纪期间连续进行,但三叠纪沉积范围逐步向西南秦岭缩小^[26,27],晚三叠世地层主要见于松潘盆地和秦岭微陆块西南缘,东秦岭北部仅有少量沉积(图 4),表明三叠纪的秦岭与现今地中海的特征相似。

(4) 侏罗纪地层基本缺失(图 4),前侏罗纪地层全部变形和变质,侏罗纪以后的地层变形微弱,没有遭受变质,表明侏罗纪发生强烈的构造变形、陆内俯冲和前陆褶冲作用^[13,28]。

(5) 由勉略洋俯冲产生的黑沟峡地区火山岩 Sm-Nd 等时线年龄为 (242±21)Ma, Rb-Sr 等时线年龄为 (221±13)Ma^[29],前者可解释为火山喷发年龄,后者可解释为变质年龄;同时,沿勉略带分布的高压榴辉岩矿物-全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 (192±34)Ma,黑云母 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 坪年龄为 (199.6±1.7)Ma^[29],显示在 220~199.6 Ma 之间由洋陆俯冲体制转变为陆陆碰撞体制。

(6) 成矿系统研究表明,220 Ma 的黄龙铺碳酸岩型钼成矿系统来自残余的俯冲洋壳的部分熔融^[30,31],218 Ma 的大湖金钼矿床成矿流体主要来自俯冲洋壳的变质脱水作用^[32-34],表明 220 Ma 左右洋壳俯冲仍然存在^[6]。

(7) 最新研究表明,西秦岭三叠纪岩浆岩类型复杂,是活动大陆边缘的产物,而非陆陆碰撞体制的产物(后述)。印支期花岗岩类主要为钙碱性准铝质,具有高 Sr 低 Y、Yb 含量以及高 Sr/Y、高 La/Yb 比值、

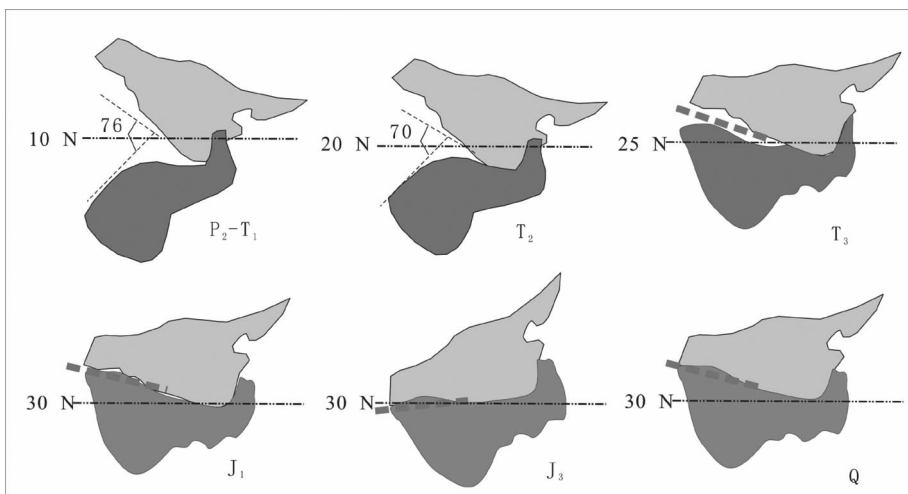


图 2 古地磁揭示的扬子与华北陆块的缝合过程^[16]

Fig.2 Final coalescence of Yangtze and North China Blocks, revealed by geomagnetic data^[16]

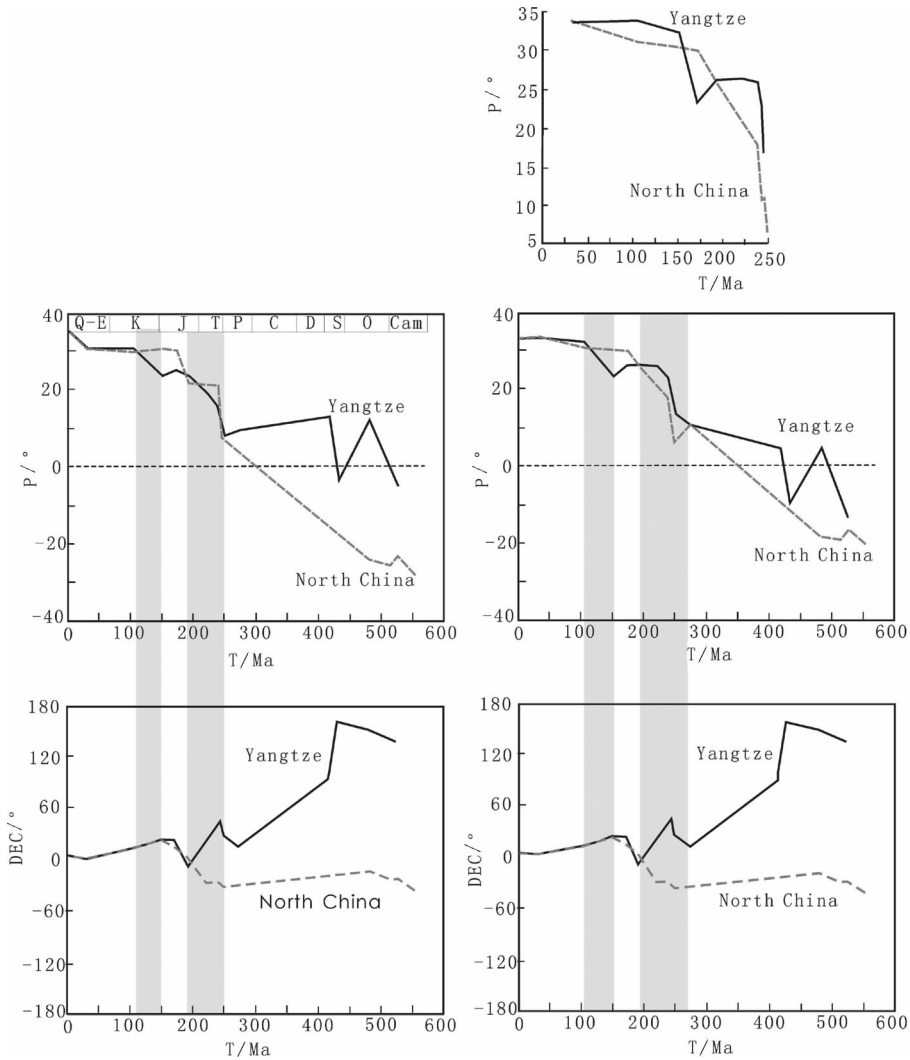


图 3 古地磁揭示的扬子与华北陆块的缝合、碰撞过程^[16]

Fig.3 Coalescence and collision of Yangtze and North China Blocks, revealed by geomagnetic data^[16]

高 Mg[#] 等特征,更适合于解释为陆弧背景的产物^[21],即秦岭三叠纪仍处于洋陆俯冲体制。

综上所述,中央造山带地区的古特提斯洋自东向西拉链式缝合,因为大别—苏鲁造山带在 240~220 Ma 期间开始发生与陆陆碰撞有关的超高压变质作用^[9],所以秦岭地区在晚三叠世处于自东向西的由洋陆俯冲体制向陆陆碰撞体制转变的过程,其地质、地理特点类似于现今的地中海,属于陆陆碰撞造山作用的初始阶段,而非后碰撞或晚碰撞时期,更非碰撞后!即在秦岭地区,扬子陆块与华北—秦岭联合大陆之间的碰撞始于 230~200 Ma,且自东向西逐渐变晚。

3 印支期岩浆岩类型、空间分带性和成因

目前关于秦岭印支期花岗岩成因存在如下不同观点:(1) 张本仁等^[11]认为秦岭主洋盆闭合于志留纪—泥盆纪,晚石炭世开始碰撞并在 330~280 Ma 期间发育同碰撞花岗岩类,中三叠世末秦岭已经全面隆升成山,在晚三叠世—白垩纪期间接受磨拉石堆积,晚三叠世及其以后的花岗岩类皆为碰撞后花岗岩类;(2) 依据勉略缝合带黑沟峡地区变质火山岩的 Sm-Nd 等时线年龄为(242~21)Ma,铷—锶等时线年龄为(221~13)Ma,认为火山岩遭受陆陆碰撞—变质

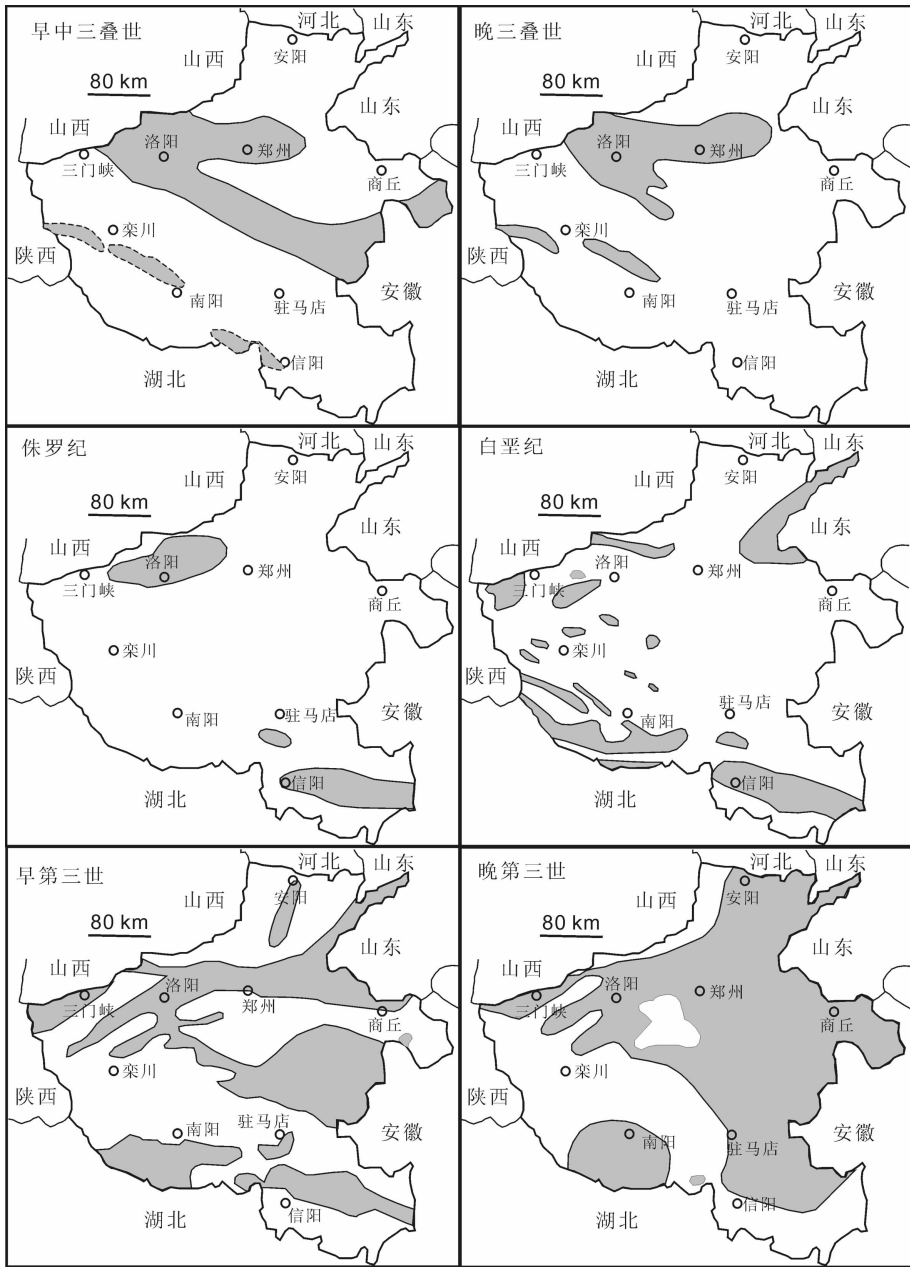


图 4 中生代河南省沉积范围及其变化^[2]

Fig.4 Mesozoic and Cenozoic sedimentation and its change in Henan Province^[2]

的时间是 242~220 Ma^[22], 藉此认为印支期花岗岩属于同碰撞型^[3,19,35], 形成于陆陆碰撞的初期^[36]或挤压向伸展转变期^[37]; (3) 赞同陆陆碰撞发生在 242~220 Ma, 但认为印支期的沙河湾、秦岭梁等花岗岩岩体形成于造山后拉张背景^[20,24]; (4) 考虑到秦岭中生代花岗岩类发育存在 200~170 Ma 间歇期, >200 Ma 的印支期花岗岩类具有弧岩浆的岩石学和地球化学特征, <170 Ma 的燕山期花岗岩类属于碰撞型^[18,38],

李诺等^[8]首先提出秦岭印支期花岗岩类属于岩浆弧(含滞后性岩浆弧)或弧-陆过渡带的产物, 而 Jiang et al.^[21]认为 211 Ma 之前和之后的花岗岩类分别形成于洋陆俯冲和大陆碰撞体制; (5) 考虑到大陆碰撞体制的陆壳俯冲尾随于碰撞前的洋壳俯冲, 而陆壳俯冲并置换弧下堆积的残留洋壳需要一定时间, 许成等^[30]、倪智勇等^[34]和陈衍景等^[6]将秦岭印支期岩浆岩肢解为“南秦岭钙碱性花岗岩带”和“北秦岭富碱

花岗岩-碳酸岩带”,提出前者形成于大陆碰撞体制或滞后性岩浆弧,后者形成于深部残余洋壳的低程度部分熔融。

由上可见,目前关于印支期花岗岩特征、成因及其构造意义的研究和认识较为薄弱。一些学者依据不充分的花岗岩研究厘定构造背景,甚至简单地根据同位素年龄测定而确定岩石成因及其构造背景(前者不是后者的判定依据)。应该说,这类研究不符合成因岩石学或“岩石探针”研究的规则,很难准确认识秦岭印支期岩浆岩成因及其构造意义,反而导致认识上的分歧,甚至导致了相互矛盾或自相矛盾,突出地表现在陕西沙河湾岩体的成因认识上。事实上,秦岭印支期岩浆岩类型复杂,包括了埃达克岩、钙碱性花岗岩、高钾钙碱性花岗岩、碱性花岗岩类、疑似奥长环斑花岗岩和碳酸岩等等。如果单凭其中某个岩体甚或某类岩浆岩判别构造环境,很难避免认识的片面性,甚至得出错误的结论,因为“特定构造背景的某种典型岩石类型往往可以在其他构造背景发育”^[39],例如,洋中脊可以发育洋岛玄武岩(OIB),而 MORB 可以出现在弧后盆地。如此以来,我们必须全面分析秦岭印支期各类岩浆岩的成因、空间分布、时间序列及其构造背景,方可较好地判别印支期的大地构造环境。

在空间分布和时间序列上,秦岭地区的海西期(晚古生代)岩浆岩发育较少,并分布在北秦岭^[4],如宝鸡复式岩体^[36];印支期岩浆岩明显多于海西期,在秦岭造山带的各单元均有发育,但扬子北缘基本缺

乏;燕山期花岗岩类遍布龙门山—大巴山断裂与三宝断裂之间的秦岭造山带各构造单元,以华北克拉通南缘的华熊地块和北秦岭增生造山带最为发育,且在 200~170 Ma 之间岩浆活动较弱,160~100 Ma 期间花岗质岩浆活动强烈并具有碰撞型花岗岩类的特点^[18,38,40],100 Ma 之后缺乏中酸性岩浆岩,但发育基性的玄武岩类。上述花岗岩类发育的时间序列表明:(1) 晚古生代勉略洋向北俯冲消减的设想无法得到同期岩浆弧杂岩的支持,而岩浆弧杂岩恰恰是重建活动大陆边缘最关键的依据^[41];(2) 燕山期广泛发育的碰撞型花岗岩类指示燕山期已经存在强烈的大陆碰撞造山作用,而大陆碰撞前应该存在大洋板块的俯冲消减,这要求印支期存在洋陆俯冲体制;⁽³⁾ 秦岭印支期岩浆岩的多样性和空间分带性与大陆碰撞体制的构造-岩浆特点不相符,而与洋陆俯冲体制的岩浆作用特征十分吻合(图 5 及下述)。因此,我们有必要设想秦岭印支期仍存在洋陆俯冲作用,并以此解释岩浆岩成因和分布。

秦岭三叠纪岩浆岩复杂多样,且有一定程度的自勉略缝合带向北的空间分带性,即:(1) 紧邻勉略缝合带发育的胭脂坝—阳山陆壳改造型或 S 型花岗岩带,(2) 南秦岭钙碱性同熔型或 I 型花岗岩岩带,(3) 沿商丹断裂带及北秦岭发育的秦岭梁—沙河湾高钾钙碱性花岗岩带,(4) 华北克拉通南缘的黄龙铺—黄水庵高钾碱性岩-碳酸岩带。虽然上述各带之间有所重叠或界线不明确,但总体规律是客观的,反映了活动大陆边缘特有的岩浆作用极性和分带性。

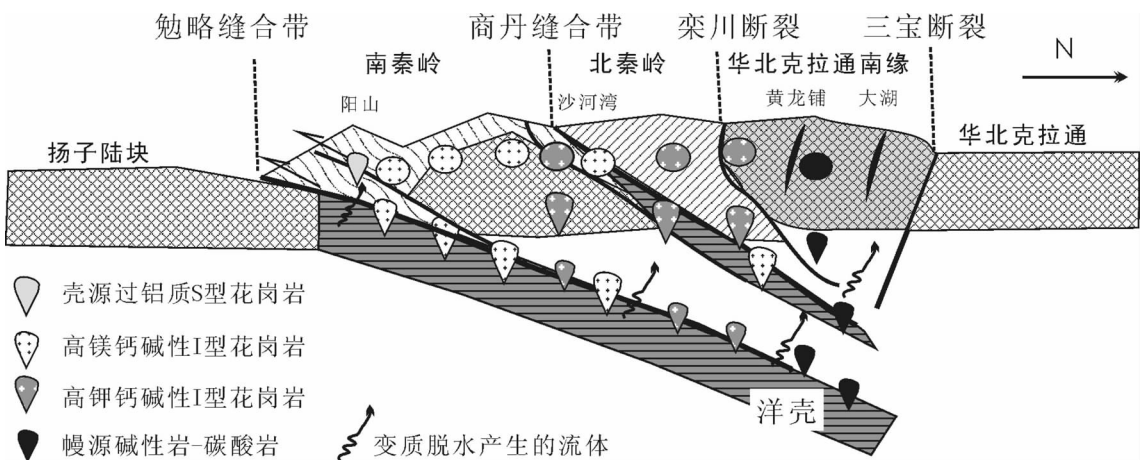


图 5 秦岭印支期花岗岩类成因类型及其构造背景

Fig.5 Genetic types and tectonic settings of Indosinian granitoids in Qinling orogen

据刘红杰等^[42]、张莉等^[43],甘肃阳山金矿田发育 220 Ma 左右的花岗斑岩脉,其暗色矿物为黑云母和白云母,副矿物中有石榴子石和电气石, $K_2O/Na_2O > 1$, Al_2O_3 含量高达 19.47%~23.71%,铝指数达 1.65~3.65,镁指数($Mg^{\#}$)为 4.07%~13.4%,属于强过铝质改造型花岗岩;其 $I_{Sr} = 0.708 \sim 0.717$, $\epsilon_{Nd}(T) = -5.0 \sim -2.9$,指示俯冲洋壳变质脱水诱发低成熟度沉积物部分熔融的成因特征。据 Jiang et al.^[21],211 Ma 的陕西胭脂坝岩体属高钾钙碱性、过铝质的含石榴子石二云母花岗岩,具有低 Sr、高 Y、Yb 含量和低 $Mg^{\#}$ (7%~29%) 的特征, $I_{Sr} = 0.7055$, $\epsilon_{Nd}(T) = -5.9 \sim -4.2$,同样显示了俯冲洋壳变质脱水诱发沉积物部分熔融的成因特点。这类陆壳改造型花岗岩曾被解释为陆陆碰撞体制的产物^[6, 21, 42],但可以更好地解释为洋壳俯冲变质脱水诱发弧前沉积柱体的部分熔融的产物^[44~45]。

在勉略带与商丹带之间的南秦岭地体发育格尔珂、迷坝、张家坝、新院、姜家坪、光头山、留坝、西坝、华阳、老城、东江口等花岗岩体,构成本文所谓的“南秦岭钙碱性花岗岩带”。其中,部分岩体被认为是海西期形成,但最新的锆石 SHRIMP 或 LA-ICPMS U-Pb 同年龄测定表明,它们均形成于 220~205 Ma^[92]。这些岩体多含有暗色包体,化学成分上属于钙碱性准铝质或过铝质,Sr 含量高,Y、Yb 含量低,Sr/Y、La/Yb 比值高, $Mg^{\#}$ 高,LREE/HREE 较高,Eu 异常不明显, I_{Sr} 介于 0.703~0.706, $\epsilon_{Nd}(T)$ 介于 -6.1~-1.3, $\epsilon_{Hf}(T)$ 介于 -2.2~1.6,等。所有这些岩石学和地球化学特征均显示了同熔型或 I 型花岗岩甚至埃达克岩^[46]的特征,应形成于活动大陆边缘的陆弧背景。

“北秦岭高钾钙碱性花岗岩带”位于商丹断裂带附近及其以北的北秦岭增生造山带,自西向东有甘肃的五朵金花、温泉岩体^[49]以及曾被报道为环斑花岗岩的陕西老君山、秦岭梁、沙河湾、曹坪、榨水^[20, 36~37]和翠华山岩体^[21],它们形成于 245~205 Ma。与南秦岭钙碱性花岗岩带相比,其岩石学和地球化学特征极为相似,但钾长石含量和 K_2O 含量偏高, $\epsilon_{Nd}(T)$ 和 $\epsilon_{Hf}(T)$ 偏低, $T_{DM2}(Nd)$ 和 $T_{DM2}(Hf)$ 偏大,指示源区中古老地壳组分增多,其成因可以解释为勉略洋向北俯冲的深度加大,地壳成分混入增多,显示了活动大陆边缘弧岩浆作用极性的特点。

华北克拉通南缘碱性岩-碳酸岩带以陕西黄龙

铺、华阳川和河南黄水庵、磨沟等杂岩体为代表,它们形成于印支期,均为碱性中酸性岩-碳酸岩杂岩体^[30, 47]。此外,东铜峪金矿和大湖金钼矿床的赋矿围岩具有粗粒钾长花岗岩或伟晶岩的特征^[32, 33],成矿系统中获得了印支期的同位素年龄,表明它们可能是后期构造破坏了的印支期钾长花岗岩。上述岩体的共同特征是全碱含量高(>7%),属于钾玄系列(高钾钙碱性系列)或碱性系列。据许成等^[30, 31]最新研究,黄龙铺碳酸岩脉源于俯冲洋壳变质而成的榴辉岩的低程度部分熔融作用,这要求黄龙铺矿区之下在 220 Ma 时存在这类榴辉岩,即 220 Ma 时仍有洋壳向北俯冲,至少由洋壳俯冲形成的榴辉岩还没有被陆壳板片置换。

综合上述,印支期岩浆岩岩石地球化学和空间分布特点与洋陆俯冲体制的岩浆作用特点和分布规律一致,或者与大陆初始碰撞时的岩浆活动一致(图 5)。

4 印支期成矿作用和成矿类型

按照现有的板块构造-成矿模式^[48],无论三叠纪的秦岭造山带是处于洋陆俯冲体制还是大陆碰撞体制,都应该发育多种类型的成矿系统。然而,过去关于秦岭造山带三叠纪的成矿作用探讨较少。虽然黄典豪等^[49]曾报道黄龙铺热液碳酸岩脉型钼矿床的辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 220~231 Ma,等时线年龄为 221 Ma,但秦岭印支期成矿作用的识别和研究仍被长期忽视。

最近 10 年的勘查和研究进展显示,秦岭造山带存在一次重要的印支期成矿事件^[68, 250],具体表现在:

(1) 西秦岭卡林型-类卡林型金矿省中获得了一批 200~220 Ma 的同位素年龄,如湖北银洞沟银金铅锌矿床(详见文献^[7]及其引文)。

(2) 前人在华北克拉通南缘造山型金矿床中获得了大量印支期成矿的信息,如(参见卢欣祥等^[50]):小秦岭东桐峪金矿床的碱性长石 Rb-Sr 等时线年龄为 208.2 Ma,15 号含金石英脉中蚀变白云母 K-Ar 年龄为 (237.54 ± 4.80) Ma;桃园金矿热液绢云母 K-Ar 年龄为 211 Ma,北岭金矿床热液石英 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 年龄为 216.04 Ma;上宫金矿早阶段矿物 Rb-Sr 等时线年龄为 (242 ± 11) Ma,石英 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 年龄为 (222.83 ± 24.91) Ma^[51]。

(3) 东秦岭陡岭地体的毛堂斑岩-爆破角砾岩型金矿之黄铁矿 Ar-Ar 年龄为 (222.95 ± 7.58) Ma^[50]。

表 1 熊耳山石英脉型钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄
Table 1 Molybdenite Re-Os isotope ages of Mo-quartz vein deposits
in Xiong'er Shan

矿床	测试矿物	测试方法	样品数	年龄(Ma)	资料来源
马家洼	辉钼矿	Re-Os	5	232±11 (I)	[56]
前范岭	辉钼矿	Re-Os	7	239±13 (I)	[57]
大西沟、毛沟	辉钼矿	Re-Os		230~240	[57]
纸房	辉钼矿	Re-Os	5	243.8±2.8 (A)	本文
八道沟	辉钼矿	Re-Os	8	240.8±9.2 (I)	本文
香椿沟	辉钼矿	Re-Os	5	242±12 (I)	本文

注:I 代表等时线年龄,A 代表加权平均年龄。

(4) 西秦岭新发现了印支期的温泉斑岩钼矿床,其 5 件辉钼矿 Re-Os 模式年龄在 (212.7±2.6)~(215.1±2.6) Ma 之间,加权平均值为 (214.1±1.1) Ma,等时线年龄为 (214.4±7.1) Ma^[52];成矿岩体 K-Ar 年龄 223~226 Ma,锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (223±7) Ma^[23];

(5) 与“华北克拉通南缘碱性岩-碳酸岩带”有关的钼矿化时代被确定为印支期。例如,黄水庵碳酸岩脉型钼(铅)矿床的辉钼矿 Re-Os 模式年龄加权平均值为 (209.5±4.3) Ma^[53];黄龙铺矿床 7 件辉钼矿 Re-Os 同位素年龄的加权平均值为 (221.5±0.3) Ma^[54]。

(6) 小秦岭大湖金矿床深部发现了造山型钼矿体,其 6 件辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (218±41) Ma (2σ 误差,MSWD=38)^[52],李诺等测得其热液独居石 SHRIMP U-Pb 年龄为 216 Ma (待发表)。熊耳山区新近发现了一批石英脉型钼矿床^[55],其辉钼矿 Re-Os 年龄均为印支期(表 1)。

由此可见,秦岭地区在 245~200 Ma 期间发生了一次强烈的成矿事件,形成了多种类型、多种金属的热液矿床,包括了浅成热液型的金、银矿床,造山型的金、钼矿床,斑岩型钼矿床,斑岩-爆破角砾岩型金矿床,以及碳酸岩型钼多金属。复杂多样的矿床成因类型指示其构造环境可能是活动大陆边缘,或者是由活动大陆边缘向陆陆碰撞造山的转变体制。据倪智勇等^[54],218 Ma 的大湖金钼矿床的初始成矿流体来自亏损的残留洋壳,表明成矿时小秦岭地体之下仍然存在亏损的俯冲洋壳,当时仍有洋壳俯冲作用,或者大陆碰撞体制的陆壳俯冲作用尚未使小秦岭之下的残余洋壳被置换为陆壳。

5 结论

(1) 印支期(即三叠纪)秦岭造山带的构造背景与现代地中海相当,洋陆俯冲与陆陆碰撞并存,并逐渐由洋陆俯冲转变为陆陆碰撞体制,而不是过去认为的造山后或碰撞后,也非单一的陆陆碰撞体制。扬子与华北-秦岭联合大陆之间的古特提斯洋自东向西拉链式缝合,在秦岭地区的缝合时间为 230~200 Ma,即晚三叠世。

(2) 秦岭印支期岩浆作用强烈,岩石类型复杂,至少发育了埃达克岩、钙碱性花岗岩、高钾钙碱性花岗岩、碱性岩、疑似奥长环斑花岗岩和碳酸岩等,它们分布于勉略缝合带以北并有空间分带性,自南向北依次是:阳山-胭脂坝过铝质 S 型或改造型花岗岩带,南秦岭高镁埃达克质的钙碱性花岗岩带,北秦岭高钾钙碱性花岗岩带,华北克拉通南缘碱性岩-碳酸岩带。岩浆作用的复杂性、多样性、空间分带性和成分极性等特点要求其构造背景是勉略洋板块向北俯冲,或者陆陆碰撞的起始阶段,而不是典型的大陆碰撞体制,更非碰撞后或造山后。

(3) 秦岭印支期成矿作用显著,浅成热液型、岩浆热液型和变质热液型(造山型)成矿系统均有发育,至少已发现了有重要经济价值的碳酸岩脉型、造山型和斑岩型钼矿床,卡林型-类卡林型、造山型和斑岩-爆破角砾岩型金矿床,造山型银多金属矿床。这些矿床主要形成于洋陆俯冲体制或其向陆陆碰撞体制的转变阶段,找矿潜力较大。

致谢:笔者的科研工作长期得到李廷栋院士的鼓励、指导和扶持!适逢李先生 80 华诞,谨以此文表示

祝贺和感谢!许成、张静、姚军明、李文博、秦艳、倪智勇、祁进平、张莉、卿敏等博士和李诺、邓小华、毛世东、李晶、曾庆涛、韩金生、刘红杰、赵成海、李超等研究生参加了部分工作,一并致谢!

参考文献(References):

- [1] Huang J Q, Chen B W (ed.). The Evolution of the Tethys in China and Adjacent Regions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 109.
- [2] 陈衍景, 富士谷. 豫西金矿成矿规律[M]. 北京: 地震出版社, 1992: 234.
Chen Yanjing, Fu Shigu. Gold Mineralization in West Henan [M]. Beijing: Seismological Press, 1992: 234 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 855.
Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001: 1-855 (in Chinese with English abstract).
- [4] Ernst W G, Tsujimori T, Zhang R, et al. Permo-Triassic collision, subduction zone metamorphism, and tectonic exhumation along the East Asian continental margin [J]. Annual Review of Earth and Planetary Science, 2008, 35: 73-110.
- [5] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup [J]. Earth-Science Reviews, 2004, 67(1/2): 91-123.
- [6] 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题 [J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 2695-2726.
Chen Yanjing, Zhai Mingguo, Jiang Shaoyong. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (11): 2695-2726 (in Chinese with English abstract).
- [7] 陈衍景, 张静, 张复新, 等. 西秦岭地区卡林—类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式 [J]. 地质论评, 2004, 50: 134-152.
Chen Yanjing, Zhang Jing, Zhang Fuxin, et al. Carlin and Carlin-Like gold deposits in Western Qinling Mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model [J]. Geological Reviews, 2004, 50(2): 134-152 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李诺, 陈衍景, 张辉, 等. 东秦岭斑岩钼矿带的地质特征和成矿构造背景 [J]. 地学前缘, 2007, 14: 186-198.
Li Nuo, Chen Yanjing, Zhang Hui, et al. Molybdenum deposits in East Qinling [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14: 186-198 (in Chinese with English abstract).
- [9] 涂光炽, 丁抗. 全球性第三条汞锑矿带—秦岭—中亚细亚汞锑成矿带 [C]// 地球化学文集. 北京: 科学出版社, 1986: 8-13.
Tu Gangzhi, Ding Kang. The Qinling—Central Asia Sb—Hg belt—the third Sb—Hg belt of global significance [C]// Geochemical Collections. Beijing: Science Press, 1986: 8-13 (in Chinese with English abstract).
- [10] Zhang J, Chen Y J, Yang Y, et al. Lead isotope systematics of the Weishancheng Au—Ag belt, Tongbai Mountains, central China: implication for ore genesis [J]. International Geology Review, 2010: DOI: 10.1080/00206814.2010.496196.
- [11] 张本仁, 高山, 张宏飞, 等. 秦岭造山带地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 187.
Zhang Benren, Gao Shan, Zhang Hongfei, et al. Geochemistry of Qinling Orogen [M]. Beijing: Science Press, 2002: 187 (in Chinese with English abstract).
- [12] Yin A, Nie S Y. A Phanerozoic palinspastic reconstruction of China and its neighboring regions [C]// Yin A, Harrison TM (eds.). The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 442-485.
- [13] 许志琴, 卢一伦, 汤耀庆, 等. 东秦岭造山带的变形特征及其构造演化 [J]. 地质学报, 1986, 60: 237-247.
Xu Zhiqin, Lu Yilun, Tang Yaoqing, et al. Deformation characteristics and tectonic evolution of the eastern Qinling orogenic belt [J]. Acta Geologica Sinica, 1986, 60: 237-247. (in Chinese with English abstract).
- [14] 许志琴. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程 [M]. 北京: 地质出版社, 1992: 190.
Xu Zhiqin. Mountain—Building Process of the Songpan—Ganzi Orogenic Belt, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 190 (in Chinese with English abstract).
- [15] Yuan X C. Velocity structure of the Qinling lithosphere and mushroom cloud model [J]. Science in China (Series D), 1996, 39 (3): 235.
- [16] Zhu R X, Yang Z Y, Wu H N, et al. Palaeomagnetic constraints on the tectonic history of the major blocks of China during the Phanerozoic [J]. Science in China (Series D), 1998, 41(Sup.): 1-19.
- [17] 张进江, 郑亚东, 刘树文. 小秦岭变质核杂岩的构造特征、形成机制及构造演化 [M]. 北京: 海洋出版社, 1998: 120.
Zhang Jinjiang, Zheng Yadong, Liu Shuwen. Structural Features, Genetic Mechanism and Tectonic Evolution of the Xiaoqinling Metamorphic Core Complex [M]. Beijing: Ocean Press, 1998: 120 (in Chinese with English abstract).
- [18] Chen Y J, Chen H Y, Zaw K, et al. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: an overview [J]. Ore Geology Reviews, 2007, 31: 139-169.
- [19] Sun W D, Li S G, Chen Y D, et al. Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, Central China: Constraints on the evolution of the Qinling—Dabie orogenic belt [J]. Journal of Geology, 2002, 110: 457-468.
- [20] Wang X X, Wang T, Jahn B M, et al. Tectonic significance of Late Triassic post-collisional lamprophyre dykes from the Qinling Mountains [J]. Geological Magazine, 2007, 144 (5): 837-848.
- [21] Jiang Y H, Jin G D, Liao S Y, et al. 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 [J]. *Lithos*, 2010, 117:183-197.
- [22] Li S G, Sun W D, Zhang G W, et al. Chronology and geochemistry of metavolcanic rocks from Heigouxia Valley in the Mian-Lue tectonic zone, south Qinling—Evidence for a Paleozoic oceanic basin and its close time [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 39:300-310.
- [23] Zhu L M, Ding Z J, Yao S Z, et al. Ore-forming event and geodynamic setting of molybdenum deposit at Wenquan in Gansu Province, Western Qinling [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54: 2309-2324.
- [24] Lu X X, Dong Y, Chang Q L, et al. Indosinian Shahewan rapakivi granite in Qinling and its dynamic significance [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 39(3): 266-272.
- [25] Lin J L, Fuller M, Zhang W Y. Preliminary Phanerozoic polar wander paths for the North and South China Blocks [J]. *Nature*, 1985, 313: 444-449.
- [26] 杜远生. 秦岭造山带泥盆纪沉积地质学研究 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997:130.
Du Yuansheng. Devonian Sedimentary Geology of Qinling Orogenic Belt [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997:130 (in Chinese with English abstract).
- [27] 张复新, 魏宽义, 马建秦. 南秦岭微细粒浸染型金矿床地质与找矿 [M]. 西安: 西北大学出版社, 1997:190.
Zhang Fuxin, Wei Kuanyi, Ma Jianqin. Geology and Prospecting of Micro-disseminated (Carlin Type) Gold Deposits in South Qinling [M]. Xi'an: Northwest University Press, 1997:190 (in Chinese with English abstract).
- [28] 胡受奚, 林潜龙, 陈泽铭, 等. 华北与华南古板块拼合带地质与成矿 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1988:558.
Hu Shouxi, Lin Qianlong, Chen Zeming, et al. Geology and Metallogeny of the Collision Belt Between the North and the South China Plates [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1988: 558 (in Chinese with English abstract).
- [29] Zhang Z Q, Zhang G W, Tang S H, et al. Age of Anzishan granulites in the Mianxian-Lueyang suture zone of Qinling orogen: With a discussion of the timing of final assembly of Yangtze and North China craton blocks [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47:1925-1930.
- [30] 许成, 宋文磊, 漆亮, 等. 黄龙铺钼矿田含矿碳酸岩地球化学特征及其形成构造背景 [J]. *岩石学报*, 2009, 25(2):422-430.
Xu Cheng, Song Wenlei, Qi Liang, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of ore-bearing carbonatite in Huanglongpu Mo ore field [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25 (2):422-430 (in Chinese with English abstract).
- [31] Xu C, Kynicky J, Chakhmouradian A R, et al. A unique Mo deposit associated with carbonatites in the Qinling orogenic belt, central China [J]. *Lithos*, 2010, 118:50-60.
- [32] 李诺, 孙亚莉, 李晶, 等. 小秦岭大湖金钼矿床辉钼矿铼钨同位素年龄及印支期成矿事件 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(4):810-816.
Li Nuo, Sun Yali, Li Jing, et al. Molybdenite Re-Os isotope age of the Dahu Au-Mo deposit, Xiaoqinling and the Indosinian mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24 (4):810-816 (in Chinese with English abstract).
- [33] 倪志勇, 李诺, 管申进, 等. 河南小秦岭金矿田大湖金-钼矿床流体包裹体特征及矿床成因 [J]. *岩石学报*, 2008, 24 (9):2058-2068.
Ni Zhiyong, Li Nuo, Guan Shenjin, et al. Characteristics of fluid inclusions and ore genesis of the Dahu Au-Mo deposit in the Xiaoqinling gold field, Henan Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(9):2058-2068 (in Chinese with English abstract).
- [34] 倪志勇, 李诺, 张辉, 等. 河南大湖金钼矿床成矿物质来源的铼钨同位素约束 [J]. *岩石学报*, 2009, 25(11):2823-2832.
Ni Zhiyong, Li Nuo, Zhang Hui, et al. Pb-Sr-Nd isotope constraints on the source of ore-forming elements of Dahu Au-Mo deposit, Henan Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25 (11): 2823-2832 (in Chinese with English abstract).
- [35] 周滨, 汪方跃, 孙勇, 等. 秦岭沙河湾造山带型环斑花岗岩地球化学及构造属性讨论 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(6):1261-1272.
Zhou Bin, Wang Fangyue, Sun Yong, et al. Geochemistry and tectonic affinity of Shahewan orogenic rapakivi from Qinling [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24 (6):1261-1272 (in Chinese with English abstract).
- [36] Zhang J, Chen Y J, Shu G M, et al. Compositional study of minerals within the Qinlingiang granite, southwestern Shaanxi Province and discussions on the related problems [J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 45 (7):662-672.
- [37] 弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 等. 南秦岭沙河湾、曹坪、柞水岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2009, 25(2): 248-264.
Gong Hujun, Zhu Laimin, Sun Boya, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics and their geological significance of the Shahewan, Caoping and Zhashui granitic plutons in the South Qinling orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(2):248-264 (in Chinese with English abstract).
- [38] Chen Y J, Li C, Zhang J, et al. Sr and O isotopic characteristics of porphyries in the Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type [J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 43(Supp.):82-94.
- [39] Condie K C. Precambrian tectonic settings and secular geochemical variations [J]. *International Symposium on Geochemistry and Mineralization of Proterozoic Mobile Belt*. September 6-10, 1988, Tianjin, 14-15.
- [40] Li C, Chen Y J, He S D. East Qinling-Dabieshan lithosphere delaminating age, mechanism and direction—petrological evidences and stipulation [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2001, 20:59-72.
- [41] Sengor A M C, Natal'in B A. Paleotectonics of Asia: fragments of synthesis [C]//Yin A, Harrison T M (ed.). *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996:486-640.

- [42] 刘红杰, 陈衍景, 毛世东, 等. 西秦岭阳山金矿带花岗斑岩元素及 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学 [J]. 岩石学报, 2008, 24 (5): 1101-1111.
Liu Hongjie, Chen Yanjing, Mao Shidong, et al. Element and Sr-Nb-Pb isotope geochemistry of granite-porphry dykes in the Yangshan gold belt, western Qinling Orogen [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(5): 1101-1111 (in Chinese with English abstract).
- [43] 张莉, 杨荣生, 毛世东, 等. 阳山金矿床锶铅同位素地球化学与成矿物质来源 [J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 2811-2822.
Zhang Li, Yang Rongsheng, Mao Shidong, et al. Sr and Pb isotope geochemistry and ore-forming material source of the Yangshan gold deposit [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(11): 2811-2822 (in Chinese with English abstract).
- [44] Ernst W G. Late Mesozoic subduction-induced hydrothermal gold deposits along the eastern Asian and northern Californian margins: Oceanic versus continental lithospheric underflow [J]. Island Arc, 2010, 19: 213-229.
- [45] 胡受奚, 胡志宏, 郭继春, 等. 论板块构造与花岗岩类成岩、成矿的关系—兼论成岩、成矿物质的侧向源问题 [J]. 南京大学学报地质版, 1990, 1: 1-14.
Hu Shouxi, Hu Zhihong, Guo Jichun, et al. Relationships of petrogenesis and metallogenesis of granitoids to plate tectonics [J]. Journal of Nanjing University, Earth Sciences, 1990, 1: 1-14 (in Chinese with English abstract).
- [46] 张旗, 殷先明, 殷勇, 等. 西秦岭与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的金铜成矿及找矿问题 [J]. 岩石学报, 2009, 25(12): 3013-3022.
Zhang Qi, Yin Xianming, Yin Yong, et al. Issues on metallogenesis and prospecting of gold and copper deposits related to adakite and Himalayan type granite in west Qinling [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(12): 3013-3022 (in Chinese with English abstract).
- [47] 阎国翰, 牟保磊, 曾贻善, 等. 华北克拉通火成碳酸岩时空分布和锶钨同位素特征及其地质意义 [J]. 高校地质学报, 2007, 13: 463-473.
Yan Guohan, Mu Baolei, Zeng Yishan, et al. Igneous carbonatites in North China craton: the temporal and spatial distribution, Sr and Nd isotopic characteristics and their geological significance [J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13: 463-473 (in Chinese with English abstract).
- [48] 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, 等. 不同类型热液金矿床的流体包裹体特征 [J]. 岩石学报, 2007, 23(9): 2085-2108.
Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, et al. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (9): 2085-2108 (in Chinese with English abstract).
- [49] 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 等. 东秦岭地区钼矿床的铼-钨同位素年龄及其意义 [J]. 矿床地质, 1994, 13(3): 221-230.
Huang Dianhao, Wu Chengyu, Du Andao, et al. Re-Os isotope ages of molybdenum deposits in east Qinling and their significance [J]. Mineral Deposits, 1994, 13 (3): 221-230 (in Chinese with English abstract).
- [50] 卢欣祥, 李明立, 王卫, 等. 秦岭造山带的印支运动及印支期成矿作用 [J]. 矿床地质, 2008, 27(6): 762-773.
Lu Xinxiang, Li Mingli, Wang Wei, et al. Indosinian movement and metallogenesis in Qinling orogenic belt [J]. Mineral Deposits, 2008, 27(6): 762-773 (in Chinese with English abstract).
- [51] Chen Y J, Pirajno F, Qi J P. The Shanggong gold deposit, Eastern Qinling Orogen, China: Isotope geochemistry and implications for ore genesis [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 33: 252-266.
- [52] 宋史刚, 丁振举, 姚书振, 等. 甘肃武山温泉辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其成矿意义 [J]. 西北地质, 2008, 41(1): 67-73.
Song Shigang, Ding Zhenjun, Yao Shuzhen, et al. Re-Os isotopic dating of molybdenite and its implication for molybdenum mineralization of Wenquan porphyry, Wushan, Gansu Province [J]. Northwestern Geology, 2008, 41 (1): 67-73 (in Chinese with English abstract).
- [53] 黄典豪, 侯增谦, 杨志明, 等. 东秦岭钼矿带内碳酸岩脉型钼(铅)矿床地质-地球化学特征、成矿机制及成矿构造背景 [J]. 地质学报, 2009, 83(12): 1968-1984.
Huang Dianhao, Hou Zengqian, Yang Zhiming, et al. Geological and geochemical characteristics, metallogenetic mechanism and tectonic setting of carbonatite vein-type Mo (Pb) deposits in the East Qinling molybdenum ore belt [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(12): 1968-1984 (in Chinese with English abstract).
- [54] Stein H J, Markey R J, Morgan J W, et al. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt, Shaanxi Province, China [J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 1997, 92 (7/8): 827-835.
- [55] 陈德杰, 朱文凤, 赵金洲, 等. 东秦岭两种新型钼矿床的矿物特征及成因分析 [J]. 矿产与地质, 2008, 22(5): 447-450.
Chen Dejie, Zhu Wenfeng, Zhao Jinzhou, et al. Minerals characteristics of the two new types of Mo deposits in East Qinling with the studying on their genesis [J]. Mineral Resources and Geology, 2008, 22(5): 447-450 (in Chinese with English abstract).
- [56] 王义天, 叶会寿, 叶安旺, 等. 小秦岭北缘马家洼石英脉型金钼矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄及其意义 [J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 140-145.
Wang Yitian, Ye Huishou, Ye Anwang, et al. Re-Os age of molybdenite from the Majiawa Au-Mo deposit of quartz vein type in the north margin of the Xiaolinling gold area and its implication for metallogeny [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(2): 140-145 (in Chinese with English abstract).
- [57] 高阳, 李永峰, 郭保健, 等. 豫西嵩县前范岭石英脉型钼矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素年龄 [J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 757-767.
Gao Yang, Li Yongfeng, Guo Baojian, et al. Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic dating of Qianfanling quartz-vein Mo deposit in Songxian County, western Henan Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(3): 757-767 (in Chinese with English abstract).

Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis in Qinling Orogen, central China

CHEN Yan-Jing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Orogen and Crust Evolution, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Key Laboratory of Metallogenic Dynamics, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: The Qinling Orogen in central China has been a long-term geologically studied focus for its unique tectonic location, complicated geological history and abundant mineral resources. In previous studies geologists have clarified its tectonic framework, outlined its geological evolution, and reached a consensus that the final transition from marine basin to intracontinental mountains occurred in Indosinian (Triassic: 251~199.6 Ma). However, the details of basin-to-mountain transition process, the age of final oceanic closure, the nature of Triassic tectonic setting, and the associated magmatism and mineralization in the area have been poorly constrained and hotly debated. Based on a comprehensive re-assessment of results from geological, geophysical, geochemical and ore deposit studies, the author compares the Triassic Qinling with present Mediterranean Sea, which contemporaneously accommodates oceanic slab subduction and intercontinental collision as well as gradual transition from oceanic subduction to intercontinental collision. The Qinling paleo-Tethys finally closed in a westward zipper-like way during the period of 230~200 Ma, and instantly followed by intercontinental collision between the Yangtze block and Qinling-North China united continents. Therefore, the Triassic tectonic setting in Qinling was neither a simple intercontinental collision, nor a post-orogenic or post-collisional regime. Indosinian magmatism was intensive in Qinling, forming igneous rocks including at least the adakites, calc-alkaline granitoids, high-K calc-alkaline granitoids, alkaline intrusions, Rapakivi-like granites, and carbonatites. These rocks show zoning spatial distribution, namely, northward from the Mian-Lue suture, the Yangshan-Yanzhiba peraluminous S-type granite belt, southern Qinling high-Mg and adakitic calc-alkaline granite belt, northern Qinling high-K calc-alkaline granite belt, and the carbonatite-alkaline intrusion belt at the southern margin of North China craton. Such Indosinian magmatites with distinctive petrologic complexity, lithologic diversity, spatial zonation and compositional polarity cannot be formed in syn- and/or post-collisional tectonic settings, but could have resulted from a northward paleo-Tethysan slab subduction along the Mian-Lue geosuture. Although the Indosinian mineralization has been ignored for a long time, a great number of Triassic ore deposits of economic significance have been recently discovered, including Molybdenum-containing carbonatite dykes, porphyries and orogenic-type quartz veins; orogenic-type, porphyry-/breccia pipe-type, and Carlin-type and Carlin-like gold deposits; and orogenic-type silver-dominant poly-metal deposits. This shows that mineralization of various genetic types strongly occurred in the transition regime from oceanic slab subduction to intercontinental collision, and that the Indosinian ore deposits are of exploration potential in Qinling Orogen.

Key words: Qinling Orogen; paleo-Tethys; magmatic rocks; ore deposits; oceanic slab subduction; intercontinental collision

About the author: CHEN Yan-Jing, male, born in 1962, professor and Ph.D of Economic Geology, mainly engages in collisional orogeny and metallogeny; E-mail: yjchen@pku.edu.cn, gigyjchen@126.com.