

从华北陆块南缘大洋扩张到北秦岭造山带 板块俯冲的转换时限

闫全人¹⁾, 王宗起²⁾, 闫臻¹⁾, 王涛¹⁾, 张宏远³⁾, 向忠金¹⁾, 姜春发¹⁾, 高联达¹⁾

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 2) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037;
3) 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京, 100083

内容提要: 本文以北秦岭造山带华北陆块南缘被动陆缘火山裂谷(大洋?)盆地、早古生代岛弧-弧后盆地和晚古生代岛弧-蛇绿杂岩等构造相带为研究重点, 综合利用同位素年代学、古生物年代学、岩石学、岩石地球化学和同位素地球化学等实测数据, 系统研究和探讨了北秦岭造山带被动陆缘大洋扩张向俯冲增生造山转换的时限。研究显示: 华北陆块南缘由晚新元古代大洋扩张作用转化为板块俯冲作用的转换时限为早奥陶世, 约 472 Ma 左右。北秦岭造山带在古生代期间至少存在两期板块俯冲增生造山作用, 时代上向南变新, 空间上向南向洋内迁移。两次俯冲增生造山作用分别构筑了北秦岭造山带早古生代岛弧-弧后盆地和晚古生代岛弧-俯冲杂岩两条构造相带。

关键词: 北秦岭; 晚新元古代火山裂谷与大洋扩张; 古生代俯冲增生造山作用; 转换时限

早在 1945 年, 黄汲清先生(T K Huang, 1945)就将秦岭造山带定为华力西地槽褶皱带。后来研究进一步将秦岭造山带划分为北秦岭、中秦岭和南秦岭三部分(黄汲清等, 1977; 任纪舜等, 1980, 1991)。以天水—丹凤—信阳一线的秦岭主缝合带为界, 其北为加里东地槽褶皱带, 其南依次为中秦岭礼县—柞水华力西褶皱带、南秦岭印支褶皱带和松潘—甘孜印支褶皱带。姜春发等(1963, 1979)调查确定三叠系留风关浊积岩系和秦岭印支运动后, 南秦岭一直被认为是印支冒地槽褶皱带。20 世纪 70 ~ 80 年代鉴别确定“商丹缝合带”后(李春昱等, 1978, 1982; Matture et al., 1985; 许志琴等, 1988), 根据板块构造理论, 秦岭造山带被重新划分为北秦岭和南秦岭两个带(许志琴等, 1988; 张国伟等, 1988, 1991; 王清晨等, 1989; Zhang et al., 1989)。李春昱等(1978, 1982)认为东昆仑阿尼玛卿晚三叠世板块缝合带延到略阳—勉县一带(即勉略带), 是秦岭造山带内的第二条板块缝合带。张国伟等(1995, 2001)对勉略构造带进一步研究后, 提出了关于秦岭造山带“三块夹两缝”的构造划分, 即华北地块、秦岭微板块与扬子地块之间分别夹着早古生代商丹缝合带和早中生代勉略缝合带。冯益民等(2002)将商丹带

以北划为大洋盆地相和弧后盆地相。

尽管不同学者对秦岭造山带构造相带或构造单元的划分存在差异, 但都展示了这样的地质事实, 即秦岭造山带经历相当于 Wilson 旋回的板块构造过程。然而, 有两个关键问题尚不十分清晰: 一是被动陆缘拉张及由之而成的大洋盆地的确切地质时代, 特别是勉略古洋盆的时代争议还很大(冯庆来等, 1996; 冯益民等, 2004; 李春昱等, 1978, 1982; 李曙光等, 1996; 孙卫东等, 1995; 王宗起等, 1999; 夏林圻等, 1996; 闫全人等, 2007a; 殷鸿福等, 1996; 张国伟等, 1995, 2001; 张宗清等, 1996, 2002; Yan et al., 2004); 二是由大洋扩张向板块俯冲的构造转换的时代不清。

最近十年(1999 ~ 2008 年), 在前人工作基础上, 通过三轮地质大调查的详细野外工作, 综合利用同位素年代学、古生物年代学、岩石学、岩石地球化学和同位素地球化学等方面取得成果资料, 作者的研究团队对组成秦岭造山带的构造相带进行了重新厘定与划分(王宗起等, 2006)。在新方案中, 将北秦岭造山带划分为: ①晚新元古代—早古生代陆缘斜坡、②晚新元古代—早古生代陆缘火山裂谷(大洋?)盆地、③早古生代岛弧—弧后盆地、④晚古生代构造移

注: 本文为“十一五”国家科技支撑计划课题(编号 2006BAB01A11)、国家自然科学基金项目(编号 40872147 和 40472119)、中国地质调查局项目(编号 12120100782003-13, 1212010711816 和 1212010633601)和国土资源部“百人计划”项目(2004)资助的成果。

收稿日期: 2009-03-05; 改回日期: 2009-09-11; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 闫全人, 男, 1964 生。博士。研究员。主要从事造山带与沉积盆地及油气资源研究。Email: qryan@cags.ac.cn.

置块体、⑤晚古生代岛弧—俯冲杂岩和⑥晚古生代弧前盆地等构造相带。其中,前二个构造相带形成于华北地块南缘的被动大陆边缘环境,后四个带形成于板块俯冲与增生造山环境。北秦岭造山带范畴内曾发育一个由被动板块边缘向主动板块边缘的构造转换过程。本文以华北陆块南缘被动陆缘火山裂谷(大洋?)盆地、早古生代岛弧—弧后盆地和晚古生代岛弧—蛇绿杂岩等构造相带为研究重点,探讨北秦岭造山带被动陆缘大洋扩张向俯冲增生造山转换的时限,供地学界参评。并谨以此文恭贺姜春发先生八十华寿,表达后生学人对先生五十多年来在中国大地构造研究中的卓越贡献的诚挚敬意。

1 被动陆缘火山裂谷(大洋?)盆地

华北陆块南缘的被动陆缘火山裂谷盆地(volcanic rift),是指以宽坪群为代表的构造岩石单元。宽坪群西起甘肃天水,经陕西眉县—户县、商洛地区和河南卢氏—栾川—南召至云阳—方城,向东湮灭于南阳盆地。过南阳盆地,宽坪群又出露于桐柏—信阳北,终没于华北平原之下。断续出露长度约1000km。宽坪群,北与陶湾群、太华群、官道口群、汝阳群等以铁炉子—栾川断裂相邻,南与草滩沟群、斜峪关群、云架山群、二郎坪群等以斜峪关—瓦穴子断裂相邻(图1)。宽坪群最初由《1:200000 商南幅区域地质调查》定组,金守文(1976)将其定名为“宽坪群”,一直延用至今,时代被定为元古代。张寿广等(1991)曾提出宽坪群不是一个简单的地层单位,而是由若干个构造岩片堆叠而成的构造岩片组合体。

宽坪群从下向上由广东坪组、四岔口组和谢湾组组成。变铁镁质岩主要分布于广东坪组中。已有研究结果显示,宽坪群铁镁质岩组成复杂(张维吉等,1988;张宗清等,1994,1995,2006;陈保瑞等,1999;李靠社,2002;何世平等,2007;万渝生等,1990;肖思云等,1988;高洪学等,1989;闫全人等,2008)。代表性研究如,张宗清等(1994,1995)提出宽坪群中的变基性火山岩形成于华北大陆边缘弧后拉张的小洋盆环境。陈保瑞等(1999)也认为宽坪群具有大陆边缘弧后盆地性质。李靠社(2002)提出宽坪群为一套复理石杂砂岩+基性火山岩+硅镁质碳酸盐岩的岩石组合,形成于活动大陆边缘弧后盆地。万渝生等(1990)的研究显示,宽坪群变玄武质岩具有大洋拉斑玄武岩的成分特征,具轻稀土元素亏损或平坦型稀土配分模式,高场强元素含量较低,源自

地幔亏损源区,未遭受大陆物质的同化混染,形成于华北地块南缘被动大陆边缘的扩张海盆环境。宽坪群地层时代方面的争论较大(张维吉等,1988;河南地质三队,1978;张维吉等,1988;张宗清等,1994,1995,2006;乔秀夫等,1985;闫全人等,2008)。我们新近完成的地质大调查项目在户县马召、商县板桥北、北宽坪—焦安沟、南召马市坪等地的宽坪群浅变质碎屑岩中,采获凝源类7属9种、几丁虫5属17种和虫颚2属2种,经鉴定,这些微古化石的时代为早—中奥陶世(王宗起等,2006)。

本文地球化学分析结果显示,宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩虽然在变质程度上不同,但岩石地球化学组成非常相似: $\text{SiO}_2 = 46\% \sim 53\%$, $\text{TiO}_2 < 2\%$, MgO 含量较低($\text{Mg}^\# = 29 \sim 49$),均属亚碱性TH系列玄武质岩石。两类岩石的稀土配分模式呈平坦型(图2a & c),轻稀土元素(LREE)和重稀土元素(HREE)无明显分异($\text{Ce}/\text{Y}_{\text{bn}} = 0.9 \sim 1.7$),LREE略显富集,与E-MORB的配分模式相似。在N-MORB标准化蛛形图上,宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩的大离子亲石元素(LILE,如Sr、K、Rb、Ba)轻度富集,但斜长角闪岩的Th显示了槽状异常。高场强元素Ta和Nb相对其它高场强元素略显富集,而其它高场强元素(如P、Zr、Hf、Ti、Y和Yb等)既不富集也不亏损,大体保持了N-MORB的丰度水平(图2d & d),总体上显示了与E-MORB类似的地球化学特征。经过对张宗清等(1994)测年的数据重新处理,宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为正值,前者的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值集中于 $+5.67 \sim +7.82$ 和 $+8.15 \sim +10.19$ 两个区间,后者的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值则集中于 $+7.54 \sim +9.50$ 和 $+2.49 \sim +4.63$ 两个区间。 $+8.15 \sim +10.19$ 和 $+7.54 \sim +9.50$ $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值范围与N-MORB的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($+8.9 \sim +9.7$)相当,暗示宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩可能是由2个LREE亏损程度不同的源区端元的部分熔融和混合形成的。在Zr-Sr-Ti判别图上(图2e),基性熔岩与斜长角闪岩均位于OFB区域,暗示了二者与大洋地壳的亲缘性。在Hf-Th-Nb判别图上(图2f),基性熔岩落在与N-MORB与E-MORB的过渡带,表明二者应是比N-MORB更加富集源区的产物。

对岔口铺南的宽坪群变基性火山岩块的锆石SHRIMP测年表明,捕获的残余锆石晶核年龄明显偏大,所获得的3个锆石晶核的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄分别是 $1844 \pm 46\text{Ma}$ 、 $1144 \pm 63\text{Ma}$ 和 1023 ± 26

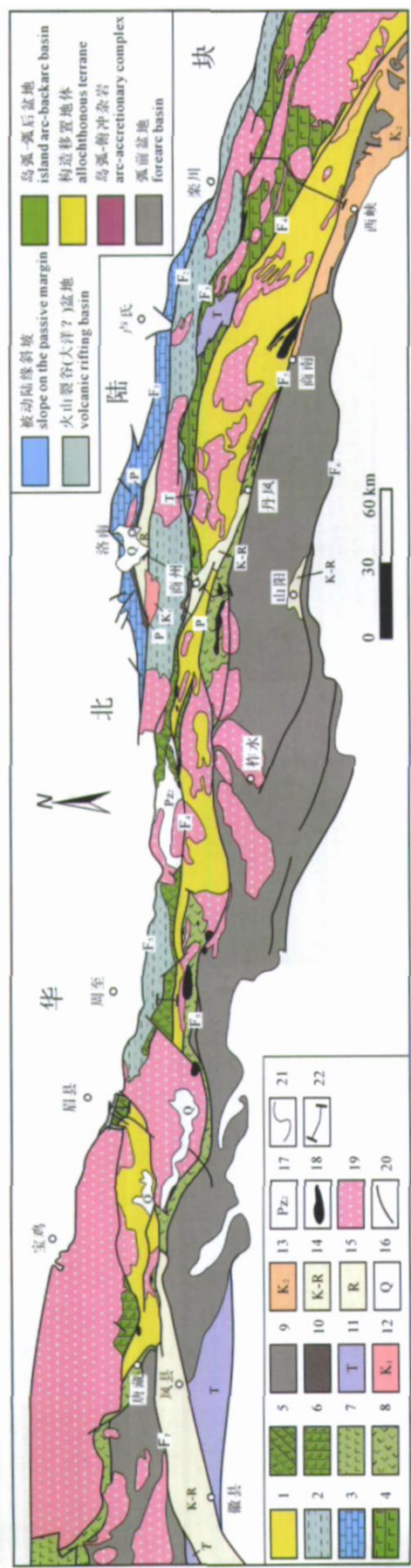


图 1 北秦岭造山带(部分)地质构造简图(据张二朋等 1993 和王宗起等 2006, 简化)

Fig. 1 Sketch map showing geology and structure of the north Qinling orogenic belt (modified after Zhang et al., 1993 and Wang et al., 2006)

1—秦岭群; 2—宽坪群; 3—陶湾群; 4—二郎坪群; 5—斜峪关群; 6—草滩沟群; 7—李子园群; 8—丹凤群; 9—泥盆系; 10—二叠系; 11—三叠系; 12—下白垩统; 13—上白垩统; 14—白垩系-第三系; 15—第三系; 16—第四系; 17—古生界未分; 18—超镁铁质岩块; 19—侵入岩; 20—断层; 21—地层界线; 22—实测剖面

1—Qinling Group; 2—Kuanping Group; 3—Taowan Group; 4—Erlangping Group; 5—Xieyuguan Group; 6—Caotangou Group; 7—Liziyuan Group; 8—Danfeng Group; 9—Devonian; 10—Permian; 11—Triassic; 12—lower Cretaceous; 13—upper Cretaceous; 14—Cretaceous-Tertiary; 15—Tertiary; 16—Quaternary; 17—undivided Paleozoic; 18—ultramafic block; 19—intrusive rock; 20—fault; 21—geological boundary; 22—transection

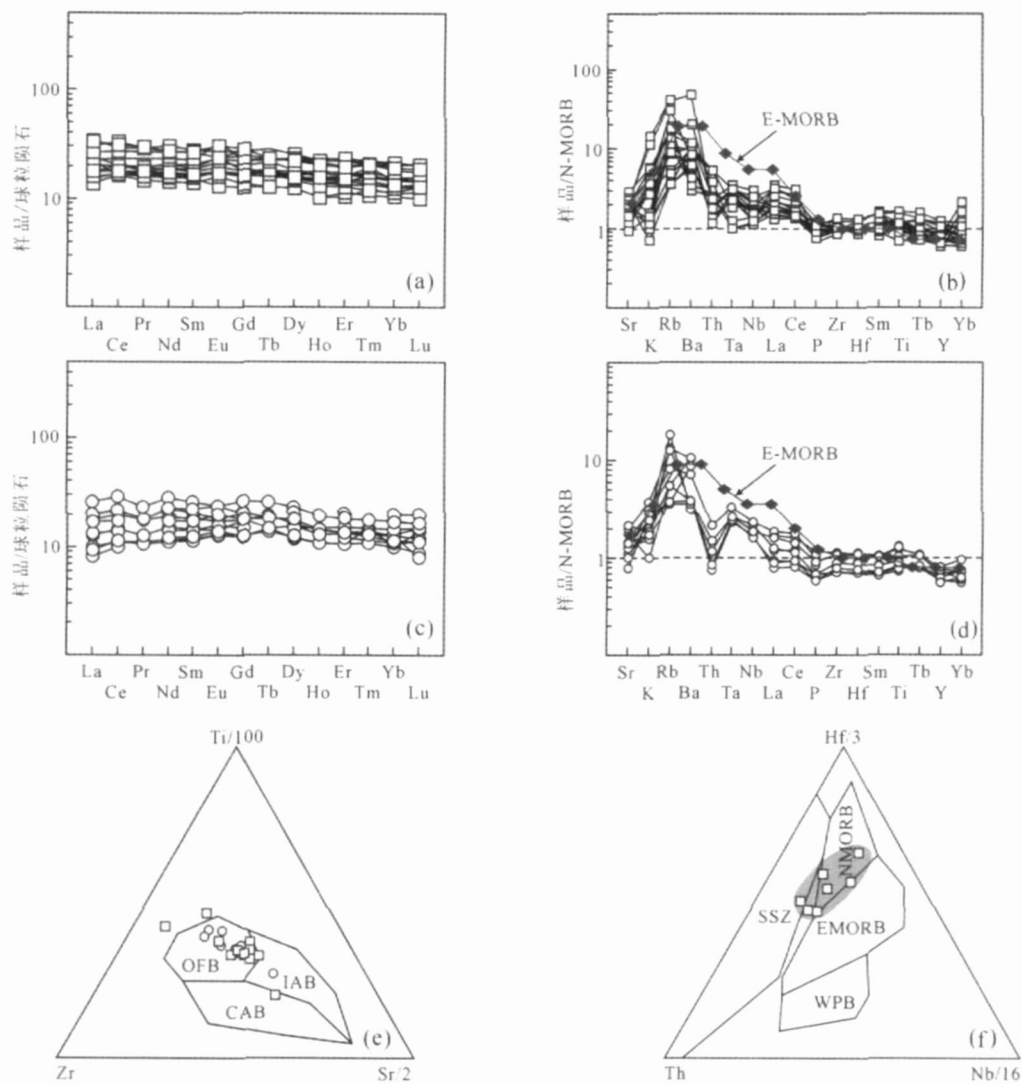


图 2 宽坪群铁镁质岩石标准化稀土配分图和微量元素蛛形图及构造环境判别图
(标准化球粒陨石和 N-MORB 值据 Sun et al., 1989. E-据 Pearce et al., 1973; F-据 Wood, 1980)

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns, N-MORB-normalized trace element spider diagrams, and discrimination diagrams of Ti-Zr-Sr (after Pearce et al., 1973) and Hf-Th-Ta (after Wood, 1980) for metamafic rocks from the Kuangping group (The values of chondrite and N-MORB used in normalizing samples are after Sun et al., 1989)
OFB—洋底玄武岩; IAB—岛弧拉斑玄武岩; CAB—岛弧钙碱性玄武岩; E-MORB—富集型洋脊玄武岩; N-MORB—亏损型洋脊玄武岩。
OFB—Ocean floor basalt; IAB—Island arc basalt; CAB—calc-alkaline basalt; E-MORB—enriched mid-oceanic ridge basalt;
N-MORB—normal mid-oceanic ridge basalt

Ma。而其余 8 个测点的年龄值比较集中, 构成一个主群, 其²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 611 ± 13Ma (图 3), 即宽坪群中的变基性熔岩块的形成时代为晚新元古代 Ediacaran 期。3 个具有较老年龄的锆石晶核可能是岩浆活动过程中捕获古老地壳成分的记录, 这也从另一方面暗示宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩可能不是单一的亏损地幔源区。对变基性火山岩的围岩, 石榴子石黑云母石英片岩中的黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年结果表明, 6 个温阶的⁴⁰Ar/³⁹Ar 比值非常稳定, 年龄谱平坦, ³⁹Ar 析出量为 62.79%

(总析出量为 87.14%), 初始⁴⁰Ar/³⁶Ar 为 279 ± 13Ma, 略低于 Nier 尼尔值 (295.5Ma), 暗示该样品不存在过剩 Ar。坪年龄为 319.1 ± 3.6Ma (MSWD = 0.56) (图 4a), 与之对应的等时线年龄为 320.4 ± 3.5Ma (MSWD = 0.81) (图 4b), 二者在误差范围一致, 表明宽坪群石榴子石黑云母石英片岩的形成时代或原岩变质时代为早石炭世末。

2 北秦岭造山带岛弧-弧后盆地

北秦岭造山带早古生代岛弧-弧后盆地主要是

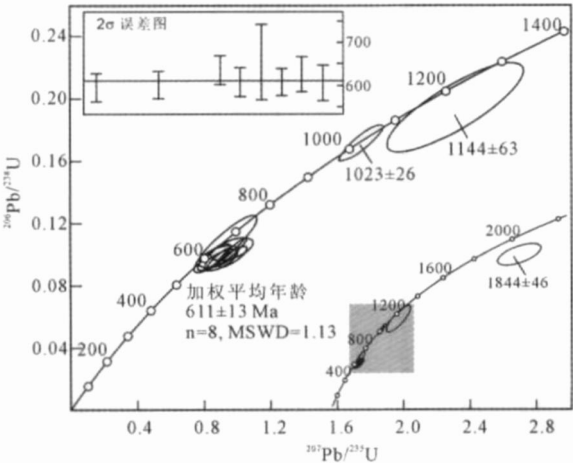


图 3 宽坪群变基性火山岩(QD04-58)SHRIMP 锆石 U-Pb 谐和曲线

Fig. 3 SHRIMP zircon U-Pb concordia plots for the sample (QD04-58) in the Kuanping group

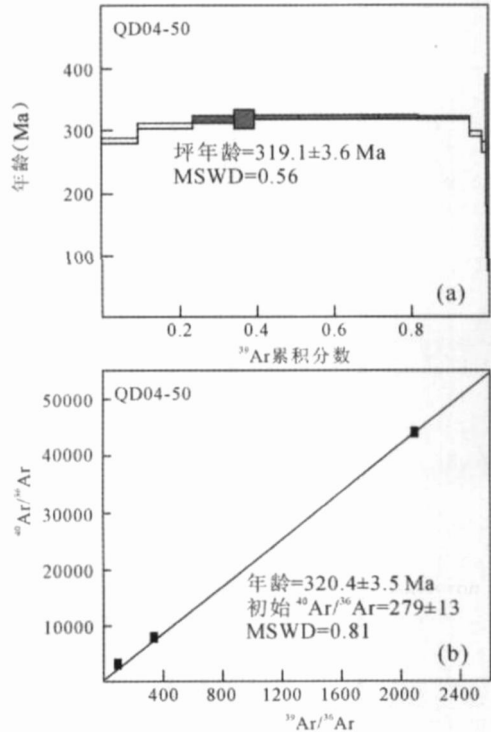


图 4 宽坪群石榴黑云石英片岩(QD04-50)中黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年结果

Fig. 4 Ar-Ar analyses for biotite isolated from the schist sample (QD04-50) in the Kuanping Group

指沿北秦岭造山带东西向展布的早古生代火山岛弧与弧后盆地, 包括草滩沟群、斜峪关群、云架山群、二郎坪群等(图 1)。

2.1 草滩沟群和斜峪关群岛弧

草滩沟群分布于天水党川—花石山—利桥、两

当县张家庄、太白县唐藏草滩沟一带的北秦岭西段。北与石炭纪草凉驿组、南与秦岭群呈断层接触。自下而上划分为红花铺组、张家庄组和龙王庙组。红花铺组产腕足类、三叶虫和腹足类, 时代为早奥陶世中期—中奥陶世早期。张家庄组以中基性、中酸性火山熔岩、火山碎屑岩为主, 产珊瑚、腹足类、层孔虫和竹节石等, 顶部大理岩含海百合茎, 珊瑚化石的时代为晚奥陶世。龙王沟组以深灰色含凝灰质粉砂岩、灰色凝灰质细砂岩为主, 夹安山质火山岩, 下与张家庄组整合接触, 顶部因断层缺失。龙王沟组中未发现生物化石, 但其岩石组合及整合于张家庄组之上的地层关系分析, 时代被定为晚奥陶世晚期(陕西区调队, 1996)。

斜峪关群分布于北秦岭中段, 西起眉县铜峪, 向东经涝峪、蓝田汤峪、草坪至商州, 被北西向草坪—丹凤断裂所截, 东西断续延伸达 500km。南北两侧分别与秦岭群、宽坪群和上古生界甘峪组呈不整合或断层接触(图 1)。按岩石组合分为文家山组和干岔沟组。文家山组以凝灰质砂岩为主, 干岔沟组为一套中性火山岩—沉积岩组合。斜峪关群是陕西地层表编写组(1983)从宽坪群中解体出来的一套浅变质火山—沉积岩系, 宋子季等(1987)正式创名于眉县斜峪关, 时代定为早古生代。陕西地层表认为斜峪关群可与二郎坪群对比, 并将其更名为二郎坪群。曹宣铎等(1990)在涝峪与斜峪关群层位相当的大理岩中采获泥盆纪床板珊瑚化石, 陕西地质八队(1980)在同一层位发现中—晚奥陶世珊瑚化石。

对斜峪关群和草滩沟群火山岩的成因争论较大。宋志高等(1991)通过对天水—宝鸡间的古生代火山岩系及其构造关系的研究, 提出草滩沟群火山岩石类型主要由玄武岩—安山岩—英安岩—流纹岩组成钙碱系列, 具双峰特征, “为岛弧初期与裂谷末期阶段的产物”。孙民生等(1995)对位于秦岭群北南两侧的草滩沟群和丹凤岩群火山岩的岩石类型、岩石化学及地球化学特征进行了对比, 认为二者均属亚碱性钙碱系列, 前者为中—酸性岩组合, 具弧后盆地拉张裂谷特征; 后者为中—基性岩组合, 具岛弧外侧—边缘海型特征。但多数学者认为斜峪关群和草滩沟群形成于加里东—早华力西造山期, 是扬子板块向华北陆块俯冲、碰撞的产物(李春昱等, 1978, 1982; 任纪舜等, 1980, 1990; 肖思云等, 1988, 许志琴等, 1988; 王润三等, 1990; 张国伟等, 1988; 闫全人等, 2007b)。

本文测试结果表明, 斜峪关群火山岩为亚碱性

TH 系列。基性火山岩的 TiO_2 含量变化较大 ($0.40\% \sim 1.75\%$), 多小于 1.00% (集中于 $0.40\% \sim 0.82\%$)。斜峪关群基性熔岩稀土元素总量间于 $40.85 \sim 71.88 \mu\text{g/g}$, LREE 轻度富集 ($\text{La}/\text{Y}_{\text{BN}} = 1.31 \sim 3.27$), 球粒陨石标准化稀土配分形式呈右倾形(图 5a)。N-MORB 标准化图上, 斜峪关群火山岩的大离子亲石元素(LILE, 如 Sr, K, Rb, Ba 和 Th)明显富集, 具明显的 Ta、Nb 低谷, 略显负异常(图 5b), 其它高场强元素(HFSE, 如 Zr, Hf, Ti 等)也显示亏损, 展示了典型的岛弧火山岩的特征。

草滩沟群张家庄组层位火山岩以 CA 系列为主。基性火山岩(玄武岩和细碧角斑岩)稀土元素总量为 $59.06 \sim 65.26 \mu\text{g/g}$, LREE 中度富集 ($\text{La}/\text{Y}_{\text{BN}} = 2.50 \sim 2.97$), 稀土配分形式呈右倾形(图 5c), 大离子亲石元素(Sr, K, Rb, Ba 和 Th)明显富集, HFSE(Ti, Y, Yb)呈现亏损, Ta、Nb 不亏损, 但具明显异常低谷(图 5d), 同样展示了典型的岛弧火山岩的特征。斜峪关群和草滩沟群火山岩低(Eu 值为 $0.62 \sim 1.14$)暗示初始玄武质岩浆的分离结晶程度非常低, 初始岩浆中斜长石分异作用很弱。

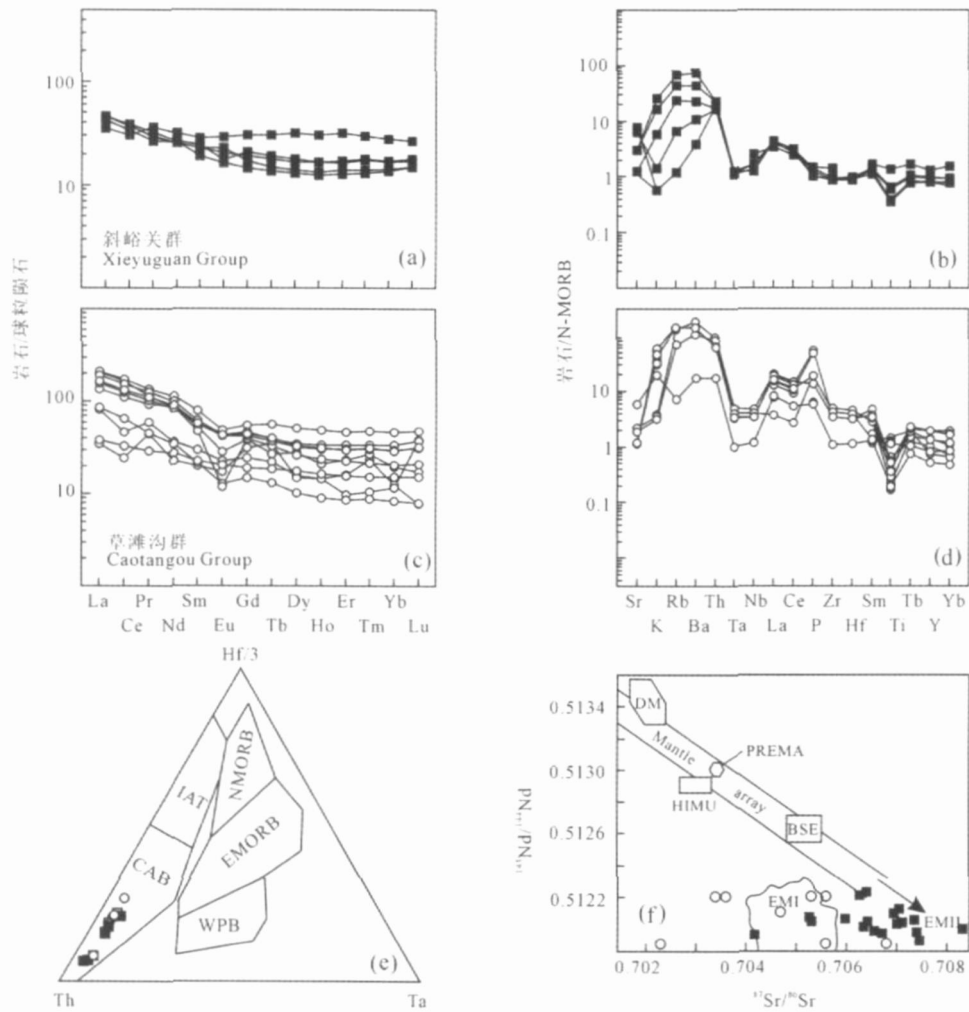


图 5 斜峪关群和草滩沟群铁镁质岩石标准化稀土配分图和微量元素蜘蛛图及构造环境判别图
(E—据 Wood, 1980; F—据 Zindler et al., 1986)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns, N-MORB-normalized spider diagrams, and discrimination diagrams of Hf-Th-Ta (after Wood, 1980) and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (after Zindler et al., 1986) for metamafic rocks from the Xieyuguan and Caotangou Group
IAT—岛弧拉斑玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩; NMORB—亏损型洋脊玄武岩; EMORB—富集型洋脊玄武岩; WPB—板内玄武岩; DM—亏损地幔; Mantle array—地幔库; PREMA—初始地幔; BSE—大硅质地球; EM I—I 型富集地幔; EM II—II 型富集地幔; HIMU—高 U/Pb 比地幔; IAB—Island arc basalt; CAB—calc-alkaline basalt; E-MORB—enriched mid-oceanic ridge basalt; N-MORB—normal mid-oceanic ridge basalt; WPB—within-plate basalt; DM—depleted mantle; PREMA—prevalent mantle; BSE—bulk silicate earth; EM I & EM II—enriched mantle; HIMU—mantle with high U/Pb ratio

地球化学构造环境判别图上, 斜峪关群和草滩沟群基性熔岩均投入 $Hf/Th < 3$ 的岛弧钙碱性玄武岩区(图 5e), 表明这些基性熔岩形成于与板块俯冲作用相关的岛弧环境, 并具有显著的俯冲板片沉积物加入。经过对前人数据重新处理, 斜峪关群和草滩沟群变基性火山岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值均为正值, 集中于 $+8.40 \sim +10.97$ 和 $+5.42 \sim +7.83$ 两个区间, 前者的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值范围与 N-MORB 的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 ($+8.9 \sim +9.7$) 相当, 暗示斜峪关群和草滩沟群变基性火山岩可能是由 2 个 LREE 亏损程度不同的源区端元的部分熔融和混合形成的。在 $^{87}Sr/^{86}Sr - ^{144}Nd/^{143}Nd$ 协和图上(图 5f), 斜峪关群和草滩沟群火山岩落入富集地幔源区。如果剔除成岩过程中的水岩作用以及后构造蚀变的影响, 二者的源区可能主要是 EMI 型富集地幔, 表明斜峪关群和草滩沟群火山岩的岩浆源区主要是俯冲洋壳板片熔融混染的幔源岩浆, 形成于板块俯冲作用背景下的岛弧环境。

对选自斜峪关群建组剖面熔岩样品的锆石进行了 SHRIMP 年代学测量。其中两颗锆石含捕晶、呈核幔结构。一个捕晶的年龄为 $1294 \pm 34 Ma$, 其他 14 个测点给出一个非常谐和的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄 $472 \pm 11 Ma$ (图 6), 表明斜峪关群基性熔岩形成时代为早奥陶世。锆石捕晶较老的年龄代表了混染地壳的时代。

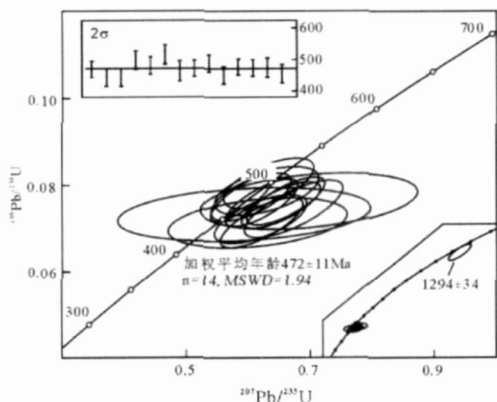


图 6 斜峪关群火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 谐和曲线

Fig. 6 SHRIMP zircon U/Pb concordia plots for the sample (QD04-13) in the Xieyuguan Group

2.2 二郎坪群和云架山群岛弧-弧后盆地系统

二郎坪群夹于朱阳关—大河和瓦穴子—王岗断裂之间, 北西向西展布(图 1)。河南区调队(1973)在西峡北部 1/5 万地质填图时从宽坪群解体并建立了二郎坪群, 时代定为震旦系。金守文等(1973)提出二郎坪群地层自北向南为一单斜构造, 包括八个

组, 即: 二进沟组、大庙组、火神庙组、小寨组、抱树坪组、子母沟组、火山沟组、赶脚沟组, 时代定为震旦纪。河南省区测队(1973)在西峡县北部开展 1/5 万区调时, 将二郎坪群分为: 歪头山组、大栗树组、张家大庄组、刘山岩组、大河组, 时代定为早古生代。金守文(1976)将其下部三个组命名为“二郎坪群”。之后, 有研究者在西峡湾潭二郎坪群火神庙组硅质岩中采得放射虫、单射或四射海绵骨针化石、疑源化石(张思纯等, 1983; 李采一等, 1990; 裴放等, 1995; 王学仁, 1995; 孙勇等, 1996), 时代为寒武纪—奥陶纪。在夏馆二郎坪群大庙组结晶灰岩中采到链珊瑚等化石, 其时代为志留纪(任纪舜等, 1987)。我们最近工作在河南西峡二郎坪、南召县马市坪等地区的二郎坪群二进沟组和火神庙组的复理石碎屑岩中采集了微体生物化石样品 38 件, 孢子有 20 余属 40 余种、凝源类 2 属 2 种和少数的几丁虫化石。这些微体古生物化石的时代为中泥盆世早期, 相当于西欧艾菲尔阶(Eifelian), 表明二郎坪群中部分砂板岩的形成时代为泥盆纪。

二郎坪群最早被认为是形成于加里东—早华力西造山期的蛇绿岩建造(李春昱等, 1978, 1982; 任纪舜等, 1980, 1990; 肖思云等, 1988; 王润三等, 1990)。张国伟(1988)和许志琴等(1988)提出二郎坪蛇绿岩具有弧后小洋盆的性质特点, 为早古生代末古商丹洋向华北陆块之下俯冲消减过程中, 在活动大陆边缘北侧发育起来的弧后小洋盆。张国伟等(2001)提出二郎坪群以拉斑玄武岩和钙碱性基性熔岩为主, 含中酸性火山岩; 南阳盆地以东, 二郎坪群以拉斑系列基性和酸性火山岩为主, 含相当数量的钠质火山岩, 具类似于双模式岩套的特征。李亚林等(1999)认为二郎坪群形成于大陆岛弧区附近或活动大陆边缘区, 属不稳定的活动陆缘环境, 即一个弧后盆地环境, 源于古秦岭洋向秦岭古岛弧之下的俯冲作用。最近, 韦昌山等(2003)根据火山岩的岩石化学研究成果提出, 桐柏刘山岩一带的火山岩系的岩石类型不具大洋拉斑玄武岩特征, 而是属于弧后盆地型, 发育了刘山岩块状硫化物(VMS)型铜锌矿床。

陕西区调队(1979)和河南地区调队(1973)在二郎坪群西侧、豫陕交界的云架山一带的碳酸盐岩中采到海百合茎等化石, 其时代为奥陶纪, 并在蟒岭地区建立了“云架山群”, 自下而上为安坪组、干江河组、月牙沟组、粉笔沟组, 并于干江河组大理岩中发现珊瑚、海百合茎化石, 时代定为早古生代。林德超等(1990)在南召青山干江河组大理岩中采得丰富的

腹足类、头足类和珊瑚等晚奥陶世-志留纪化石。

本文对湾潭-二郎坪剖面和军马河-白果树剖面的二郎坪群火山岩、丹凤留仙坪-洛南县湖涂岔剖面的云架山群安坪组火山岩进行了详细地球化学、同位素地球化学及沉积岩研究。

湾潭-二郎坪地质剖面火山岩主要分布于二郎坪群大庙组中,包括枕状熔岩和块状熔岩两套不同产状的火山岩。地球化学分析结果(表1)表明,二类熔岩均属TH系列亚碱性玄武岩(图7a),但表现了三种不同的地球化学行为。样品(QLTS-3, -22, -26~28)的稀土总量为46.15~159.17 $\mu\text{g/g}$, LREE和HREE分异显著, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 2.70 \sim 12.23$, 稀土呈右倾型分布(图7b)。平坦的重稀土(HREE)富集程度与N-MORB一致,约为球粒陨石20倍(Sun et al., 1989)。但LREE富集程度间于E-MORB和OIB之间。N-MORB标准化图图上,大离子亲石元素Sr明显亏损,其它的较为富集。但高场强元素Nb和Y显著富集,呈明显的高峰,Zr略显亏损(图7c),展示了与E-MORB相类似的特征。样品(QLTS-5, -30~34)稀土总量较低,为29.96~41.97 $\mu\text{g/g}$, LREE和HREE分异不明显, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.94 \sim 2.56$, 稀土呈平坦型分布(图7d)。大离子亲石元素相对明显富集,高场强元素显著亏损,具明显的Nb和Ta负异常槽(图7e)。样品(QLTS-23, -29, -39, -42和-46)的稀土总量为67.19~97.88 $\mu\text{g/g}$, LREE和HREE分异显著, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.84 \sim 6.93$, 多数大于3.00, 稀土呈明显的右倾型分布(图7f)。大离子亲石元素较为富集,高场强元素Nb和Ta显著亏损,呈明显的负异常低谷(图7g)。后二类火山岩表现了与俯冲作用密切相关的地球化学行为,REE富集程度的差异是不同的。而第一类样品展示了与板内玄武岩相似的微量元素地球化学特征。

沿军马河-白果树村剖面出露的二郎坪群铁镁质岩石为一套由基性熔岩、辉长辉绿岩、辉长岩构成的铁镁质岩石组合。这套铁镁质杂岩展现了截然不同的地球化学特征(表1), SiO_2 为47.01%~55.15%, TiO_2 较低,为0.45%~2.01%,多小于0.75%; MgO 含量相对较高(7.03%~9.00%), $\text{Mg}^{\#} = 51 \sim 64$ 。稀土总含量较低,为21.13~41.19 $\mu\text{g/g}$, LREE略显亏损, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.76 \sim 1.06$, 稀土模式平坦(图7h)。平坦的未分异的HREE相对于N-MORB略显亏损(约为球粒陨石的18~20倍)。军马河铁镁质岩石的高场强元素略显亏损,多

呈负异常,具Ta和Ti的小幅负异常低(图7i)。军马河铁镁质岩石表现与E-MORB和IOB明显不同的地球化特征,明显的高场强元素亏损暗示这些铁镁质岩石与俯冲作用相关。

地球化学特征也反映出二郎坪群铁镁质岩石具多种成因环境。在经典的Hf-Th-Ta判别图上,军马河铁镁质杂岩中的辉长岩、辉绿岩和基性熔岩落于N-MORB和SSZ过渡的区域(图7j),暗示其为亏损幔源且有俯冲物质混染,最可能是弧后盆地环境。而沿二郎坪-湾潭剖面的铁镁质岩石则落入与俯冲作用上关的岛弧区域,即超级俯冲带(SSZ)环境。但是,样品(QLTS-3, -22, -26~28)并未显示与俯冲作用有关的微量元素地球化学特征。尤其是高场强元素富集的特点展示了间于E-MORB和OIB之间过渡类型岩石的特征,表明这些样品可能是大洋板内(最可能是弧后扩张)岩浆活动产物。云架山群铁镁质岩石以构造块体赋存于变沉积岩地层中,规模小,出露数量少。初步分析表明,基性熔岩和辉长岩的初始锶同位素比值为0.705407~0.705662,初始钕同位素比值为0.511781~0.512249。云架山群变基性火山岩和辉长岩均为富集地幔源区,不象军马河杂岩中辉长岩来自地幔阵列,暗示该辉长岩可能混染地幔源区岩浆结晶分异的产物。从上述岩石组合及其地球化学特征分析,二郎坪群中富火山岩的大庙组及与之相对应的云架山群有可能是一套岛弧与弧后的混杂体。

3 北秦岭造山带岛弧-俯冲杂岩

北秦岭造山带岛弧-俯冲杂岩构造相带是指以丹凤群为代表的一套构造岩石单元,包括西秦岭李子园群、罗汉寺岩群和丹凤群等。丹凤群断续出露在凤县唐藏、太白、眉县黑河、商县三十里铺及丹凤商南一带。丹凤群主要由杂砂岩基质以及裹于其中的镁铁质火山熔岩块、基性岩墙群和斜长花岗岩等组成,局部地段镁铁质熔岩可见枕状构造。

已有研究成果普遍认为,丹凤群为一套蛇绿混杂岩,形成于加里东一早华力西造山期,是扬子板块向华北陆块俯冲、碰撞的产物(李春昱等, 1978, 1982; 任纪舜等, 1980, 1990; 肖思云等, 1988, 张国伟等, 1988; 许志琴等, 1988; 王润三等, 1990), 但尚存较大争议。有学者认为是蛇绿岩带(张国伟, 1988; 许志琴等, 1988; 任纪舜等, 1990; 张国伟等, 1995; 张宗清等, 1996), 也有学者认为属非蛇绿岩(杨森楠, 1985; 杨巍然等, 1991; 邓清录等, 1996)。还有学者

表 1 二郎坪—湾潭二郎坪群镁铁质岩地球化学测试结果
Table 1 Geochemical analytical results of mafic rocks from the Erlangping Group

样品号	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS	QLTS		
	-3	-5	-22	-23	-26	-27	-28	-29	-30	-32	-33	-34	-39	-42	-46	-79	-80	-82	-83	-84	-85	-86	-87	-88	-89			
剖面	二郎坪—湾潭剖面												军马河剖面															
岩性	块状熔岩			枕状熔岩			斑状熔岩			黑色玄武岩			块状熔岩			辉长岩						辉长岩		辉长辉绿岩				
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Loi	Total	Mg [#]	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	54.40	45.56	51.59	41.68	41.36	41.21	51.58	49.37	49.10	45.93	42.77	47.07	46.84	45.82	50.75	47.01	50.75	50.69	50.20	49.95	49.82	55.15	49.54	48.99	50.83			
	1.20	0.40	0.65	0.61	0.80	0.90	0.95	1.09	0.75	0.82	1.12	0.87	1.96	1.85	1.79	2.01	0.73	0.72	1.02	0.98	1.01	0.62	1.00	0.45	0.65			
	13.33	13.75	15.69	14.77	14.37	15.39	15.15	14.43	15.08	15.94	15.09	15.42	16.67	17.52	13.03	14.14	15.63	15.88	15.34	15.18	14.86	16.70	14.97	17.16	15.11	15.11	15.11	15.11
	4.61	4.01	3.61	4.40	4.58	6.98	5.31	6.92	4.58	4.69	4.36	5.51	6.46	6.25	5.94	9.21	5.08	5.22	5.87	5.66	5.91	4.67	5.72	5.37	5.75			
	5.64	4.90	4.41	5.38	5.60	8.53	6.49	8.45	5.60	5.73	5.33	6.74	7.89	7.64	7.26	7.54	4.16	4.27	4.80	4.63	4.83	3.82	4.68	4.39	4.70			
	0.18	0.20	0.12	0.17	0.17	0.20	0.21	0.22	0.17	0.19	0.14	0.15	0.17	0.32	0.14	0.22	0.16	0.15	0.16	0.16	0.18	0.12	0.17	0.15	0.18			
	3.18	5.18	5.80	7.68	6.48	9.19	4.82	5.43	8.56	6.35	9.14	7.93	5.37	6.79	7.00	7.51	7.75	7.03	8.25	8.30	7.94	5.10	8.14	8.51	7.88			
	6.36	12.78	8.39	12.99	13.50	11.26	10.35	8.79	11.77	15.52	14.30	11.13	8.35	7.20	7.43	7.67	11.51	10.67	10.91	11.25	11.94	9.84	11.88	11.57	10.42			
	2.51	2.87	2.99	3.48	1.81	2.03	2.28	3.94	2.85	3.18	2.10	3.84	4.38	4.02	2.07	3.46	2.74	3.06	2.80	2.80	2.38	2.86	2.39	2.43	3.01			
	2.92	0.23	0.34	0.46	0.31	0.09	0.07	0.07	0.08	0.21	1.12	0.28	0.90	0.30	3.39	0.14	0.10	0.20	0.13	0.10	0.11	0.46	0.10	0.21	0.15			
	0.30	0.05	0.20	0.12	0.01	0.12	0.14	0.14	0.11	0.09	0.09	0.11	0.23	0.27	0.18	0.15	0.05	0.06	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09	0.03	0.04			
	5.38	9.90	6.13	8.10	10.82	4.05	2.63	1.33	1.39	1.42	4.38	1.05	0.95	2.10	1.19	0.72	0.79	0.96	0.56	0.45	0.52	0.59	0.62	0.81	0.54			
	100.00	99.82	99.93	99.86	99.81	99.95	99.99	100.18	100.06	100.08	99.95	100.10	100.16	100.08	100.16	99.79	99.45	98.91	100.13	99.55	99.58	100.01	99.31	100.06	99.28			
	30	45	50	52	47	45	36	33	54	46	57	48	34	41	43	43	59	56	57	58	56	51	57	60	56			
	9.66	4.60	36.87	15.65	8.45	21.96	12.52	12.23	9.37	5.01	3.56	7.70	12.82	13.45	16.29	2.23	3.11	2.05	3.79	3.73	3.55	2.71	3.56	1.78	3.42			
	21.41	9.56	66.38	27.25	17.76	45.41	24.49	23.18	18.09	11.54	9.12	15.84	26.44	28.82	33.16	5.45	7.67	5.27	9.93	9.64	9.78	6.10	7.98	4.57	7.35			
	2.75	1.31	7.29	3.12	2.14	4.98	3.17	3.02	2.29	1.65	1.56	2.34	3.62	3.88	4.24	0.87	1.09	0.78	1.46	1.45	1.43	1.02	1.34	0.69	1.14			
	12.65	5.49	25.47	11.93	8.57	20.36	13.02	12.58	10.16	7.53	7.79	10.12	17.12	17.55	17.69	4.45	5.25	4.13	7.49	7.43	7.56	4.98	6.33	3.61	5.25			
	3.68	1.51	6.24	2.90	2.18	4.92	3.38	3.34	2.57	2.20	2.65	2.94	4.92	5.01	5.14	1.51	1.63	1.55	2.35	2.30	2.30	1.78	2.21	1.25	1.75			
	1.14	0.52	1.43	1.03	0.68	1.25	1.06	0.95	0.83	0.77	1.08	1.00	1.63	1.58	1.69	0.65	0.68	0.81	0.75	0.76	0.80	0.54	0.76	0.54	0.70			
	3.62	1.65	5.14	3.18	1.90	4.28	3.57	3.48	3.02	2.90	3.53	3.72	5.69	5.82	5.99	1.98	2.39	2.08	3.20	3.16	3.02	2.59	3.11	1.67	2.35			
	0.61	0.27	0.72	0.46	0.31	0.67	0.64	0.49	0.48	0.53	0.63	0.68	0.92	0.97	0.89	0.38	0.47	0.40	0.61	0.59	0.59	0.49	0.59	0.33	0.46			
	3.65	1.84	3.85	2.68	1.74	4.13	4.03	3.04	3.07	3.66	4.42	4.68	5.88	6.33	5.48	2.66	3.26	2.76	4.28	4.12	4.16	3.47	4.05	2.44	3.16			
	0.86	0.40	0.77	0.55	0.34	0.84	0.85	0.65	0.68	0.83	0.96	1.08	1.29	1.31	1.11	0.59	0.71	0.63	0.89	0.88	0.90	0.72	0.85	0.53	0.69			
	2.32	1.14	2.18	1.65	0.93	2.35	2.55	1.86	1.96	2.34	2.78	2.96	3.45	3.75	2.88	1.69	2.18	1.83	2.62	2.67	2.69	2.17	2.53	1.55	2.02			
	0.37	0.18	0.33	0.27	0.13	0.37	0.37	0.29	0.30	0.38	0.41	0.50	0.56	0.56	0.43	0.27	0.34	0.29	0.44	0.43	0.43	0.35	0.42	0.26	0.35			
	2.56	1.29	2.16	1.62	0.88	2.51	2.48	1.81	1.93	2.28	2.72	3.00	3.28	3.72	2.52	1.75	2.17	1.90	2.95	2.75	2.78	2.16	2.76	1.67	2.31			
	0.41	0.20	0.34	0.24	0.13	0.37	0.39	0.27	0.28	0.35	0.40	0.46	0.48	0.55	0.37	0.26	0.31	0.29	0.42	0.42	0.42	0.32	0.41	0.24	0.35			

续表 1

Total	65.68	29.96	159.17	72.53	46.15	114.40	72.53	67.19	55.03	41.97	41.61	57.02	88.10	93.30	97.88	24.75	31.26	24.78	41.19	40.34	40.41	29.40	36.90	21.13	31.29
(La/ Yb)N	2.70	2.56	12.23	6.93	6.87	6.28	3.62	4.85	3.48	1.58	0.94	1.84	2.80	2.59	4.64	0.91	1.03	0.77	0.92	0.97	0.91	0.90	0.93	0.76	1.06
Eu*	0.95	1.00	0.75	1.03	1.00	0.82	0.93	0.85	0.91	0.93	1.08	0.92	0.94	0.89	0.93	1.14	1.06	1.38	0.84	0.86	0.93	0.76	0.88	1.14	1.06
Sc	2.26	35.46	0.67	36.77	0.30	0.27	0.37	32.40	41.66	38.72	40.02	54.81	44.79	50.16	35.09	37.56	39.68	35.55	37.57	39.60	38.07	44.20	39.04	35.56	40.14
Co	32.42	39.28	27.58	41.29	23.51	47.27	13.43	34.62	38.35	33.17	43.35	54.49	39.95	37.25	38.46	29.54	38.39	34.75	41.92	40.06	37.42	39.80	40.55	39.22	39.13
Rb	24.23	10.89	14.42	10.18	10.32	8.34	10.94	2.22	0.16	18.44	113.80	7.91	28.66	8.85	157.45	3.25	1.22	16.44	4.14	0.20	0.37	0.73	0.61	20.87	4.19
Sr	102.15	210.32	6.37	281.07	7.26	4.09	1.50	238.66	243.84	386.30	138.61	153.89	381.92	647.60	171.96	162.74	248.90	156.55	176.09	158.89	179.55	145.30	175.90	144.94	192.26
Y	134.09	12.53	439.14	18.30	485.15	161.04	423.88	21.51	19.45	23.80	26.94	31.24	34.69	39.22	32.68	16.71	20.19	18.43	25.68	24.24	24.75	19.22	23.81	15.73	19.82
Zr	21.74	25.80	21.69	44.61	8.54	22.97	22.20	43.04	42.92	47.69	55.60	73.27	107.33	129.55	77.67	22.71	24.39	22.46	55.97	54.54	53.15	24.08	48.57	21.96	26.95
Nb	67.73	0.42	103.03	1.71	37.36	59.63	57.93	0.74	1.21	1.56	2.20	3.60	1.87	3.25	9.23	1.87	3.42	1.35	2.57	2.53	1.71	1.38	3.00	1.83	1.90
Cs	0.49	1.13	0.55	0.97	0.20	0.62	0.70	0.16	0.03	2.35	5.79	2.68	8.48	2.02	13.70										
Ba	480.35	140.87	297.18	246.00	157.01	19.26	43.15	50.27	49.92	29.32	128.46	65.60	273.41	133.64	256.99	118.21	35.19	136.23	58.67	44.59	34.66	43.65	35.02	148.17	50.46
Hf	1.84	0.79	2.88	1.19	1.15	1.73	1.87	1.09	1.23	1.40	1.71	1.95	2.73	3.26	2.21	0.70	0.80	0.67	1.57	1.59	1.54	0.80	1.45	0.70	0.88
Ta	0.14	0.02	1.14	0.08	0.41	0.08	0.37	0.04	0.07	0.08	0.12	0.19	0.10	0.18	0.51	0.03	0.11	0.07	0.16	0.17	0.15	0.04	0.15	0.04	0.09
Pb	3.88	7.21	8.51	3.14	7.51	4.38	4.44	0.45	0.64	3.58	1.47	1.52	5.62	14.03	4.39										
Th	1.17	0.56	11.75	2.58	4.09	5.84	2.96	1.53	1.29	0.44	0.18	0.99	1.50	1.60	0.73	0.13	0.15	0.12	0.32	0.31	0.29	0.14	0.29	0.08	0.20
U	0.61	0.11	2.12	0.58	0.55	1.49	0.43	0.34	0.24	0.14	0.04	0.28	0.39	0.36	1.68	0.02	0.04	0.02	0.07	0.06	0.06	0.03	0.06	0.03	0.04

表 2 丹凤群镁铁质岩地球化学测试结果

Table 2 Geochemical analytical results of mafic rocks from the Danfeng Group

样品号	QLTS-92	-94	-98	-95	-99	-100	-102	-103	-104	-03	QD04-04	-05	-06	-07	D-1XT	D-2XT	D-3XT
岩性	斜长角闪岩																
地点	商州-山阳剖面																
	小王洞剖面																
SiO ₂	51.25	49.18	49.03	46.46	46.65	50.18	42.47	43.86	51.71	47.95	46.66	52.87	61.01	60.20	51.76	51.21	51.38
TiO ₂	0.31	1.70	1.44	0.69	0.84	1.02	1.03	1.01	1.05	1.71	1.30	1.08	0.79	0.79	0.60	0.70	0.70
Al ₂ O ₃	11.16	13.46	15.31	11.68	11.82	12.67	12.25	12.21	14.22	15.01	14.16	16.25	15.47	15.52	19.13	17.54	18.79
Fe ₂ O ₃	4.23	6.37	4.62	4.75	5.43	3.99	3.82	3.73	3.98	7.63	4.55	4.71	3.14	3.11	4.00	6.40	5.60
FeO	5.17	7.79	5.65	5.81	6.64	4.88	4.67	4.55	4.87	6.24	3.73	3.85	2.57	2.54	4.10	3.97	4.51
MnO	0.17	0.26	0.13	0.17	0.20	0.18	0.15	0.16	0.15	0.20	0.14	0.15	0.08	0.09	0.16	0.18	0.17
MgO	12.87	6.69	10.46	15.84	7.34	9.92	10.90	9.96	6.79	6.81	4.58	5.18	2.48	2.58	3.91	4.12	4.63
CaO	9.28	7.89	5.67	10.73	7.91	7.37	9.02	8.87	6.80	10.14	14.67	6.97	3.78	4.58	6.99	8.60	5.76
Na ₂ O	3.03	4.34	3.33	2.50	4.23	3.52	3.26	1.91	5.69	3.29	4.35	3.92	5.29	5.13	4.46	2.23	3.18
K ₂ O	0.40	0.76	2.76	0.14	0.77	3.20	1.40	2.39	3.73	0.39	0.22	2.45	1.41	1.22	0.56	0.57	0.97

续表 2

P ₂ O ₅	0.03	0.15	0.71	0.08	0.08	0.08	0.51	0.53	0.51	0.65	0.16	0.13	0.75	0.42	0.43	0.28	0.24	0.25
Loi	2.15	1.48	1.29	1.21	8.19	2.68	10.38	10.38	10.75	1.75	0.60	5.50	1.86	2.65	2.99	4.11	3.84	3.27
Total	100.04	100.06	100.41	100.06	100.11	100.12	99.89	99.89	99.90	101.40	100.14	99.97	100.05	99.10	99.18	100.06	99.60	99.21
Mg#	66	40	59	68	46	61	64	64	63	52	46	49	51	43	44	42	44	44
La	2.04	6.09	4.56	3.69	46.53	62.08	52.51	52.51		66.61	5.89	4.23	47.93	50.97	49.46	7.22	6.85	7.30
Ce	4.69	14.28	10.26	8.78	91.30	113.97	101.25	101.25		123.07	14.80	11.55	90.47	93.63	91.47	13.90	12.40	13.20
Pr	0.66	2.27	1.45	1.32	9.44	12.56	11.97	11.97		14.56	2.15	1.90	9.80	10.23	10.07	2.00	1.98	1.98
Nd	2.98	10.64	6.84	6.23	35.49	53.79	46.02	46.02		54.68	11.34	9.67	29.66	29.89	30.45	8.74	8.32	8.64
Sm	0.87	3.61	2.25	1.81	9.55	11.97	9.87	9.87		11.77	4.01	2.98	6.83	6.19	6.11	2.15	2.13	2.04
Eu	0.34	1.24	0.84	0.78	1.77	3.71	2.90	2.90		3.34	1.22	0.99	1.95	1.51	1.58	0.80	0.73	0.78
Gd	1.13	5.13	2.85	2.37	7.05	10.43	9.05	9.05		11.28	5.22	3.69	5.65	5.56	5.63	2.72	2.40	2.57
Tb	0.21	0.88	0.52	0.39	0.90	1.25	1.12	1.12		1.30	0.96	0.67	0.69	0.70	0.69	0.43	0.37	0.41
Dy	1.46	6.38	3.64	2.78	4.91	6.13	5.62	5.62		6.34	6.50	4.44	3.44	3.50	3.44	2.69	2.52	2.59
Ho	0.33	1.41	0.80	0.63	0.99	1.15	1.09	1.09		1.25	1.32	0.91	0.65	0.65	0.67	0.58	0.54	0.55
Er	1.00	3.96	2.31	1.81	2.83	3.05	2.90	2.90		3.32	3.83	2.66	1.78	1.88	1.92	1.75	1.64	1.68
Tm	0.17	0.61	0.40	0.31	0.38	0.47	0.45	0.45		0.51	0.63	0.43	0.28	0.29	0.31	0.29	0.27	0.27
Yb	1.15	4.06	2.50	1.88	2.65	2.87	2.66	2.66		3.13	4.03	2.77	1.77	1.99	1.93	1.63	1.53	1.53
Lu	0.18	0.59	0.38	0.30	0.39	0.43	0.40	0.40		0.46	0.60	0.41	0.27	0.29	0.29	0.31	0.29	0.29
Total	17.21	61.15	39.60	33.08	214.18	283.86	247.81	247.81		301.62	62.50	47.30	201.17	207.28	204.02	45.21	41.97	43.83
(La/Yb) _N	1.13	0.98	1.14	1.30	9.57	11.03	10.57	10.57		10.92	1.02	1.16	14.20	13.07	13.16	2.37	2.25	2.40
Eu*	1.05	0.88	1.01	1.15	0.63	0.99	0.92	0.92		0.87	0.82	0.91	0.93	0.77	0.81	1.01	0.98	1.04
Sc	37.22	51.34	47.31	43.85	1.52	25.45	24.88	24.88		21.67	45.85	41.25	11.67	13.09	13.45	13.84	13.84	13.84
Co	50.42	42.25	44.94	49.74	26.23	39.14	41.46	41.46		28.67	49.91	41.74	16.83	13.84	13.84	16.21	16.21	16.21
Ga	10.23	14.22	13.87	7.89	37.43	94.58	69.54	69.54		67.11	16.23	13.48	11.30	17.68	16.21	11.10	10.10	25.10
Rb	13.02	21.21	30.07	2.65	36.24	63.60	31.19	31.19		66.99	7.23	6.13	28.69	27.32	26.89	11.10	10.10	25.10
Sr	132.37	159.79	200.79	10.54	53.66	850.32	531.88	531.88		1725.98	220.30	218.29	465.38	342.53	385.17	324.00	308.00	355.00
Y	11.59	40.91	23.52	18.63	326.21	31.99	31.16	31.16		34.96	36.16	26.16	17.61	20.26	20.67	45.70	35.80	34.20
Zr	18.98	51.01	30.92	43.52	25.40	220.25	194.72	194.72		237.77	117.11	80.53	52.98	207.68	200.64	45.70	45.70	45.70
Nb	0.38	3.90	1.87	3.03	208.09	13.28	12.17	12.17		6.39	3.92	4.13	4.80	10.42	10.46	4.67	4.78	4.91
Ba	104.15	44.81	123.53	4.39	796.69	2365.35	1640.67	1640.67		1592.08	65.40	43.48	976.64	442.51	426.83	165.00	188.00	385.00
Hf	0.56	1.71	1.10	1.20	5.45	5.87	4.84	4.84		6.07	2.99	2.17	0.89	4.60	4.44	1.59	1.02	1.03
Ta	0.02	0.18	0.08	0.15	0.96	0.65	0.48	0.48		0.59	0.23	0.18	0.02	0.85	0.74	0.32	0.31	0.28
Pb	2.71	1.30	3.42	1.68	53.54	98.86	17.98	17.98		77.24								
Th	0.22	0.40	0.40	0.51	9.36	12.38	10.47	10.47		12.40	0.27	0.23	4.75	11.15	10.99	1.59	1.54	1.68
U	0.10	0.12	0.13	0.19	2.99	2.18	2.60	2.60		2.21	0.13	0.26	0.89	2.45	2.35			

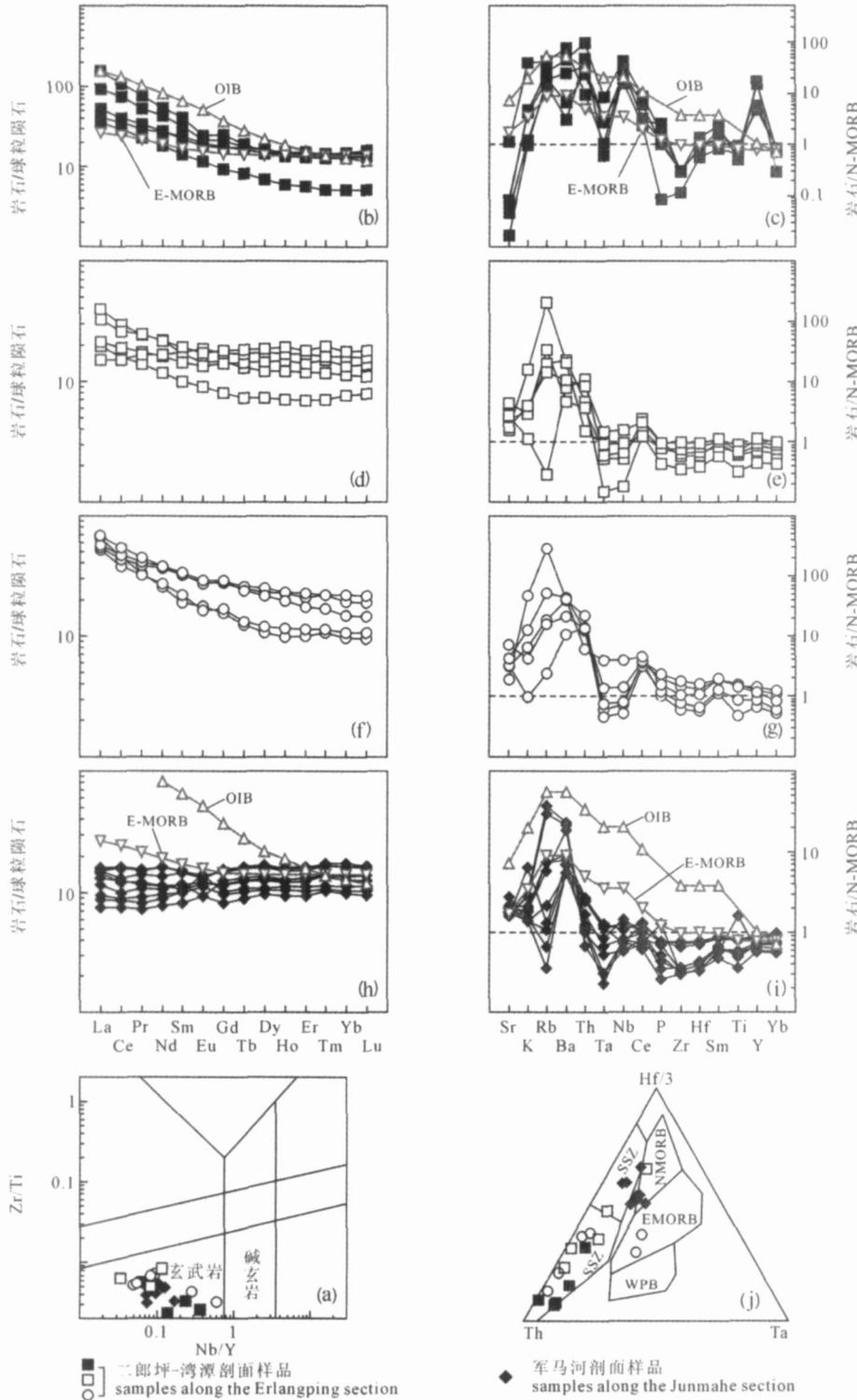


图 7 二郎坪群铁镁质岩分类、标准化稀土配分图、微量元素蛛形图和环境判别图

Fig.7 Classification diagram, chondrite-normalized REE patterns, N-MORB-normalized spider diagrams and discrimination diagram (after Wood, 1980) for mafic rocks from the Erlangping Group
OIB—洋岛玄武岩; E-MORB—富集型洋脊玄武岩; N-MORB—亏损型洋脊玄武岩; SSZ—超级俯冲带; WPB—板内玄武岩
OIB—ocean floor basalt; E-MORB—enriched mid-oceanic ridge basalt; N-MORB—normal mid-oceanic ridge basalt;
WPB—within-plate basalt; SSZ—super subduction zone

认为是岛弧火山岩(张旗等, 1995; 姜常义等, 1998; 裴先治, 1997; 裴先治等, 1997; 薛锋等, 1993; 张成立等, 1994), 或裂谷火山岩(杨森楠, 1985; 杨巍然等, 1991; 邓清录等, 1996), 或岛弧-俯冲蛇绿杂岩(王宗

起等, 2006; 闫全人等, 2007c) 等不同解释。

本次沿商州—山阳剖面和小王涧剖面出露的丹凤群铁镁质岩进行了详细的野外地质调查, 开展了岩石学、岩相学、地球化学和同位素地球化学等综合研究。结果(表 2)显示, 丹凤群中的变铁镁质岩包括 TH 和 CA 两个系列, 岩石类型以 TH 系列的变玄武岩类和变玄武安山岩为主。沿商州—山阳剖面丹凤群中的 CA 系列铁镁质岩 REE 总量较高, $214.17 \sim 301.62 \mu\text{g/g}$, $(\text{Ce}/\text{Yb})_N = 12.61 \sim 14.16$, LREE 显著富集(图 8a)。大离子亲石元素(Sr, Rb, K, Ba 和 Th)明显富集, 而高场强元素(Ta, Nb, P, Zr 和 Hf)表现为富集, Ti、Y 和 Yb 接近 N-MORB 水平。Ta、Nb 具明显的低谷(图 8b), 展现了与俯冲作用有关的地球化学特征。丹凤群中的 TH 系列铁镁质岩具多种地球化学特征。第一类变基性岩的稀土含量较高, 为 $247 \sim 301 \mu\text{g/g}$, $(\text{Ce}/\text{Yb})_N = 4.16 \sim 31.69$, LREE 显著富集(图 8c)。除 Sr 以外的大离子亲石元素富集, 高场强元素相对 N-MORB 明显为亏损, Ta、Nb 呈现明显的负异常低谷(图 8d), 展现了与板块俯冲环境火山岩相似的地球化学特征。第二类变铁镁质岩石的 LREE 和 HREE 分异不明显, 稀土呈平坦型分布(图 8e)。大离子亲石元素富集, 高场强元素相对 N-MORB 并不亏损或略富集, Ta、Nb 并未呈现低谷特征(图 8f), 展现了与 E-MORB 相似的地球化学特征。小王涧剖面丹凤群枕状熔岩和侵入其中的浅色花岗岩具明显不同的地球化学特征。枕状熔岩的稀土含量较低, 为 $47.29 \sim 62.49 \mu\text{g/g}$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 1.05 \sim 1.09$, LREE 和 HREE 分异不明显, 稀土呈平坦型分布(图 8g)。浅色花岗岩稀土含量较高, 为 $201.18 \sim 207.72 \mu\text{g/g}$, LREE 和 HREE 强烈分异, 稀土呈明显的右倾型分布(图 8g)。N-MORB 标准化微量元素图上, 小王涧枕状熔岩的大离子亲石元素富集, 高场强元素不亏损, Ta、Nb 并未呈现低谷特征(图 8h), 展现了与 E-MORB 相似的地球化学特征。浅色花岗岩大离子亲石元素(LILE, Rb, K, Ba 和 Th)富集, 高场强元素(Ta, Nb, Zr, Hf 和 Ti 等)不亏损, Ta、Nb 呈现明显的低谷(图 8h), 展现了与俯冲作用相关的地球化学行为。商州—山阳剖面丹凤群中斜长角闪岩的稀土含量较低, 为 $17 \sim 39 \mu\text{g/g}$, LREE 略富集, 稀土呈平坦型分布(图 8i), 类似 E-MORB 的稀土分配特征。N-MORB 标准化微量元素蜘蛛图上, 大离子亲石元素明显富集, 而高场强元素只有 Ta 和 Nb 表现为亏损, 呈现明显的低谷(图 8j), 展

现了与板块俯冲作用相关的地球化学特征。商州南三十里铺一带丹凤群中超镁铁质岩块的稀土含量更低, 其中辉长岩类岩石的 LREE 略呈富集, 具 U 型配分形式(图 8k)。N-MORB 标准化图上, 大离子亲石元素和 Nb、Ta 表现为富集, 其它高场强元素略呈亏损(图 8l)。

地球化学特征显示, 丹凤群中的变铁镁质岩石具多种构造成因环境, 包括: N-MORB 型、E-MORB 型、岛弧拉斑玄武岩(IAB)和岛弧钙碱性玄武(CAB)等不同构造环境的玄武岩(图 9a-b)。Sr 和 Nd 同位素地球化学也展示了丹凤群中的变铁镁质岩多源区和多构造环境特点, 包括地幔阵列、富集地幔(EMI 型)以及二者的过渡区域(图 9c)。

LA-ICP-MS 锆石测年表明, 丹凤群 N-MORB 型基性火山岩形成年龄为 $454 \pm 6 \text{ Ma}$, 即晚奥陶世(图 10a)。SHRIMP 测年结果表明, 由俯冲洋壳+大洋含水沉积物部分熔融形成小王涧淡色花岗岩的形成时代为 $442 \pm 7 \text{ Ma}$ (图 10b), 代表了早志留世的俯冲作用。在岩湾—鸚鹄嘴一带的丹凤群中, 发育一套蛇绿混杂岩。对蛇绿岩辉长岩中锆石 LA-ICP-MS 测年结果表明, 岩湾—鸚鹄嘴蛇绿岩套残片形成年龄为 $486 \pm 6 \text{ Ma}$, 即寒武纪末或奥陶纪初(图 10c)。

4 讨论

前文研究表明, 宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩是来自亏损地幔源区岩浆演化的产物, 存在不同成分端元的混染。SHRIMP 测年所获得较老的锆石捕晶也显示岩浆活动过程中有古老地壳成分的混染。综合分析判断, 宽坪群变基性火山岩和斜长角闪岩是大陆边缘火山裂谷所形成的初始洋壳的组成部分, 其形成时代与华北陆块南缘栾川群大红口组裂谷基性熔岩($682 \pm 60 \text{ Ma}$)和碱性火山岩($660 \pm 27 \text{ Ma}$)(张宗清等, 1994)一致。另外, 同期构造事件在北秦岭造山带具有广泛的分布和时代记录(609 ± 43 、 697 ± 1 和 700 Ma , 刘敦一等, 1988; 张宗清等, 1994), 进一步表明晚新元古代华北地块南缘发育火山裂谷和/或初始的有限洋盆扩张作用。但是, 这次大陆裂解事件是否是 Rodinian 大陆裂解作用的响应, 须进一步探讨。另外南北两个陆块是否如牛宝贵等(2006)所提出的因这次裂解作用而分离, 有待探索。因为对勉略带中的蛇绿岩残片的最年代学研究结果表明, 残留于勉略带的古洋壳成分时代更老, 为 $841 \pm 19 \sim 808 \pm 10 \text{ Ma}$ (SHRIMP

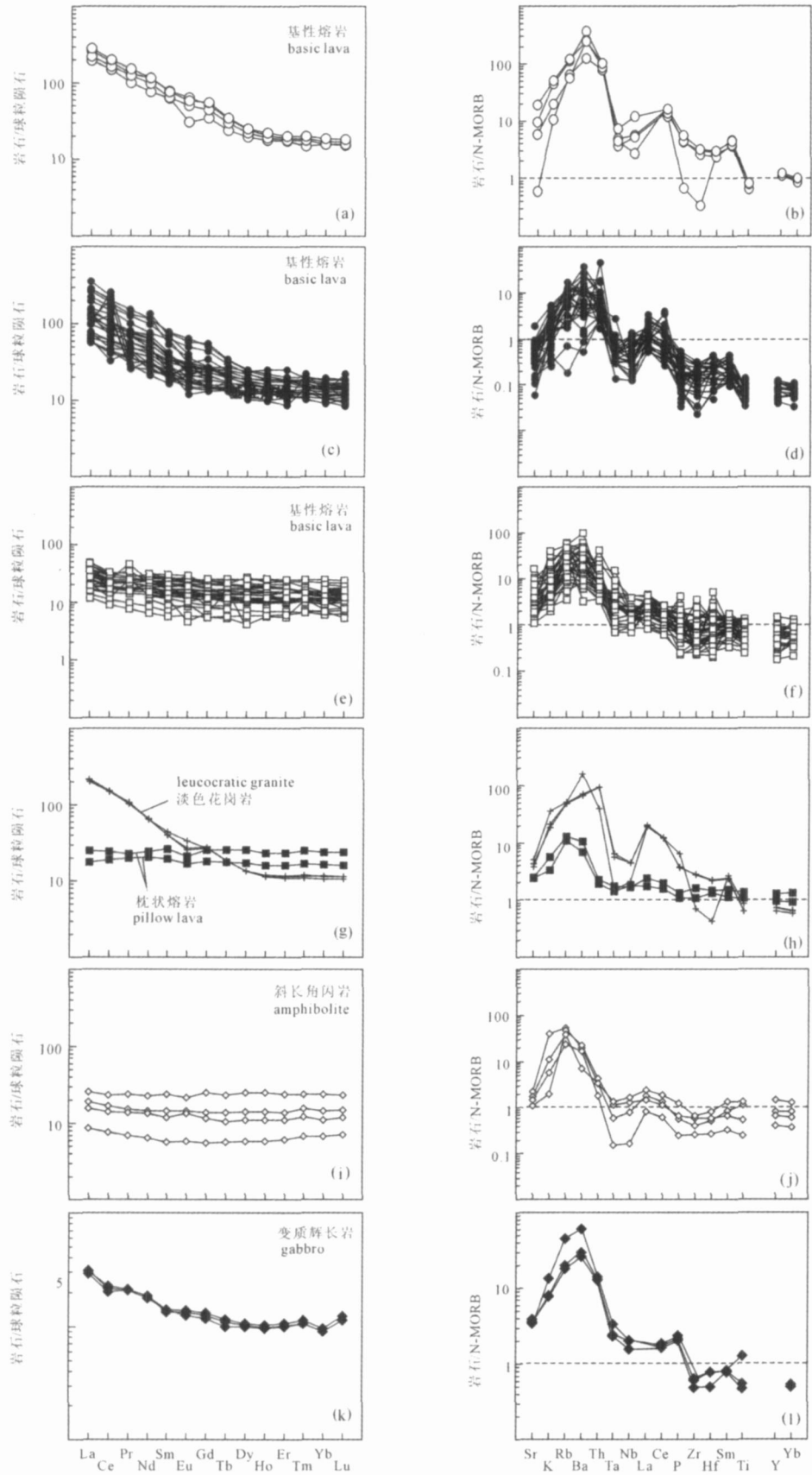


图 8 丹凤群铁镁质岩稀土配分图和 N-MORB 标准化微量元素蛛形图

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns and N-MORB-normalized spider diagrams of mafic rocks from the Danfeng Group

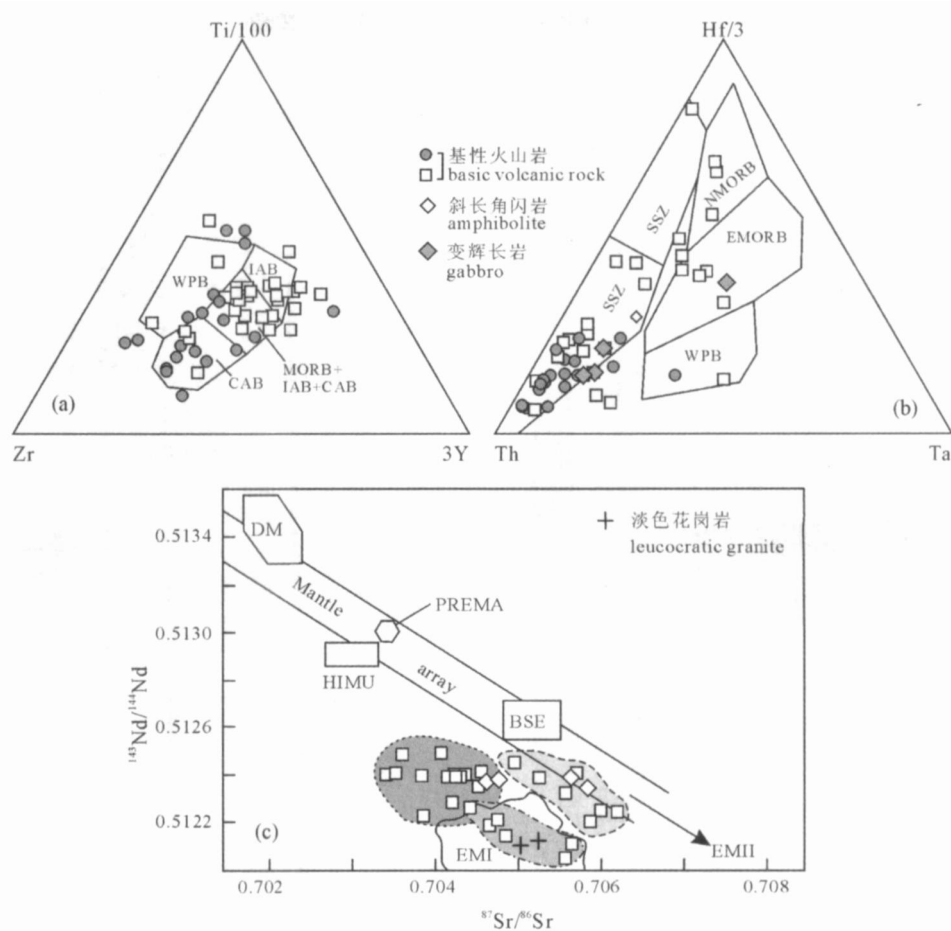


图 9 丹凤群火山岩基性火山岩构造环境判别图

Fig. 9 Discrimination diagrams of Ti-Zr-Y (after Pearce et al., 1973), Hf-Th-Ta (after Wood, 1980) and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (after Zindler et al., 1986) for mafic rocks from the Danfeng Group

IAT—岛弧拉斑玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩; NMORB—亏损型洋脊玄武岩; EMORB—富集型洋脊玄武岩; WPB—板内玄武岩; SSZ—超级俯冲带; DM—亏损地幔; Mantle array—地幔库; PREMA—初始地幔; BSE—大硅质地球; EMI—I型富集地幔; EMII—II型富集地幔; HIMU—高 U/Pb 比地幔

IAB—Island arc basalt; CAB—calc-alkaline basalt; E-MORB—enriched mid-oceanic ridge basalt; N-MORB—normal mid-oceanic ridge basalt; WPB—within-plate basalt; SSZ—super subduction zone; DM—depleted mantle; PREMA—prevalent mantle; BSE—bulk silicate earth; EMI & EMII—enriched mantle; HIMU—mantle with high U/Pb ratio

锆石 U-Pb, 闫全人等, 2007a), 即新元古代期间存在分隔中国南北陆块的古秦岭洋。但华北陆块南缘是否也发育同时代的古大洋, 值得思考, 至少迄今为止还没有发现相关记录或证据。本文获得的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄($319.1 \pm 3.6\text{ Ma}$)与前人获得的与北秦岭造山带变形变质事件有关的大量测年结果一致或相近(如, 张宗清等, 1994, 富云莲等, 1987, 许志琴等, 1988), 表明宽坪群在晚古生代经历了一次显著的构造变形/变质作用。

斜峪关群和草滩沟群为一套岛弧火山-沉积建造, 是早古生代早期板块俯冲、增生造山作用的产物。这一结论与前人推断一致。对斜峪关群岛弧火山岩的 SHRIMP 测年结果大于前人获得的铜峪斜

峪关群大理岩中黄铁矿 Pb-Pb 年龄(402 Ma, 陕西地质八队, 1978), 后者可能是代表了变形变质时代。同时, SHRIMP 测年结果也明显晚于眉县铜峪斜峪关群变质火山岩 Sm-Nd 等时线年龄($847 \pm 198\text{ Ma}$, 张宗清等, 1994)。这一年龄以及本文获得的捕晶锆石年龄($1294 \pm 34\text{ Ma}$)暗示斜峪关群岛弧火山岩的初始岩浆源区受到了元古代地壳混染, 与地球化学特征所反映的一致。前人获得的涝峪斜峪关群全岩 Rb-Sr 等时线年龄(365 Ma, 宋子季, 1988; 207Ma, 张维吉等, 1988)、眉县铜峪斜峪关群变质火山岩 Rb-Sr 等时线年龄(103 Ma, 张宗清等, 1994), 显然代表的是晚古生代和中生代的构造变形/变质事件的时代。大体与宽坪群的变质时代相当。另

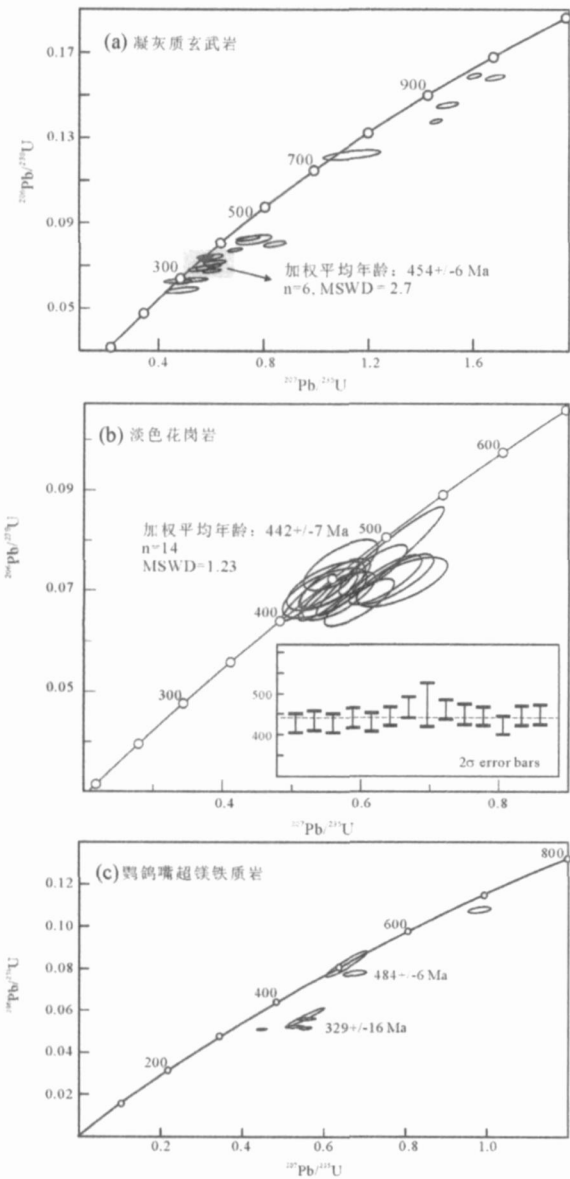


图 10 丹凤群、峪关群铁质岩 LA-ICP-MS (a, c) 和 SHRIMP (b) 锆石 U-Pb 谐和曲线

Fig. 10 LA-ICP-MS and SHRIMP zircon U/Pb concordia plots for the mafic rocks from the Dabfeng Group

外, 本文对斜峪关群火山岩的 SHRIMP 测年结果与前人在草滩沟群以及斜峪关群相当层位中发现的古生物化石时代(寒武纪-奥陶纪, 陕西地质八队, 1980; 曹宣铎等, 1990)一致, 表明斜峪关群岛弧火山岩形成于早奥陶世是确切无疑的, 这也是至目前为止在北秦岭造山带内获得的早古生代板块俯冲造山最确切和最早的年龄记录。

如前文分析, 二郎坪群和云架山群火山岩是一个由岛弧火山岩和弧后盆地火山-沉积岩构成的构造相带。其中的第一类基性火山岩, LREE 和

HREE 分异不明显, 稀土呈平坦型分布, 高场强元素 Nb 和 Ta 显著亏损, 出现明显的低谷, 可能是弧后盆地初始发育阶段的产物。第二类基性火山岩, 稀土含量相对较高, LREE 和 HREE 分异显著, 呈 LREE 明显富集的右倾型分布, 高场强元素 Nb 和 Ta 显著亏损, 呈明显的低谷, 显示了典型的岛弧火山岩特点。第三类稀土含量较高, LREE 和 HREE 分异显著, 但高场强元素 Nb 和 Ta 显著富集, 呈明显的高峰, 可能是初始弧后扩张的产物。军马河一带的铁镁质岩石, 以相对高 MgO 为特征。除斜长花岗岩表现了 LREE 与 HREE 显著分异特点外, 其它镁铁质岩的稀土总含量较低, LREE 略显亏损, 稀土呈左倾型或平坦型分布, 并未显示高场强元素的亏损。相对典型 MORB 的高稀土含量、低 LREE 分异特征, 该套铁镁质岩石应是弧后扩张相对成熟阶段的准洋壳或洋壳的组成部分。我们新采获的古生物化石以及前人化石证据表明, 二郎坪群和云架山群是一套是奥陶纪-泥盆纪的弧后盆地-岛弧系统。

综合地层古生物、岩石学、岩石地球化学和同位素地球化学以及新的 SHRIMP 年代学研究结果, 草滩沟群、斜峪关群、云架山群、二郎坪群构成了北秦岭造山带早古生代的岛弧-弧后盆地构造相带。就目前资料而言, 该岛弧-弧后盆地构造相带是华北陆块南缘晚新元古代由大洋扩张作用转化为板块俯冲作用所形成的最早的岛弧-弧后盆地系统。或者说, 华北陆块南缘从晚新元古代开始的大洋扩张作用, 于早奥陶世转变为板块俯冲、增生造山作用。但与该岛弧-弧后盆地系统相配置的弧前系统仍悬而未决。

闫全人等(2009)的最新研究显示, 西峡县北秦岭群中发育两类产状和地球化学行为截然不同斜长角闪岩, 一是侵入秦岭岩群云母石英片岩中的斜长角闪岩岩墙, 二是与秦岭岩群大理岩密切共生的似层状和块状斜长角闪岩。SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学分析结果表明, 侵入秦岭岩群云英片岩中的斜长角闪岩岩墙形成于晚奥陶世(449 ± 11 Ma), 并经受了晚石炭世(301.3 ± 6.4 Ma, Ar/Ar)角闪岩相变质作用。而与大理岩共生的斜长角闪岩的原岩则经历了晚二叠世(258.1 ± 5.7 Ma, Ar/Ar)的角闪岩相变质作用, 二者的变质时代相差约 43 Ma。不同性质的原岩、时代和变质时代, 相似的变质作用, 表明西峡县秦岭群中的两类角闪岩分属不同性质的构造块体。张国伟等(1988, 1991)也认为“秦岭岩群上部厚

层大理岩不属于秦岭岩群,是推覆于秦岭岩群之上的外来岩片”。斜长角闪岩岩墙是晚奥陶世或早志留世侵入原地秦岭岩群云英片岩中的,是北秦岭早古生代造山期后热收缩而致的地壳伸展或岩石圈拆离减薄的产物。另一类斜长角闪岩与洋岛玄武岩(OIB)具有较高的亲缘性,又与大理岩密切共生,构成了类似洋隆体(如洋岛、海山等)的基性火山岩-碳酸盐岩帽岩石组合,晚石炭世—中二叠世(312~260 Ma)期间构造移置到秦岭岩群内的。由此分析,北秦岭早古生代俯冲增生造山带的组成包括两部分:一是与俯冲增生造山作用有关的原地的弧盆系统,一是构造移置的外来块体。后者主要由构造移置而来的秦岭岩群斜长角闪岩-大理岩组合和中-下地壳(如广泛出露的新元古代花岗岩)构成。而秦岭群下部的变碎屑岩系很可能是早古生代俯冲作用的弧前盆地充填物,但需进一步深入工作。

丹凤群铁镁质岩具多种构造成因和形成于不同时期。构造成因包括两类,一是与俯冲作用有关的岛弧火山岩,发育时代为早志留世和中泥盆世;二是洋壳组成部分的 N-MORB 型火山岩或蛇绿岩套残片,形成时代为寒武纪末-早奥陶世。进一步说明北秦岭造山带早古生代(早奥陶世)岛弧-弧后盆地系统发育期间,其南侧仍发育大洋扩张作用。就目前已知资料和测试分析数据而言,与俯冲作用有关的小王涧淡色侵入岩(442 ± 7 Ma)暗示沿商丹带时代最早的晚古生代俯冲作用始于奥陶世末或志留世初。孙卫东等(1995)的研究显示,位于周至黑河公路虎豹河口丹凤群变铁镁质火山岩为一套以安山岩为主的岛弧火山岩,时代为 413 Ma,暗示了沿商丹带的另一期晚古生代俯冲作用发生于早泥盆世,比小王涧淡色侵入岩所代表洋壳俯冲的时代晚 29 Ma 左右。

由此分析,北秦岭造山带在古生代期间至少存在两期板块俯冲、增生造山作用,时代上向南变新,空间上向南向洋内迁移的。两次俯冲增生造山作用分别构筑了北秦岭造山带早古生代岛弧-弧后盆地和晚古生代岛弧-俯冲杂岩两条构造相带。由华北陆块南缘晚新元古代的被动陆缘火山裂谷作用发展而成的大洋扩张作用至少持续到了早泥盆世。太白山岩湾蛇绿杂岩(486 ± 6 Ma)和丹凤群 MORB 型基性火山岩(456 ± 6 Ma)则表明更老洋壳伴随向南迁移的增生造山作用而被构造蚀、就位于丹凤群俯冲杂岩-岛弧构造相带中。

5 结论

华北陆块南缘由晚新元古代大洋扩张作用转化为板块俯冲作用的转换时限为早奥陶世,约 472 Ma 左右。北秦岭造山带在古生代期间至少存在两期板块俯冲、增生造山作用,时代上向南变新,空间上向南向洋内迁移。但是,与早古生代岛弧-弧后盆地系统相配置的弧前盆地仍是需要深入调查和研究的一个问题。

致谢:感谢陈家义、陈隽璐、张宗清及陈高潮在野外工作中的指导,以及张玉海、杨之青、唐索寒、王进辉和季建清等在实验过程的帮助。

谨以此文恭贺姜春发先生八十华寿和从事地质事业五十四载。

参 考 文 献

- 曹宣铎, 张瑞林, 张汉文. 1990. 秦巴地区泥盆纪地层及重要含矿层位形成环境的研究. 西北地质科学, (23): 1~123.
- 陈保瑞, 崔霄峰, 杨俊峰. 1999. 宽坪岩群斜长角闪岩 Sm-Nd 同位素年龄. 河南地质, 17: 278~282.
- 邓清录, 杨巍然. 1996. 秦岭造山带早古生代“开”“合”构造格局及加里东运动. 地质科技情报, 15: 45~50.
- 冯庆来, 杜远生, 殷鸿福, 等. 1996. 南秦岭勉略蛇绿混杂带中放射虫的发现及其意义. 中国科学 D 辑, 26(增刊): 78~82.
- 冯益民, 曹宣铎, 张二册, 等. 2002. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质. 西北地质, 36: 1~10.
- 冯益民, 曹宣铎, 张二册. 2004. 勉县—略阳带大地构造属性之探讨. 地质论评, 50: 295~303.
- 富云莲, 罗修泉, 张思红, 等. 1987. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年法的试验技术与一些地质样品年龄的测定. 中国地质科学院地质研究所所刊, 17: 85~107.
- 高洪学, 李栓禄, 成学涛. 1989. 中元古界宽坪群岩石化学及微量元素特征. 陕西地质, 7: 11~27.
- 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 等. 2007. 北秦岭西段宽坪岩群斜长角闪岩锆石 LA-ICP-MS 测年及其地质意义. 地质学报, 81: 79~87.
- 河南省第三地质队. 1978. 1: 50000 河南省栾川县南部区域地质调查报告.
- 河南区测队. 1973. 1: 50000 河南省西峡县北部区域地质调查报告.
- 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等. 1977. 中国大地构造基本轮廓. 地质学报, (2): 117~135.
- 姜常义, 赵太平, 苏生瑞, 等. 1998. 北秦岭侵入岩带与晋宁运动. 北京: 地质出版社, 21~97.
- 姜春发, 张庆贵, 张玉蚰, 等. 1963. 东秦岭地槽型印支运动的存在. 地质论评, 21: 116~121.
- 姜春发, 朱志直, 孔凡宗. 1979. 留风关复理石. 地质学报, 53: 203~218.
- 金守文. 1976. 宽坪群和陶湾群的地层划分及时代问题. 中国地质科技情报, (1): 1~10.
- 金守文. 1985. 关于二郎坪群. 河南地质, 3: 49~54.
- 李采一, 马国建, 陈瑞保, 等. 1990. 对河南二郎坪群层序及时代的新认识. 中国区域地质, 9: 181~185.
- 李春昱, 刘仰文, 朱宝清, 等. 1978. 秦岭及祁连山构造发展史. 国

- 际交流地质学术论文集(1), 区域构造、地质力学, 北京: 地质出版社, 174~187.
- 李春昱, 王荃, 刘雪亚, 等. 1982. 亚洲大地构造图及说明书. 北京: 地图出版社, 1~49.
- 李靠社. 2002. 陕西宽坪群变基性熔岩锆石 U~Pb 年龄. 陕西地质, 20: 72~78.
- 李曙光、孙卫东、张国伟, 等. 1996. 南秦岭勉略构造带黑沟峡变质火山岩的年代学和地球化学: 古生代洋盆及其闭合时代的证据. 中国科学, D 辑, 26: 223~230.
- 李亚林, 张国伟, 王根宝, 等. 1999. 北秦岭小寨变质沉积岩系的地质特征及其构造意义. 沉积学报, 17: 596~600.
- 林德超, 王世炎, 杜建山, 等. 1990. 河南省宽坪群及其边界特征. 见: 刘国惠, 张寿广主编, 秦岭一大巴山论文集(一)变质地质. 北京: 科学技术出版社, 40~45.
- 刘敦一, 赵敏敏. 1988. 用热离子发射质谱计直接测定单颗粒锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄. 地质论评, 34: 496~505.
- 牛宝贵, 和政军, 任纪舜, 等. 2006. 秦岭略地区陡岭—小茅岭隆起带西段的几个岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义. 地质论评, 52: 826~835.
- 裴放, 张元国, 刘长乐. 1995. 河南东秦岭北部晚古生代孢子化石的发现及其意义. 中国区域地质, 14: 112~117.
- 裴先治, 李厚民, 李国光, 等. 1997. 东秦岭商丹构造带主要地质体的同位素年龄及其构造意义. 地球学报, 18(增刊): 40~42.
- 裴先治. 1997. 东秦岭商丹构造带的组成与构造演化. 西安: 西安地图出版社, 1~184.
- 乔秀夫, 张德全, 王雪英, 等. 1985. 晋南西阳河群同位素年代研究及其地质意义. 地质学报, (3): 260~269.
- 任纪舜, 陈廷恩, 牛宝贵, 等. 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, 58~66.
- 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 等. 1980. 中国大地构造及其演化. 北京: 科学出版社, 1~124.
- 任纪舜, 张正坤, 牛宝贵, 等. 1991. 论秦岭造山带. 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.
- 任纪舜. 1987. 论华力西旋回后全球构造阶段之划分. 地质学报, (1): 21~31.
- 陕西地质八队. 1980. 1: 50000 纸房幅区域地质调查报告.
- 陕西区测队. 1979. 1: 20 万栾川幅区域地质调查报告.
- 陕西地层表编写组. 1983. 西北地区区域地层表—陕西省分册. 北京: 地质出版社, 1~258.
- 陕西区测队. 1996. 1: 50000 辛家庄—红花铺幅区域地质调查报告.
- 宋志高, 贾群子, 张治洮, 等. 1991. 北秦岭—北祁连(天水~宝鸡)早古生代火山岩系及其构造连接关系的研究. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, (34): 1~71.
- 宋子季, 张维吉. 1987. 陕西眉县—蓝田间下古生界斜峪关群的建立. 陕西地质, 5: 12~34.
- 宋子季, 张维吉, 安三元. 1988. 北秦岭北部早古生代断陷带古海相火山岩特征及其形成环境. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, (24): 51~63.
- 孙民生, 董恒笔. 1995. 再论草滩沟群的层序划分及时代归属. 陕西地质, 13: 22~30.
- 孙卫东, 李曙光, 肖益林, 等. 1995. 北秦岭黑河丹凤群岛弧火山岩建造的发现及其构造意. 大地构造与成矿学, 19: 227~236.
- 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, 26(增刊): 49~55.
- 万渝生, 刘国惠, 从日祥. 1990. 东秦岭商洛地区宽坪群变玄武岩的地球化学特征. 见: 刘国惠, 张寿广主编, 秦岭一大巴山论文集(一)变质地质. 北京: 北京科学技术出版社, 47~59.
- 王清晨, 孙枢, 李继亮, 等. 1989. 秦岭的大地构造演化. 地质科学, 24: 129~142.
- 王润三, 刘文荣, 车自成, 等. 1990. 二郎坪群蛇绿岩的产出环境. 见: 刘国惠, 张寿广主编, 秦岭一大巴山地质论文集(一)变质地质. 北京: 北京科学技术出版社, 154~166.
- 王学仁. 1995. 河南西峡龙潭地区二郎坪群微体化石研究. 西北大学学报, 25: 353~358.
- 王宗起, 陈海泓, 李继亮, 等. 1999. 南秦岭西乡群放射虫化石的发现及其地质意义. 中国科学(D 辑), 29: 38~44.
- 王宗起, 闫全人, 闫臻, 等. 2006. 秦岭造山带结构及造山作用过程. 地质调查项目研究报告, 中国地质科学院地质研究所.
- 韦昌山, 杨振强, 付建明, 等. 2003. 河南刘山岩铜钼矿区细碧—石英角斑质含矿火山岩系的构造环境. 华南地质与矿产, (4): 31~38.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996. 南秦岭中一晚元古代火山岩性质与前寒武纪大陆裂解. 中国科学(D), 26: 237~243.
- 肖思云, 张维吉, 宋子季. 1988. 北秦岭变质地层. 西安: 西安交通大学出版社.
- 许志琴, 卢一伦, 汤耀庆. 1988. 东秦岭复合山链的形成—变形演化及板块动力学. 北京: 中国环境出版社, 1~193.
- 薛锋, 张国伟. 1993. 秦岭造山带丹凤变质岛弧火山岩系的岩石组合与地球化学特征. 地球化学, 22(1): 80~92.
- 闫全人, 王宗起, 闫臻, 等. 2007a. 秦岭勉略构造混杂带康县—勉县段蛇绿岩块/铁镁质岩块的 SHRIMP 年代及其意义. 地质论评, 53: 755~764.
- 闫全人, 王宗起, 陈隽璐, 等. 2007b. 北秦岭斜峪关群和草滩沟群火山岩成因的地球化学和同位素约束. SHRIMP 年代及其意义. 地质学报, 81: 488~500.
- 闫全人, 陈隽璐, 王宗起, 等. 2007c. 北秦岭小王洞枕状熔岩中淡色侵入岩的地球化学特征. SHRIMP 年龄及地质意义. 中国科学 D 辑, 37: 1301~1313.
- 闫全人, 王宗起, 闫臻, 等. 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.
- 闫全人, 王宗起, 闫臻, 等. 2009. 秦岭岩群中两类斜长角闪岩的性质和时代及其地质意义. 岩石学报, 25: 2177~2194.
- 杨森楠. 1985. 东秦岭古生代陆间裂谷系的演化. 地球科学, (4): 53~62.
- 杨巍然, 简平. 1991. 造山带结构与演化的现代理论和研究方法—东秦岭造山带剖析. 北京: 地质出版社, 1~113.
- 殷鸿福, 杜远生, 许继锋, 等. 1996. 南秦岭勉略古缝合带中放射虫动物群的发现及其古海洋意义. 地球科学, (21): 184.
- 张成立, 周鼎武, 韩松. 1994. 陕西商州地区丹凤变质火山岩的地球化学特征. 地质科学, 29: 384~392.
- 张二朋, 牛道福, 霍有光, 等. 1993. 秦岭及邻区地质—构造特征概论. 北京: 地质出版社, 1~291.
- 张国伟. 1988. 秦岭造山带的形成及其演化. 西安: 西北大学出版社, 1~74.
- 张国伟, 周鼎武, 于在平. 1991. 秦岭造山带岩石圈组成、结构和演化特征. 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, 125~138.
- 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 1995. 秦岭造山带的结构构造. 中国科学(B 辑), 25: 994~1003.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1~855.
- 张旗, 张宗清, 孙勇, 等. 1995. 陕西商县—丹凤地区丹凤群变质玄武岩的微量元素和同位素地球化学. 岩石学报, 11(增刊): 43~54.
- 张寿广, 万渝生, 刘国惠, 等. 1991. 北秦岭宽坪群变质地质. 北

- 京: 北京科学技术出版社. 1~119.
- 张思纯, 唐尚文. 1983. 东秦岭北部早古生代放射虫硅质岩的发现与板块构造. 陕西地质, (2): 1~9.
- 张维吉, 宋子季. 1988. 北秦岭变质地层(下卷). 西安: 西安交通大学出版社
- 张宗清, 刘敦一, 付国民, 等. 1994. 北秦岭变质地层同位素年代研究. 北京: 地质出版社. 1~191.
- 张宗清, 张旗. 北秦岭晚元古代宽坪蛇绿岩中变基性火山岩的地球化学特征. 岩石学报, 11(增刊): 1995. 166~177.
- 张宗清, 张国伟, 付国民, 等. 1996. 秦岭变质地层年龄及其构造意义. 中国科学(D 辑), 26: 216~222.
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒. 2002. 南秦岭变质地层同位素年代学. 北京: 地质出版社. 217~246.
- 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. 1~348.
- Huang TK. 1945. On major tectonic forms of China. Geol. Memoirs. A(20): 1~165.
- Mattauer M, Matte P, Malavieille J, et al. 1985. Tectonics of the Qinling belt: Build-up and evolution of eastern Asia. Nature, 317: 496~500.
- Pearce JA, Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. Earth Planet Sci Lett, 19: 290~300.
- Sun SS, McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D and Norry M J (eds.), Magmatism in ocean basins. Geol. Soc. London. Spec. Pub., 42: 315~345.
- Wood DA. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. Earth Planet. Sci. Lett., 50: 11~30.
- Yan QR, Hanson AD, Wang ZQ, et al. 2004. Neoproterozoic subduction and rifting on the northern margin of the Yangtze Plate, China: Implications for Rodinia reconstruction. International Geology Review, 46: 817~832.
- Yogodzinski GM, Naumann TR, Smith EL, et al. 1996. Evolution of a Mafic volcanic field in the central Great Basin, south central Nevada. Journal of Geophysical Research, 101 (B8): 17425~17445.
- Zhang G, Yu Z, Sun Y, et al. 1989. The major suture zone of the Qinling orogenic belt. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 3: 63~76.
- Zindler A, Hart SR. 1986. Chemical geodynamics. Am. Rev. Earth planet. Sci., 14: 493~571.

Timing of the Transformation from Seafloor Spreading on the South Margin of the North China Block to Subduction within the North Qinling Orogenic Belt

YAN Quanren¹⁾, WANG Zongqi²⁾, YAN Zhen¹⁾, WANG Tao¹⁾, ZHANG Hongyuan³⁾,
XIANG Zhongjin¹⁾, JIANG Chunfa¹⁾, GAO Lianda¹⁾

1) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

2) Institute of Mineral resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

3) School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083

Abstract

This study examines the tectonic affinities and geochronology of three tectonic facies in the north Qinling orogenic belt, the volcanic rift or oceanic basin on the south margin of the north China block, early Paleozoic island arc-backarc basin assemblage, and late Paleozoic island arc-subduction-related ophiolitic melange, respectively, using integrated field observations, biochronologic, geochemical, isotopic, SHRIMP and LA-ICP-MS zircon U-Pb analyses. The results in the study show that transformation from sea-floor spreading on the south margin of the north China block to subduction resulting in the arc-basin system occurred in the early Ordovician, ca 472 ± 11 Ma, and there were two events of subduction-accretion orogeny developed in the north Qinling orogenic belt during the Paleozoic. Subduction migrated southward to the ocean from the early to late Paleozoic.

Key words: north Qinling; late Neoproterozoic rifting and sea-floor spreading; subduction-accretion orogeny in the Paleozoic; transformation time from spreading to subduction