

东秦岭磨沟碱性岩体年代学、地球化学及岩石成因

曹 晶¹, 叶会寿², 李正远^{1,2}, 张兴康^{1,2}, 王 鹏¹, 贺 文^{1,2}

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘 要: 河南嵩县磨沟碱性岩体位于华北陆块南缘, 其主体岩性为霓辉正长岩, 局部出露正长岩和少量似斑状(霓辉)正长岩, 发育岩浆暗色包体。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 霓辉正长岩和正长岩成岩年龄分别为 210.4 ± 2.0 Ma (MSWD=0.39) 和 237.6 ± 2.9 Ma (MSWD=0.95), 结合前人研究成果, 认为该岩体是中三叠世和晚三叠世两期岩浆活动的产物。岩石地球化学特征显示, 霓辉正长岩的 σ 值为 8.93~11.08, K_2O 含量为 10.70%~13.76%, K_2O/Na_2O 值为 3.87~10.35, 属于过碱性岩石系列的钾质碱性岩; 在微量元素组成上, 富集轻稀土和大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 具有弱或不明显的负铕异常。在同位素组成上, 霓辉正长岩具有偏高的、变化范围很大的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值和显著偏低的 $\epsilon Nd(t)$ 值; 锆石的 $\epsilon Hf(t)$ 值变化于 -21.6~-4.5 之间, 两阶段 Hf 模式年龄为 1555~2629 Ma。磨沟岩体是由含金云母的富集地幔部分熔融产生的幔源岩浆与壳源岩浆混合并经一定程度的分异演化形成的, 岩石中高含量的 K 来源于这种含金云母的富集地幔。磨沟岩体早期岩浆活动发生于秦岭造山带主碰撞峰期的局部伸展环境, 晚期岩浆活动则发生于后碰撞伸展环境。

关键词: 霓辉正长岩; 锆石 U-Pb 定年; Sr-Nd-Hf 同位素; 富集地幔; 东秦岭磨沟

中图分类号: P588.12⁺2; P588.15; P597⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6524(2015)05-0665-20

Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Mogou alkalic pluton in the East Qinling orogenic belt

CAO Jing¹, YE Hui-shou², LI Zheng-yuan^{1,2}, ZHANG Xing-kang^{1,2}, WANG Peng¹ and HE Wen^{1,2}

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Mogou alkalic pluton, located in the southern margin of the North China Block, is mainly composed of aegirine-augite syenite, with minor syenite and porphyritic (aegirine-augite) syenite as well as mafic magma enclaves. LA-ICP-MS U-Pb dating of the aegirine-augite syenite yielded two ages of 237.6 ± 2.9 Ma (MSWD=0.95) and 210.4 ± 2.0 Ma (MSWD=0.39), suggesting the middle and late Triassic epoch, as also shown by previous studies. The aegirine-augite syenite is of peralkaline series and belongs to potassic alkaline rock with σ being 8.93~11.08, K_2O 10.70%~13.76%, and K_2O/Na_2O 3.87~10.35. The REE and trace elements are enriched in LREE and large ion lithophile elements, and depleted in high-field strength elements, with slightly negative to no obvious anomalies of Eu. The aegirine-augite syenite shows high $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ values with a large variation and significantly negative $\epsilon Nd(t)$ values. The zircon Hf isotopic compositions are characterized by $\epsilon Hf(t)$ values of -21.6 to -4.5, and the two-stage model ages of 1555 to 2629 Ma. The formation of the

收稿日期: 2014-12-27; 修订日期: 2015-07-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272104); 地质调查项目(1212011220869)

作者简介: 曹 晶(1988-), 女, 汉族, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: jing.cao@cugb.edu.cn; 通讯作者: 叶会寿(1964-), 男, 汉族, 研究员, 矿床学专业, 长期从事矿床研究与资源勘查评价工作, E-mail: yehuishou@163.com。

Mogou pluton could be interpreted as mixing/mingling of crustal-melted magma and mantle-derived magma which originated from phlogopite-bearing enriched mantle by low degree partial melting. The early stage magmatic activity of the Mogou pluton occurred in a local extension setting during a great regional collision period, while the late stage magmatism took place in the post-collision environment.

Key words: aegirine-augite syenite; zircon U-Pb dating; Sr-Nd-Hf isotope; enriched mantle; Mogou in the East Qinling orogenic belt

秦岭-大别造山带是中央造山带的重要组成部分,也是世界上著名的多期次、多体制的复合型大陆造山带(张国伟等,2001)。该带主要由商丹缝合带以北的北秦岭构造带、商丹缝合带和勉略缝合带之间的南秦岭构造带组成,北邻华北克拉通南缘,南邻扬子克拉通北缘(张国伟等,2001)。该造山带至少经历了新元古代、古生代和中生代3次主要的构造岩浆热事件,相应形成了3期主要的不同成因及构造背景的岩浆岩,其中中生代花岗岩出露面积最大,并横跨不同构造单元。在空间分布上,晚中生代花岗岩主要分布于商州以东的东秦岭-大别地区,在东秦岭地区主要出露于商丹缝合带以北的北秦岭地区和华北陆块南缘,同时形成了与之有成因联系的巨量金属矿产。早中生代花岗岩主要分布于商州以西的东、西秦岭地区(张成立等,2008),西秦岭以糜署岭、温泉、罗坝以及美武等大岩基为典型代表,东秦岭主要分布于南、北秦岭构造带中。北秦岭构造带以宝鸡岩体群构成的不规则大岩基为代表,南秦岭构造带以东江口(高桥街、东江口、柞水、曹坪和沙河湾岩体)、五龙(西坝、华阳、五龙、老城、西岔河和胭脂坝岩体)、光头山(迷坝、新院、姜家坪、张家坝、光头山、留坝岩体)三大岩体群为代表,并且在这些岩体群中识别出了具环斑结构的环斑花岗岩体(卢欣祥等,1999;王晓霞等,2002,2003a,2003b)。东秦岭-大别山地区却鲜有早中生代岩浆热事件的报道和研究。目前对这些早中生代花岗岩的物质来源、岩石成因、成岩环境等仍存在重要分歧(Zhang *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2002; 张本仁等,2002; Wang *et al.*, 2007; 秦江峰等,2007; 张成立等,2008; 周滨等,2008; 弓虎军等,2009; 许成等,2009),分歧的关键点是晚三叠世是秦岭陆内造山作用的开始还是结束。

近些年,在华北陆块南缘陆续发现了一些早中生代的侵入体,例如小秦岭东吉口辉石正长岩(李春麟等,2012)、金铜盆辉绿岩墙群(待发表资料)、熊耳山寨凹正长花岗岩(李厚民等,2012)、嵩县南部磨沟

地区的正长岩(任富根等,2001; 刘楚雄等,2010; Mao *et al.*, 2010; 卢仁等,2013)以及黄水庵、黄龙铺等地区的火成碳酸岩脉(黄典豪等,1994; Stein *et al.*, 1997; 曹晶等,2014; Song *et al.*, 2015)等。与秦岭早中生代大规模的花岗岩类相比,这些侵入体产于不同的大地构造单元,在岩石类型、规模等方面也有明显区别,对这些侵入体的研究有望对以上问题的解决找到新的突破口,并且可以在一定程度上提高对华北陆块南缘早中生代岩浆构造活动的认识。河南省嵩县南部磨沟地区是华北陆块南缘面积最大的早中生代侵入体分布区,本文选择该区出露面积最大的磨沟碱性岩体进行详细研究,通过对该岩体地球化学、锆石 LA-ICP-MS 年代学、锆石微量元素、Hf 同位素及 Sr-Nd 同位素特征等的研究,探讨岩石成因、岩浆源区特征,并结合区域研究成果,分析成岩构造背景及其地质意义,从而为秦岭地区早中生代的构造背景研究提供新的约束。

1 区域地质背景

磨沟岩体所在的华北陆块南缘位于秦岭构造带北侧,北以三宝断裂为界与华北陆块相邻,南以黑沟-栾川断裂为界与北秦岭中新元古界宽坪群呈断层接触(图1)。区内地层具有克拉通结晶基底和盖层的双重结构,结晶基底主要由新太古界太华群片麻岩组成,沉积盖层主要由中元古界熊耳群中基性-酸性火山岩系、官道口群碎屑岩-碳酸盐岩沉积建造和新元古界栾川群、陶湾群碎屑-碳酸盐-碱性火山岩沉积建造组成。区域性构造以近东西向为主,并叠加北东向构造。早中生代侵入体零星出露(图1),以岩株或岩脉为主,如小秦岭地区的东吉口辉石正长岩、金铜盆基性岩墙群等,熊耳山磨沟地区的碱性岩、寨凹正长花岗岩脉、祁雨沟辉绿岩脉以及黄龙铺、华阳川、黄水庵等地碳酸岩脉等。晚中生代岩浆岩广泛出露,以花岗岩类为主,主要呈两种形式产出:一类为大面积出露的大岩基,如老牛山、华山、

文峪、花山、五丈山、合峪等;另一类为小的斑岩体,如金堆城、石家湾、南泥湖、雷门沟等(图1),这些小

斑岩体与东秦岭钼矿带内众多的斑岩型钼矿床有密切成因联系。

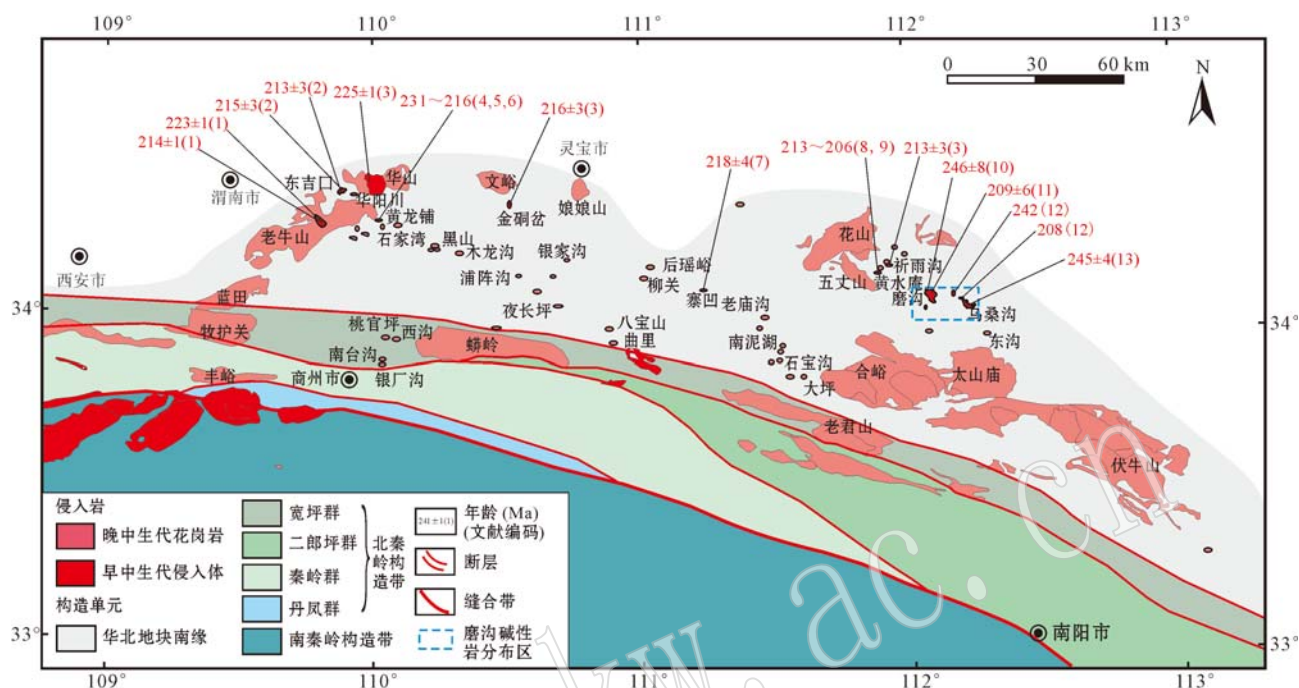


图1 东秦岭地区中生代侵入体分布图(据王晓霞等,2011)

Fig. 1 Distribution of the Mesozoic intrusions in the East Qinling orogen (after Wang Xiaoxia *et al.*, 2011)

年龄后括号内数字为来源文献编码,其中(12)为全岩 K-Ar 年龄和 Rb-Sr 等时线年龄,其它均为锆石 U-Pb 年龄:(1)齐秋菊等(2012);(2)李春麟等(2012);(3)待发表资料;(4)黄典豪等(1994);(5)Stein 等(1997);(6)Song 等(2015);(7)李厚民等(2012);(8)黄典豪等(2009);(9)曹晶等(2014);(10)卢仁等(2013);(11)任富根等(2001);(12)曾广策(1990);(13)刘楚雄等(2010)

The sequence numbers of references [the ages are all zircon U-Pb ages except for number (12) K-Ar and Rb-Sr ages]: (1) Qi Qiuju *et al.*, 2012; (2) Li Chunlin *et al.*, 2012; (3) unpublished data; (4) Huang Dianhao *et al.*, 1994; (5) Stein *et al.*, 1997; (6) Song *et al.*, 2015; (7) Li Houmin *et al.*, 2012; (8) Huang Dianhao *et al.*, 2009; (9) Cao Jing *et al.*, 2014; (10) Lu Ren *et al.*, 2013; (11) Ren Fugen *et al.*, 2001; (12) Zeng Guangce, 1990; (13) Liu Chuxiong *et al.*, 2010

河南省嵩县南部磨沟地区是华北陆块南缘重要的碱性岩分布区,面积约 180 km²,该区出露 33 个大小不等的正长岩体及岩脉(曾广策,1990),规模较大的为磨沟、狼凹沟、龙头、焦沟、乌桑沟等岩体(图2),其他岩体出露面积约为 0.03~0.3 km²(曾广策,1990),多呈椭圆状、不规则状产出。这些岩体或岩脉侵位于中元古界熊耳群流纹斑岩和玄武安山岩中,接触面产状一般较陡,部分岩体被后期北西向、近东西向断裂切穿。岩性主要有霓辉正长岩、黑云霓辉正长岩、霓辉正长斑岩、霓辉正长伟晶岩、霓辉正长细晶岩等;岩石结构主要为细粒、中细粒、中粗粒结构,部分岩体边缘相可见似斑状结构。

2 岩体地质及岩相学特征

磨沟岩体是磨沟碱性岩分布区出露面积最大的

岩体。该岩体在平面上呈北西-南东走向的近椭圆形(图2),出露面积约 15 km²,长轴长度约 6.8 km,短轴长度约 2.5 km。主体岩性为霓辉正长岩(图3a),霓辉石含量变化较大;岩体北部出露正长岩(图2),正长岩与霓辉正长岩之间界限清晰,西北及东部边缘分布有少量少量的似斑状(霓辉)正长岩。岩体内可见后期侵入的正长岩脉、细晶正长岩脉及石英脉(图3b),霓辉正长岩内发育椭圆形暗色微粒包体(图3c)。与围岩接触带发生云英岩化、绢云母化、硅化、绿泥石化、黄铁矿化等蚀变。

霓辉正长岩:呈浅肉红色至暗红色,块状构造,细粒、中-细粒结构,主要矿物为正长石、霓辉石和少量分布不均的微斜长石,副矿物可见榍石、磷灰石、锆石、磁铁矿等。正长石呈自形-半自形板柱状或他形粒状,发育卡斯巴双晶(图3g、3h),粒度多在 0.8~2.5 mm 之间,含量变化于 70%~80% 之间。霓辉石

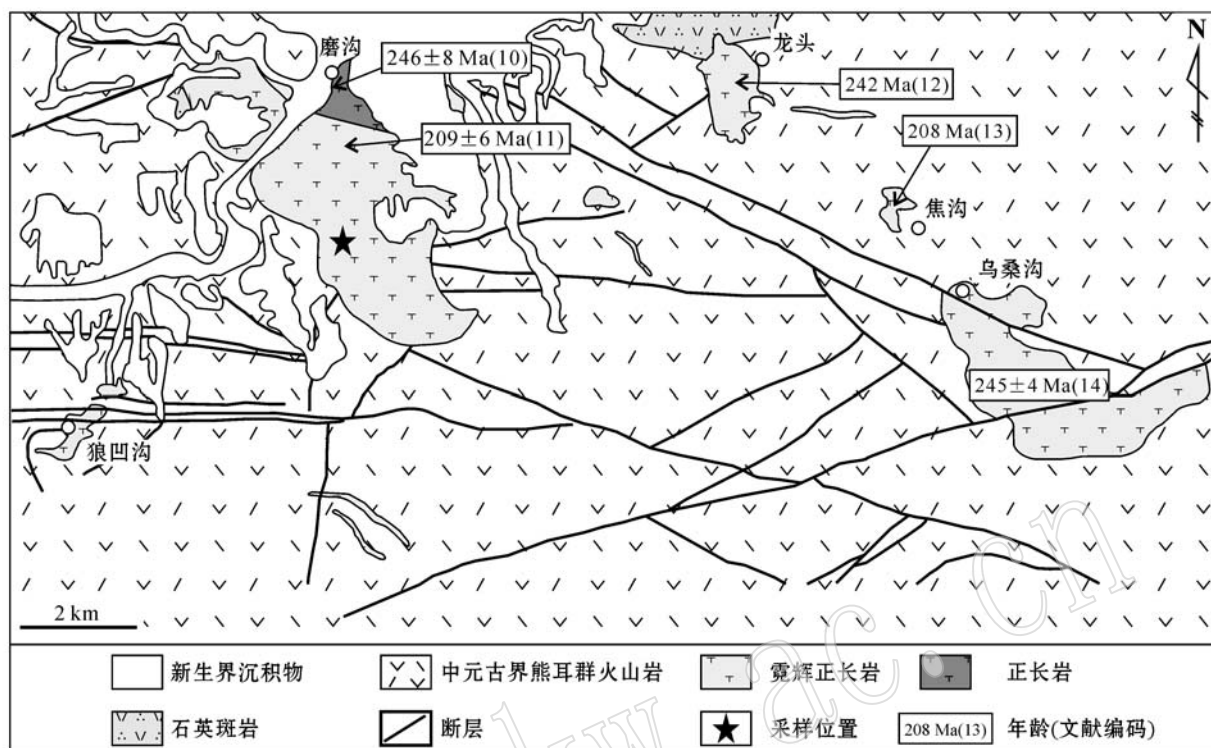


图 2 河南省嵩县南部磨沟碱性岩分布区地质简图(据梁涛等, 2012)(文献编码同图 1)

Fig. 2 Geological sketch map of the alkaline rocks in Mogou area, south Songxian County, western Henan Province (after Liang Tao *et al.*, 2012)(the sequence numbers of references as for Fig. 1)

呈暗绿-黄绿色, 具有明显的颜色环带(图 3f), 呈板柱状或柱状, 偶见八边形晶体(图 3g), 少量呈针柱状或针状镶嵌于正长石中(图 3h), 粒径为 0.08~2 mm 不等, 含量为 10%~20%。微斜长石呈半自形-他形板状, 或以不同比例作为正长石的外部环带(图 3d、3e), 格子双晶发育, 粒径为 0.06~1.2 mm, 含量为 0~5%。

正长岩: 呈肉红色至暗红色, 块状构造, 细粒等粒结构, 少量为中-细粒等粒结构。主要矿物为正长石和微斜长石。正长石多呈自形-半自形板柱状, 其含量通常大于 80%。微斜长石多呈半自形-他形粒状, 或作为正长石的外部环带, 格子双晶发育, 其分布不均, 通常变化于 5%~15%之间。另外可见分布不均的霓辉石, 其含量通常低于 5%。副矿物有榍石、磷灰石、锆石等。

似斑状(霓辉)正长岩: 呈浅肉红色, 块状构造, 似斑状结构, 斑晶主要为正长石(图 3i)。正长石多呈自形板柱状, 卡斯巴双晶发育, 粒径以 0.4~1 mm 为主。基质以半自形柱状或他形粒状的正长石为主, 有少量分布不均的霓辉石和微斜长石。

3 样品采集及分析方法

用于锆石 U-Pb 定年的样品 MG-B3 采自磨沟岩体中部新鲜岩石露头, 采样位置见图 2, 岩性为霓辉正长岩。6 件新鲜岩石样品分别采自磨沟岩体的不同位置, 岩性均为霓辉正长岩, 用于元素地球化学分析和 Sr、Nd 同位素测试。

主量元素、微量元素分析测试工作在国家地质实验测试中心完成, 主量元素采用 X 射线荧光光谱法(XRF)完成(FeO 用化学法测定), 精度优于 1%, 微量元素采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行分析, 精度优于 5%, 少数含量极少($<10^{-8}$)的元素分析精度优于 10%。锆石分选工作在河北省地质测绘院岩矿实验测试中心完成。锆石阴极发光(CL)照相在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心完成。锆石 U-Pb 同位素及微量元素测试分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室利用四级杆 ICP-MS Elan6100DRC 同时分析完成。激光剥蚀系统为德国 Lambda Physik 公司生产的 Geolas 200M 深

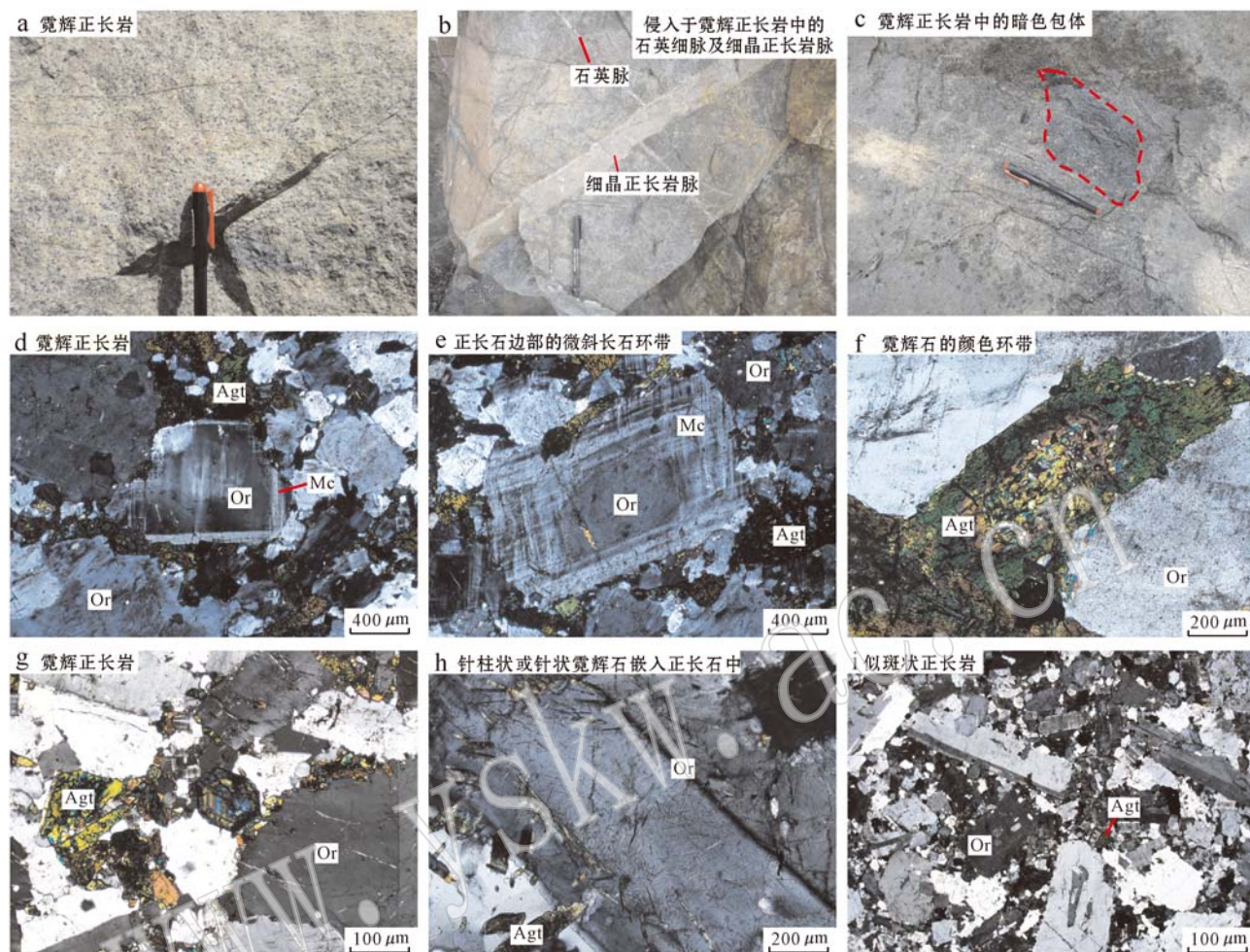


图3 磨沟岩体岩相学特征(显微照片为正交偏光)

Fig. 3 Petrography of the Mogou pluton (crossed nicols)

Agt—霓辉石; Mc—微斜长石; Or—正长石

Agt—aegirine-augite; Mc—microcline; Or—orthoclase

紫外(DUV)193 nm ArF 准分子(excimer)激光剥蚀系统,分析所采用的激光束直径为 $30\ \mu\text{m}$,剥蚀深度为 $20\sim 40\ \mu\text{m}$ 。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化调试。锆石年龄采用标准锆石 91500 作为外部标准物质,元素含量采用 NIST610 作为外标。测试结果通过 Glitter 软件计算得出,获得的数据采用 Andersen(2002)的方法进行同位素比值的校正,并采用 Isoplot 3.23v 进行最终的年龄计算和图表的绘制,分析点的同位素比值和同位素年龄的误差(标准偏差)为 1σ , $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄按 95% 的置信度给出,详细分析参见 Yuan 等(2004)。

锆石 Lu-Hf 同位素测试在中国地质科学院矿产

资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行,采用 He 作为剥蚀物质载气,剥蚀直径为 $55\ \mu\text{m}$,测试时采用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质,分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。分析过程中锆石标准 GJ1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282\ 015 \pm 28$ (2σ , $n=10$),与文献报道值(Elhlou *et al.*, 2006; 侯可军等, 2007)在误差范围内完全一致。

Sr、Nd 同位素分析测试工作在中国科学院壳幔物质与环境重点实验室进行。仪器为德国 Finnigan 公司生产的型号为 MAT-262 的热电离质谱仪(TIMS)。Sr、Nd 同位素比值分别以 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} =$

0.119 4和¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.721 9为标准进行校正。
详细实验过程可参考 Shang 等(2004)。

4 分析测试结果

4.1 地球化学特征

4.1.1 主量元素

表 1 列出了所采岩石样品及前人研究的磨沟霓辉正长岩的主量元素数据。从表中可以看出,磨沟霓辉正长岩的 SiO₂ 含量为 60.51%~66.74%,属于中性岩。在 K₂O+Na₂O-SiO₂ 图解(图 4a)中,样品全部落在碱性系列正长岩区域;Al₂O₃ 含量较高,为 12.78%~16.32%,平均为 14.56%,A/CNK 为

0.59~0.89,平均为 0.75,在 A/NK-A/CNK 图解(图 4b)中样品全部落入过碱质范围内。岩石的 TiO₂ 含量显著偏低(0.25%~0.57%),CaO 含量偏低,为 0.60%~3.23%。K₂O 含量较高,为 9.00%~13.76%,K₂O/Na₂O 为 2.37~10.35,在 Na₂O-K₂O 图解(图 5a)中样品全部分布于高钾质岩石区域,K₂O+Na₂O=12.48%~15.09%,平均为 13.75%,表明岩石具有高钾、富碱的特点。岩石样品的里特曼指数 σ=6.89~11.08,除 3 号样品外,均属于过碱性岩系列,在 SiO₂-AR 图解(图 5b)中全部样品均落于过碱性岩区域。磨沟岩体中含碱性暗色矿物霓辉石,也表明该岩体属于过碱质岩石。因此,磨沟正长岩主体岩性属富碱、高钾、过碱质、贫钛的过碱性岩石。

表 1 磨沟霓辉正长岩主量元素组成

w_B/%

Table 1 Major elements composition of Mogou aegirine-augite syenite

样品号	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-B2	61.00	0.52	12.78	5.21	1.74	0.14	0.66	3.23	2.45	10.96	0.12	0.59	99.40
MG-B3	64.72	0.29	15.20	2.67	0.59	0.03	0.26	1.06	1.33	13.76	0.11	0.45	100.47
MG-B4	63.49	0.48	13.65	4.13	1.13	0.06	0.79	1.86	2.78	10.75	0.14	0.34	99.60
MG-B5	62.11	0.44	14.75	3.23	0.97	0.08	0.62	2.04	1.95	12.60	0.03	0.57	99.39
MG-B6	62.61	0.57	12.91	4.88	1.33	0.09	0.79	2.38	2.72	10.70	0.07	0.21	99.26
MG-B7	63.31	0.29	15.16	3.22	0.84	0.08	0.29	1.15	1.74	12.99	0.04	0.41	99.52
1	61.34	0.42	16.32	2.69	1.03	0.08	0.41	1.62	2.37	11.42	0.12		99.31
2	60.51	0.44	15.06	3.19	1.47	0.12	0.93	2.78	2.42	10.06	0.23		99.23
3	66.74	0.25	15.21	2.64	0.36	0.05	0.25	0.60	3.79	9.00	0.11		99.55

注:样品号 1、2、3 数据引自曾广策(1990),其余为本次研究结果。

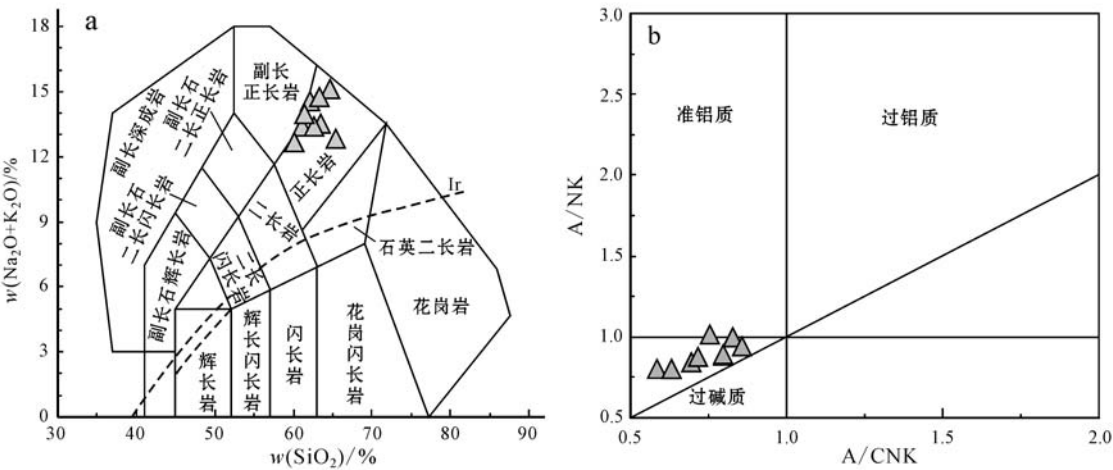


图 4 磨沟岩体 TAS 图解(a, 底图据 Rollinson, 1993)和 A/NK-A/CNK 图解(b, 底图据 Rickwood, 1989)

Fig. 4 TAS (a, after Rollinson, 1993) and A/NK-A/CNK diagrams (b, after Rickwood, 1989) for Mogou aegirine-augite syenite

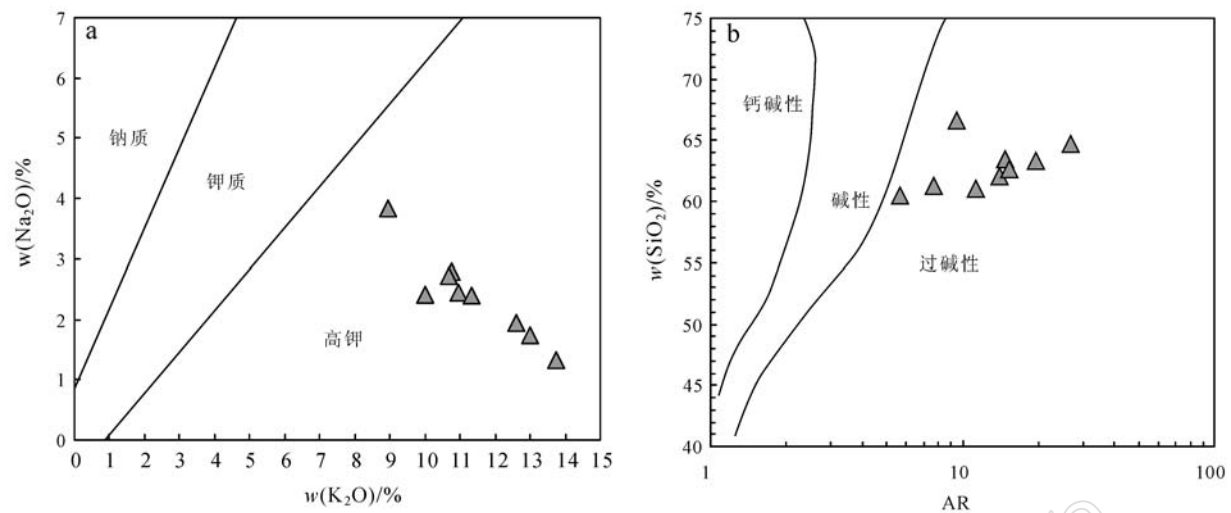


图 5 磨沟岩体 Na₂O-K₂O 判别图解(a, 据 Middlemost, 1975)和 SiO₂-AR 判别图解(b, 据 Wright, 1969)

Fig. 5 Na₂O-K₂O discrimination diagram (a, after Middlemost, 1975) and SiO₂-AR discrimination diagram (b, after Wright, 1969) for Mogou aegirine-augite syenite

4.1.2 微量元素

表 2 列出了岩石样品的稀土、微量元素数据。磨沟霓辉正长岩的稀土元素总量变化较大($\Sigma\text{REE}=157.5\times10^{-6}\sim316.0\times10^{-6}$, 平均为 232.6×10^{-6}),但在稀土元素球粒陨石标准化分配模式图(图 6a)上,分配型式基本一致,表现为轻稀土元素富集的右倾型,与典型碱性岩具有相似的稀土元素配

分曲线(王涛等, 2013),轻重稀土元素分馏明显, $\text{LREE/HREE}=10.48\sim20.29$, $(\text{La/Yb})_{\text{N}}=10.01\sim34.18$),具有中等至弱的负铕异常($\delta\text{Eu}=0.66\sim0.96$),暗示在成岩过程中存在一定程度的斜长石分离结晶作用。在微量元素原始地幔标准化蛛网图解(图 6b)中,磨沟霓辉正长岩相对富集 K、Rb、Ba 等大离子亲石元素和轻稀土元素(LREE),而明显亏损

表 2 磨沟霓辉正长岩微量和稀土元素及相关参数 $w_{\text{B}}/10^{-6}$

Table 2 Trace elements and REE as well as related parameters in Mogou aegirine-augite syenite													
样品号	MG-B2	MG-B3	MG-B4	MG-B5	MG-B6	MG-B7	样品号	MG-B2	MG-B3	MG-B4	MG-B5	MG-B6	MG-B7
La	51.3	48.6	56.3	36.7	67.1	39.4	Sc	16.50	3.38	8.81	5.45	10.40	5.26
Ce	112.0	72.9	121.0	85.3	132.0	64.1	V	214	107	159	160	338	139
Pr	13.6	7.9	15.3	11.4	16.9	7.9	Cr	9.07	4.30	4.32	10.60	4.42	3.89
Nd	50.2	27.5	56.4	43.0	62.3	26.7	Co	6.68	1.36	2.58	2.94	4.16	3.27
Sm	11.00	3.91	10.30	7.92	11.00	4.97	Ni	5.59	7.85	7.61	9.87	7.52	6.84
Eu	2.44	1.08	2.05	1.85	2.19	1.34	Cu	14.30	12.30	22.00	6.56	12.20	10.00
Gd	7.20	2.73	8.09	5.83	8.05	3.54	Zn	73.40	27.60	46.20	52.10	72.10	63.20
Tb	0.99	0.40	1.21	0.89	1.25	0.57	Mo	1.09	0.26	0.31	0.12	0.09	0.16
Dy	5.33	2.01	6.00	4.36	6.15	2.80	Ga	22.00	31.70	21.30	21.60	20.90	17.70
Ho	0.99	0.41	1.20	0.86	1.22	0.62	Rb	260	266	209	227	202	245
Er	2.95	1.06	3.21	2.33	3.29	1.91	Sr	668	352	348	561	222	424
Tm	0.45	0.17	0.48	0.38	0.51	0.35	Nb	74.1	26.0	19.4	45.1	37.1	65.5
Yb	3.61	1.02	3.14	2.63	3.40	2.76	Ta	5.08	0.41	0.78	2.26	1.46	1.53
Lu	0.70	0.18	0.57	0.48	0.60	0.55	Zr	887	206	219	290	294	386
Y	24.20	10.10	27.10	19.40	28.40	14.30	Hf	25.20	5.49	7.48	9.08	8.97	11.90
ΣREE	262.8	169.9	285.3	203.9	316.0	157.5	Th	38.00	8.12	6.19	25.50	25.20	4.47
LREE/HREE	10.83	20.29	10.94	10.48	11.91	11.02	U	6.97	1.52	1.20	2.67	2.37	3.83
$(\text{La/Yb})_{\text{N}}$	10.19	34.18	12.86	10.01	14.16	10.24	Cs	2.06	1.31	1.33	1.13	0.98	1.45
δEu	0.79	0.96	0.66	0.80	0.68	0.93	Ba	5 052	2 725	1 758	2 009	1 140	7 442
δCe	1.02	0.83	0.99	1.01	0.94	0.84							

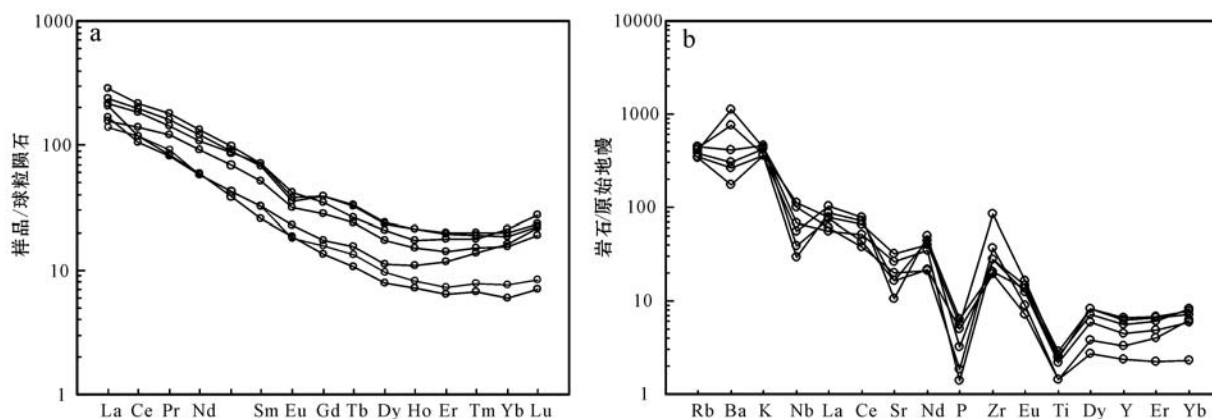


图6 磨沟岩体稀土元素球粒陨石标准化图解(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(标准值据 Sun 和 McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element spider diagrams (b) for Mogou aegirine-augite syenite (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

Nb、P、Ti 等高场强元素和重稀土元素(HREE),表明岩浆或其源岩在演化过程中存在金红石、磷灰石以及 Ti-Fe 氧化物的分离结晶。

4.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

4.2.1 锆石特征

磨沟岩体霓辉正长岩中的锆石可分为3类。

第1类锆石呈无色透明或淡黄色,短至长柱状,少数为四方双锥状,自形-半自形,部分破碎,粒径一般长80~150 μm ,宽50~100 μm ,阴极发光(CL)图像(图7)显示,该类锆石多数具有明显的震荡韵律环带,具有岩浆锆石的特征,用于 LA-ICP-MS 定年的锆石大多数选择此类锆石。该类锆石的 U 含量为 $335 \times 10^{-6} \sim 2394 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $68 \times 10^{-6} \sim 755 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.11~0.69,多数大于 0.3(表3)。锆石的稀土元素组成中,稀土元素总量较高,变化于 $441 \times 10^{-6} \sim 1357 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 995×10^{-6} (表4),HREE 强烈富集,具有明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常,其稀土元素球粒陨石标准化配分曲线与岩浆锆石一致(图8a)。以上特征表明该类

锆石为岩浆锆石。

第2类锆石呈淡黄色、淡红棕色,绝大多数破碎,少数晶形完整,颗粒大小与第1类锆石相似,棱角不分明,部分锆石内部发育针柱状或暗色包裹体、多孔状结构,明显的特征是在锆石阴极发光(CL)图像中由暗色区域和亮色区域组成,多数锆石边部有粗糙的再生边,个别锆石晶体可见不完整的岩浆震荡环带,部分锆石发育斑杂构造。选择锆石进行 U-Pb 定年时尽量避开此类锆石。

第3类锆石呈半透明或淡黄色,大多数颗粒呈半自形-它形,长轴一般为100~200 μm ,短轴一般为50~100 μm ,多数棱角不分明,裂纹发育,具有不明显的岩浆震荡环带,阴极发光(CL)图像较明亮(图7,测点9)。该类锆石的 U 含量为 $39 \times 10^{-6} \sim 247 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $35 \times 10^{-6} \sim 212 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.81~1.04(表3)。此类锆石的稀土元素具有明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常,稀土元素球粒陨石标准化配分曲线与岩浆锆石一致(图8b)。U-Pb 测年结果(表3)表明此类锆石形成于中元古代,可能来自

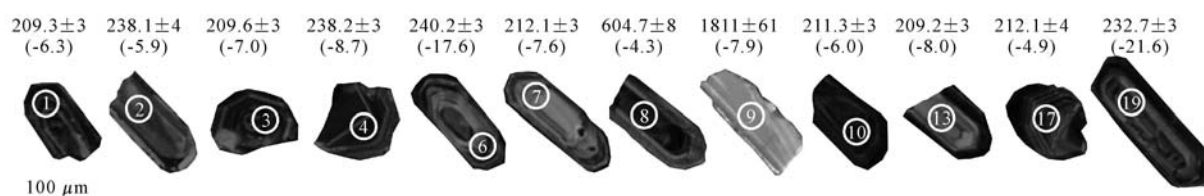


图7 磨沟霓辉正长岩代表性锆石阴极发光图像、测点位置、U-Pb 年龄和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

Fig. 7 Cathodoluminescence (CL) images, U-Pb ages and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of representative zircons from Mogou aegirine-augite syenite

表 3 磨沟岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定结果

Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for Mogou aegirine-augite syenite

点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值($\pm 1\sigma$)			年龄/Ma($\pm 1\sigma$)		
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
1	508.51	1 060.87	0.48	0.052 33 $\pm$ 0.001 93	0.238 11 $\pm$ 0.005 88	0.033 00 $\pm$ 0.000 45	300 $\pm$ 82	217 $\pm$ 5	209 $\pm$ 3
2	231.80	335.37	0.69	0.051 31 $\pm$ 0.002 33	0.266 14 $\pm$ 0.009 52	0.037 62 $\pm$ 0.000 56	255 $\pm$ 101	240 $\pm$ 8	238 $\pm$ 4
3	179.83	527.03	0.34	0.053 58 $\pm$ 0.001 91	0.244 15 $\pm$ 0.005 58	0.033 05 $\pm$ 0.000 45	353 $\pm$ 79	222 $\pm$ 5	210 $\pm$ 3
4	193.17	579.76	0.33	0.052 85 $\pm$ 0.002 00	0.2743 0 $\pm$ 0.007 14	0.037 64 $\pm$ 0.000 52	323 $\pm$ 84	246 $\pm$ 6	238 $\pm$ 3
5	39.04	39.19	1.00	0.109 75 $\pm$ 0.003 83	4.944 68 $\pm$ 0.109 65	0.326 78 $\pm$ 0.005 04	1 795 $\pm$ 62	1 810 $\pm$ 19	1 823 $\pm$ 24
6	211.11	505.08	0.42	0.052 12 $\pm$ 0.001 99	0.272 81 $\pm$ 0.007 19	0.037 97 $\pm$ 0.000 53	291 $\pm$ 85	245 $\pm$ 6	240 $\pm$ 3
7	146.09	769.79	0.19	0.050 41 $\pm$ 0.001 98	0.232 51 $\pm$ 0.006 46	0.033 45 $\pm$ 0.000 47	214 $\pm$ 89	212 $\pm$ 5	212 $\pm$ 3
8	433.41	953.57	0.45	0.070 26 $\pm$ 0.002 28	0.952 7 $\pm$ 0.016 52	0.098 34 $\pm$ 0.001 30	936 $\pm$ 65	680 $\pm$ 9	605 $\pm$ 8
9	34.69	41.14	0.84	0.110 67 $\pm$ 0.003 80	4.797 34 $\pm$ 0.101 02	0.314 40 $\pm$ 0.004 73	1 811 $\pm$ 61	1 784 $\pm$ 18	1 762 $\pm$ 23
10	79.37	538.11	0.15	0.051 21 $\pm$ 0.001 68	0.235 28 $\pm$ 0.004 22	0.033 33 $\pm$ 0.000 44	250 $\pm$ 74	215 $\pm$ 3	211 $\pm$ 3
11	60.57	63.07	0.96	0.108 87 $\pm$ 0.003 74	4.710 06 $\pm$ 0.099 02	0.313 80 $\pm$ 0.004 71	1 781 $\pm$ 61	1 769 $\pm$ 18	1 759 $\pm$ 23
12	50.81	48.68	1.04	0.109 20 $\pm$ 0.003 78	4.666 70 $\pm$ 0.100 14	0.309 95 $\pm$ 0.004 69	1 786 $\pm$ 62	1 761 $\pm$ 18	1 740 $\pm$ 23
13	167.32	362.90	0.46	0.052 25 $\pm$ 0.002 45	0.237 60 $\pm$ 0.008 89	0.032 98 $\pm$ 0.000 50	296 $\pm$ 104	217 $\pm$ 7	209 $\pm$ 3
14	54.44	67.26	0.81	0.108 92 $\pm$ 0.003 66	4.689 48 $\pm$ 0.092 49	0.312 26 $\pm$ 0.004 56	1 781 $\pm$ 60	1 765 $\pm$ 17	1 752 $\pm$ 22
15	104.82	357.87	0.29	0.051 05 $\pm$ 0.002 68	0.267 54 $\pm$ 0.011 74	0.038 01 $\pm$ 0.000 62	243 $\pm$ 116	241 $\pm$ 9	241 $\pm$ 4
16	68.19	640.54	0.11	0.062 150 $\pm$ 0.002 00	0.821 09 $\pm$ 0.013 60	0.095 82 $\pm$ 0.001 26	679 $\pm$ 67	609 $\pm$ 8	590 $\pm$ 7
17	376.06	602.14	0.62	0.052 07 $\pm$ 0.003 89	0.240 11 $\pm$ 0.016 34	0.033 45 $\pm$ 0.000 69	288 $\pm$ 162	219 $\pm$ 13	212 $\pm$ 4
18	212.49	247.02	0.86	0.110 09 $\pm$ 0.003 44	4.995 08 $\pm$ 0.074 57	0.329 08 $\pm$ 0.004 37	1 801 $\pm$ 56	1 819 $\pm$ 13	1 834 $\pm$ 21
19	408.36	1 189.96	0.34	0.053 35 $\pm$ 0.001 85	0.270 38 $\pm$ 0.005 66	0.036 76 $\pm$ 0.000 49	344 $\pm$ 77	243 $\pm$ 5	233 $\pm$ 3
20	755.49	2 393.70	0.32	0.055 14 $\pm$ 0.001 84	0.255 27 $\pm$ 0.004 74	0.033 57 $\pm$ 0.0004 4	418 $\pm$ 72	231 $\pm$ 4	213 $\pm$ 3
21	755.36	2 156.42	0.35	0.065 26 $\pm$ 0.002 31	0.294 69 $\pm$ 0.006 44	0.032 75 $\pm$ 0.000 45	782.6 $\pm$ 73	262.2 $\pm$ 5	207.7 $\pm$ 3

表 4 磨沟岩体锆石微量元素 LA-ICP-MS 测试结果

$w_B/10^{-6}$

Table 4 Zircon trace element data of Mogou aegirine-augite syenite

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Hf
1	0.30	8.88	0.40	3.68	6.04	0.59	28.32	10.65	135.48	52.60	237.06	49.71	473.04	86.40	1 545	9 068
2	0.02	10.71	0.15	2.36	5.08	0.94	23.55	8.01	89.60	33.51	145.34	29.91	285.73	53.13	961	8 799
3	1.09	4.33	0.39	3.53	2.20	0.31	29.52	10.88	134.54	52.72	234.75	49.31	481.99	89.20	829	8 520
4	0.06	5.99	0.08	1.30	3.33	0.24	20.91	8.58	108.81	43.01	196.65	41.58	409.10	75.28	307	9 842
5	0.04	7.91	0.21	3.03	4.58	0.46	20.16	6.56	74.30	27.28	116.55	23.16	219.83	39.95	795	7 392
6	<0.016 1	4.48	0.07	1.20	3.03	0.14	19.52	7.60	97.40	38.00	171.42	35.82	346.89	63.05	1 120	8 924
7	0.02	2.09	0.03	0.47	1.71	0.10	12.79	5.59	77.70	31.70	150.80	33.48	344.19	63.18	950	9 948
8	5.17	34.29	2.30	14.40	12.99	3.44	48.24	16.24	181.17	64.87	267.65	52.82	488.83	87.89	1 832	8 546
9	0.03	7.81	0.12	1.68	3.06	0.28	13.62	4.89	56.27	21.22	93.86	19.23	184.10	33.73	627	8 176
10	0.07	2.58	0.06	0.93	2.62	0.20	15.73	6.78	91.26	37.67	185.31	43.28	464.14	90.62	1 028	10 589
11	2.54	13.15	0.76	7.40	8.71	0.83	33.97	10.68	113.96	41.31	173.48	33.84	313.50	55.73	1 201	8 103
12	0.05	9.93	0.39	4.56	6.83	0.81	28.47	9.07	101.04	36.11	153.12	30.38	282.85	49.97	1 044	7 980
13	0.05	3.08	0.13	2.77	5.75	0.30	30.79	11.53	140.64	55.77	251.56	52.26	498.30	92.15	1 630	8 414
14	2.46	14.54	0.52	3.83	4.87	0.24	20.42	6.74	81.87	30.32	133.30	27.30	255.08	45.84	878	7 749
15	0.22	3.08	0.17	1.99	5.14	0.22	30.47	11.69	141.09	52.68	233.09	47.17	451.64	82.16	1 571	9 702
16	0.09	5.01	0.05	0.76	1.14	0.07	7.18	3.03	40.15	17.10	85.21	20.11	216.41	44.64	512	10 247
17	0.48	11.60	0.58	5.76	8.49	1.13	39.75	13.69	153.71	55.80	37.11	47.61	447.81	80.15	1 609	8 319
18	0.64	21.93	0.21	2.90	4.89	0.16	24.22	8.38	101.68	39.09	175.97	36.51	348.72	61.61	1 164	10 183
19	4.97	24.57	3.39	19.87	11.69	2.44	32.61	10.62	119.06	43.38	194.76	41.50	403.74	74.56	1 287	9 747
20	2.42	24.37	3.37	22.38	14.85	2.37	37.45	12.91	152.58	57.13	262.25	56.54	550.23	100.25	1 707	10 073
21	7.35	39.27	8.02	51.55	30.26	5.88	54.91	16.16	169.91	59.45	257.56	52.83	513.32	90.83	1 727	9 785

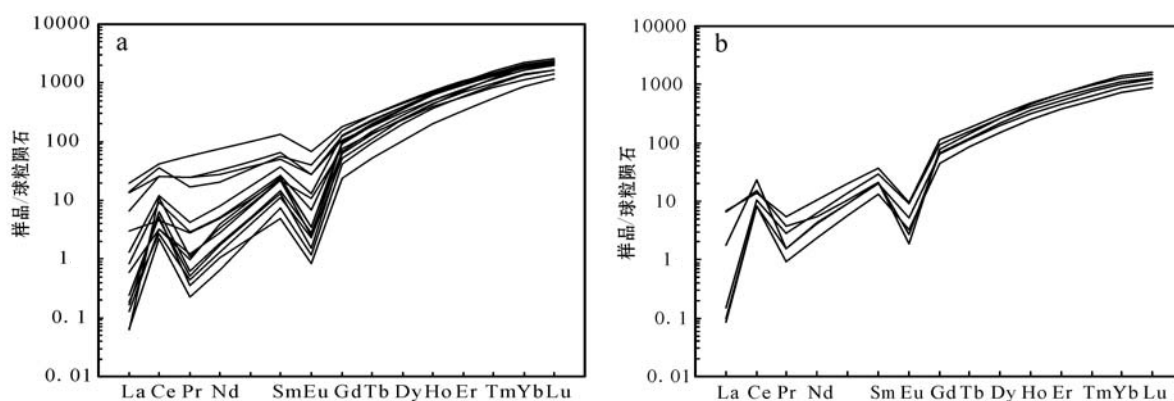


图 8 磨沟霓辉正长岩中第 1 类锆石(a)和第 3 类锆石(b)的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(标准值据 Sun 和 McDonough, 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of zircons (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

于中元古界熊耳群火山岩。

4.2.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

对磨沟霓辉正长岩样品 MG-B3 进行了 21 个测点的分析(表 3), 结果显示, 所有数据点均投影在谐和线上或附近(图 9a), 并呈现出几组有差异的年龄。其中有 6 个测点(第 3 类锆石)的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄变化在 1781~1811 Ma 之间, 加权平均年龄为 1793 ± 48 Ma (MSWD=0.04)(图 9a), 在误差范围内与熊耳群火山岩(1750~1800 Ma)(赵太平等, 2004)的年龄一致, 可能为岩体侵位过程中捕获的围岩熊耳群火山岩的锆石。有 2 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 605 ± 8 Ma(测点 8)和 590 ± 7 Ma(测点 16), 可能暗示了新元古代的一次岩浆事件。其余 13 个测点给出了早中生代的年龄信息, 并呈现出两组

有差异的年龄值(图 9b), 其中 5 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 233~241 Ma 之间, 加权平均年龄为 237.6 ± 2.9 Ma (MSWD=0.95), 属于中三叠世, 另外 8 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在 208~213 Ma 之间, 加权平均年龄为 210.4 ± 2.0 Ma (MSWD=0.39), 属晚三叠世。由于该样品所测锆石均具有明显的岩浆成因特征, 且数据点沿谐和线分布良好, 因此推断样品测试结果可靠, 表明磨沟岩体的形成经历了约 30 Ma 的时间跨度。

4.3 锆石 Hf 同位素特征

在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及锆石微量元素分析的基础上, 对霓辉正长岩中的锆石进行了 Hf 同位素测定, 分析结果见表 5。所测锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值均小于 0.002, 表明锆石在形成后具有很少的放射

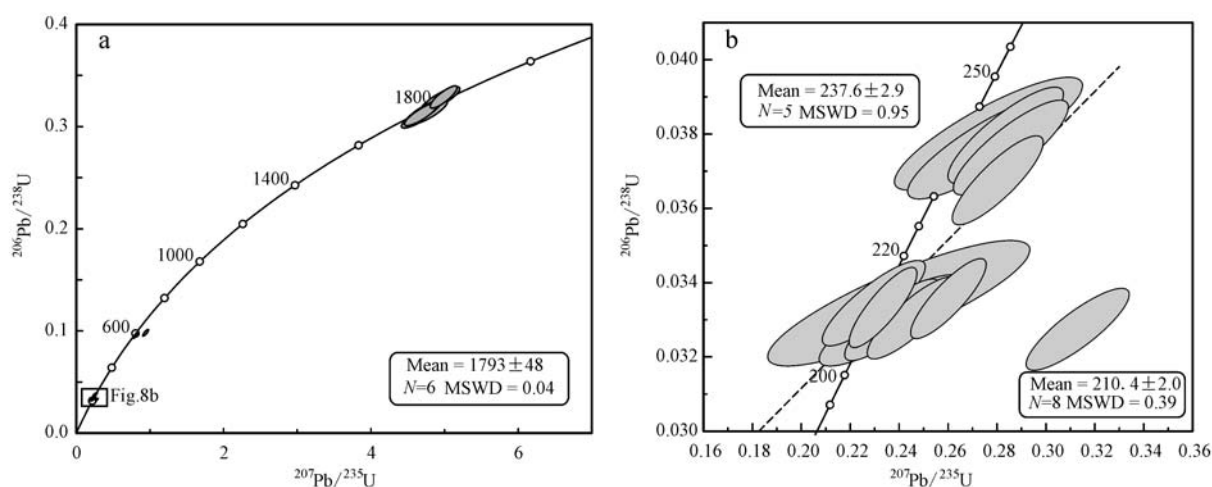


图 9 磨沟霓辉正长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig. 9 Concordia diagram of LA-ICP-MS U-Pb zircon analyses from Mogou aegirine-augite syenite

表 5 磨沟岩体锆石 Hf 同位素分析结果

Table 5 Hf isotopic data of zircon from Mogou aegirine-augite syenite

点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	t_{DMI}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1	209	0.067 875	0.001 003	0.001 453	0.000 025	0.282 470	0.000 020	0.282 464	-6.3	1 119	1 646	-0.96
2	238	0.058 392	0.000 857	0.001 248	0.000 025	0.282 464	0.000 018	0.282 458	-5.9	1 122	1 641	-0.96
3	210	0.057 917	0.000 985	0.001 258	0.000 006	0.282 450	0.000 017	0.282 445	-7.0	1 142	1 690	-0.96
4	238	0.052 664	0.000 555	0.001 101	0.000 015	0.282 382	0.000 017	0.282 377	-8.7	1 232	1 822	-0.97
5	1 823	0.003 919	0.000 059	0.000 099	0.000 001	0.281 645	0.000 018	0.281 641	0.7	2 199	2 439	-1.00
6	240	0.039 972	0.000 138	0.000 921	0.000 002	0.282 129	0.000 020	0.282 125	-17.6	1 579	2 384	-0.97
7	212	0.052 231	0.000 797	0.001 236	0.000 013	0.282 430	0.000 017	0.282 425	-7.6	1 170	1 733	-0.96
8	605	0.044 786	0.000 224	0.001 111	0.000 014	0.282 286	0.000 016	0.282 273	-4.32	1 367	1 820	-0.97
9	1 762	0.035 741	0.000 156	0.000 841	0.000 005	0.281 468	0.000 017	0.281 440	-7.9	2 483	2 919	-0.97
10	211	0.056 954	0.000 310	0.001 276	0.000 006	0.282 476	0.000 015	0.282 471	-6.0	1 105	1 629	-0.96
11	1 759	0.050 206	0.000 237	0.001 231	0.000 015	0.281 431	0.000 019	0.281 390	-9.7	2 559	3 029	-0.96
12	1 740	0.033 312	0.000 526	0.000 870	0.000 027	0.281 385	0.000 019	0.281 356	-11.3	2 598	3 115	-0.97
13	209	0.057 370	0.001 415	0.001 332	0.000 024	0.282 422	0.000 018	0.282 417	-8.0	1 184	1 753	-0.96
14	1 752	0.038 219	0.000 402	0.000 986	0.000 025	0.281 356	0.000 024	0.281 323	-12.2	2 645	3 180	-0.97
15	241	0.069 122	0.001 304	0.001 924	0.000 060	0.282 504	0.000 019	0.282 496	-4.5	1 084	1 555	-0.94
16	590	0.067 988	0.000 874	0.001 727	0.000 044	0.282 422	0.000 016	0.282 403	-0.04	1 195	1 539	-0.95
17	212	0.050 552	0.000 899	0.001 189	0.000 015	0.282 506	0.000 018	0.282 501	-4.9	1 060	1 561	-0.96
18	1 834	0.047 892	0.000 626	0.001 187	0.000 006	0.281 416	0.000 019	0.281 375	-8.6	2 577	3 015	-0.96
19	233	0.020 952	0.001 094	0.000 537	0.000 029	0.282 019	0.000 019	0.282 017	-21.6	1 713	2 629	-0.98
20	213	0.079 891	0.001 153	0.001 942	0.000 018	0.282 460	0.000 017	0.282 452	-6.6	1 149	1 671	-0.94
21	208	0.096 045	0.003 104	0.002 373	0.000 081	0.282 470	0.000 020	0.282 460	-6.5	1 151	1 660	-0.93

注: $\epsilon\text{Hf}(t) = \{[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1\} \times 10\,000$; $t_{\text{DMI}} = 1/\lambda \times \ln \{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}$; $t_{\text{DM2}} = 1/\lambda \times \ln \{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},t} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},0}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},t} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},0}]\} + t$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s$ 为样品测定值; $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282\,772$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.033\,2$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},0} = 0.283\,25$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038\,4$; $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{C}} = 0.015$, t = 锆石结晶年龄。

性成因 Hf 的积累,因此可利用锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值探索岩体形成时体系的 Hf 同位素组成(Patchett *et al.*, 1981; Knudsen *et al.*, 2001; Kinny and Mass, 2003; 吴福元等, 2007)。表中还给出了亏损地幔模式年龄和二阶段模式年龄,由于所有锆石的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值介于 $-0.98 \sim -0.93$ 之间(平均值为 -0.96),因此,二阶段模式年龄应能更真实地反映其源区物质由地幔中分离出的时限(Vervoort *et al.*, 1996; Amelin *et al.*, 2000; 吴福元等, 2007)。记录磨沟岩体成岩年龄信息的 13 颗锆石虽然出现了两组年龄值,但这两组锆石的 Hf 同位素组成特征却没有明显不同,都具有较为均一的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值,主要变化于 $0.282\,382 \sim 0.282\,506$ 之间,相应的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值变化于 $-8.7 \sim -4.5$ 之间,两阶段 Hf 模式年龄为 $1\,555 \sim 1\,822$ Ma。仅有 2 颗中三叠世的锆石(测点 6、19)有较低的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值,分别为 $0.282\,129$ 和 $0.282\,019$,相应的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 -17.6 和 -21.6 ,两阶段 Hf 模式年龄分别为 $2\,384$ Ma 和 $2\,629$ Ma(表 5)。虽然未测得正长岩的锆石 Hf 同位素,但具有较老年龄的一组锆石可代表正长岩的 Hf 同位素组成(下述此组锆

石应为捕获的正长岩的锆石),从表 5 和图 10 可看出,记录两组年龄的锆石在 Hf 同位素组成上并没有太大差别,因此,可认为正长岩与霓辉正长岩是同源的。

古元古代的 6 颗锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值 $0.281\,356 \sim 0.281\,645$, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-12.2 \sim -0.7$,对应的两阶段 Hf 模式年龄为 $2\,439 \sim 3\,180$ Ma,说明熊耳期岩浆可能主要来自于中新太古代的地壳物质(图 10)。新元古代的两颗锆石的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 -4.32 和 -0.04 ,对应的两阶段模式年龄(t_{DM2})为 $1\,820$ Ma 和 $1\,539$ Ma。

4.4 Sr、Nd 同位素特征

磨沟霓辉正长岩的 Sr、Nd 同位素测试结果见表 6。 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值小于 3,没有出现 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值异常低(小于 0.700)的情况,因此所测结果有地质意义。以磨沟霓辉正长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 $t = 210$ Ma 计算,获得了一个偏高的、变化范围很大的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值,介于 $0.709\,469 \sim 0.717\,243$ 之间,而 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值显著偏低,变化于 $-24.25 \sim -17.63$ 之间。

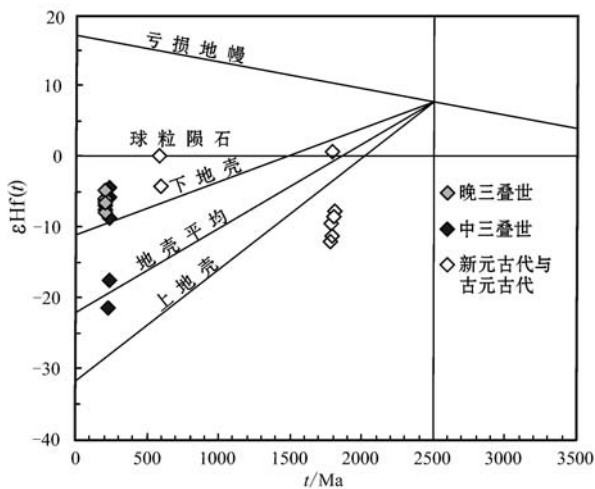


图 10 磨沟霓辉正长岩的 Hf 同位素演化图解
Fig. 10 Hf isotopes of the Mogou aegirine-augite syenite

表 6 磨沟霓辉正长岩的 Sr、Nd 同位素组成
Table 6 Isotopic compositions of the Mogou aegirine-augite syenite

样品	MG-B2	MG-B4	MG-B6
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	217	104	183
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	678	266	251
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.93	1.14	2.11
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.712 253	0.720 659	0.720 184
2σ	0.000 014	0.000 015	0.000 014
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.709 469	0.717 243	0.713 864
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	10	10	11
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	55	54	59
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.112 2	0.111	0.109 6
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.511 618	0.511 277	0.511 365
2σ	0.000 012	0.000 008	0.000 01
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.511 46	0.511 12	0.511 21
$\epsilon\text{Nd}(t)$	-17.63	-24.25	-22.50
t_{DM}/Ma	2 294	2 768	2 604
t_{DM2}/Ma	2 420	2 953	2 812

5 讨论

5.1 岩体形成时代

磨沟岩体主体岩性为霓辉正长岩，北部出露正长岩，野外观察显示二者具有清晰的接触界限，且在正长岩一侧可见宽约几厘米的烘烤边，显示正长岩早于霓辉正长岩形成。本次研究采集的霓辉正长岩样品呈致密均一的块状构造，从锆石的内部结构(图 7)、Th/U 值(表 3)和锆石稀土元素特征(图 8)来看，所测锆石均为岩浆成因锆石。同一个霓辉正长岩样品中出现了 $237.6 \pm 2.9 \text{ Ma}$ 和 $210.4 \pm 2.0 \text{ Ma}$ 两组

年龄。任富根等(2001)曾获得磨沟霓辉正长岩样品中 3 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄分别为 209.1、204.5 和 210.5 Ma，加权平均年龄为 $208.5 \pm 6.2 \text{ Ma}$ ，与本次测得的较年轻的一组年龄 $210.4 \pm 2.0 \text{ Ma}$ 在误差范围内一致，代表了霓辉正长岩的年龄。

卢仁等(2013)测得磨沟岩体北部正长岩样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $246 \pm 8.0 \text{ Ma}$ ，与本次获得的较老的一组年龄 $237.6 \pm 2.9 \text{ Ma}$ 存在一定偏差。观察发现，卢仁等(2013)所选取的测年锆石与本次样品中第 2 组锆石具有相似的特征，锆石破碎强烈，没有明显的岩浆震荡环带，发育暗色包裹体及粗糙的再生边，这可能是由于碱性岩通常具有强烈的放射性而易发生退晶化(Rizvanova *et al.*, 1996)，从而使锆石结构不稳定，在流体作用下易发生重结晶，并常圈闭有磷酸盐及硅酸盐的矿物包裹体(Geisler *et al.*, 2003)，这很可能会导致测试结果的偏差。本次研究尽量避开了此类锆石，而选择具有明显原生岩浆成因特征的锆石，获得的年龄误差较小。因此，本次获得的较老一组的年龄 $237.6 \pm 2.9 \text{ Ma}$ 很可能是捕获的早期岩浆结晶的锆石，代表正长岩的结晶年龄，而不能说磨沟岩体除 $210.4 \pm 2.0 \text{ Ma}$ 外，还存在 $246 \pm 8.0 \text{ Ma}$ 和 $237.6 \pm 2.9 \text{ Ma}$ 两组年龄。综上所述，磨沟岩体的主体霓辉正长岩形成于 210 Ma 左右，岩体北部出露的正长岩形成于 238 Ma 左右，这与野外观察相符。该岩体的岩浆侵入可划分为中三叠世早期和晚三叠世中期两期，岩体的形成时间跨度较大，经历了约 30 Ma。

实际上，印支期岩浆热事件在熊耳山地区有明显表现，并且主要集中于 210 Ma 左右和 240 Ma 左右这两个重要阶段。除磨沟岩体在这两个阶段均有活动之外，其附近的乌桑沟正长岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $245 \pm 4 \text{ Ma}$ (刘楚雄等, 2010)，龙头岩体 K-Ar 法全岩年龄为 241.6 Ma(曾广策, 1990)，磨沟岩体南部的石英脉型钼矿田的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 $237.0 \pm 1.9 \text{ Ma}$ (高阳等, 2010)。210 Ma 左右的岩浆热事件包括磨沟岩体东侧的焦沟碱性岩体(Rb-Sr 等时线年龄为 208 Ma，曾广策, 1990)、黄水庵碳酸岩脉型钼矿床(辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 206~213 Ma，黄典豪等, 2009; 曹晶等, 2014)等。从整个华北陆块南缘来看，早中生代侵入体还包括小秦岭东吉口辉石正长岩(212~214 Ma，李春麟等, 2012)、老牛山岩基中的印支期侵入体(214~228 Ma，Ding *et al.*, 2011; 齐秋菊等,

2012)和熊耳山寨凹正长花岗岩(217.7 ± 3.6 Ma, 李厚民等, 2012)等。最近,我们在华山岩体中部也发现了印支期侵入体(黑云母二长花岗岩),其出露面积约占整个华山岩体面积的1/3(图1)。成矿方面,小秦岭地区的黄龙铺碳酸岩脉型钼矿田的辉钼矿 Re-Os 模式年龄为216~231 Ma(黄典豪等, 1994; Stein *et al.*, 1997; Song *et al.*, 2015),大湖和马家洼金(钼)矿床辉钼矿 Re-Os 年龄分别为215.4~255.6 Ma(李厚民等, 2007; 李诺等, 2008)和232.5~268.4 Ma(王义天等, 2010),这两类矿床均是东秦岭典型的印支期成矿实例。以上这些测年资料显示,华北陆块南缘早中生代岩浆热事件集中于205~245 Ma之间,与整个秦岭造山带早中生代花岗岩大规模活动时限(200~245 Ma, 张成立等, 2008; Wang *et al.*, 2013)一致。

5.2 源区特征

关于正长岩类岩石的成因,概括起来主要有以下观点:①由富集的岩石圈地幔低程度部分熔融形成(Roden and Murthy, 1985; Brown and Beeker, 1986; Edgar, 1987; Sutcliffe *et al.*, 1990; Faure, 2001),或是碱性玄武质岩浆经分异作用后残余熔体结晶的产物(Sutcliffe *et al.*, 1990);②有流体参与或高压条件下下地壳物质部分熔融形成(Huang and Willie, 1981; Lubala *et al.*, 1994; Tchameni *et al.*, 2001);③壳幔混合作用的产物,即幔源镁铁质岩浆与壳源长英质岩浆混合并经进一步的分异作用形成,或者幔源硅不饱和的碱性岩浆和壳源花岗质岩浆混合形成(Sheppard, 1995; Zhao *et al.*, 1995; Litvinovsky *et al.*, 2002; Riishuuset *et al.*, 2008)。此外,也有壳幔过渡带部分熔融成因的观点(张招崇, 1997; 张招崇等, 1997)。目前多数学者主张正长岩类岩石的形成应有幔源组分的贡献(Zanvilevich *et al.*, 1995; Harris *et al.*, 1999),近年来的一些实验结果也表明,加厚的长英质下地壳岩石部分熔融只可能产生含 SiO_2 为72%~73%的花岗质熔体,而不能直接形成碱性的正长质岩浆(Litvinovsky *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2004)。

磨沟霓辉正长岩具有偏高的、变化范围很大的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i值(0.709 469~0.717 243)和显著偏低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(-24.25~-17.63),这同徐夕生等(2010)总结的碱性岩具有变化范围很大的Sr、Nd、Pb同位素组成特征是一致的,这种特征指示了碱性岩岩浆源区的高度不均一性。华北陆块南缘虽然缺

乏印支期超基性-基性岩的研究,但可与同时期的黄水庵碳酸岩脉(206~213 Ma)相对比。黄水庵碳酸岩脉相距磨沟岩体约16 km,成岩物质来源于富集地幔EMI的低程度部分熔融,并且未受到任何壳源物质的混染(黄典豪等, 2009),其($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i值和 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值分别为0.705 8~0.705 9和-14.6~-8.7(集中于-14.6~-12.6)。与之相比,磨沟岩体具有更高的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i值和更低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$,说明磨沟岩体的岩浆源区不可能单纯起源于富集地幔的低程度部分熔融。霓辉正长岩锆石样品的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值主要集中于-8.7~-4.5,从锆石Hf同位素组成的分布来看,除个别点(测点6和19)外,绝大多数样品点的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值显著高于平均地壳,落于下地壳和球粒陨石演化曲线之间(图10),其对应的两阶段模式年龄为1 555~1 822 Ma。磨沟岩体侵位于熊耳群中基性-酸性火山岩系中,锆石U-Pb定年结果表明,熊耳群形成时限约为1.70~1.80 Ga(任富根等, 2000; 赵太平等, 2004; He *et al.*, 2009);华北陆块南缘的结晶基底太华群则形成于新太古代和古元古代(第五春荣等, 2007, 2010; Xu *et al.*, 2009; 时毓等, 2011; Huang *et al.*, 2012)。熊耳群火山岩系似乎有可能作为磨沟岩体的源区物质,但磨沟岩体中有相当数量的锆石两阶段模式年龄低于熊耳群的上限年龄(约1 700 Ma),绝大部分锆石两阶段模式年龄远远低于太华群结晶基底的年龄,说明该岩体不可能单纯起源于地壳物质(如熊耳群火山岩系)的部分熔融,成岩过程中应有幔源组分参与。一系列壳源物质的熔融实验(Montel and Vielzeuf, 1997)也表明下地壳的深熔作用不可能直接产生正长质岩浆。由此看来,对于磨沟岩体的成因,合理的解释应为壳幔两种岩浆混合作用的结果。磨沟岩体中发育暗色微粒包体,并且多数包体呈椭圆形,说明这些暗色包体与寄主岩浆之间是塑性共存的,也即表明存在过岩浆混合作用。

另外,磨沟霓辉正长岩样品具有高钾含量($\text{K}_2\text{O} = 9.00\% \sim 13.76\%$),且 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为2.37~10.35,表明源岩需要大量碱尤其是K的加入,而古老地壳物质不可能提供如此大量的K来源。秦江峰(2010)在研究秦岭造山带三叠纪花岗岩石时,认为这些花岗岩中普遍发育的具高 K_2O 特征的暗色包体起源于富含金云母(富K矿物)的富集地幔,并认为这种富集地幔是在晚古生代—中生代早期(早于250 Ma)勉略洋壳向北俯冲过程中,源于玄武质洋壳

和大洋沉积物的流体与上覆的地幔楔橄榄岩发生富集反应形成的。最近 Song 等(2015)研究认为,位于华北陆块南缘的黄龙铺碳酸岩脉中的钾长石是来自于碳酸岩岩浆的原生产物,而这些碳酸岩是源于富集地幔 EM I 的(黄典豪等,2009;王林均等,2012)。因此,将富集地幔考虑为 K 的来源更合理。另外,磨沟岩体明显亏损 P、Ti 等元素,并具有中等至弱的锆负异常,这些特征表明初始岩浆在上升侵位过程中存在一定程度的分异演化。结合磨沟岩体的 Sr-Nd-Hf 同位素特征及地球化学特征可以看出,磨沟岩体应是富含金云母的富集地幔部分熔融产生的岩浆与壳源岩浆混合并经一定程度的分异演化形成的。

5.3 成岩环境及意义

目前关于秦岭造山带早中生带花岗岩的成岩物质来源、岩石成因及演化过程等尚存在不同认识,概括起来主要有两种观点:① 晚三叠世秦岭地区处于扬子与华北板块陆陆碰撞的挤压环境(Zhang *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2002; 许成等,2009),印支期花岗岩的形成是俯冲洋壳板片断离并诱发软流圈物质上涌而导致的岩石圈物质发生部分熔融的结果(Sun *et al.*, 2002; 周滨等,2008);② 秦岭地区在中三叠世全面隆升造山,晚三叠世则进入碰撞后伸展阶段,秦岭地区印支期花岗岩是由于扬子板块向北俯冲导致下地壳加厚发生拆沉,地幔物质上涌诱发地壳组分大规模部分熔融形成的(张本仁等,2002; Wang *et al.*, 2007; 秦江峰等,2007; 张成立等,2008; 弓虎军等,2009)。磨沟碱性岩是华北陆块南缘有代表性的早中生代岩体之一,上述岩浆来源和源区性质表明,磨沟岩体的成岩物质来源于富集地幔部分熔融产生的岩浆与壳源岩浆的混合,而这种地幔富集的时间应早于 240 Ma,也就是在 240 Ma 之前华北陆块南缘之下的地幔已受到源于玄武质洋壳和大洋沉积物的流体的交代而发生富集。并且碱性岩多形成于拉张条件下,它的出现指示造山旋回的结束和转入非造山状态(涂光炽,1989),显然在上述第一种观点下难以形成磨沟等碱性岩体。由此看来,磨沟岩体(尤其是其主体霓辉正长岩)的发育标志着秦岭造山带在晚三叠世已进入后碰撞的构造伸展阶段。

从碰撞造山的细节来看,秦岭-大别造山带的超高压峰期变质年代学研究表明三叠纪碰撞造山的峰期大致在 227~242 Ma 之间(Ames *et al.*, 1993; Chavagnac and Jahn, 1996; Hacker *et al.*, 1998;

Zheng *et al.*, 1998, 2007),形成于早中生代较早期的具埃达克质岩石地球化学特征的花岗岩体(245~215 Ma)代表了同碰撞向后碰撞转换过程中地壳明显增厚阶段,并在 225 Ma 达到最厚阶段(张成立等,2008);南秦岭曹坪和柞水(224 Ma)等岩体形成于由挤压向伸展构造体质的转变时期(弓虎军等,2009);而秦岭环斑花岗岩(200~217 Ma)则是碰撞造山旋回末期伸展拉张阶段的产物(卢欣祥等,1996, 1999, 2008; 张成立等,2008)。

磨沟岩体第 1 期岩浆活动发生于 238 Ma 左右,处于秦岭造山带地壳明显增厚的主碰撞峰期,秦岭微地块沿商丹缝合带向北俯冲碰撞,该效应经远距离传递而波及到华北陆块南缘(任富根等,2001; 卢仁等,2013)。区域上整体的挤压很可能形成了局部的剪切和伸展环境,使得磨沟等局部岩石圈因重力失稳而发生小规模拆沉作用(高阳等,2010; 卢仁等,2013),源区岩石圈地幔减压部分熔融,形成的幔源岩浆在上升过程中“联通”壳源岩浆-流体库(卢仁等,2013),从而形成磨沟正长岩。近几年在磨沟岩体附近发现的石英脉型钼矿田(237.0 ± 1.9 Ma, 高阳等,2010)也证明了该区在 238 Ma 左右处于局部伸展环境的事实(高阳,2011; Gao *et al.*, 2013)。磨沟岩体在 210 Ma 左右发生第 2 次岩浆活动,此时华北陆块南缘与北、南秦岭褶皱带等已经连在一起作为一个整体演化,因此,磨沟霓辉正长岩也应与秦岭造山带同时期的花岗岩一样,属于后碰撞伸展拉张阶段的产物,老牛山岩基中印支期高 Ba-Sr 花岗岩(王艳芬等,2012)和寨凹正长岩花岗岩(李厚民等,2012)等岩体均形成于伸展环境。华北陆块南缘在晚三叠世形成了幔源成因的碳酸岩脉(及相关的钼矿床)、辉绿岩脉等,表现出了明显的幔源岩浆活动特征。在磨沟地区,幔源岩浆上升并“联通”壳源岩浆-流体库,壳幔岩浆混合并经一定程度的分异演化形成磨沟霓辉正长岩。对比商州以西的中生代侵入岩可以发现,商州以东的东秦岭地区形成的侵入体规模较小,岩浆源区多与伸展环境下富集地幔的部分熔融有关。

6 结论

(1) 磨沟霓辉正长岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 237.6 ± 2.9 Ma 和 210.4 ± 2.0 Ma, 结合前人研究成果,认为磨沟岩体是多期次岩浆活动的产物,在 238

Ma左右发生第1次岩浆活动,形成正长岩,在210 Ma左右形成其主体,即霓辉正长岩。磨沟岩体活动时期为中晚三叠世,经历了约30 Ma的时间跨度。

(2) 磨沟霓辉正长岩属于中性钾质碱性岩,属于过碱性岩石系列,具有富碱、高钾、过碱质、贫钛的特点。具有中等至弱的负钨异常,富集K、Rb、Ba等大离子亲石元素和轻稀土元素(LREE),而明显亏损Nb、P、Ti等高场强元素和重稀土元素(HREE)。

(3) 磨沟霓辉正长岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 $0.709\,469\sim 0.717\,243$, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值变化于 $-24.25\sim -17.63$ 之间,锆石的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值集中于 $-8.7\sim -4.5$ 之间,两阶段Hf模式年龄主要变化于 $1\,555\sim 1\,822$ Ma之间。

(4) 磨沟岩体是含金云母的富集地幔部分熔融产生的岩浆与壳源岩浆混合并经一定程度的分异演化形成的。第1期岩浆活动(238 Ma左右)发生于秦岭造山带主碰撞峰期的局部伸展环境,第2期岩浆活动(210 Ma左右)则是碰撞造山旋回末期伸展拉张阶段的产物。商州以东的东秦岭地区形成的早中生代侵入体规模较小,且多与幔源岩浆有关。

致谢 国家地质实验测试中心、西北大学大陆动力学国家重点实验室、中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室及中国科学院壳幔物质与环境重点实验室在实验及数据分析过程中都给予了大量帮助,审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢!

References

- Amelin Y, Lee D C and Halliday A N. 2000. Early-middle archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 4 205~4 225.
- Ames L, Tilton G R and Zhou G. 1993. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites[J]. *Geology*, 21: 339~343.
- Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chem. Geol.*, 192(1/2): 59~79.
- Brown P E and Becker S M. 1986. Fractionation, hybridisation and magma-mixing in the Kialineq centre East Greenland[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 57~70.
- Cao Jing, Ye Huishou, Li Zhengyuan, *et al.* 2014. Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic dating of Huangshuian carbonatite vein-type Mo(Pb) deposit in Songxian County, Henan Province[J]. *Mineral Deposits*, 33(1): 53~69(in Chinese with English abstract).
- Chavagnac V and Jahn B M. 1996. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling Complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications[J]. *Chem. Geol.*, 133: 29~51.
- Chen B, Jahn B M, Arakawa Y, *et al.* 2004. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang Orogen, North China Craton: elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints[J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 148: 489~501.
- Ding L X, Ma C Q, Li W J, *et al.* 2011. Timing and genesis of the adakitic and shoshonitic intrusions in the Laoniushan complex, southern margin of the North China Craton: Implications for post-collisional magmatism associated with the Qinling Orogen[J]. *Lithos*, 126: 212~232.
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Lin Ciluan, *et al.* 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of Yiyang TTG gneisses from Henan province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 253~262(in Chinese with English abstract).
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Lin Ciluan, *et al.* 2010. LA-(MC)-ICPMS U-Pb zircon geochronology and Lu-Hf isotope compositions of the Taihua Complex on the southern margin of the North China Craton[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 55(21): 2 112~2 123(in Chinese).
- Edgar A D. 1987. The genesis of alkaline magmas with emphasis on the source regions: inferences from experimental studies[A]. Fitton J G and Upton B G J. *Alkaline Igneous Rocks*[C]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 29~52.
- Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, *et al.* 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A158.
- Faure G. 2001. *Origin of Igneous Rocks*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1~494.
- Gao Yang. 2011. Geology, geochemistry and genesis of Qianfanling quartz-vein Mo deposit in Songxian County, Western Henan Province[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Gao Y, Li Y F, Guo B J, *et al.* 2010. Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic dating of Qianfanling quartz-vein Mo

- deposit in Songxian County, western Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 757~767(in Chinese with English abstract).
- Gao Yang, Ye Huishou, Mao Jingwen, *et al.* 2013. Geology, geochemistry and genesis of the Qianfanling quartz-vein Mo deposit in Songxian County, Western Henan Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 55, 13~28.
- Geisler T, Rashwan A A, Rahn M K W, *et al.* 2003. Low-temperature hydrothermal alteration of natural metamict zircons from the Eastern Desert, Egypt[J]. *Mineralogical Magazine*, 67(3): 485~508.
- Gong Hujun, Zhu Laimin, Sun Boya, *et al.* 2009. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of the Dongjiangkou granitic pluton and its mafic enclaves in the South Qinling terrain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3 029~3 042 (in Chinese with English abstract).
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, *et al.* 1998. U-Pb zircon ages constrain the architecture of the ultra high-pressure Qinling-Dabie orogen, China[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 161: 215~230.
- Harris C, Marsh J S and Milner S C. 1999. Petrology of the alkaline core of the Messum igneous complex, Namibia: Evidence for the progressively decreasing effect of crustal contamination[J]. *J. Petrol.*, 40: 1 377~1 397.
- He Yanhong, Zhao Guochun, Sun Min, *et al.* 2009. SHRIMP and LA-ICP-MS zircon geochronology of the Xiong'er volcanic rocks: implications for the Paleo- Mesoproterozoic evolution of the southern margin of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 168 (3~4): 213~222.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 595~2 604(in Chinese with English abstract).
- Huang Dianhao, Hou Zengqian, Yang Zhiming, *et al.* 2009. 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*, 83(12): 1 968~1 984(in Chinese with English abstract).
- Huang Dianhao, Wu Chengyu, Du Andao, *et al.* 1994. Re-Os isotopic ages of molybdenum deposits in east Qinling and their significance [J]. *Mineral Deposits*, 13(3): 220~210(in Chinese).
- Huang W L and Wyllie P J. 1981. Phase relationships of S-type granite with H₂O to 35 kbar: Muscovite granite from Harney Peak, South Dakota[J]. *J. Geophys. Res.*, 86: 10 515~10 529.
- Huang Xiaolong, Simon A W, Yang Qijun, *et al.* 2012. Geochronology and petrogenesis of gray gneisses from the Taihua Complex at Xiong'er in the southern segment of the Trans-North China Orogen: Implications for tectonic transformation in the Early Paleoproterozoic[J]. *Lithos*, 134~135: 236~252.
- Kinny P D and Maas R. 2003. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon[J]. *Rev. Mineral. Geochem.*, 53(1): 327~341.
- Knudsen T L, Griffin W L, Hartz E H, *et al.* 2001. In-situ hafnium and lead isotope analyses of detrital zircons from the Devonian sedimentary basin of NE Greenland: A record of repeated crustal reworking[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 141: 83~94.
- Li Chunlin, Yu Xinqi, Liu Junlai, *et al.* 2012. Geochronology of the Indosinian dongjiekou pyroxene syenite from xiaoqinling area and its tectonic implications[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 42(6): 1 806~1 816(in Chinese with English abstract).
- Li Houmin, Wang Denghong, Wang Xiaoxia, *et al.* 2012. The Early Mesozoic syenogranite in Xiong 'er Mountain area, southern margin of North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry and its significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31 (6): 771~782(in Chinese with English abstract).
- Li Houmin, Ye Huishou, Wang Denghong, *et al.* 2007. Re-Os dating of molybdenites from Au (-Mo) deposits in Xiaoqinling gold ore district and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 26(4): 417~424(in Chinese with English abstract).
- Li Nuo, Sun Yali, Li Jing, *et al.* 2008. Molybdenite Re-Os isotope age of the Dahu Au-Mo deposit, Xiaoqinling and the Indosinian mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 810~816(in Chinese with English abstract).
- Liang Tao, Lu Ren, Lu Xinxiang, *et al.* 2012. Geological features and mineralization of the nepheline syenite in Henan Province[J]. *Geology and Exploration*, 48(2): 288~296(in Chinese with English abstract).
- Litvinovsky B A, Jahn Borming, Zandvilevich A N, *et al.* 2002. Petrogenesis of syenite granite suites from the Bryansky Complex (Transbaikalia, Russia): Implications for the origin of A-type granitoid magmas[J]. *Chemical Geology*, 189: 105~133.
- Litvinovsky B A, Steele I M and Wickham S M. 2000. Silicic magmatism in overthickened crust: melting of charnockite and leucogranite at 15, 20 and 25 kbar[J]. *J. Petrol.*, 41: 717~737.
- Liu Chuxiong, Yan Guohan and Cai Jianhui. 2010. The SHRIMP zircon U-Pb age and the characteristics of elemental geochemistry of the alkaline intrusion in Songxian, Henan Province and its tectonic implications.

- tions[A]. Symposium "Petrology and Geodynamics in China"[C]. Beijing. 157~158(in Chinese).
- Lu Ren, Liang Tao, Bai Fengjun, *et al.* 2013. LA-ICP-MS U-Pb zircon age and Hf isotope composition of Mogou syenite, western Henan Province[J]. Geological Review, 59(2): 355~368(in Chinese with English abstract).
- Lu Xinxiang, Dong You, Chang Qiuling, *et al.* 1996. Indosinian Shenhewan rapakivi granite in Qinling and its dynamic significance[J]. Science in China (Series D), 26(3): 244~248(in Chinese with English abstract).
- Lu Xinxiang, Li Mingli, Wang Wei, *et al.* 2008. Indosinian movement and metallogenesis in Qinling orogenic belt[J]. Mineral Deposits, 27(6): 762~773(in Chinese with English abstract).
- Lu Xinxiang, Wei Xiangdong, Xiao Qinghui, *et al.* 1999. Geochronologic studies of rapakivi granites in Qinling and its geological implications[J]. Geological Journal of China Universities, 5(4): 372~377(in Chinese with English abstract).
- Lubala R T, Frick C and Roders J H. 1994. Petrogenesis of syenites and granites of the Schiel Alkaline complex, Northern Transvaal, South Africa[J]. J. Geol., 102: 307~309.
- Mao J W, Xie G Q, Pirajno F, *et al.* 2010. Late Jurassic-Early Cretaceous granitoid magmatism in Eastern Qinling, central-eastern China: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 57: 51~78.
- Middlemost E A K. 1975. A simple classification of volcanic rocks[J]. Bull. Volcanol, 36: 282~397.
- Montel J M and Vielzeuf D. 1997. Partial melting of greywackes: Part II. Composition of minerals and melts[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 128: 176~196.
- Patchett P J, Kouvo O, Hedge C E, *et al.* 1981. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: Evidence from Hf isotope [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 78: 279~297.
- Qi Qiuju, Wang Xiaoxia, Ke Changhui, *et al.* 2012. Geochronology and origin of the Laoniushan complex in the southern margin of North China Block and their implications: New evidences from zircon dating, Hf isotopes and geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(1): 279~301(in Chinese with English abstract).
- Qin Jiangfeng. 2010. Petrogenesis and Geodynamic Implications of the Late-Triassic Granitoids from the Qinling Orogenic Belt [D]. Northwest University(in Chinese with English abstract).
- Qin J F, Lai S C and Li Y F. 2007. Genesis of the Indosinian Guangtoushan adakitic biotite plagiogranite in the Mianxian-Lueyang (Mianlue) suture, South Qinling, China, and its tectonic implications [J]. Geological Bulletin of China, 26(4): 466~471.
- Ren Fugen, Li Huimin, Yin Yanjie, *et al.* 2000. The upper chronological limit of Xiong'er Group's volcanic rock series, and its geological significance[J]. Progress in Precambrian Research, 23(3): 140~146(in Chinese with English abstract).
- Ren Fugen, Yin Yanjie, Li Shuangbao, *et al.* 2001. The coupling character between isotopic geochronology of Indosinian Epoch in Xiong'er fault basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 20(4): 286~288(in Chinese with English abstract).
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides major and minor elements[J]. Lithos, 22: 247~263.
- Riishuus M S, Peate D W, Tegner C, *et al.* 2008. Petrogenesis of co-genetic silica-oversaturated and-undersaturated syenites by periodic recharge in a crustally contaminated magma chamber: the Kangerlussuaq intrusion, East Greenland[J]. Journal of Petrology, 49: 493~522.
- Rizvanova N G, Levchenkov O A, Belous A E, *et al.* 1996. The dynamics of the interaction of zircon with hydrothermal carbonate fluid [J]. Geochemistry International, 34(3): 253~263.
- Roden M F and Murthy V R. 1985. Mantle metasomatism[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 13: 269~296.
- Rollinson H R. 1993. Using Trace Elements Data. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. New York: Pearson Education Limited, 1~315.
- Shang C K, Statir M, Siebel W, *et al.* 2004. TTG matatism in the Congo craton: a view from major and trace element geochemistry, Rb-Sr and Sm-Nd systematics: case of the Sangmelima region, Ntemcomplex, southern Cameroon[J]. Journal of African Earth Sciences, 40(1~2): 61~79.
- Sheppard S. 1995. Hybridization of shoshonitic lamprophyre and calc-alkaline granite magma in the early Proterozoic Mt Bundey igneous suite, Northern Territory[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 42: 173~185.
- Shi Yu, Yu Jinhai, Xu Xisheng, *et al.* 2011. U-Pb ages and Hf isotope compositions of zircon of Taihua Group in Xiaoqinling area, Shaanxi Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(10): 3 095~3 108(in Chinese with English abstract).
- Song Wenlei, Xu Cheng, Qi Liang, *et al.* 2015. Genesis of Si-rich carbonates in Huanglongpu Mo deposit, Lesser Qinling orogen, China and significance for Mo mineralization[J]. Ore Geol. Rev., 65: 148~164.

- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, *et al.* 1997. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling Molybdenum Belt, Shanxi Province, China[J]. *Economic Geology*, 92: 827~835.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D. *Magmatism in Ocean Basins*[C]. Geological Society Publication, 42: 313~345.
- Sun Weidong, Li Shuguang, Chen Yadong, *et al.* 2002. Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, Central China: Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie orogenic belt[J]. *J. Geol.*, 110: 457~468.
- Sutcliffe R H, Smith A R, Doherty W, *et al.* 1990. Mantle derivation of Archean amphibole-bearing granitoid and associated mafic rocks: evidence from the southern Superior Province, Canada[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 105: 255~274.
- Tchameni R, Mezger K, Nsifa N E, *et al.* 2001. Crustal origin of Early Proterozoic syenites in the Congo Craton (Ntem Complex), South Cameroon[J]. *Lithos*, 57: 23~42.
- Tu Guangzhi. 1989. On the alkali-rich intrusive rocks[J]. *Mineral Resources and Geology*, 3(13): 1~4 (in Chinese with English abstract).
- Vervoort J D, Patchett P J, Gehrels G E, *et al.* 1996. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes [J]. *Nature*, 379: 624~627.
- Wang Linjun, Xu Cheng, Wu Min, *et al.* 2012. Sr-Nd-Pb Isotope Geochemistry of Lesser Qinling[J]. *Acta Mineralogica sinica*, 32(3): 370~378 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Liu Shen and Ma Runze. 2013. Elemental geochemistry and petrogenesis of the Yanshanian alkaline syenites in Jiaonan, Shandong Province[J]. *J. Mineral Petrol.*, 33(3): 54~62 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia and Lu Xinxiang. 2003a. Mineralogical characteristics of Shahewan rapakivi textured granite in North Qinling and their petrological significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 23(1): 57~62 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Jahn B M, *et al.* 2007. Tectonic significance of Late Triassic post-collisional lamprophyre dykes from the Qinling Mountains[J]. *Geol. Mag.*, 144: 837~848.
- Wang Xiaoxia, Wang Tao and Lu Xinxiang. 2002. Characteristics of rapakivi texture in Mesozoic Shahewan granite of North Qinling Mountains and some related problems[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(1): 30~36 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Lu Xinxiang, *et al.* 2003b. Laojunshan and Qinlingliang rapakivi-texture granite in North Qinling and their tectonic setting: a possible orogenic-type rapakivi granitoids[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 650~660 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Qi Qiuju, *et al.* 2011. Temporal-spatial variations, origin and their tectonic significance of the Late Mesozoic granites in the Qinling, Central China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1573~1593 (in Chinese with English abstract).
- Wang X, Wang T and Zhang C. 2013. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling Orogen, China: Constraints on orogenic process[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 129~151.
- Wang Yanfen, Shao Yi, Jiang Shaoyong, *et al.* 2012. Petrogenesis of Indosinian high Ba-Sr granites in Laoniushan batholith, Shaanxi province and their tectonic implications[J]. *Geological Journal of China Universities*, 18(1): 133~149 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yitian, Ye Huishou, Ye Anwang, *et al.* 2010. 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*, 17(2): 140~145 (in Chinese with English abstract).
- Wright J B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of nonorogenic granite genesis[J]. *Geol. Mag.*, 106: 370~384.
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopes systematics and their application in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185~220 (in Chinese with English abstract).
- Xu Cheng, Song Wenlei, Qi Liang, *et al.* 2009. Geochemical characteristics and tectonic setting of ore-bearing carbonatites in Honglongpu Mo ore field[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 422~430 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng, Griffin William L, Ma Xi, *et al.* 2009. The Taihua group on the southern margin of the North China craton: further insights from U-Pb ages and Hf isotope compositions of zircons[J]. *Mineralogy and Petrology*, 97(1~2): 43~59.
- Xu Xisheng and Qiu Jiansheng. 2010. *Igneous Petrology*[M]. Beijing: Science Press, 239~250 (in Chinese).
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, *et al.* 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled

- plasma-mass spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353~370.
- Zanvilevich A N, Litvinovsky B A, Wickham S M, *et al.* 1995. Genesis of alkaline and peralkaline syenite-granite series: The Kharitonovo Pluton (Transbaikalia, Russia)[J]. *J. Geol.*, 103: 127~145.
- Zeng Guangce. 1990. Petrological characteristics and tectonic environment of alkali-syenites in the south of Songxian, Henan[J]. *Earth Science—Journal of China University*, 15(6): 635~642 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Benren, Gao Shan, Zhang Hongfei, *et al.* 2002. Geochemistry in Qinling Orogenic Belt[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhang Chengli, Wang Tao and Wang Xiaoxia. 2008. Origin and tectonic setting of the Early Mesozoic granitoids in Qinling Orogenic Belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 304~316 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G W, Zhang B R, Yuan X C, *et al.* 2001. Qinling Belt and Continental Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 1~729 (in Chinese).
- Zhang Jing, Chen Yanjing, Shu Guiming, *et al.* 2002. Compositional study of minerals within the Qinlingiang granite, southwestern Shaanxi Province and discussion on the related problems [J]. *Sci. in China Ser. D*, 45: 662~672.
- Zhang Zhaochong. 1997. The isotopic geochemical characteristics and its petrogenesis of the Shuiquangou complex, north Hebei[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 27(1): 36~43 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong and Chen Hongxin. 1997. Geology and geochemistry of the Shuiquangou weakly-alkaline complex of northern Hebei and its tectonic environment[J]. *Regional Geology of China*, 16(3): 275~290 (in Chinese with English abstract).
- Zhao J X, Shiraiishi K, Ellis D J, *et al.* 1995. Geochemical and isotopic studies of syenites from the Yamato Mountains, East Antarctica: Implications for the origin of syenitic magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1363~1382.
- Zhao Taiping, Zhai Mingguo, Xia Bin, *et al.* 2004. Zircon U-Pb SHRIMP dating for the volcanic rocks of the Xiong'er Group: Constraints on the initial formation age of the cover of the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2342~2349 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F, Fu B, Li Y L, *et al.* 1998. Oxygen and hydrogen isotope geochemistry of ultrahigh pressure eclogites from the Dabie Mountains and the Sulu terrane[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 155: 113~129.
- Zheng Y F, Gao T S, Wu Y B, *et al.* 2007. Fluid flow during exhumation of deeply subducted continental crust Zircon U-Pb age and O-isotope studies of a quartz vein with in ultrahigh-pressure eclogite [J]. *J. Metamorph. Geol.*, 25: 267~283.
- Zhou Bin, Wang Fangyue, Sun Yong, *et al.* 2008. Geochemistry and tectonic affinity of Shahewan orogenic rapalcivi from Qinling [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1261~1272 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹 晶, 叶会寿, 李洪英, 等. 2014. 河南嵩县黄水庵碳酸岩脉型钼(铅)矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素年龄[J]. *矿床地质*, 33(1): 53~69.
- 第五春荣, 孙 勇, 林慈奎, 等. 2007. 豫西宜阳地 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学[J]. *岩石学报*, 23(2): 253~262.
- 第五春荣, 孙 勇, 林慈奎, 等. 2010. 河南鲁山地区太华杂岩 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成[J]. *科学通报*, 55(21): 2112~2123.
- 高 阳. 2011. 豫西嵩县前范岭石英脉型钼矿床地质地球化学与成因研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 高 阳, 李永峰, 郭保健, 等. 2010. 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*, 26(3): 757~767.
- 弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 等. 2009. 南秦岭地体东江口花岗岩及其基性包体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 25(11): 3029~3042.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. *岩石学报*, 23(10): 2595~2604.
- 黄典豪, 侯增谦, 杨志明, 等. 2009. 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*, 83(12): 1968~1984.
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 等. 1994. 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*, 13(3): 221~230.
- 李春麟, 余心起, 刘俊来, 等. 2012. 小秦岭东吉口印支期辉石正长岩年代学及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(6): 1806~1816.
- 李厚民, 王登红, 王晓霞, 等. 2012. 华北地块南缘熊耳山早中生代正长花岗岩-SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学及意义[J]. *岩*

- 石矿物学杂志, 31(6): 771~782.
- 李厚民, 叶会寿, 毛景文, 等. 2007. 小秦岭金(钼)矿床辉钼矿铼-钨定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 26(4): 417~424.
- 李 诺, 孙亚莉, 李 晶, 等. 2008. 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, 24(4): 810~816.
- 梁 涛, 卢 仁, 卢欣祥, 等. 2012. 河南省霞石正长岩地质特征及其成矿作用[J]. 地质与勘探, 48(2): 288~96.
- 刘楚雄, 阎国翰, 蔡剑辉. 2010. 河南嵩县碱性岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和岩石地球化学特征及构造意义[A]. 全国岩石学与地球动力学研讨会论文集[C], 157~158.
- 卢 仁, 梁 涛, 白凤军, 等. 2013. 豫西磨沟正长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素[J]. 地质论评, 59(2): 355~368.
- 卢欣祥, 董 有, 常秋岭, 等. 1996. 秦岭印支期沙河湾奥长环斑花岗岩及其动力学意义[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 3: 244~248.
- 卢欣祥, 李明立, 王 卫, 等. 2008. 秦岭造山带的印支运动及印支期成矿作用[J]. 矿床地质, 27(6): 762~773.
- 卢欣祥, 尉向东, 肖庆辉, 等. 1999. 秦岭环斑花岗岩的年代学研究及意义[J]. 高校地质学报, 5(4): 372~377.
- 齐秋菊, 王晓霞, 柯昌辉, 等. 2012. 华北地块南缘老牛山杂岩体时代、成因及地质意义——锆石年龄、Hf 同位素和地球化学新证据[J]. 岩石学报, 28(1): 279~301.
- 秦江峰. 2010. 秦岭造山带晚三叠世花岗岩类成因机制及深部动力学背景[D]. 西北大学.
- 秦江峰, 赖绍聪, 李永飞. 2007. 南秦岭勉县-略阳缝合带印支期光头山埃达克质花岗岩的成因及其地质意义[J]. 地质通报, 26(4): 467~471.
- 任富根, 李惠民, 殷艳杰, 等. 2000. 熊耳群火山岩系的上限年龄及其地质意义[J]. 前寒武纪研究进展, 23(03): 140~146.
- 任富根, 殷艳杰, 李双保, 等. 2001. 熊耳裂陷印支期同位素地质年龄耦合性[J]. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 286~288.
- 时 毓, 于津海, 徐夕生, 等. 2011. 陕西小秦岭地区太华群的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 27(10): 3 095~3 108.
- 涂光炽. 1989. 关于富碱侵入岩[J]. 矿产与地质, 3(13): 1~4.
- 王林均, 许 成, 吴 敏, 等. 2012. 小秦岭碳酸岩的 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学[J]. 矿物学报, 32(3): 370~378.
- 王 涛, 刘 桑, 马润则. 2013. 山东胶南燕山期碱性正长岩的地球化学及其成因探讨[J]. 矿物岩石, 33(3): 54~62.
- 王晓霞, 卢欣祥. 2003a. 北秦岭沙河湾环斑结构花岗岩的矿物学特征及其岩石学意义[J]. 矿物学报, 23(1): 57~62.
- 王晓霞, 王 涛, 卢欣祥. 2002. 北秦岭中生代沙河湾岩体环斑结构特征及有关问题的讨论[J]. 地球学报, 23(1): 30~36.
- 王晓霞, 王 涛, 卢欣祥, 等. 2003b. 北秦岭老君山和秦岭梁环斑结构花岗岩及构造环——一种可能的造山带型环斑花岗岩[J]. 岩石学报, 19(4): 650~660.
- 王晓霞, 王 涛, 齐秋菊, 等. 2011. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义[J]. 岩石学报, 27(6): 1 573~1 593.
- 王艳芬, 邵 毅, 蒋少涌, 等. 2012. 山西老牛山印支期高 Ba-Sr 花岗岩成因及其构造指示意义[J]. 高校地质学报, 18(1): 133~149.
- 王义天, 叶会寿, 叶安旺, 等. 2010. 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]. 地质前缘, 17(2): 140~145.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 徐夕生, 邱检生. 2010. 火成岩岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 239~250.
- 许 成, 宋文磊, 漆 亮, 等. 2009. 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, 25(2): 422~430.
- 曾广策. 1990. 河南嵩县南部碱性正长岩类的岩石特征及构造环境[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 15(6): 635~642.
- 张本仁, 高 山, 张宏飞, 等. 2002. 秦岭造山带地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1~187.
- 张成立, 王 涛, 王晓霞. 2008. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境[J]. 高校地质学报, 14(3): 304~316.
- 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, 1~729.
- 张招崇. 1997. 冀北水泉沟杂岩体的同位素地球化学特征及其成因意义[J]. 长春地质学院学报, 27(01): 36~43.
- 张招崇, 陈洪新. 1997. 冀北水泉沟偏碱性杂岩体的地质-地球化学特征及其构造环境[J]. 中国区域地质, 16(3): 275~290.
- 赵太平, 翟明国, 夏 斌, 等. 2004. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究: 对华北克拉通盖层发育初始时间的制约[J]. 科学通报, 49(22): 2 342~2 349.
- 周 滨, 汪方跃, 孙 勇, 等. 2008. 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, 24(6): 1 261~1 272.