

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.340



北秦岭寨根地区富铌辉长岩地球化学特征及其构造意义

赵利刚¹, 李承东^{1*}, 许雅雯¹, 武志宇², 常青松¹, 许 腾¹, 滕雪明¹

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

2. 长庆实业集团, 陕西西安 710016

摘要: 富铌辉长岩往往与高镁闪长岩、埃达克岩共生, 被认为是具有指相意义的岩石构造组合, 但豫西地区北秦岭造山带南侧该类岩浆活动却很少被发现。对寨根地区秦岭岩群中的斜长角闪岩类进行岩石学、地球化学、同位素地球化学和年代学研究, 在该深成杂岩中发现了富铌辉长岩, 并且测得富铌辉长岩的变质锆石 U-Pb 年龄为 484.3 ± 1.8 Ma, 与区内超高压榴辉岩变质峰值年龄相近。富铌辉长岩地球化学特征表现为富集 Rb、Th 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、P 等高场强元素, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 介于 $-1.61 \sim +0.49$, 相应的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 范围为 $0.714\,273 \sim 0.723\,936$ 。推测其成因与秦岭古陆壳深俯冲过程中部分熔融的板片熔体交代地幔楔橄榄岩再熔融有关, 经受深俯冲时有大量陆壳物质的加入, 该发现为秦岭造山带早古生代早期存在多个微陆块提供了证据。

关键词: 富铌辉长岩; 地球化学; 寨根; 秦岭造山带。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2019)01-0135-10

收稿日期: 2018-07-20

Geochemistry of Nb-Enriched Gabbros in Zhaigen Area in Northern Qinling and Their Tectonic Significance

Zhao Ligang¹, Li Chengdong^{1*}, Xu Yawen¹, Wu Zhiyu², Chang Qingsong¹, Xu Teng¹, Teng Xueming¹

1. Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China

2. Changqing Industry and Commerce Group, Xi'an 710016, China

Abstract: Nb-enriched gabbros are often associated with high-Mg diorite and adakite, which is considered to be a petrotectonic association of facies significance. However, this kind of magmatic activity has seldom been found in the southern side of the North Qinling orogenic belt in western Henan. Based on the method of petrology, geochemistry, isotope geochemistry and chronology for amphibolites from the Qinling Group in Zhaigen area, the Nb-enriched gabbros were separated from the deep plutonic complex in this study. The results show that the U-Pb age of metamorphic zircons from Nb-enriched gabbros is 484.3 ± 1.8 Ma, which is similar to the peak of metamorphic ages of the UHP eclogites in this area. Nb-enriched gabbros are characterized by enrichment of Rb, Th and other heavy ion lithophilic elements and depletion of Nb, Ta, P and other high field strength elements. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values range from -1.61 to $+0.49$, and $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ values range from $0.714\,273$ to $0.723\,936$. We speculated that their formation was related to the remelting of mantle wedge peridotite by partially melted plate melts during the deep subduction of the Qinling paleocontinental crust. And a large amount of continental crust was added to the deep subduction. The discovery of Nb-enriched gabbros provides evidence for the existence of multiple small continental blocks in the Early Paleozoic of the Qinling orogen.

Key words: Nb-enriched gabbros; geochemistry; Zhaigen; the Qinling orogenic belt.

基金项目: 中国地质调查局地质矿产调查项目(No. DD20160043); 国家自然科学基金项目(No. 41272065).

作者简介: 赵利刚(1981—), 男, 助理研究员, 主要从事区域成矿规律研究. ORCID: 0000-0003-1550-6293. E-mail: zhaoligang981@126.com

*** 通讯作者:** 李承东, ORCID: 0000-0001-5556-9171. E-mail: tjled99@163.com

引用格式: 赵利刚, 李承东, 许雅雯, 等, 2019. 北秦岭寨根地区富铌辉长岩地球化学特征及其构造意义. 地球科学, 44(1): 135-144.

秦岭造山带横亘于中国中部,是华北板块与扬子板块长期汇聚形成的复合造山带,受到国内外地质界的广泛关注和持续研究(张国伟等,2001; 张本仁等,2002; 王宗起等,2009; Dong *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2015; 毛小红等, 2018; Liu *et al.*, 2018).

根据岩石学和大地构造特征,可将秦岭造山带分为南秦岭和北秦岭两个地体或造山带(张国伟等, 2001).秦岭岩群为北秦岭地体的重要组成部分,主要呈几个巨大的透镜状岩片沿近东西向断续分布,是秦岭造山带中从组成到构造最为复杂的地带.前人曾对秦岭岩群中的斜长角闪岩类进行研究,张本仁等(2002)认为秦岭岩群变基性岩(斜长角闪岩)的地球化学特征类似于大陆拉斑玄武岩,但样品数量较少,不能涵盖秦岭岩群中所有的变基性岩类;闫全人等(2009)在秦岭岩群中识别出两类斜长角闪岩,一类与秦岭岩群中的大理岩紧密共生,可能形成于洋岛(OIB)或海山环境,另一类则呈密集岩墙群型式侵入于秦岭岩群,形成于板内拉张环境,时代为晚奥陶世(449 ± 11 Ma).最近,笔者在寨根北部一带秦岭岩群郭庄岩组斜长角闪岩类中鉴别出一套具有富

铌辉长岩是具有特殊地球化学特征的岩石,具有构造环境指示意义,它的发现为研究北秦岭造山带早前古生代构造演化提供了新的思路.

1 地质背景及样品特征

原建立的秦岭群(又称秦岭杂岩),实际是一套包含不同时代地质体的构造岩石组合(张国伟等, 2001),已逐步解体.现在普遍认为秦岭岩群为一套中深变质杂岩系,变质程度普遍达角闪岩相,局部达麻粒岩相,有强烈的深熔混合岩化,多期变质变形和岩浆贯入,以深层塑性流变和韧性剪切带为主要变形特征(张国伟等,2001).区域上,秦岭岩群被新元古代(815~979 Ma)花岗岩侵入(王晓霞等,2015),如牛角山片麻岩体(959 Ma; 王涛等, 2005)、蔡凹岩体(张成立等, 2004).在秦岭岩群中还发育榴辉岩、榴闪岩、高压麻粒岩等高压甚至超高压变质岩(Chen *et al.*, 1993; 刘良等,2013).秦岭岩群被南部的中一新元古代峡河岩群覆盖,向北为早古生代二郎坪群和宽坪岩群.上述地层普遍被早古生代辉长岩类和花岗岩类侵入,它们共同构成了北秦岭造山带(图 1).

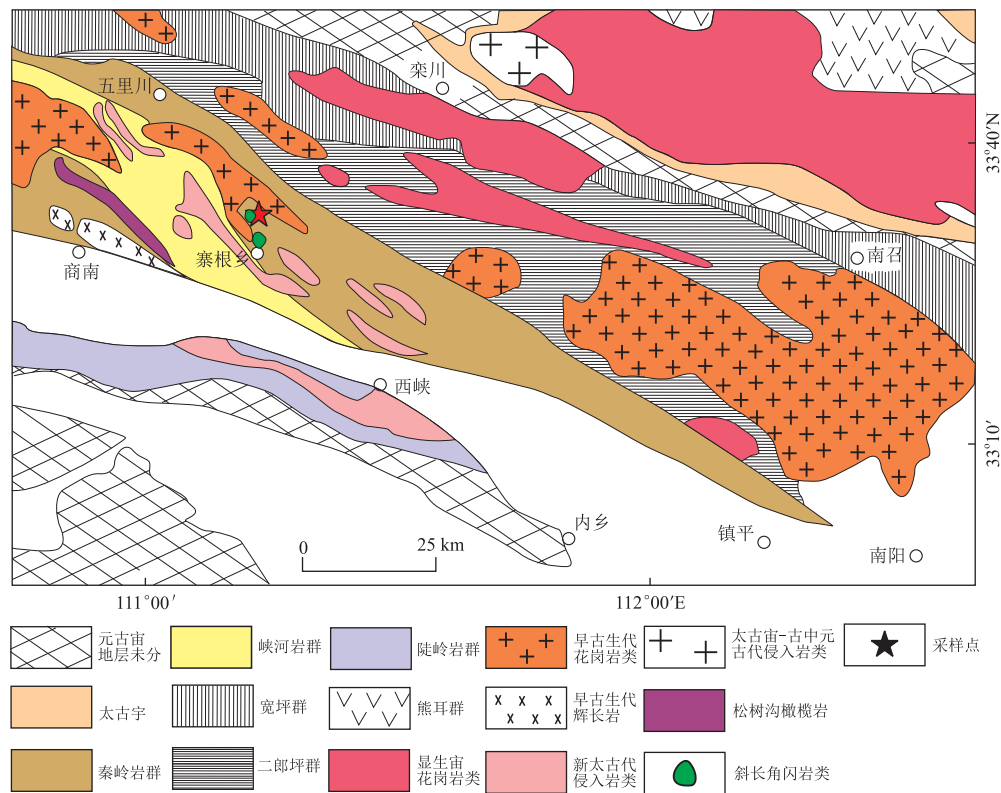


图 1 豫西地区地质略图
Fig.1 Geological sketch of West Henan
据万渝生等(2011)

寨根地区秦岭岩群主要岩性为石榴黑云斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩、矽线石榴黑云斜长片麻岩,局部夹斜长角闪岩块体.笔者从郭庄岩组斜长角闪岩中甄别出一套岩石地球化学特征类似于富铌玄武岩类的岩石.在赛岭村附近,该类岩石呈团块状或岩株状分布于郭庄岩组中,次生角闪石定向排列,局部切断了秦岭岩群石榴黑云斜长片麻岩片麻理,初步判断该类岩石侵入了秦岭岩群,原岩可能为富铌辉长岩(图 2a,2b).样品岩相学特征描述如下:

样品 YX64:富铌辉长岩,柱粒状变晶结构,块状构造,矿物定向排列.岩石由辉石(约 65%)、斜长石(20%~25%)、石英(5%~10%)、次生黑云母(约 5%)组成(图 2c),副矿物含有不透明矿物(约 5%)和磷灰石.辉石多已角闪石化,呈他形柱状、柱粒状,杂乱分布,显定向,粒度一般在 0.1~1.3 mm,多色性明显,局部边缘或整个颗粒向蓝绿色角闪石转变,角闪石有少量又被黑云母交代.斜长石为他形粒状,杂乱分布,显定向,粒度一般在 0.05~0.35 mm,具粘土化、少黝帘石化,表面较脏.石英为他形粒状,相对集合呈断续线纹状分布,显定向,粒度 0.05~1.00 mm不等,粒内具波状、带状消光,粒间齿状镶

嵌.黑云母为叶片状,星散分布,显长轴定向,片径一般在 0.1~0.8 mm,多色性明显,少见交代角闪石.矿物共生组合:角闪石+斜长石+石英+黑云母.岩内局部见不透明矿物相对集合,呈断续条纹状分布.

样品 YX65:富铌辉长岩,柱粒状变晶结构,块状构造.岩石主要由辉石(65%~70%)组成,但大部分发生了角闪石化.其他主要矿物:斜长石(约 20%)、次生黑云母(约 5%)和石英(5%~10%),副矿物包括不透明矿物、磷灰石、榍石.次生角闪石呈他形柱状、柱粒状,粒度一般在 0.1~1.2 mm,相对集合呈堆状分布,少部分<0.1 mm,与微粒状斜长石混杂一起分布,多色性明显,局部边缘或整个颗粒向蓝绿色角闪石转变,少被黑云母交代.斜长石为他形粒状,与微细粒角闪石混杂在一起分布,粒度一般在 0.02~0.20 mm,具不均匀粘土化、绢云母化.石英呈他形粒状,星散分布,粒度一般在 0.03~0.20 mm,粒内具波状消光.黑云母呈叶片状,零星分布,略显长轴定向,片径一般在 0.10~0.75 mm,多色性明显,少见交代角闪石.矿物共生组合:角闪石+斜长石+石英+黑云母(图 2d).

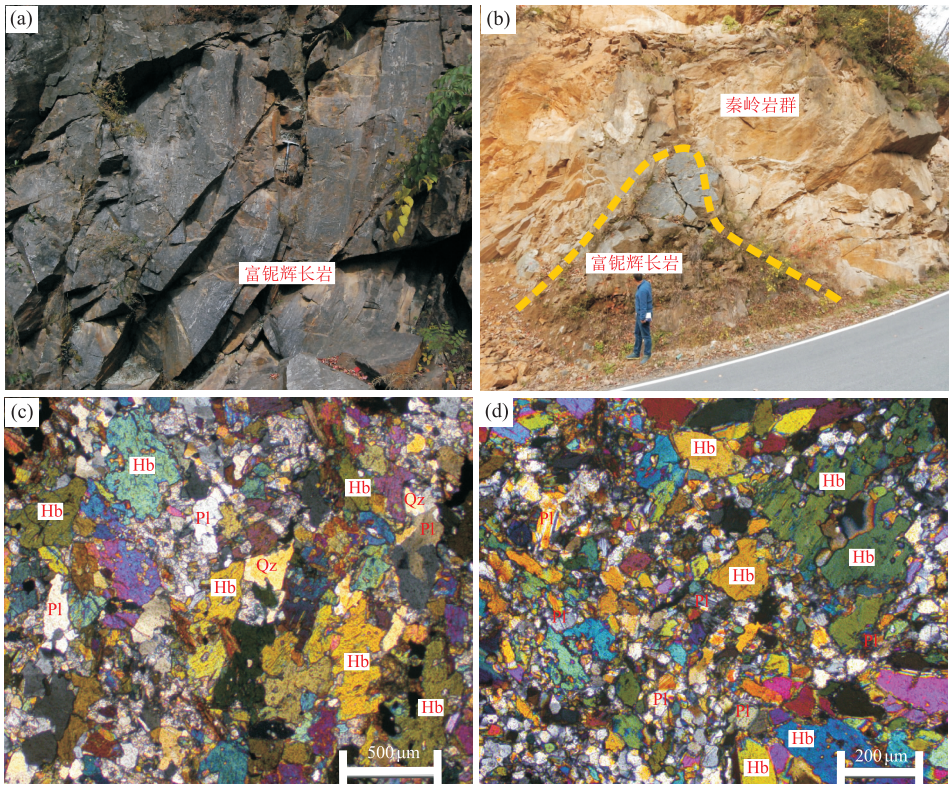


图 2 富铌辉长岩野外及镜下照片

Fig.2 Field and microscopic features of Nb-enriched gabbros

Qz.石英;Pl.斜长石;Hb.角闪石

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 测年分析

将新鲜岩石样品破碎至 80 目,然后经水粗淘、强磁分选、电磁分选和酒精细淘之后,在实体显微镜下手工挑选出锆石,将待测锆石颗粒用环氧树脂制靶,然后磨至锆石颗粒的一半并抛光,阴极发光照相在北京铅年领航科技有限公司的日本电子 JSM_6510 型扫描电镜上进行。锆石原位 U-Pb 年龄测试是在天津地质调查中心同位素实验室利用激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)完成的,将 NEWWAVE193-FXArF 准分子激光器与 Thermo Fisher 公司的 Neptune 多接收器电感耦合等离子体质谱仪联用,采用 He 气作为剥蚀物质的载气,锆石 U-Pb 年龄测定采用的激光束斑直径为 35 μm ,剥蚀时间为 30 s,采用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐标准参考物质 NIST610,锆石年龄计算采用 GJ-1;锆石原位微区 Hf 同位素分析采用与 U-Pb 年龄测定相同的激光器与质谱仪,激光剥蚀束斑直径为 50 μm ,剥蚀时间为 30 s,采用 GJ-1 作为外标计算 Hf 同位素比值,具体仪器配置和实验流程参见耿建珍等(2011)。U-Pb 测年数据处理采用 ICPMSDataCal 程序(Liu *et al.*, 2010),锆石 U-Pb 年龄谐和图采用 Isoplot 程序(Ludwig, 2003)绘制。

对于锆石年龄大于 1 Ga 的数据,采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄,而对于锆石年龄小于 1 Ga 的数据,采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,以²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄和²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄比值为标准选择 U-Pb 年龄数据,谐和度介于 90%~110%的数据为有效数据。

2.2 岩石地球化学

野外采集新鲜无蚀变的岩石样品,首先用水将样品表面冲洗干净并晾干,机械破碎至 200 目后送实验室分析。岩石主微量元素分析在天津地质调查中心实验室完成,主量元素用熔片法 X 射线荧光光谱法(XRF)测试,FeO 采用氢氟酸、硫酸溶样、重铬酸钾滴定容量法测试,分析精度优于 2%,微量元素使用 ICP-MS 测试,分析精度优于 5%。

2.3 Sr-Nd 同位素分析

取 200 目全岩样品粉末(具体称样量以估计可取得 1.0 μg 以上的纯 Nd 为标准),用 HF + HClO₄ + HNO₃ 溶解,在密闭的 Teflon 溶样器中于高温条件下反应 7 d,利用 AG50W×12 强酸性阳离子交换树脂分离 Rb、Sr 得到总稀土,然后采用 HE-

HEHP 树脂(P507)技术分离纯化 Nd,全流程空白本底稳定在 Sm = 3.0×10^{-11} g; Nd = 5.4×10^{-11} g。Sr、Nd 同位素比值测试均在天津地质调查中心 Triton 热电离质谱上完成, Sr 的质谱标准样 NBS987Sr 的结果为⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.710 245 ± 0.000 030, LRIG 质谱标准样的结果为¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512 202 ± 0.000 030,国家一级标准 Sm-Nd 岩石样 GBS04419 的结果是: Sm = 3.017×10^{-6} 、Nd = 10.066×10^{-6} 、¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512 739 ± 0.000 005。国际标准岩石样 BCR-2 的结果是: Rb = $(46.50 \pm 0.93) \times 10^{-6}$ 、Sr = $(336.00 \pm 6.72) \times 10^{-6}$ 、⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.704 958 ± 0.000 030, Sr 分馏的内校正因子均采用⁸⁸Sr/⁸⁶Sr = 8.375 209。Sm = $(6.70 \pm 0.14) \times 10^{-6}$ 、Nd = $(28.00 \pm 0.56) \times 10^{-6}$ 、¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512 633 ± 0.000 030。Nd 分馏的内校正因子均采用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.721 900。

3 测定结果

3.1 锆石 U-Pb 同位素测定

本次研究对 1 件 YX65 富铌辉长岩样品进行了锆石 U-Pb 同位素测年,结果见附表 1,图 3 为代表性锆石 CL(阴极发光)图像特征。图 4 展示了样品分析的锆石 U-Pb 谐和曲线图。

该样品中的代表性锆石多为椭圆状、次圆状,少数为次棱角状,基本不具有完整晶型,阴极发光图像较暗,振荡环带不发育,表现为变质成因锆石特征。并且 Th/U 比值均小于 0.10(0.003 2~0.028 3),同样指示了变质成因。在图 4 中,数据点成群落在谐和线上,30 个测点²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄范围为 481~487 Ma,加权平均年龄为 484.3 ± 1.8 Ma($n=30$, MSWD=0.050)。

3.2 岩石地球化学特征

寨根地区富铌辉长岩的主微量元素分析结果列于附表 2。

3.2.1 主量元素特征 富铌辉长岩类 SiO₂ 含量介于 48.10%~53.66%, MgO 含量为 4.66%~7.52%, Mg[#] 值介于 38.30~59.87, TiO₂ 含量介于 1.25%~2.92%, Al₂O₃ 含量介于 11.16%~14.87%, FeO^T 为 10.50%~15.75%。在图 5 上,富铌辉长岩样品投点于亚碱性玄武岩区域内。

3.2.2 微量及稀土元素特征 富铌辉长岩 Σ REE 为 70.40×10^{-6} ~ 151.41×10^{-6} , 稀土总量较高, (La/Yb)_N = 2.11~5.50, (La/Sm)_N = 1.50~2.79, (Gd/Yb)_N = 1.06~1.78, δEu = 0.83~1.12, 8 件样

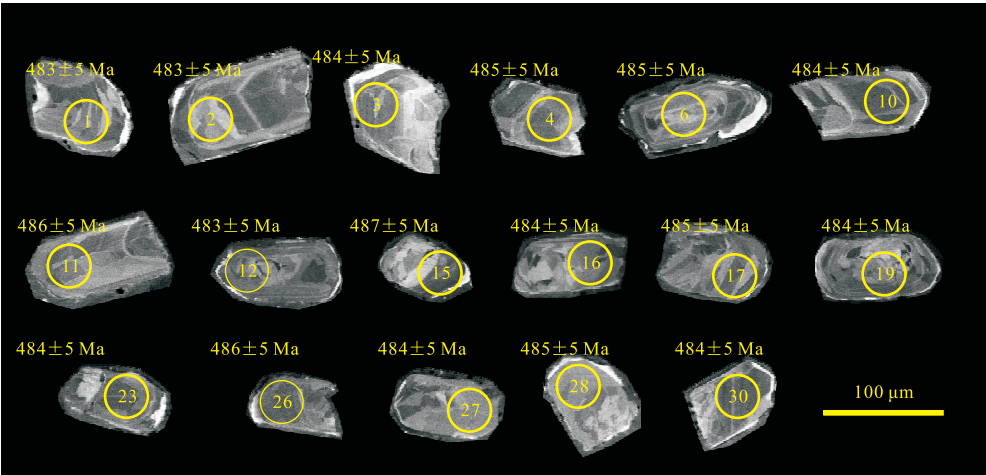


图 3 富铌辉长岩代表性锆石 CL 图像及测点位置
Fig.3 Representative CL images and dating spots of Nb-enriched gabbros

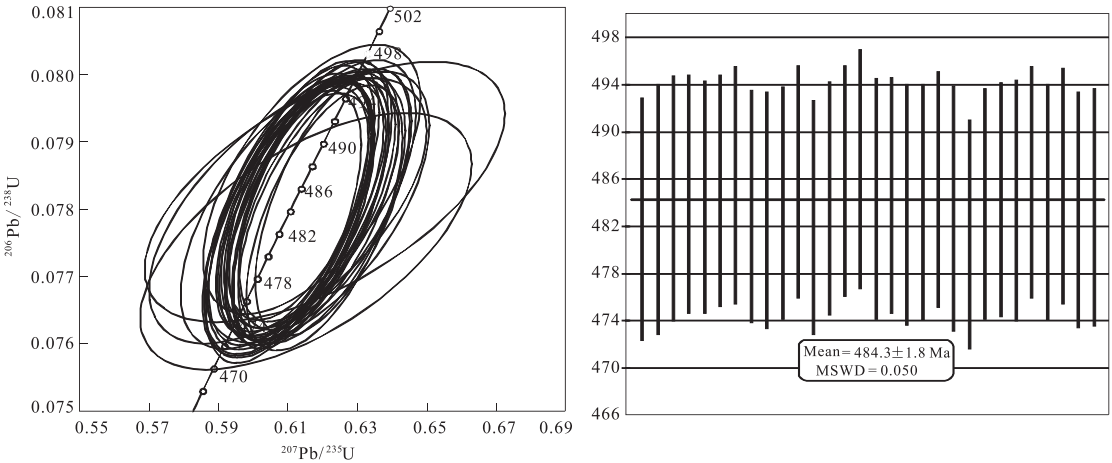


图 4 富铌辉长岩锆石 U-Pb 谐和图
Fig.4 Concordia diagrams plot of the zircons U-Pb data of Nb-enriched gabbros

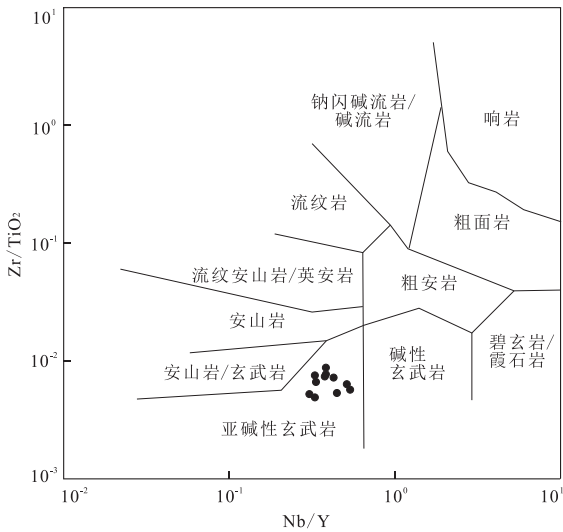


图 5 富铌辉长岩类 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解
Fig.5 Zr/TiO₂-Nb/Y diagram of Nb-enriched gabbros

品具有微弱的 Eu 负异常,3 件样品具 Eu 正异常.微量元素相对富集 Rb、Th 等大离子亲石元素,相对亏损 Nb、Ta、P 等高场强元素.在图 6 上,样品总体投于富铌玄武岩区域.轻稀土略富集,轻稀土分馏程度比重稀土略高(图 7a).

3.3 全岩 Sr-Nd 同位素地球化学特征

本次共对 5 件样品进行了 Sr-Nd 同位素分析,数据列于附表 3.⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 比值小于 3,没有出现 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i异常低的情况(小于 0.700),表明 Sr 同位素分析结果具有地质意义(Wu *et al.*, 2000),5 件样品具有较高的 Sr 初始比值,(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 范围为 0.714 273~0.723 936.

分析样品的 *f*_{Sm/Nd} 为 -0.13~-0.24,在有效的范围内(-0.2~-0.4, Wu *et al.*, 2000),表明分析数据有意义.5 件样品均具有亏损的 Nd 同位素组

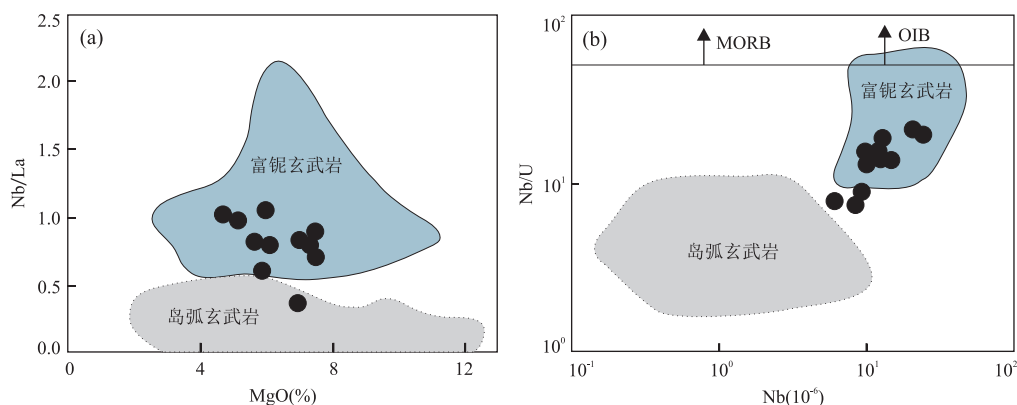


图 6 富铌辉长岩 MgO-Nb/La (a) 和 Nb-Nb/U (b) 判别图解

Fig.6 MgO vs. Nb/La (a) and Nb vs. Nb/U (b) for the Nb-enriched gabbros

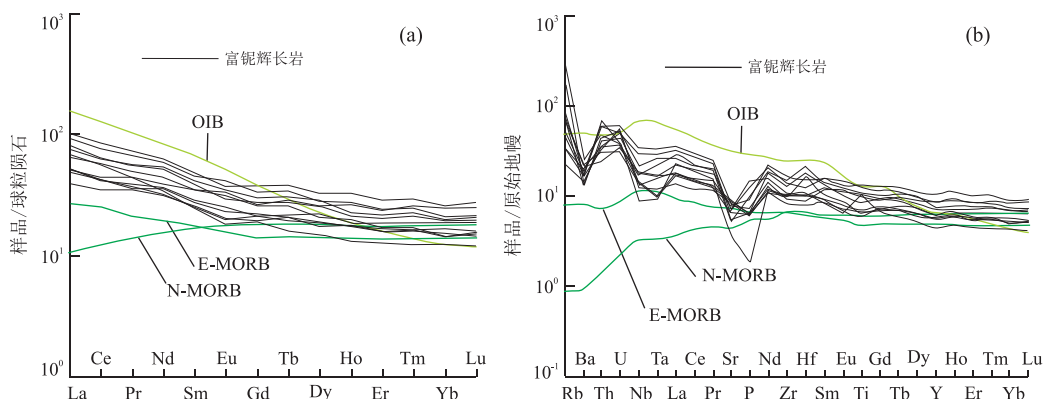
底图据 Kepezhinskas *et al.* (1996)

图 7 富铌辉长岩稀土元素配分模式图(a)及微量元素蛛网图(b)

Fig.7 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergrams (b) for Nb-enriched gabbros

球粒陨石和原始地幔标准化值均据 Sun and McDonough (1989)

成, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 范围为 $0.511\,880 \sim 0.511\,988$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值范围为 $-1.61 \sim +0.49$, 表明源岩来自于原始地幔, 并有少量地壳物质的加入; 二阶段模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 较集中 ($1\,095 \sim 1\,253$ Ma)。

4 讨论

4.1 富铌辉长岩的时代

研究区东北部西庄河一带二郎坪群被早古生代 O 型埃达克岩侵入, 其成岩年龄为 461 ± 0.9 Ma (郭彩莲和陈丹玲, 2011); 西部商南地区侵入秦岭岩群的新元古代商南花岗岩体和吊庄花岗岩体也具有埃达克岩的特征, 但缺乏精确的同位素年代学数据 (裴先治等, 2003; 单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 889 ± 22 Ma)。北秦岭西段宝鸡地区也有早古生代埃达克岩和玻安岩的报导, 陈隽璐等 (2008) 获得侵入丹凤群的唐藏岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为

454 ± 1.7 Ma, 该岩体具有高镁埃达克岩的地球化学特征; 李源等 (2012) 获得丹凤蛇绿岩中的鸚鵡嘴辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 524 ± 1.3 Ma, 该辉长岩具有玻安岩地球化学特征。本次研究未能获得寨根地区富铌辉长岩的成岩年龄, 仅测得富铌辉长岩 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 变质年龄为 484.3 ± 1.8 Ma, Sr-Nd 同位素校正时参照鸚鵡嘴辉长岩年龄 524 Ma。

前已叙及, 秦岭岩群中存在高压—超高压榴辉岩、榴闪岩、麻粒岩等, 这些高压—超高压岩石呈面状分布于秦岭岩群中, 榴辉岩峰期变质年龄变化于 $510 \sim 486$ Ma 之间, 暗示秦岭岩群可能整体卷入了早古生代的俯冲和碰撞作用 (宫相宽等, 2016)。本次获得的富铌辉长岩变质年龄与超高压变质岩的峰值年龄一致, 且赋存于秦岭岩群中, 是否经历超高压变质作用无法判断, 但笔者推测本地区富铌辉长岩可能与秦岭岩群一起经历了大陆深俯冲作用。

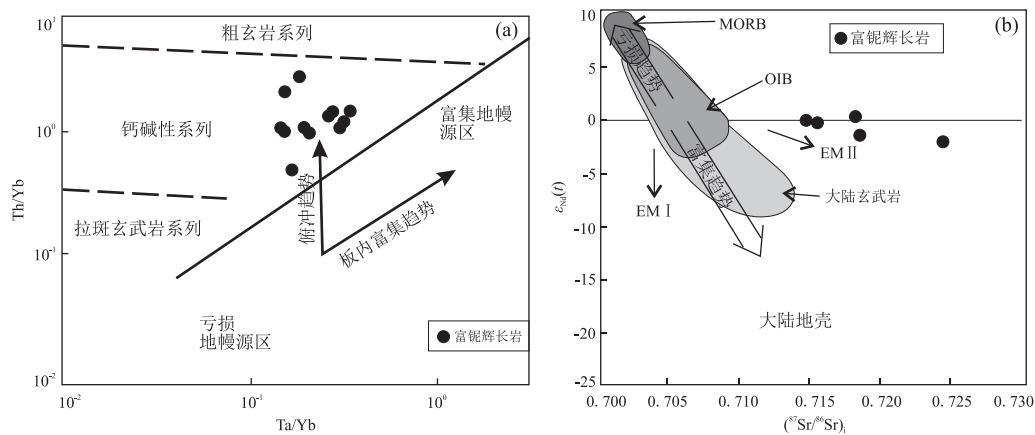


图 8 富铌辉长岩 Th/Yb-Ta/Yb 判别图(a)和 Sr-Nd 同位素组成图解(b)
Fig.8 Th/Yb-Ta/Yb diagram (a) and Sr-Nd isotopic diagram (b) of Nb-enriched gabbros

4.2 富铌辉长岩的成因机制

地球化学数据表明,这套侵入岩属于亚碱性系列,微量元素显示 Rb、Th 等大离子亲石元素的富集以及 Nb、Ta、P 等高场强元素的亏损,总体反映了俯冲带的地球化学特征。

在图 8a 中,样品点投于富集地幔源区趋势线之上,说明寨根地区富铌辉长岩 Th/Yb 值不但高于亏损地幔源区,而且还高于富集地幔源区,同时其演化趋势也偏离了板内富集的演化趋势,也表明该岩石 Th 的富集与板块俯冲的贡献有关.富铌辉长岩 Th/Nb 值为 0.15~0.97,高于原始地幔(0.12)和 EMII 型洋岛玄武岩(0.16),有的甚至高于陆壳的平均值 0.44(Stern *et al.*, 2006).据 Turner *et al.*(1997)对洋岛玄武岩的研究,高的 Th/Nb 比值与俯冲洋壳上的沉积物熔融有关.Th 的高度富集表明有沉积物参与了寨根地区富铌辉长岩的成岩过程。

富铌辉长岩往往被认为是由俯冲板块熔体交代的地幔橄榄岩熔融所形成.无论何种成因机制,富铌辉长岩的形成均需要一个被交代的地幔源区,而差异表现在交代组分来源的不同(Tatsumi, 2006; Streck *et al.*, 2007; 张旗等,2008; 尹继元等,2013).通常认为比较高的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值是地壳来源的标志,而 ε_{Nd}(t) 为负值则指示源区为地壳或富集地幔.寨根地区富铌辉长岩 ε_{Nd}(t) 值范围为 -1.61~+0.49,如图 8b 所示,其源区可能属于第 II 类富集地幔.(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 范围为 0.714 273~0.723 936,明显高于正常的玄武质岩浆,甚至高于正常的花岗质岩浆,说明富铌辉长岩与秦岭岩群深俯冲过程中有大量陆壳物质的混入。

综上,笔者认为寨根地区富铌辉长岩是受俯冲板片熔体交代的地幔楔部分熔融形成的产物,在成

岩过程中有海洋沉积物和大量陆壳物质的加入,可能与秦岭地块共同经受了深俯冲作用有关。

4.3 对早前古生代北秦岭造山带俯冲作用的启示

王晓霞等(2015)将北秦岭早古生代 S 和 I 型花岗岩分为 3 个演化阶段,揭示北秦岭古生代俯冲作用具有长期连续性、阶段性的特点.最早的俯冲事件可能始于 534 Ma(Dong *et al.*, 2015),造山作用可能持续到晚古生代(闫臻等,2009; Yan *et al.*, 2016; 曲玮等,2018).本次研究的寨根地区富铌辉长岩类很可能为第一阶段(534~471 Ma)俯冲作用的产物。

王宗起等(2009)提出,秦岭岩群是北秦岭古生代岛弧岩浆作用基底,其中存在很多被古生代岛弧花岗岩侵入交代变质而成的副变质岩系.随着区调工作的深入进行,一些小的岩体或岩块也逐渐从秦岭岩群中解体出来,如五里川一带原归为秦岭岩群的雁岭沟岩组可能形成于 900 Ma 之后,应该从原秦岭岩群中解体出来(赵利刚等,2018).而近年来的地球化学研究尤其是 Pb、Nd 等同位素地球化学研究成果表明,秦岭造山带内部各地质单元的地球化学组成有很大的差异,难以用两个或三个统一一板块基底的演化来解释,可能存在更多的微板块(地块).此次发现的富铌辉长岩类岩石分布于秦岭岩群中部,形成于早古生代早期俯冲环境中,也表明秦岭岩群在早古生代早期不是由单一的陆块组成,为秦岭造山带构造演化的研究提供了新思路。

5 结论

(1)获得寨根地区富铌辉长岩 LA-MC-ICPMS

锆石 U-Pb 变质年龄为 484.3 ± 1.8 Ma, 与超高压变质岩的峰值年龄一致, 推测本地区富铌辉长岩可能与秦岭岩群一起经历了深俯冲作用。

(2) 寨根地区富铌辉长岩是受俯冲板片熔体交代的地幔楔部分熔融形成的产物, 在成岩过程中有海洋沉积物和大量陆壳物质的加入, 可能与秦岭地块共同经受了深俯冲作用有关。

(3) 富铌辉长岩类岩石的发现, 表明秦岭岩群在早古生代早期不是由单一的陆块组成, 为秦岭造山带构造演化的研究提供了新思路。

致谢: 感谢匿名审稿专家提出的建设性修改意见!

附补充信息表见: <http://www.earth-science.net/WebPage/view.aspx?id=20190117063442.pdf>

References

- Chen, J. L., Xu, X. Y., Wang, H. L., et al., 2008. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of Early Paleozoic Adakitic Rock in the West Segment of North Qinling. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 475–484 (in Chinese with English abstract).
- Chen, N. S., Yang, Y., Zhou, H. W., 1993. High Pressure Metamorphism of Garnet-Amphibole Rocks from Songshugou Area, Eastern Qinling Mountain and Its Tectonic Implication. *Journal of Earth Science*, 14(1): 36–45.
- Dong, Y. P., Zhang, G. W., Hauenberger, C., et al., 2011. Paleozoic Tectonics and Evolutionary History of the Qinling Orogen: Evidence from Geochemistry and Geochronology of Ophiolite and Related Volcanic Rocks. *Lithos*, 122(1–2): 39–56. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.11.011>
- Dong, Y. P., Zhang, X. N., Liu, X. M., et al., 2015. Propagation Tectonics and Multiple Accretionary Processes of the Qinling Orogen. *Journal of Asian Earth Sciences*, 104: 84–98. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.10.007>
- Geng, J. Z., Li, H. K., Zhang, J., et al., 2011. Zircon Hf Isotope Analysis by Means of LA-MC-ICP-MS. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1508–1513 (in Chinese with English abstract).
- Gong, X. K., Chen, D. L., Ren, Y. F., et al., 2016. Identification of Coesite-Bearing Amphibolite in the North Qinling and Its Geological Significance. *Chinese Science Bulletin*, 61(12): 1365–1378 (in Chinese with English abstract).
- Guo, C. L., Chen, D. L., 2011. Identification of O-Type Adakitic Rocks in Erlangping Area, Western of Henan Province, and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 85(12): 1994–2002 (in Chinese with English abstract).
- Kepezhinskas, P., Defant, M. J., Drummond, M. S., 1996. Progressive Enrichment of Island Arc Mantle by Melt-Peridotite Interaction Inferred from Kamchatka Xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(7): 1217–1229. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00001-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00001-4)
- Li, Y., Yang, J. S., Dilek, Y., et al., 2015. Crustal Architecture of the Shangdan Suture Zone in the Early Paleozoic Qinling Orogenic Belt, China: Record of Subduction Initiation and Backarc Basin Development. *Gondwana Research*, 27(2): 733–744. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.03.006>
- Li, Y., Yang, J. S., Pei, X. Z., et al., 2012. A Model for Multi-Stage of the Early Palaeozoic Danfeng Ophiolite in Qinling Orogen Belt: From Arc to Inter-Arc Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1896–1914 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. B., Chen, N. S., Su, W., 2018. Tectonic Boundary and Ceasing Time of Amalgamation between the North China Craton and the North Qinling Belt. *Journal of Earth Science*, 29(5): 1074–1080. <https://doi.org/10.1007/s12583-018-0847-8>
- Liu, L., Liao, X. Y., Zhang, C. L., et al., 2013. Multi-Metamorphic Timings of HP-UHP Rocks in the North Qinling and Their Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1634–1656 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Ludwig, K. R., 2003. Users Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Mao, X. H., Zhang, J. X., Yu, S. Y., et al., 2018. Metamorphism of Qinling Complex in Northern West Qinling Orogen: Petrology, Phase Equilibria Modelling of Paragneiss and Their Geological Implication. *Earth Science*, 43(1): 278–295 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.017>
- Pei, X. Z., Wang, T., Ding, S. P., et al., 2003. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Neoproterozoic Adakitic Granitoids on the North Side of the Shangdan Zone in the East Qinling. *Geology in China*, 30(4): 372–381 (in Chinese with English abstract).
- Qu, W., Liu, X. C., Cui, J. J., et al., 2018.⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating of Muscovite from the Guishan Complex in the Tongbai Orogen, Central China, and Its Geological Implications.

- Earth Science*, 43(1): 247—258 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.015>
- Stern, R.J., Kohut, E., Bloomer, S.H., et al., 2006. Subduction Factory Processes beneath the Guguan Cross-Chain, Mariana Arc: No Role for Sediments, are Serpentinites Important? *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(2): 202—221. <https://doi.org/10.1007/s00410-005-0055-2>
- Streck, M. J., Leeman, W. P., Chesley, J., 2007. High-Magnesian Andesite from Mount Shasta: A Product of Magma Mixing and Contamination, not a Primitive Mantle Melt. *Geology*, 35(4): 351. <https://doi.org/10.1130/g23286a.1>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tatsumi, Y., 2006. High-Mg Andesites in the Setouchi Volcanic Belt, South Western Japan: Analogy to Archean Magmatism and Continental Crust Formation? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34(1): 467—499. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125014>
- Turner, S., Hawkesworth, C., Rogers, N., et al., 1997. U-Th Isotope Disequilibria and Ocean Island Basalt Generation in the Azores. *Chemical Geology*, 139(1—4): 145—164. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(97\)00031-4](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(97)00031-4)
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Dong, C. Y., et al., 2011. SHRIMP Zircon Dating of Meta-Sedimentary Rock from the Qinling Group in the North of Xixia, North Qinling Orogenic Belt; Constraints on Complex Histories of Source Region and Timing of Deposition and Metamorphism. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1172—1178 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T., Zhang, Z. Q., Wang, X. X., et al., 2005. Neoproterozoic Collisional Deformation in the Core of the Qinling Orogen and Its Age: Constrained by Zircon SHRIMP Dating of Strongly Deformed Syn-Collisional Granites and Weakly Deformed Granitic Veins. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 220—231 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. X., Wang, T., Zhang, C. L., et al., 2015. Granitoid Magmatism in the Qinling Orogen, Central China and Its Bearing on Orogenic Evolution. *Science in China (Series D)*, 45(8): 1109—1125 (in Chinese).
- Wang, Z. Q., Yan, Q. R., Yan, Z., et al., 2009. New Division of the Main Tectonic Units of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Acta Petrologica Sinica*, 83(11): 1527—1546 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S., et al., 2000. Phanerozoic Crustal Growth: U-Pb and Sr-Nd Isotopic Evidence from the Granites in Northeastern China. *Tectonophysics*, 328(1/2): 89—113. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(00\)00179-7](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(00)00179-7)
- Yan, Q. R., Wang, Z. Q., Yan, Z., et al., 2009. Tectonic Affinity and Timing of Two Types of Amphibolites within the Qinling Group, North Qinling Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2177—2194 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Z., Fu, C. L., Wang, Z. Q., et al., 2016. Late Paleozoic Subduction-Accretion along the Southern Margin of the North Qinling Terrane, Central China: Evidence from Zircon U-Pb Dating and Geochemistry of the Wuguan Complex. *Gondwana Research*, 30: 97—111. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.05.005>
- Yan, Z., Wang, Z. Q., Chen, J. L., et al., 2009. Geochemistry and SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Amphibolites from the Danfeng Group in the Wuguan Area, North Qinling Terrane and Their Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 83(11): 1633—1646 (in Chinese with English abstract).
- Yin, J. Y., Chen, W., Yu, S., et al., 2013. Age, Geochemical Features and Cu-Au Mineralization Significance of the Magnesian Dioritic Dykes in Baogutu Area of West Junggar. *Geology in China*, 40(4): 1030—1043 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B. R., Gao, S., Zhang, H. F., et al., 2002. Geochemistry of Qinling Orogen. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, C. L., Liu, L., Zhang, G. W., et al., 2004. Determination of Neoproterozoic Post-Collisional Granites in the North Qinling Mountains and Its Tectonic Significance. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 33—42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., Yuan, X. C., Zhang, B. R., et al., 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, Q., Wang, Y., Xiong, X. L., et al., 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity. China Land Press, Beijing (in Chinese).
- Zhao, L. G., Li, C. D., Wu, Z. Y., et al., 2018. Detrital Zircon U-Pb Geochronology of the Qinling Group in Wuli-chuan-Zhaigen Area, West Henan. *Geology in China*, 45(4): 753—766 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈勇骞, 徐学义, 王洪亮, 等, 2008. 北秦岭西段早古生代埃达克岩地球化学特征及岩石成因. *地质学报*, 82(4): 475—484.
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 等, 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-

- MC-ICP-MS 测定.地质通报,30(10): 1508—1513.
- 宫相宽,陈丹玲,任云飞,等,2016.北秦岭含柯石英斜长角闪岩的发现及其地质意义.科学通报,61(12): 1365—1378.
- 郭彩莲,陈丹玲,2011.豫西二郎坪地区 O 型埃达克岩的厘定及其地质意义.地质学报,85(12): 1994—2002.
- 李源,杨经绥,裴先治,等,2012.秦岭造山带早古生代蛇绿岩的多阶段演化:从岛弧到弧间盆地.岩石学报,28(6): 1896—1914.
- 刘良,廖小莹,张成立,等,2013.北秦岭高压—超高压岩石的多期变质时代及其地质意义.岩石学报,29(5): 1634—1656.
- 毛小红,张建新,于胜尧,等,2018.西秦岭北缘秦岭杂岩变质作用:副片麻岩岩石学、相平衡模拟及其地质意义.地球科学,43(1): 278—295.
- 裴先治,王涛,丁仁平,等,2003.东秦岭商丹带北侧新元古代埃达克质花岗岩及其地质意义.中国地质,30(4): 372—381.
- 曲玮,刘晓春,崔建军,等,2018.桐柏造山带中龟山杂岩的白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及其地质意义.地球科学,43(1): 247—258.
- 万渝生,刘敦一,董春艳,等,2011.西峡北部秦岭群变质沉积岩锆石 SHRIMP 定年:物源区复杂演化历史和沉积、变质时代确定.岩石学报,27(4): 1172—1178.
- 王涛,张宗清,王晓霞,等,2005.秦岭造山带核部新元古代碰撞变形及其时代——强变形同碰撞花岗岩与弱变形脉体锆石 SHRIMP 年龄限定.地质学报,79(2): 220—231.
- 王晓霞,王涛,张成立,等,2015.秦岭造山带花岗质岩浆作用与造山带演化.中国科学(D 辑),45(8): 1109—1125.
- 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.地质学报,83(11): 1527—1546.
- 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地质意义.岩石学报,25(9): 2177—2194.
- 闫臻,王宗起,陈隽璐,等,2009.北秦岭武关地区丹凤群斜长角闪岩地球化学特征、锆石 SHRIMP 测年及其构造意义.地质学报,83(11): 1633—1646.
- 尹继元,陈文,喻顺,等,2013.西准噶尔包古图富镁闪长质岩墙的时代、地球化学特征以及铜金成矿意义.中国地质,40(4): 1030—1043.
- 张本仁,高山,张宏飞,等,2002.秦岭造山带地球化学.北京:科学出版社.
- 张成立,刘良,张国伟,等,2004.北秦岭新元古代后碰撞花岗岩的确定及其构造意义.地学前缘,11(3): 33—42.
- 张国伟,袁学诚,张本仁,等,2001.秦岭造山带与大陆动力学.北京:科学出版社.
- 张旗,王焰,熊小林,等,2008.埃达克岩和花岗岩:挑战与机遇.北京:中国大地出版社.
- 赵利刚,李承东,武志宇,等,2018.豫西五里川—寨根一带秦岭岩群碎屑锆石 U-Pb 年龄研究.中国地质,45(4): 753—766.