

南秦岭竹山地区早古生代碱性岩浆活动及其相关铌稀土成矿的若干认识

朱江^{1,2}, 程昌红³, 王连训⁴, 彭三国^{1,2}, 彭练红^{1,2}, 许珂¹

(1. 中国地质调查局 武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 2. 中国地质调查局 花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北 武汉 430205; 3. 中化地质矿山总局湖北地质调查院, 湖北 荆州 434020; 4. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 南秦岭竹山地区发育强烈的志留纪碱性岩浆活动, 主要岩性包括正长岩、火成碳酸岩、粗面岩和碱性玄武岩, 侵位时间集中于 450~430 Ma。该期碱性岩浆活动主要形成于幔源碱性玄武质岩浆结晶分异演化, 岩浆源区以 HIMU 组分为主, 具有 HIMU 和 EM I、EM II 多种富集地幔端员混合特征。碱性杂岩体普遍发育铌、稀土矿化, 形成了庙垭、杀熊洞、天宝等大型或超大型矿床。区域性深大断裂及其次级断裂控制了碱性杂岩体或碱性火山杂岩的空间展布, 富碱和较高的结晶分异程度是成矿有利条件。幔源与洋壳俯冲消减、陆源沉积物再循环以及地幔流体交代作用关系密切。该期碱性岩浆-成矿事件形成于板块边缘岩石圈强烈伸展和幔源岩浆底侵上涌背景。

关键词: 碱性杂岩; 铌稀土矿床; 伸展; 底侵; 南秦岭

中图分类号: P588.15; P618.79

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)05-0681-10

Some new knowledge concerning Silurian alkaline magmatism and related Nb-REE mineralization in the Zhushan region, South Qinling

ZHU Jiang^{1,2}, CHENG Chang-hong³, WANG Lian-xun⁴, PENG San-guo^{1,2}, PENG Lian-hong^{1,2} and XU Ke¹

(1. Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, China; 2. Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, China Geological Survey, Wuhan 430205, China; 3. Hubei Geological Survey, China Chemical Geology and Mine Bureau, Jingzhou 434020, China; 4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Intense alkaline magmatism and related Nb-REE mineralization occurred during the Silurian in the South Qinling belt, forming igneous rocks including syenites, carbonatites, trachytes and alkali basalts. The alkaline magma erupted during 450~430 Ma, at the same time with intense ultramafic and mafic activities in the region. These alkaline rocks were formed through fractional crystallization from mantle-derived magmas. The magma sources were likely composed of dominated HIMU mantle and minor EMI and EMII mantle. The high values of alkali ($K_2O + Na_2O$) and protracted fractional crystallization constituted important geodynamic controls on the Nb-REE mineralization. The Silurian alkaline magmatic activities were generated in an intensive lithospheric extension and mantle upwelling setting, while the enriched lithospheric mantle was metasomatized by slab melts related to the subduction system.

Key words: alkaline complexes; Nb-REE deposits; extension; underplating; South Qinling

收稿日期: 2017-01-02; 接受日期: 2017-07-31

基金项目: 中国地质调查局资助项目(1212011220515, 121201009000150013); 国家自然科学基金资助项目(41502046, 41530211)

作者简介: 朱江(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 从事矿床学、矿产普查与勘探研究, E-mail: zhujiang.01@foxmail.com。

Fund support: China Geological Survey(1212011220515, 121201009000150013); National Natural Science Foundation of China(41502046, 41530211)

碳酸岩是所有火成岩中 REE 含量最高且轻重稀土分异最强烈的岩石之一(Nelson *et al.*, 1988; Woolley & Kjarsgaard, 2008)。与碳酸岩-碱性杂岩相关的内生稀土矿床主要分布在中国和美国,国内主要有内蒙古白云鄂博、四川攀西地区牦牛坪、山东微山等。其成因类型可分为岩浆型和热液型(Mariano, 1989; 宋文磊等, 2013)。其中 REE 富集成矿机制主要存在碳酸盐矿物的分离结晶作用(Ionov & Harmer, 2002)和熔体-流体的不混溶作用(Buhn & Rankin, 1999)两种不同观点。对碳酸岩-碱性杂岩成因的深入认识,既能有效探讨深部地幔性质,又可对内生稀土矿床找矿勘查提供理论指导。

南秦岭构造带湖北省竹山-竹溪地区及其相邻陕西省岚皋-平利地区广泛发育一套碱性侵入杂岩[包括正长岩和碳酸岩(李石, 1980, 1991; Xu *et al.*, 2008, 2014, 2015; Zhu *et al.*, 2016)]、碱性火山杂岩[包括碱性玄武岩和粗面岩(王刚, 2014; 向忠金等, 2016)]、煌斑岩(徐学义等, 2001)和镁铁质岩墙群(张成立等, 2007; 王坤明, 2014)。该套碱性杂岩强烈富集 Nb、REE 元素。上世纪 80 年代勘探发现了庙垭、杀熊洞等大型岩浆型稀土矿床(彭三国等, 2013; 晁会霞等, 2016); 近年地质调查项目又在粗面质火山岩中新发现了天宝、蒋家堰等大型铌矿床, 铌矿总资源量超过 150 万吨(刘万亮等, 2015; 万俊等, 2016)。该区域碱性岩浆活动强烈, 相关 Nb、(Ta)、REE 矿床潜力巨大。前人针对碱性活动形成时限和地球化学特征展开了大量研究, 特别是近几年积累了大量高精度年代学和 Sr-Nd-Hf 同位素数据(张成立等, 2007; Xu *et al.*, 2008, 2014, 2015; 王刚, 2014; 王坤明, 2014; 向忠金等, 2016; 万俊等, 2016; Zhu *et al.*, 2016)。本文在最新研究成果基础上, 结合地质调查工作成果, 综述南秦岭竹山地区早古生代碱性岩浆事件及相关铌稀土矿床的地质特征和时空分布, 讨论铌-稀土成矿地质条件和动力学背景。

1 地质背景

秦岭-大别造山带地处中国中部, 为华北和华南两大板块拼合带。由太古宙至今, 该区域经历了多

期次、多阶段的碰撞-扩张-聚合的演化过程, 发育多期构造-岩浆-变质-成矿事件(Chen *et al.*, 2009; Dong *et al.*, 2011; Wu & Zheng, 2013)。新元古代晚期-早中生代初期板块俯冲-碰撞的构造体制造就了秦岭造山带的基本构造格局(张国伟等, 1996, 2001)。依据物质组成、构造特征和演化等方面的差异, 东秦岭-大别造山带以桐柏-磨子潭断裂和新城-黄陂断裂为界又可划分为北淮阳构造带、桐柏-大别构造带和南秦岭造山带 3 个二级构造单元(张国伟等, 1996, 2001)。

南秦岭构造带位于新城-黄陂断裂以南, 出露最老地层为新元古界青白口系武当岩群浅变质沉积-火山碎屑岩系, 其上覆地层有新元古界南华系耀岭河群浅变质基性火山岩、震旦系浅变质碎屑泥质岩-碳酸盐岩系、下古生界寒武系-奥陶系-志留系硅质碳质碎屑岩-碳酸盐岩系、上古生界泥盆系-石炭系-二叠系碎屑岩-含生物化石碳酸盐岩系。岩浆岩不甚发育, 以绿片岩相变质为主。晚古生代早期商丹洋闭合, 南秦岭地块与北秦岭地块(属华北板块南缘)碰撞拼合; 三叠纪, 华南板块与南秦岭地块沿勉略带拼合, 勉略洋盆关闭, 秦岭-大别造山带进入陆内演化阶段(张国伟等, 1996, 2001; Zheng, 2008; Dong, 2011; Wu & Zheng, 2013)。

2 碱性杂岩及相关铌-稀土矿床的时空分布

南秦岭构造带碱性杂岩体、碱性火山岩主要分布于湖北省十堰市竹山-竹溪地区和陕西省岚皋-平利地区。大地构造位置处于武当山隆起西南缘和北大巴山东北缘(图 1)。其中, 碱性杂岩体主要由正长岩类和火成碳酸岩组成; 碱性火山岩包括粗面质火山杂岩和碱性玄武岩。

成岩时间上, 前人曾一度将该碱性杂岩认定为印支期事件(李石等, 1980, 1991), 但随着近年高精度同位素年代学研究深入, 越来越多的证据表明, 南秦岭紫阳-竹山地区强烈的碱性岩浆活动形成于早中志留世(Xu *et al.*, 2008; 王刚, 2014; 向忠金等, 2016; 万俊等, 2016; Zhu *et al.*, 2016)。表 1 中湖北庙垭杂岩体中正长岩和碳酸岩的结晶年龄分别为

445.2±2.6 Ma 和 434.3±3.2 Ma(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb,Zhu *et al.*, 2016);杀熊洞杂岩体的侵位年龄为 441.8±2.2 Ma(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb, Xu *et al.*, 2008);天宝粗面岩的结晶年龄为 430.6±2.6 Ma(LA-ICP MS 锆石 U-Pb, 万俊等, 2016);岚皋地区粗面岩结晶年龄为 432.5±2.5 Ma(锆石 U-Pb, 王刚, 2014);碱性玄武岩形成年龄为 446±3 Ma(金云母 Ar-Ar, 向忠金等, 2016)和 408±3 Ma(金云母 Ar-

Ar, 王刚, 2014)。另外,紫阳-岚皋地区镁铁质岩侵位时限分别获得 438.4±3.4 Ma、438.4±3.1 Ma (SIMS 锆石 U-Pb, 王坤明, 2014)和 451±4 Ma、399±1 Ma(锆石 U-Pb, 向忠金等, 2016)的年龄。综上,南秦岭竹山-岚皋地区早中志留世发育强烈的碱性岩浆活动(包括正长岩类、碳酸岩类、粗面岩和碱性玄武岩),侵位峰期在 450~430 Ma。区内早古生代碱性岩浆活动与镁铁质岩浆事件时限基本一致。

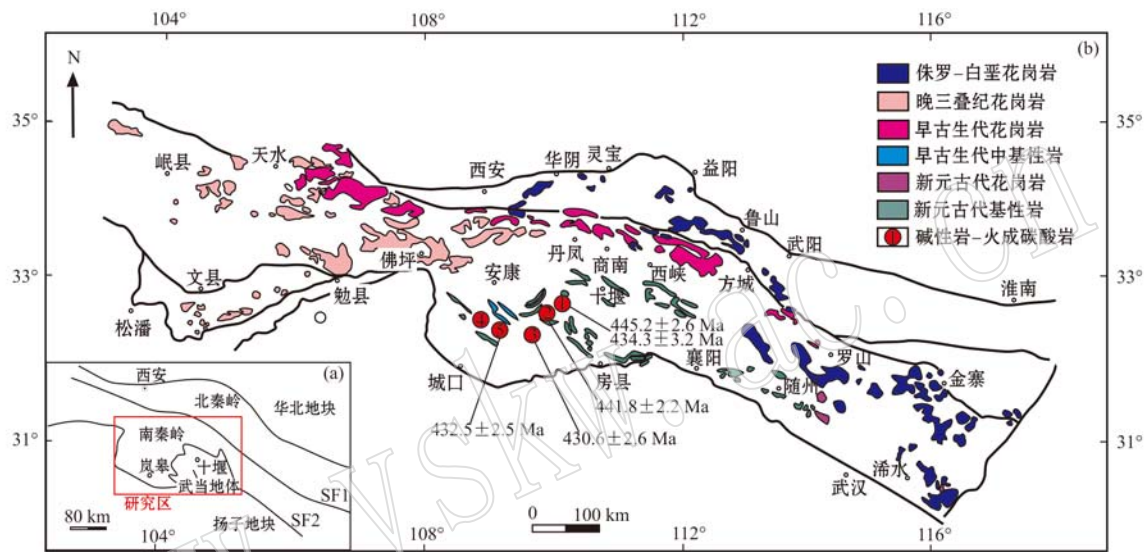


图 1 南秦岭大地构造位置示意图(a,据张国伟等,2001 修改)和南秦岭竹山地区碱性岩及碳酸岩时空分布示意图(b)

Fig. 1 Sketch geological map of the South Qinling (a, after Zhang Guowei *et al.*, 2001) and distribution of the Silurian alkaline magmatism in the Zhushan and Langao region, South Qinling (b)

SF1—商丹缝合带; SF2—勉略缝合带; ①—庙垭碱性杂岩; ②—杀熊洞碱性杂岩; ③—天宝粗面质火山杂岩; ④—紫阳粗面岩; ⑤—岚皋粗面岩; 同位素年龄值引自 Xu *et al.*, 2008; 王刚, 2014; 万俊等, 2016; 向金忠等, 2016; Zhu *et al.*, 2016

SF1—Shangdan suture; SF2—Mianlue suture; ①—Miaoya syenite and carbonatite complex; ②—Shaxiongdong syenite and carbonatite complex; ③—Tianbao trachyte; ④—Ziyang trachyte; ⑤—Langao trachyte; data source: Xu *et al.*, 2008; Wang Gang, 2014; Wan Jun *et al.*, 2016; Xiang Jinzhong *et al.*, 2016; Zhu *et al.*, 2016

表 1 南秦岭竹山-岚皋地区碱性岩浆活动年龄表

Table 1 Ages of the alkaline complexes in the Zhushan and Langao region, South Qinling

碱性杂岩	岩性	年龄值/Ma	测试方法	数据来源
庙垭	正长岩	766±25	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Xu <i>et al.</i> , 2014
	正长岩	147±0.5	SIMS 锆石 U-Pb	Xu <i>et al.</i> , 2015
	正长岩	445.2±2.6	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Zhu <i>et al.</i> , 2016
	碳酸岩	434.3±3.2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Zhu <i>et al.</i> , 2016
	碳酸岩	233.6±1.7	SHRIMP 独居石 U-Th-Pb	Xu <i>et al.</i> , 2014
杀熊洞	正长岩	441.8±2.2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Xu <i>et al.</i> , 2008
天宝粗面岩	粗面岩	430.6±2.6	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	万俊等, 2016
岚皋粗面岩	粗面岩	432.5±2.5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	王刚, 2014
岚皋碱性玄武岩	碱性玄武岩	446±3	金云母 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	向金忠等, 2016

3 典型矿床及相关碱性杂岩体地质特征

3.1 庙垭铌稀土矿床

庙垭杂岩体由正长岩类和火成碳酸岩类组成,其平面形态呈纺锤形、长轴近东西、向北倾斜往南凸出(图2)。该杂岩体沿志留系下统梅子垭组炭质绢云片岩和耀岭河群石英角斑岩之间的构造脆弱带分布,长轴方向与区域构造线方向基本一致(晁会霞等,2016)。其中正长岩类主要岩性包括正长岩、正

长斑岩、混染正长岩、混染钠质正长岩;碳酸岩类主要岩性有方解石碳酸岩、铁白云石碳酸岩、黑云母碳酸岩和含碳方解石碳酸岩(李石,1980;晁会霞等,2016)。正长岩出露面积较大,呈浅灰色,主要矿物成分为微斜长石、绢(白)云母、微斜条纹长石,其中夹大量碳酸岩透镜体;正长斑岩主要矿物成分为微斜长石、绢(白)云母,少量钠长石;方解石碳酸岩是出露面积最大的碳酸岩,与黑云母碳酸岩伴生,二者呈渐变关系,主要矿物为方解石和少量磷灰石,自形粒状结构。

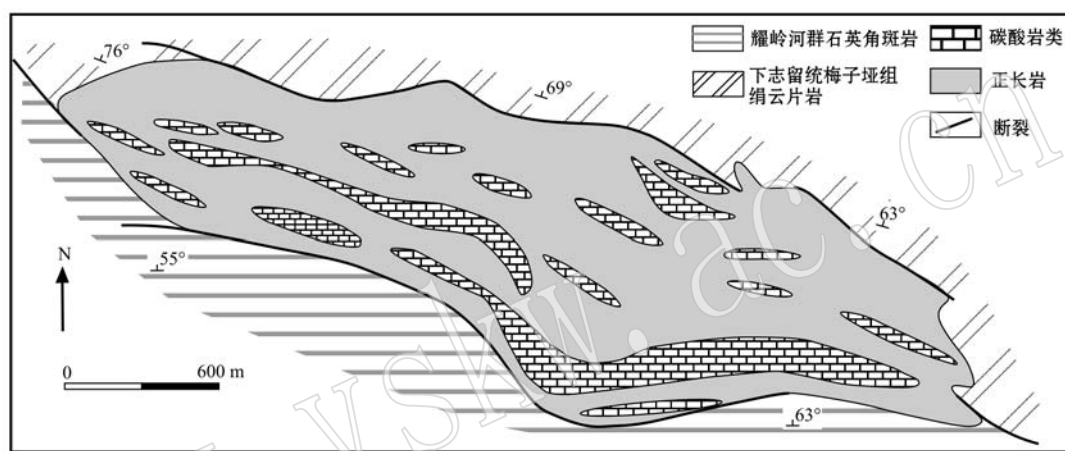


图2 湖北庙垭碱性岩和碳酸岩杂岩体地质简图(据李石,1980;Xu *et al.*, 2015 修改)

Fig. 2 Geological sketch map of the Miaoya carbonatite and syenite complex (modified after Li Shi, 1980; Xu *et al.*, 2015)

庙垭铌-稀土矿床成因类型上属于与正长岩-碳酸岩有关的岩浆型铌稀土矿床。该矿床具特大型规模,是我国仅次于内蒙古白云鄂博的第二大稀土矿床,并伴生大量磷灰石和金红石等。庙垭杂岩体即是一个巨大的矿化体,无论是正长岩类或各种碳酸岩均有明显的矿化现象,矿体没有明显界限。全区共圈定45个矿体,矿体规模大小悬殊。小者厚仅数米,长数十米。大者厚可达上百米,长千米以上。铌、稀土矿体多属中小矿体,大型者全为铌矿体。成矿元素以铌及钽族稀土为主,钽和钷族稀土含量很低,矿石品位较低。岩石类型即是矿石自然类型。矿石中铌矿物主要是铌金红石、铌铁矿,稀土矿物主要为独居石、氟碳铈矿、氟碳钙铈矿。杂岩体内发育强烈的碳酸岩化、硅化和绢云母化。

3.2 杀熊洞铌稀土矿床

竹山县杀熊洞杂岩体位于庙垭杂岩体南东45 km处,由正长岩类和火成碳酸岩组成(图3)。该杂岩体长750 m,宽55~240 m,倾角32°~72°。正长

岩类主要岩石类型包括混染含霞正长岩、斑状钙霞正长岩、辉石碱闪岩和钠质正长岩,多以斑岩产出。其主要矿物成分为条纹长石、微斜长石和钠长石,少量黑云母、霞石、霓石和绿泥石(Xu *et al.*, 2008)。碳酸岩以岩脉形式侵入正长岩类中,岩脉长多大于200 m。其主要岩石类型为黑云母霓石碳酸岩,主要矿物成分为方解石(>80%),含少量钾长石、钠长石、霓石、黑云母,副矿物包括黄菱铈钨矿、磷灰石、重晶石、烧绿石、磁铁矿和钛铁矿等。

杀熊洞稀土矿床地质特征与庙垭矿床相似(李石,1991),也属于与正长岩-碳酸岩有关的岩浆型铌稀土矿床。整个杂岩体即为矿化体。现已查明工业矿体12个,其中稀土矿体5个,铌矿体7个。最大矿体厚长数百米,宽数十米。铌、稀土矿化在正长岩和火成碳酸岩中均有分布。岩石类型即是矿石自然类型。铌、稀土矿物主要为烧绿石、黄菱铈钨矿、碳铈钨矿、硅钼石、独居石、褐帘石等。

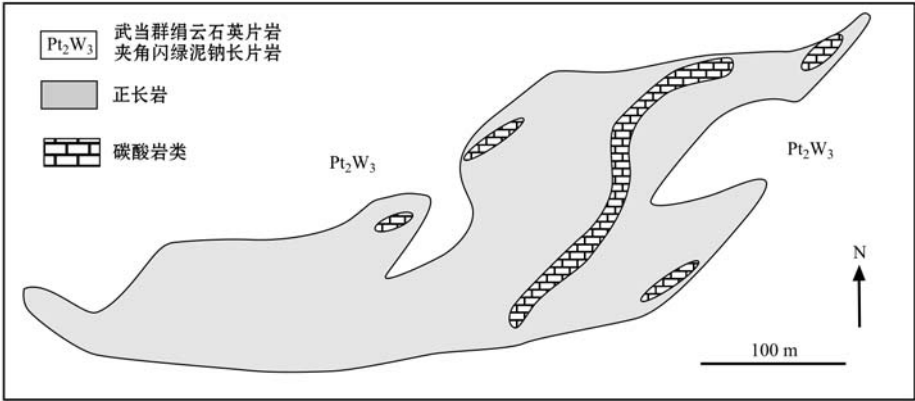


图 3 湖北杀熊洞碱性岩和碳酸岩杂岩体地质简图(据李石, 1991; Xu *et al.*, 2008 修改)

Fig. 3 Geological sketch map of the Shaxiongdong carbonatite and syenite complex (modified after Li Shi, 1991; Xu *et al.*, 2008)

3.3 天宝铌矿床

天宝铌矿床是近年新发现的大型铌矿床, 规模大且品位稳定。矿化与早志留世粗面质火山杂岩关系密切(刘万亮等, 2015; 万俊等, 2016)。天宝粗面质火山杂岩带位于北大巴山碱性岩带的最东段, 向东尖灭, 呈北西南东向展布(图 4)。该火山岩带由多个粗面质火山喷发沉积韵律组成, 赋存于下志留统大贵坪组和梅子垭组中, 并与基性侵入岩及少量超

基性侵入岩共生。铌矿体赋存于火山喷发沉积韵律的中下部层位。含矿岩性为粗面质熔结凝灰岩、粗面质熔岩、含钾长石斑晶粗面质熔岩、粗面质角砾熔岩等, 属火山爆发相和溢流相之间的产物。粗面质熔岩中发育钾长石和黑云母斑晶, 胶结物矿物成分为微晶钾长石、绢云母、黑云母等。

该矿床包含 3 条规模较大的铌矿体, 宽度 138~183 m, 延伸长度约 4.2 km, 主要含铌矿物为铌铁矿

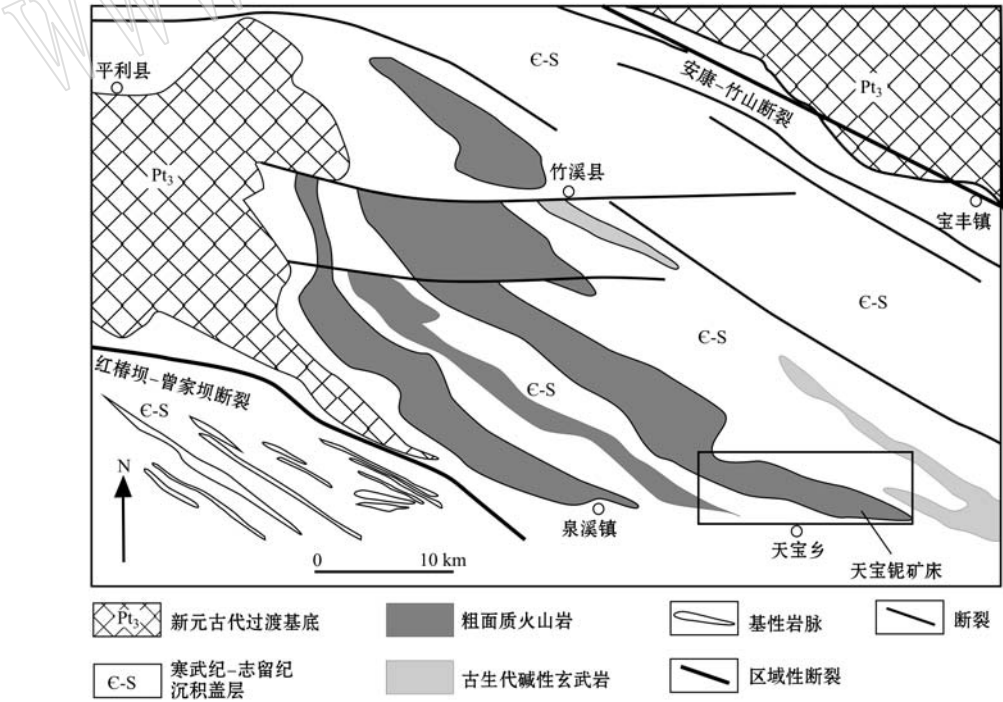


图 4 湖北天宝粗面质火山杂岩地质简图(据刘万亮等, 2015 修改)

Fig. 4 Geological sketch map of the Tianbao trachyte (modified after Liu Wanliang *et al.*, 2015)

和褐钨铌矿。已探明铌矿(Nb_2O_5)资源量为 21.05 万吨,为大型铌矿床(刘万亮等,2015)。

4 讨论

4.1 碱性杂岩成因和源区

南秦岭竹山地区志留纪正长岩类与碳酸岩类在空间上密切共生,具明显的交代关系,两者地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素特征也极为相似。如庙垭正长岩和碳酸岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分别年龄为 445.2 ± 2.6 Ma 和 434.3 ± 3.2 Ma,岩浆结晶时限上非常接近,属同一构造-岩浆事件产物(Zhu *et al.*, 2016);该碳酸岩可能由富 CO_2 的碱性硅酸盐熔浆经多阶段结晶分异而形成,是正长岩岩浆期后熔体/流体结晶分异的产物(Xu *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2016)。杀熊洞杂岩体地球化学和 Sr-Nd 同位素组成也表明,碱性岩类和碳酸岩类均起源于富 CO_2 的碱性硅酸盐熔浆,并经过强烈的结晶分异作用而形成(Xu *et al.*, 2008)。天宝粗面岩也可能形成于幔源碱性岩浆的结晶分异作用(万俊等,2016)。岚皋地区粗面岩(432 Ma)和碱性玄武岩形成于幔源岩浆强烈的结晶分异作用;紫阳地区部分粗面岩(410 Ma)则可能起源于幔源岩浆底侵导致的下地壳部分熔融(王刚,2014)。综上,南秦岭竹山地区志留纪碱性岩浆活动(包括正长岩、火成碳酸岩、粗面岩和碱性玄武岩)成因相似,主要是幔源碱性岩浆结晶分异作用的产物(Xu *et al.*, 2008; 2015; Zhu *et al.*,

2016; 万俊等,2016)。

岩石地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究表明(Xu *et al.*, 2008; Zhu *et al.*, 2016),庙垭、杀熊洞的碳酸岩和碱性岩浆具有同源特征,岩浆上侵过程中没有经历明显的地壳物质混溶,能够较好的指示其地幔源区性质。其 Sr-Nd 同位素组成具有正 ϵ_{Nd} 值($+1.11 \sim +6$)和低 I_{Sr} 值($0.7004 \sim 0.7053$)特征(Xu *et al.*, 2008; Zhu *et al.*, 2016)。 $\epsilon_{\text{Nd}} - I_{\text{Sr}}$ 图解上(图 5),幔源岩浆源区具有 HIMU 和 EM I、EM II 多种富集端员混合的特征,并以 HIMU 地幔组分为主。其源区与岚皋地区镁铁质岩源区特征基本一致,可能是洋壳俯冲消减及其携带的陆源沉积物再循环进入软流圈地幔的结果(张成立等,2007; 王坤明,2014)。

4.2 铌-稀土成矿地质条件

矿床地质特征表明,南秦岭竹山地区与碱性杂岩有关铌、稀土矿床成因类型属于岩浆型矿床。成岩与成矿过程基本一致,岩浆结晶分异过程即为铌、稀土元素富集成矿过程。庙垭杂岩体中无论是正长岩类或各种碳酸岩均有明显的矿化现象,矿体没有明显界限。铌元素和稀土元素分别在黑云母碳酸岩和铁白云石碳酸岩中更为集中,暗示岩浆结晶分异作用促使 Nb、REE 在晚期熔浆中更为富集。矿物地球化学分析表明,由于早期氟磷灰石和独居石结晶,促使岩浆贫 LREE;随后大量方解石的结晶导致残余碳酸岩质熔体极其富 LREE(因方解石对 LREE 不相容),并最终形成氟碳(钙)铈矿(Xu *et al.*, 2010;

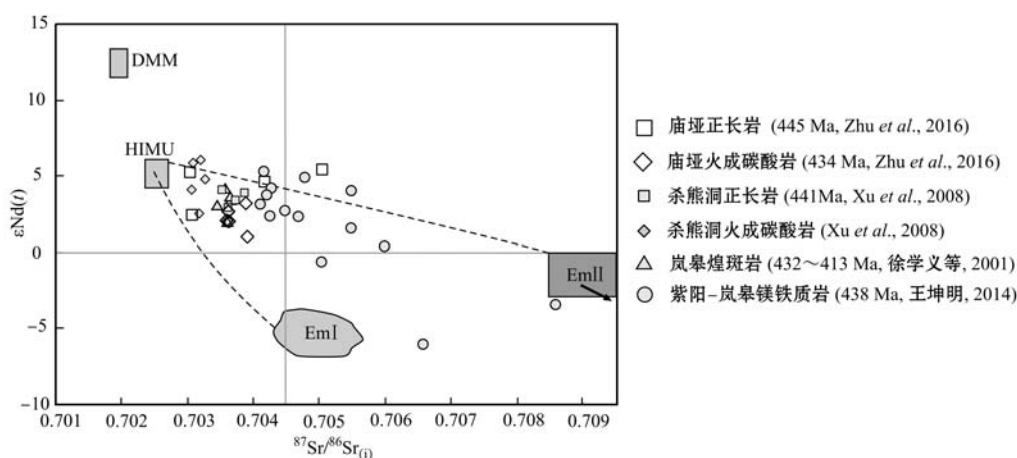


图 5 南秦岭竹山地区志留纪碱性杂岩、煌斑岩和镁铁质岩 Sr-Nd 同位素组成

Fig. 5 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ diagram of the syenite and carbonatite complex, lamprophyre complex and mafic rocks in the South Qinling belt

吴敏等, 2011)。总之, 强烈的岩浆分离结晶作用促使了 REE 富集成矿。

该类型矿床成矿主要受构造和岩浆岩条件控制, 地层条件控矿不明显。庙垭杂岩体、杀熊洞杂岩体和天宝粗面质火山杂岩均受区域性深大断裂(房县-竹山断裂、红椿坝-曾家坝断裂)和其次级断裂控制, 如庙垭杂岩体受花园-槐花园断裂控制, 杀熊洞杂岩体受长坪断裂控制, 天宝粗面岩受红椿坝-曾家坝断裂控制。区域性深大断裂和其次级断裂提供了深部幔源岩浆上升通道, 并控制了碱性杂岩空间展布。

碱性岩是成矿的必要条件, 岩体即为矿化体。含矿岩体多具有富碱、低硅特征, 可能起源于幔源碱性玄武质岩浆。如果杂岩体的碱度较高, 岩石类型齐全, 矿化相对较富; 如果碱度低, 岩性单一, 相对较贫, 暗示稀土元素的富集与岩浆结晶分异程度有关。含矿杂岩体内构成工业矿体必须有独立稀土矿物存在, 如庙垭铌-稀土矿床主要稀土矿物有铌铁矿、铌金红石、烧绿石、独居石、氟碳铈矿、氟碳钙铈矿(李石, 1980); 杀熊洞铌-稀土矿床工业矿物有烧绿石、黄菱铈矿、碳铈矿、硅钍石、独居石、褐帘石等(李石, 1991)。稀土矿物主要以副矿物形式产于碱性岩和碳酸岩中。富碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} > 10\%$)和较高的结晶分异程度是成矿的有利条件。

4.3 动力学背景

世界范围内已发现的火成碳酸岩大部分分布于克拉通区大陆裂谷带和板块内部, 板块边缘(造山带)也有碳酸岩产出, 在洋壳或洋中脊尚无碳酸岩产出的报道(Wang *et al.*, 2014)。南秦岭志留纪碱性岩和碳酸岩的产出背景主要存在两种构造模型: ①大陆裂谷的强烈伸展环境(张成立等, 1999; 徐学义等, 2001; 张国伟等, 2001); ②弧后盆地拉张环境(王宗起等, 2009; Zhu *et al.*, 2014; 王坤明, 2014; 王刚, 2014)。这两种模型所指示的拉张环境、大规模的双峰式火山岩(由粗面质火山岩和碱性玄武岩组成)以及广泛发育的碱性岩和镁铁质岩脉, 表明南秦岭岚皋-紫阳-竹山地区志留纪处于岩石圈强烈伸展背景下, 并存在幔源岩浆底侵上涌。

结合区域地质, 笔者更倾向认为南秦岭竹山地区志留纪碱性岩浆事件形成于板块边缘(弧后)伸展背景。主要证据包括: ①竹山-竹溪-平利地区和紫阳地区均发育一套碱性玄武岩-火山碎屑岩-枕状玄武岩-碳酸岩沉积组合, 其火山-沉积序列和碳酸岩沉积具有与典型洋岛或海山一致的结构特征, 可能

形成于弧后扩张早期裂谷至扩张后期海山环境(向忠金等, 2010; 闫臻等, 2011; 刘成新等, 2013; 王刚, 2014)。②紫阳、岚皋地区从奥陶纪至中志留世为连续海相沉积(傅力浦等, 1986; 崔智林等, 1997); ③庙垭和杀熊洞碱性杂岩体均呈纺锤状, 碳酸岩以岩脉或岩株形式侵入正长岩类, 其空间形态特征明显不同于裂谷环境形成的同心环状杂岩体(如东非裂谷碳酸岩, Kalt *et al.*, 1997), 而更类似于板块边缘(造山带)中形成的透镜状、条带状碳酸岩侵入体(如青藏高原东缘川西碳酸岩, 田世洪等, 2006)。大洋俯冲消减析出流体可能引发地幔源区流体交代作用, 促使早古生代幔源碱性岩浆相对富集 Nb 和 LREE(张成立等, 2007)。可能的动力学背景是: 早古生代大洋地壳俯冲消减, 促使武当地块南缘发生弧后伸展(王宗起等, 2009; 王坤明, 2014; 王刚, 2014), 并交代岩石圈地幔, 导致岩石圈地幔具有 HIMU、EMI 和 EMII 3 种富集端员混合的特征, 进一步诱发了幔源碱性玄武质岩浆底侵上涌。

5 小结

(1) 南秦岭竹山地区发育强烈的志留纪碱性岩浆活动, 侵位峰期为 450~430 Ma。

(2) 该期碱性岩浆发育强烈的铌、稀土矿化, 形成了庙垭、杀熊洞、天宝等大型或超大型矿床。其矿床成因类型为岩浆型, 强烈的岩浆分离结晶作用是促使 LREE 富集成矿的主要机制。

(3) 该期碱性岩浆活动及相关 Nb、REE 成矿作用可能形成于板块边缘的岩石圈伸展和幔源岩浆底侵背景。幔源岩浆源区以 HIMU 组分为主, 具有 HIMU 和 EM I、EM II 多种富集地幔端员混合特征, 可能与洋壳俯冲消减、陆源沉积物再循环以及地幔流体交代作用关系密切。

致谢 野外考察得到湖北省地质局第八地质大队胡起生总工的大力支持; 撰稿过程中与武汉地质调查中心邓新、刘浩、徐大良进行了有益讨论; 审稿专家对论文修改提出宝贵建议, 在此致以衷心感谢。

References

- Buhn B and Rankin A H. 1999. Composition of natural, volatile-rich Na-Ca-REE-Sr carbonatitic fluids trapped in fluid inclusions[J].

- Geochimica et Cosmochimica Acta, 63: 3 781~3 797.
- Chao Huixia, Su Shengrui, Yang Xingke, *et al.* 2016. Research on the geological characteristics of the Miaoya REE deposit, Huhei Province[J]. Earth Science Frontiers, 23(4): 102~108(in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Pirajno F, Li Nuo, *et al.* 2009. Isotope systematics and fluid inclusion studies of the Qiyugou breccia pipe-hosted gold deposit, Qinling Orogen, Henan Province, China: implications for ore genesis[J]. Ore Geology Reviews, 35: 245~261.
- Cui Zhilin, Mei Zhichao, Meng Qingren, *et al.* 2011. Evolution of early Palaeozoic carbonate platform, South Qinling Mt[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 29(1): 31~40(in Chinese with English abstract).
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Neubauer F, *et al.* 2011. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: review and synthesis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 41: 213~237.
- Fu Lipu and Song Lisheng. 1986. Stratigraphy and Paleontology of Silurian in Ziyang region (transitional belt)[J]. Northwest Geoscience, 14: 1~198(in Chinese with English abstract).
- Ionov D and Harmer R E. 2002. Trace element distribution on calcite-dolomite carbonatites from Spitskop: inferences for differentiation of carbonatite magmas and the origin of carbonates in mantle xenoliths[J]. Earth Planet Sci. Lett., 198: 495~510.
- Kalt A, Hegner E and Satir M. 1997. Nd, Sr, and Pb isotopic evidence for diverse lithospheric mantle sources of East African Rift carbonatites[J]. Tectonophysics, 278: 31~45.
- Li Shi. 1980. Geochemical features and petrogenesis of Miaoya carbonatites[J]. Geochimica, 4: 345~355(in Chinese with English abstract).
- Li Shi. 1991. Geochemistry and petrogenesis of the Shxiongdong carbonatite complex[J]. Geochimica, 3: 245~254(in Chinese with English abstract).
- Liu Chengxin, Hu Zhengxiang, Mao Xinwu, *et al.* 2013. The discovery of oceanic island basalts in the Zhushan area, southern Qinling orogenic belt and its tectonic significance[J]. Resources Environment & Engineering, 27(2): 109~118(in Chinese with English abstract).
- Liu Wanliang, Liu Chengxin, Yang Cheng, *et al.* 2015. Geological characteristics and prospecting potential of Nb deposit in Zhuxi Tianbao area, South Qinling[J]. Resources Environment & Engineering, 29(6): 779~784(in Chinese with English abstract).
- Mariano A N. 1989. Nature of economic mineralization in carbonatites and related rocks[A]. Bell K. Carbonatites: Genesis and Evolution [C]. London: Unwin Hyman, 149~175.
- Nelson D R, Chivas A R, Chappell B W, *et al.* 1988. Geochemical and isotopic systematics in carbonatites and implications for the evolution of ocean-island sources[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52: 1~17.
- Peng Sanguo, Long Baolin, Li Shutao, *et al.* 2013. Metallogenic Characteristics and Ore Prospecting in the Wudang-Tongbai-Dabie Belt, China[M]. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1~204(in Chinese).
- Song Wenlei, Xu Cheng, Wang Linjun, *et al.* 2016. Review of the metallogenesis of the endogenetic rare earth elements deposits related to carbonatite-alkaline complex[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 49(4): 725~740(in Chinese with English abstract).
- Tian Shihong, Hou Zengqian, Yuan Zhongxin, *et al.* 2006. Mantle source characteristics of magmatic carbonatites from the Himalayan Collision Zone in western Sichuan, SW China: Evidence of Pb-Sr-Nd isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(3): 669~677(in Chinese with English abstract).
- Wang Gang. 2014. Paleozoic volcanic magmatic events and Mesozoic mineralization in the Ziyang-Langao area, North Daba, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1~172(in Chinese with English abstract).
- Wang Kunming. 2014. Research on the petrogenesis, tectonic and metallogeny for mafic rocks in the Ziyang-Langao area, Shaanxi province[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1~154(in Chinese with English abstract).
- Wang Lianxun, Marks M A W, Wenzel T, *et al.*, 2014. Apatite from the Kaiserstuhl Volcanic Complex, Germany: new constraints on the relationship between carbonatite and associated silicate rocks [J]. European Journal of Mineralogy, 26: 397~414.
- Wang Zongqi, Yan Quanren, Yan Zhen, *et al.* 2009. New division of the main tectonic units of the Qinling orogenic belt, central China [J]. Acta Geologica Sinica, 83(11): 1 527~1 546(in Chinese with English abstract).
- Woolley A R and Kjarsgaard B A. 2008. Paragenetic types of carbonatites as indicated by the diversity and relative abundances of associated silicate rocks: Evidence from a global database[J]. The Canadian Mineralogist, 46: 741~752.
- Wu Min, Xu Cheng, Wang Linjun, *et al.* 2011. Mineralization process of carbonate-type rare earth deposits in Miaoya[J]. Acta Mineral Sinica, 31(3): 478~484(in Chinese with English abstract).

- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2013. Tectonic evolution of a composite collision orogen: an overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China[J]. *Gondwana Research*, 23: 1 402~1 428.
- Xiang Zhongjin, Yan Quanren, Song Bo, *et al.* 2016. New evidence for the ages of ultramafic to mafic dikes and alkaline volcanic complexes in the North Daba Mountains and its geological implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 26(4): 1 116~1 132(in Chinese with English abstract).
- Xiang Zhongjin, Yan Quanren, Yan Zhen, *et al.* 2010. Magma source and tectonic setting of the porphyritic alkaline basalts in the Silurian Taohekou Formation, North Daba Mountain: Constraints from the geochemical features of pyroxene phenocrysts and whole rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1 116~1 132(in Chinese with English abstract).
- Xu Cheng, Campbell I H, Allen C M, *et al.* 2008. U-Pb zircon age, geochemical and isotopic characteristics of carbonatite and syenite complexes from the Shaxiongdong, China[J]. *Lithos*, 105: 118~128.
- Xu Cheng, Chakhmouradian A R, Taylor R N, *et al.* 2014. Origin of carbonatites in the South Qinling orogen: Implications for crustal recycling and timing of collision between the South and North China Blocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 143: 189~206.
- Xu Cheng, Kynicky J, Chakhmouradian A R, *et al.* 2015. A case example of the importance of multi-analytical approach in deciphering carbonatite petrogenesis in South Qinling orogen: Miaoya rare-metal deposit, central China[J]. *Lithos*, 227: 107~121.
- Xu Cheng, Kynicky J, Chakhmouradian A R, *et al.* 2010. Trace-element modeling of the magmatic evolution of rare-earth-rich carbonatite from the Miaoya deposit, Central China[J]. *Lithos*, 118: 145~155.
- Xu Xueyi, Xia Linqi, Xia Zuchun, *et al.* 2001. Geochemical characteristics and petrogenesis of the early Paleozoic alkali lamprophyre complex from Langao county[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22: 55~60(in Chinese with English abstract).
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Zhang Yingli, *et al.* 2011. Sedimentary features and tectonic environments of Silurian volcanic related carbonates in the North Daba Mountains[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(1): 31~40(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Gao Shan, Zhang Guowei, *et al.* 2007. Sr-Nd-Pb isotopes of the Early Paleozoic mafic-ultramafic dykes and basalts from South Qinling belt and their implications for mantle composition[J]. *Science China-Earth Sciences*, 50: 1 293~1 301.
- Zhang Chengli, Zhou Dingwu, Jin Hailong, *et al.* 1999. Study on the Sr, Nd, Pb and O isotopes of basic dyke swarms in the Wudang block and basic volcanics of the Yaolinghe Group[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 430~437.
- Zhang Guowei, Meng Qingren, Yu Zaiping, *et al.* 1996. Orogenesis and dynamics of the Qinling Orogen[J]. *Science in China(series D)*, 39(3): 193~200(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, *et al.* 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 1~855(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei. 2008. A perspective view on ultrahigh pressure metamorphism and continental collision in the Dabie-Sulu orogenic belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 53: 3 081~3 104.
- Zhu Jiang, Wang Lianxun, Peng Sanguo, *et al.* 2016. U-Pb zircon age, geochemical and isotopic characteristics of the Miaoya syenite and carbonatite complex, central China[J]. *Geological Journal*, doi 10.1002/gj.2859.
- Zhu Xiyun, Chen Fukun, Nie Hu, *et al.* 2014. Neoproterozoic tectonic evolution of South Qinling, China: Evidence from zircon ages and geochemistry of the Yaolinghe volcanic rocks[J]. *Precambrian Research*, 245: 115~130.

附中文参考文献

- 晁会霞, 苏生瑞, 杨兴科, 等. 2016. 湖北庙垭稀土矿床地质特征研究[J]. *地学前缘*, 23(4): 102~108.
- 崔智林, 梅志超, 孟庆仁, 等. 1997. 南秦岭寒武-奥陶纪碳酸岩台地演化[J]. *沉积学报*, 15(2): 31~40.
- 傅力浦, 宋礼生. 1986. 陕西紫阳地区(过渡带)志留纪地层及古生物[J]. *西北地质科学*, 14: 1~198.
- 李石. 1980. 湖北庙垭碳酸岩地球化学特征及岩石成因探讨[J]. *地球化学*, 4: 345~355.
- 李石. 1991. 湖北杀熊洞碳酸岩杂岩体地球化学特征及其成因探讨[J]. *地球化学*, 3: 245~254.
- 刘成新, 胡正祥, 毛新武, 等. 2013. 南秦岭竹山地区洋岛型玄武岩的发现及构造意义[J]. *资源环境与工程*, 27(2): 109~118.
- 刘万亮, 刘成新, 杨成, 等. 2015. 南秦岭竹溪天宝一带铌矿地质特征及找矿前景分析[J]. *资源环境与工程*, 29(6): 779~784.
- 彭三国, 龙宝林, 李书涛, 等. 2013. 武当-桐柏-大别成矿带成矿地质特征与找矿方向[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~204.
- 宋文磊, 许成, 王林均, 等. 2013. 与碳酸岩-碱性杂岩体相关的稀土矿床成矿作用研究进展[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 49(4): 725~740.

- 田世洪, 侯增谦, 袁忠信, 等. 2006. 大别山中生代钾质岩浆作用与超高压变质地体的剥露机理[J]. 岩石学报, 15(3): 379~395.
- 万俊, 刘成新, 杨成, 等. 2016. 南秦岭竹山地区粗面质火山岩地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其大地构造意义[J]. 地质通报, 35(7): 1134~1143.
- 王刚. 2014. 北大巴山紫阳-岚皋地区古生代火山岩浆事件与中生代成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文, 1~172.
- 王坤明. 2014. 陕西紫阳-岚皋地区镁铁质岩岩石成因、构造环境及成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质科学院博士学位论文: 1~154.
- 王宗起, 闫全人, 闫臻, 等. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分[J]. 地质学报, 83(11): 1527~1546.
- 吴敏, 许成, 王林均, 等. 2011. 庙垭碳酸岩型稀土矿床成矿过程初探[J]. 矿物学报, 31(3): 478~484.
- 向忠金, 闫全人, 宋博, 等. 2016. 北大巴山超基性、基性岩墙和碱质火山杂岩形成时代的新证据及其地质意义[J]. 地质学报, 90(5): 896~916.
- 向忠金, 闫全人, 闫臻, 等. 2010. 北大巴山志留系滔河口组碱质斑状玄武岩的岩浆源区及形成环境: 来自全岩和辉石斑晶地球化学的约束[J]. 岩石学报, 26(4): 1116~1132.
- 徐学义, 夏林圻, 夏祖春, 等. 2001. 岚皋早古生代碱质煌斑杂岩地球化学特征及成因探讨[J]. 地球学报, 22(1): 55~60.
- 闫臻, 王宗起, 张英利, 等. 2011. 北大巴山与志留纪火山作用相关的碳酸盐岩沉积学特征及形成环境[J]. 沉积学报, 29(1): 31~40.
- 张成立, 高山, 袁洪林, 等. 2007. 南秦岭早古生代地幔性质: 来自超镁铁质、镁铁质岩脉及火山岩的 Sr-Nd-Pb 同位素证据[J]. 中国科学, 37(7): 857~865.
- 张成立, 周鼎武, 金海龙, 等. 1999. 武当地块基性岩墙群及耀岭河群基性火山岩的 Sr、Nd、Pb、O 同位素研究[J]. 岩石学报, 15(3): 430~436.
- 张国伟, 孟庆仁, 于在平, 等. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. 中国科学(D辑), 26(3): 193~200.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1~855.