

· 专题研究 ·

豫西熊耳山北岭金矿区马家河组安山岩地球化学特征及其地质意义

李肖龙^{1,2}, 申硕果³, 黄丹峰², 李 敏², 叶 萍⁴, 茹 朋², 程国安²

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 河南省地质调查院 河南省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 河南 郑州 450001; 3. 河南省岩石矿物测试中心, 河南 郑州 450012; 4. 河南省地质科学研究所, 河南 郑州 450001)

摘 要: 北岭金矿位于豫西熊耳山地区, 矿区内的围岩主要为熊耳群马家河组火山岩。本文对马家河组安山岩进行了详细的岩石学、地球化学研究, 旨在确定其岩石成因和形成的构造背景。研究结果表明, 马家河组安山岩高碱, 尤其富钾; 稀土元素总量(ΣREE)为 $154.60 \times 10^{-6} \sim 200.60 \times 10^{-6}$, 轻稀土元素相对富集, 具有弱的 Eu 负异常; 岩石富集 U、K、Pb、Nd 等大离子亲石元素(LILE), 亏损 Th、Nb、Ta、Ce、Zr、Ti 等高场强元素(HFSE); 马家河组安山岩具有幔源岩浆的特征, 其源区可能受到俯冲组分的改造使其地球化学特征发生变化; 岩浆在演化过程中经历了单斜辉石、斜长石等的分离结晶。结合其他资料分析认为, 马家河组安山岩形成于大陆裂谷环境, 可能是华北克拉通的伸展、裂解事件的产物。

关键词: 北岭金矿; 马家河组; 安山岩; 地球化学; 熊耳山地区

中图分类号: P588.14⁴; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)03-0287-16

Geochemical characteristics of andesites from the Majiahe Formation in the Beiling gold deposit and their geological significance

LI Xiao-long^{1, 2}, SHEN Shuo-guo³, HUANG Dan-feng², LI Min², YE Ping⁴, RU Peng² and CHENG guo-an²

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Henan Institute of Geological Survey/Henan Key Laboratory of Metallogenic Geological Processes and Resource Utilization, Zhengzhou 450001, China; 3. Henan Provincial Rock and Mineral Testing Center, Zhengzhou 450012, China; 4. Henan Institute of Geological Sciences, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The Beiling gold deposit, located in western Henan Province, is mainly hosted in the Majiahe Formation. The rocks are composed of basaltic andesites and andesties. In this paper, the petrological and geochemical characteristics of the volcanic rocks were studied to constrain the petrogenesis. The result shows that the volcanic rocks of the Majiahe Formation are rich in alkali, especially in K_2O . The mafic-intermediate rocks are characterized by a relatively low abundance. Their total amount of rare earth elements (ΣREE) is $154.60 \times 10^{-6} \sim 200.60 \times 10^{-6}$. They forms a LREE-enriched distribution [$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 6.72 \sim 8.22$] with the existence of weak negative Eu anomaly. In addition, the rocks display LILE enrichment (such as U, K, Pb and Nd) and HFSE depletion (such as Th, Nb, Ta, Ce, Zr and Ti). The chemical data presented in the paper show that the Majiahe Formation rocks

收稿日期: 2018-03-02; 接受日期: 2019-02-19; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0600504-02); 中国地质调查局项目(121201004000150017-59, 121201004000160901-18); 河南省自然科学基金项目(182300410106)

作者简介: 李肖龙(1987-), 男, 博士生, 主要从事矿产勘查及矿床学研究, E-mail: lancernmyself@126.com。

had a modified mantle source with ancient subduction belt materials. It is suggested that these volcanic rocks experienced a crystal fractionation process during the magmatic evolution. Comprehensive research shows that the Majiahe Formation was formed under a continental rifting environment.

Key words: Beiling gold deposit; Majiahe Formation; andesites; geochemistry; Xiong'er shan area

Fund support: National Key R&D Program of China (2016YFC0600504-02); Project of China Geological Survey (121201004000150017-59, 121201004000160901-18); Project of Natural Science Foundation of Henan Province (182300410106)

熊耳山地区处于华北陆块南缘,区内构造运动频繁,岩浆活动强烈,成矿地质条件极其优越,是我国重要的金多金属矿产区。北岭金矿位于熊耳山地区东南部,是上世纪90年代发现并探明的金矿床。马家河组安山岩不仅是熊耳山地区中元古代早期火山岩的重要组成部分,还是北岭金矿最重要的赋矿围岩。目前马家河组安山岩的研究工作相对比较薄弱,多作为熊耳群研究的一小部分,零散分布于其中(河南省地质科学研究所,1992^①;赵太平等,1994,2002,2007)。例如,河南省地质科学研究所(1992)^①在开展熊耳群地质环境演化及含矿性研究时,测试或收集了包括10件采自河南宜阳、洛宁、栾川以及山西垣曲等地的马家河组安山岩、玄武安山岩样品的42件熊耳群火山岩样品地球化学数据,显示熊耳群火山岩属于富钾拉斑系列, SiO_2 含量间隙很窄,兼具火山弧和大陆裂谷型溢流的双重性;赵太平等(1998)分析了嵩县黄庄附近的马家河组沉积夹层中薄层灰岩的碳、氧稳定同位素,结果表明灰岩出现在海相环境,即熊耳群形成晚期处于海相环境。国内外火山岩研究的热点之一便是安山岩(陈越等,2010),研究结果证实安山岩不但可以形成于不同的构造环境中,其形成机制也比较复杂(Byerly *et al.*, 1976; Robyn, 1979; Byers *et al.*, 1983; Dungan and Davidson, 2004; Parman and Grove, 2004; Tatsumi *et al.*, 2008; 桑隆康等,2012;王勤等,2015)。对马家河组安山岩开展针对性研究,不但有助于整个熊耳群的研究,也有助于华北陆块南缘岩石圈、构造体制研究,同时为区内找矿提供帮助。本文以马家河组安山岩为研究对象,开展岩石学、地球化学特征研究,探讨构造环境、岩石属性等,在约束安山岩岩石成因的同时,为该区域在中元古代的构造演化以及北岭金矿的研究提供帮助。

1 地质概况

熊耳山地区位于华北克拉通南缘,紧邻北秦岭造山带(吴发富等,2012;李厚民等,2012;Deng *et al.*, 2014)(图1a)。区内古老变质地层发育,构造运动频繁,岩浆活动尤其是燕山晚期酸性岩浆活动强烈(李国平,2013)。该区地层具有稳定陆块的双层结构。基底为新太古代太华群,是一套以片麻岩为主的中深变质岩系(侯红星等,2014),同位素年代学研究结果表明其形成年龄为2 900 ~ 2 200 Ma (Kroner *et al.*, 1988; 张宗清等,1994;薛良伟等,1995;倪志耀等,2003;Chen *et al.*, 2008),盖层为中元古界熊耳群和中元古界官道口群、栾川群等。其中熊耳群是一套中基性-中酸性的火山岩系,与下伏地层太华群呈角度不整合或断层接触,主要岩性为玄武岩、玄武安山岩、安山岩、英安岩和流纹岩等,形成年龄跨度大(2 400 ~ 1 400 Ma)(范宏瑞等,1994;胡受奚等,1997;任富根等,2002;陈衍景等,2004;赵太平,2004;Wang *et al.*, 2011),是该区重要的赋矿层位。区内褶皱构造不发育,构造以断裂为主,近东西向、北东向、近南北向、北西向4组断裂十分醒目,以前两组为主,其中近东西向的区域性马超营断裂是最重要的控岩控矿构造(Han *et al.*, 2009;贾玉杰等,2013),次一级的北东向断裂为成矿提供了有利的容矿空间,与金多金属矿床的形成和分布有着极为密切的关系(张元厚等,2006)。该区岩浆活动强烈,具有长期性、多期性的特点(王卫星等,2010a, 2010b;Wang *et al.*, 2012;吴发富等,2012)。其中新太古代岩浆活动主要形成中基性-酸性火山岩及TTG岩系,中元古代熊耳期岩浆活动以中基性-中酸性火山喷发为主要特点,燕

① 河南省地质科学研究所. 1992. 熊耳群地质环境演化及含矿性研究(报告). 1 ~ 196.

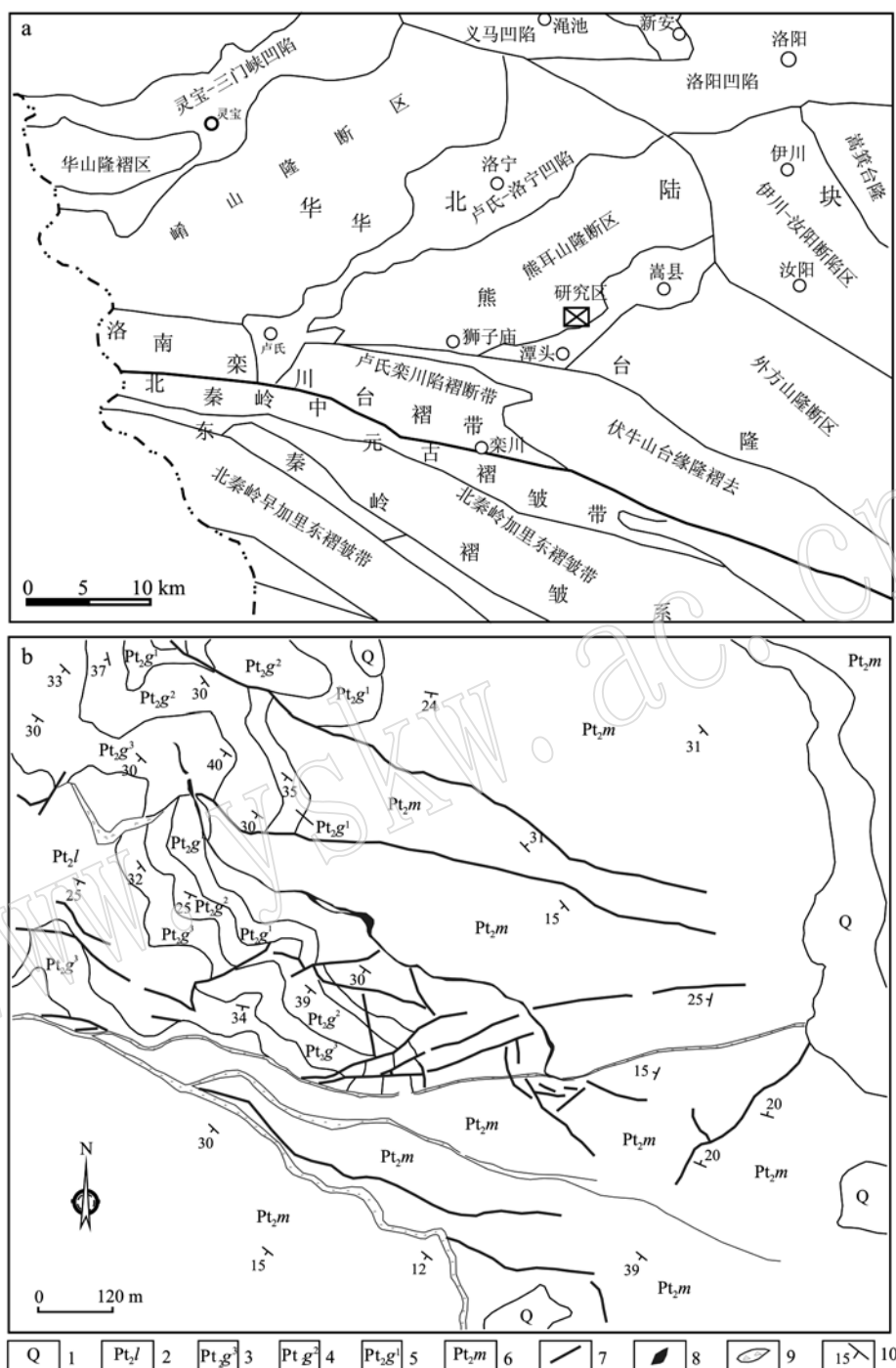


图1 豫西大地构造简图(a)(据庞振山等, 2006)和北岭金矿区地质简图(b)

Fig.1 Tectonic sketch map of western Henan Province (a, after Pang Zhenshan *et al.*, 2006) and geological map of the Beiling gold deposit (b)

1—第四系; 2—官道口群龙家园组; 3—官道口群高山河组上段; 4—官道口群高山河组中段; 5—官道口群高山河组下段;

6—熊耳群马家河组; 7—断层; 8—含金构造蚀变带; 9—断裂带; 10—产状

1—Quaternary sediments; 2—Longjiayuan Formation of the Guandaokou Group; 3—upper Gaoshanhe Formation of the Guandaokou Group; 4—middle Gaoshanhe Formation of the Guandaokou Group; 5—lower Gaoshanhe Formation of the Guandaokou Group; 6—Majiahe Formation of the Xiong'er Group; 7—fault; 8—auriferous structural altered zones; 9—fracture zone; 10—attitude

山期大规模的酸性岩浆侵入最为显著, 是本区岩浆活动的又一高峰, 不但形成花山、五丈山、合峪等花

岗岩基, 还派生出众多小型隐爆角砾岩筒、花岗闪长岩株(脉)、花岗斑岩等(张宗清等, 2006; 韩以贵,

2007; 叶会寿等, 2008; 郭波等, 2009; 高昕宇等, 2010; Mao *et al.*, 2010; 肖娥等, 2012; 卢仁等, 2013)。

北岭金矿位于熊耳山地区东南部, 矿区出露地层主要有第四系、官道口群龙家园组和高山河组、熊耳群马家河组(图1b)。其中龙家园组岩性主要为硅质条带状结晶白云岩, 夹厚层状结晶白云岩; 高山河组分为上、中、下3段, 上段岩性主要为石英砂岩和粘土岩互层, 中段岩性主要为辉石粗面岩、粗面斑岩及蚀变安山岩, 下段岩性主要为石英砂岩夹粘土岩; 马家河组岩性主要为(杏仁状)安山岩、(杏仁状)玄武安山岩、玄武粗安岩、粗安岩等, 各岩石类型之间为整合接触, 为一套富钾的火山熔岩。矿区地层整体呈单斜产出, 倾向南西为主, 其次为北西, 倾角多在 40° 以下。矿区构造以断裂构造为主, 褶皱构造仅在南部一带见到一小型背斜。断裂构造比较复杂, 大大小小共计50余条, 分为近东西向、北西向、北东向及近南北向4组, 并具有多期活动特征; 其中北西向断裂构造是主要的含矿构造, 规模最大的含

金蚀变带 F881 即由北西到南东贯穿全区。矿区内岩浆活动主要为熊耳期的火山喷发, 形成一套中基性火山熔岩。

2 岩石学特征

马家河组是熊耳群的组成部分。熊耳群是华北克拉通南缘(豫西地区)的第1盖层, 其分布范围广(横跨豫、晋、陕3省)、厚度大(厚1 000~6 000 m, 最厚可达8 000 m), 自下而上分为大古石组、许山组、鸡蛋坪组和马家河组(谢良鲜等, 2014)。其中只有大古石组为一套河湖相含砾砂岩、泥岩, 其余皆以熔岩为主(赵太平等, 2002)。

北岭一带马家河组变形变质较弱, 岩性主要为(杏仁状)安山岩、(杏仁状)玄武安山岩及玄武粗安岩、粗安岩等, 主要岩性介绍如下:

玄武安山岩呈深灰绿色, 无斑晶, 具填间结构(图2a), 块状构造。主要由斜长石($80\% \pm$)、辉石

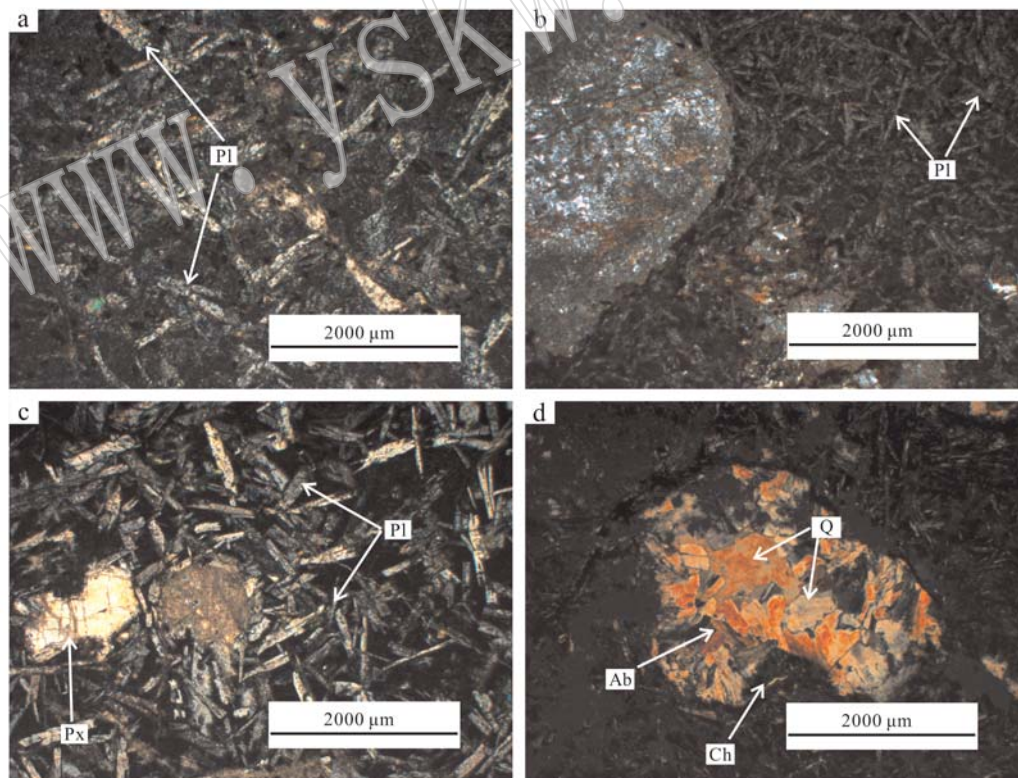


图2 马家河组岩石镜下照片

Fig. 2 Microscopic images of the rocks in the Majiahe Formation

a—玄武安山岩, 具填间结构(+); b—杏仁状安山岩, 具交织结构和杏仁状构造(+); c—杏仁状玄武安山岩, 具填间结构(+); d—杏仁状玄武安山岩的杏仁体中心为粒状石英, 中层为粒状钠长石, 外层为垂直杏仁壁生长的绿泥石(+); Q—石英; Pl—斜长石; Px—辉石; Ab—钠长石; Ch—绿泥石

a—intersertal texture in basaltic andesite(+); b—pilotaxitic texture and amygdaloidal structure in amygdaloidal andesite(+); c—intersertal texture in amygdaloidal basaltic andesite(+); d—granular quartz(core), granular albite(middle), chlorite(outer) of amygdaloid body in amygdaloidal basaltic andesite(+); Q—quartz; Pl—plagioclase; Px—pyroxene; Ab—albite; Ch—chlorite

(单斜辉石)(8% ±)及火山玻璃(12% ±)等组成。其中斜长石呈板条状,长轴大小为0.3~1.4 mm,杂乱分布,其搭成的格架中充填褐色火山玻璃及辉石,形成填间结构,少数斜长石晶体被绿泥石及绿帘石交代;辉石多呈他形粒状,大小为0.2~0.4 mm,部分呈纤柱状,与粒状辉石一起充填在斜长石格架中,可见被绿泥石或绿帘石交代。

杏仁状安山岩呈绿色,无斑晶,具交织结构,杏仁状构造(图2b)。主要由斜长石(85% ±)、铁质矿物(3% ±)及杏仁体(12% ±)等组成。其中斜长石多呈板条状,长轴大小为0.05~0.60 mm,半定向分布,形成交织结构;铁质矿物主要为褐铁矿及少量黄铁矿;杏仁体呈不规则状、次圆状等,杂乱分布,大小为0.6~10 mm,多充填隐晶状玉髓或玉髓与钾长石集合体,少数充填粒状方解石及铁质矿物。

杏仁状玄武安山岩呈深灰绿色,无斑晶,多数为填间结构(图2c),个别为间隐结构、间隐-填间结构,杏仁状构造。岩石矿物成分主要为斜长石(65%~75%),其次为火山玻璃(10%~15%)和辉石(2%~7%),杏仁体含量多为2%~3%,局部多者为10%~15%。其中斜长石呈板条状,长轴大小为0.1~1.2 mm,杂乱分布,其搭成的格架中充填褐色火山玻璃及辉石,形成填间结构,少数晶体被绿泥石、绿帘石或碳酸盐矿物交代;辉石多呈半自形-他形粒状,个别呈纤维状,粒径为0.05~0.50 mm,可见绿泥石或绿帘石交代。杏仁体呈不规则状、次圆状,大小不等,小者0.2~1.8 mm,大者4~12 mm,充

填粒状石英、方解石、钠长石、鳞片状绿泥石、隐晶状玉髓等,有的杏仁体中心为粒状石英,中层为粒状钠长石,外层为垂直于杏仁壁生长的绿泥石(图2d)。

3 样品采集及分析测试

所有马家河组研究样品均采自北岭金矿地下坑道内的新鲜岩石,岩性包括玄武安山岩、杏仁状安山岩、杏仁状玄武安山岩等。采样位置避开断裂破碎带、矿化蚀变带、各类接触带等。首先磨制光薄片,根据镜下观察结果,选择蚀变较弱、杏仁含量相对较少的7件代表性样品进行了全岩地球化学分析。

岩石全分析样品经无污染粉碎至200目后在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行主量元素和微量元素分析。其中主量元素使用XRF法测试(二价和三价铁使用化学法测定),所用仪器为AxiosmAx波长色散X射线荧光光谱仪,工作温度为23℃,相对湿度为34%,分析精度优于5%;微量元素采用ICP-MS测试,所用仪器为NexION 300D等离子体质谱仪,工作温度为21℃,相对湿度为32%,分析精度总体优于5%。具体分析流程见相关文献(Qu *et al.*, 2004)。

4 分析结果

马家河组样品的主量元素、微量元素分析测试结果见表1。

表1 北岭金矿区马家河组安山岩的主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析数据
Table 1 Major elements ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) of andesites in the Majiahe Formation

样号	6209-3	6209-6	6209-9	6209-11	590-1	590-6	590-9
SiO ₂	51.56	53.56	51.27	51.19	53.61	52.26	53.04
TiO ₂	1.42	1.40	1.55	1.62	1.47	1.43	1.46
Al ₂ O ₃	13.33	12.85	13.41	14.58	13.42	12.96	13.21
TFe ₂ O ₃	13.24	12.32	13.31	13.02	12.65	11.67	11.03
FeO	4.50	7.46	8.09	8.71	8.51	6.54	5.71
MnO	0.35	0.33	0.27	0.24	0.36	0.26	0.24
MgO	3.81	3.04	2.81	2.89	2.31	2.81	2.24
CaO	4.35	3.91	2.91	2.06	2.35	4.26	3.00
Na ₂ O	2.23	1.73	2.33	1.94	1.98	2.23	1.77
K ₂ O	4.11	5.24	5.17	4.12	4.95	4.63	6.16
P ₂ O ₅	0.41	0.38	0.44	0.45	0.41	0.39	0.42
烧失量	3.15	3.21	4.51	5.89	4.46	5.07	4.41
Total	97.96	97.97	97.98	98.00	97.97	97.97	96.98
K ₂ O + Na ₂ O	6.34	6.97	7.50	6.06	6.93	6.86	7.93
K ₂ O/Na ₂ O	1.84	3.03	2.22	2.12	2.50	2.08	3.48
A/CNK	0.83	0.82	0.91	1.28	1.04	0.79	0.88
A/NK	1.64	1.51	1.42	1.91	1.56	1.49	1.38

续表 1
Continued Table 1

样号	6209-3	6209-6	6209-9	6209-11	590-1	590-6	590-9
σ	4.70	4.60	6.80	4.48	4.53	5.08	6.26
Mg [#]	40.14	36.51	32.98	34.09	29.85	35.94	32.12
Li	13.2	14.3	11.9	17.2	18.9	15.9	14.8
Be	1.61	1.81	2.7	2.57	3.47	3.88	3.16
Sc	22.6	24.5	26.8	32.3	26.8	25.6	22.2
V	178	187	192	207	193	170	166
Cr	122	120	128	129	120	116	124
Co	42.6	36.1	39.5	39	35.8	32.6	39.9
Ni	31	33.6	35.9	33.6	31.6	28.8	31.2
Cu	16.8	26.7	23.2	24	37	19.8	31.8
Zn	136	116	140	208	183	114	105
Ga	20.2	19.9	22.9	24.2	20.4	19.0	24.7
Rb	96.3	154.0	155.0	117.0	170.0	171.0	222.0
Sr	664	425	474	417	363	288	480
Mo	4.50	2.26	10.10	4.55	4.24	1.65	10.20
Cd	0.975	0.214	0.515	0.384	0.402	0.247	0.135
In	0.091	0.081	0.085	0.090	0.103	0.084	0.075
Sb	2.61	7.46	6.44	4.80	5.28	2.03	5.15
Cs	6.50	5.67	9.82	17.30	19.70	25.10	17.20
Ba	3 086	1 435	739	784	759	1 023	1 246
W	8.57	15.10	21.00	25.30	38.00	9.34	25.30
Re	<0.002	<0.002	0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.003
Tl	1.48	2.75	3.49	2.28	3.00	2.26	4.67
Pb	51.6	33.6	368.0	156.0	82.4	52.7	47.3
Bi	0.056	0.039	0.018	0.018	0.344	0.012	0.009
Th	1.72	1.55	1.95	1.99	1.71	1.23	1.72
U	2.370	0.776	1.990	1.120	1.010	0.862	2.030
Nb	8.06	7.17	9.07	9.26	8.29	7.20	13.20
Ta	0.433	0.407	0.484	0.498	0.431	0.385	0.467
Zr	75.0	61.6	84.5	85.5	65.4	50.5	52.8
Hf	2.82	2.54	3.15	3.28	2.43	2.01	2.21
La	34.9	31.3	34.1	33.2	32.9	28.3	37.3
Ce	72.6	63.9	74.6	69.9	67.9	57.8	77.6
Pr	9.20	8.28	9.34	8.85	8.72	7.38	9.51
Nd	39.9	35.9	40.9	38.8	38.0	32.5	41.4
Sm	8.11	7.29	8.26	7.72	7.51	6.47	8.14
Eu	2.64	2.04	2.19	2.05	1.96	1.73	2.16
Gd	7.46	6.53	7.41	7.06	6.64	5.79	7.24
Tb	1.37	1.19	1.34	1.28	1.21	1.05	1.28
Dy	7.95	6.62	7.53	7.36	6.68	6.04	7.18
Ho	1.53	1.30	1.48	1.41	1.25	1.13	1.34
Er	3.98	3.38	3.92	3.65	3.30	2.96	3.45
Tm	0.642	0.532	0.619	0.588	0.533	0.491	0.547
Yb	3.50	2.86	3.41	3.24	2.79	2.63	3.06
Lu	0.420	0.355	0.425	0.399	0.347	0.331	0.389
Y	42.4	34.4	40.1	37.4	33.1	31.4	37.4
Σ REE	194.20	171.48	195.52	185.51	179.74	154.60	200.60
LREE/HREE	6.23	6.53	6.48	6.42	6.90	6.57	7.19
(La/Yb) _N	6.72	7.38	6.74	6.91	7.95	7.25	8.22
(La/Sm) _N	2.71	2.70	2.60	2.71	2.76	2.75	2.88
(Gd/Yb) _N	1.72	1.84	1.75	1.76	1.92	1.78	1.91
δ Eu	1.02	0.89	0.84	0.83	0.83	0.85	0.84
δ Ce	0.96	0.94	0.99	0.96	0.95	0.94	0.97
Rb/Sr	0.15	0.36	0.33	0.28	0.47	0.59	0.46
Nb-Ta	18.61	17.62	18.74	18.59	19.23	18.70	28.27
Zr/Hf	26.60	24.25	26.83	26.07	26.91	25.12	23.89
Nd/Th	23.20	23.16	20.97	19.50	22.22	26.42	24.07
Th/Nb	0.21	0.22	0.21	0.21	0.21	0.17	0.13
La/Nb	4.33	4.37	3.76	3.59	3.97	3.93	2.83
La/Sm	4.30	4.29	4.13	4.30	4.38	4.37	4.58
Ta/Hf	0.15	0.16	0.15	0.15	0.18	0.19	0.21
Th/Hf	0.61	0.61	0.62	0.61	0.70	0.61	0.78

4.1 主量元素地球化学

马家河组安山岩样品的 SiO_2 含量为 51.19% ~ 53.61%, 平均为 52.36%, 表现出基性-中性过渡的特点, 可能反映了岩浆的喷溢过程比较缓慢且经历了一定程度的结晶分异(田陟贤等, 2016); TiO_2 含量为 1.40% ~ 1.62%, 平均为 1.48%; Al_2O_3 含量为 12.85% ~ 14.58%, 平均为 13.39%, 低于典型岛弧火山岩(17.1% ~ 17.8%)(Hess, 1989; 王勤等, 2015); MgO 含量为 2.24% ~ 3.81%, 平均为 2.84%, $\text{Mg}^\#$ 值较小(29.85 ~ 40.14, 平均为 34.52), 远低于原生岩浆(68 ~ 75)(Wilson, 1989), 表明岩浆可能经历了一定程度的结晶分异(向坤鹏等, 2015); FeO 含量为 4.50% ~ 8.71%, 平均为 7.07%; TFe_2O_3 含量为 11.03% ~ 13.31%, 平均为 12.46%; $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 值为 2.52 ~ 4.98, 平均为 4.21; P_2O_5 含量为 0.38% ~ 0.45%, 平均为 0.41%; CaO 含量为 2.06% ~ 4.35%, 平均为 3.26%, 其值较低。马家河组安山岩具有富碱的特征($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 6.06\% \sim 7.93\%$, 平均为 6.94%), 其中 Na_2O 含量为 1.73% ~ 2.33%, 平均为 2.03%, K_2O 含量为 4.11% ~ 6.16%, 平均为 4.91%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 1.84 ~ 3.48, 平均为 2.47, 显示相对富钾贫钠的特征, 这与人关于熊耳群火山岩为高钾的认识一致(赵太平等, 1995)。关于高钾的原因, 孙枢等(1981, 1985)认为熊耳群形成于三叉裂谷构造环境, 熊耳群火山岩中的中基性和酸性岩石并不是同源岩浆分异的产物, 中基性岩石是幔源岩浆受相对富碱质(尤其是钾)的壳源物质的混合形成, 而酸性岩石可能是大陆壳深熔产物; 贾承造(1985)认为熊耳群火山岩的 K_2O 、 Na_2O 含量演化趋势和微量元素的不少特征类似于安第斯型活动大陆边缘, 其 K_2O 含量由南往北有升高的趋势; 杨忆(1990)认为熊耳群火山岩在成岩后的某些地质作用下岩石的碱总量及钾碱比值有过增加; 陈衍景等(1992)认为较高的 K_2O 可能是区域性 K_2O 异常造成的, 该区域结晶基底内的火山岩 K_2O 含量也明显高于其他地区的同类岩石; 赵太平等(1996, 1999, 2002, 2007)认为同一地区随地层层位升高 K_2O 含量具有螺旋式渐进上升的趋势。

4.2 稀土元素和微量元素地球化学

马家河组安山岩稀土元素总量($\sum \text{REE} = 154.60 \times 10^{-6} \sim 200.60 \times 10^{-6}$)相对较低, 平均为 183.09×10^{-6} 。轻、重稀土元素含量比值(LREE/HREE)为 6.23 ~ 7.19, 平均为 6.62。(La/Yb)_N 为

6.72 ~ 8.22, 平均为 7.31, 表明轻稀土元素相对富集。(La/Sm)_N 为 2.60 ~ 2.88, 平均为 2.73; (Gd/Yb)_N 为 1.72 ~ 1.92, 平均为 1.81, 表明轻稀土元素之间分馏程度相对较高, 而重稀土元素之间分馏程度相对较低。 δEu 为 0.83 ~ 1.02, 平均为 0.87, 显示具有弱的 Eu 负异常, 表明岩浆发生了程度较弱的斜长石分离结晶作用。 δCe 为 0.94 ~ 0.99, 平均为 0.96, 显示具有微弱的 Ce 负异常, 表明岩石受后期蚀变或其他热事件的改造作用很小(Polat and Hofmann, 2003)。在稀土元素球粒陨石标准化图解(图 3a)上配分曲线向右下倾斜, 并且基本平行, 显示同源岩浆演化的特征。

马家河组安山岩的大离子亲石元素(LILE)Rb 的含量为 $96.3 \times 10^{-6} \sim 222 \times 10^{-6}$, 平均为 155.04×10^{-6} ; Sr 的含量为 $288 \times 10^{-6} \sim 664 \times 10^{-6}$, 平均为 444.43×10^{-6} ; Ba 的含量为 $739 \times 10^{-6} \sim 3\,086 \times 10^{-6}$, 平均为 $1\,296 \times 10^{-6}$ 。Rb/Sr 值为 0.15 ~ 0.59, 平均为 0.38, 与地壳值(0.35)相当而高于地幔值(0.034)(Taylor and McLennan, 1995)。高场强元素(HFSE)Nb 的含量为 $7.17 \times 10^{-6} \sim 13.2 \times 10^{-6}$, 平均为 8.89×10^{-6} , 高于岛弧拉斑玄武岩和洋脊拉斑玄武岩的 Nb 含量(分别为 $1.7 \times 10^{-6} \sim 2.7 \times 10^{-6}$ 和 4.46×10^{-6}); Ta 的含量为 $0.39 \times 10^{-6} \sim 0.50 \times 10^{-6}$, 平均为 0.44×10^{-6} , 同样高于岛弧拉斑玄武岩和洋脊拉斑玄武岩的 Ta 含量(分别为 $0.10 \times 10^{-6} \sim 0.18 \times 10^{-6}$ 和 0.29×10^{-6})(转引自田陟贤等, 2013, 2016); Zr 的含量为 $50.5 \times 10^{-6} \sim 85.5 \times 10^{-6}$, 平均为 67.9×10^{-6} , 其值与钙碱性玄武岩(71×10^{-6})相当, 高于岛弧拉斑玄武岩(40×10^{-6}); Hf 的含量为 $2.01 \times 10^{-6} \sim 3.28 \times 10^{-6}$, 平均为 2.63×10^{-6} , 同样与钙碱性玄武岩(2.23×10^{-6})相当而高于岛弧拉斑玄武岩(1.17×10^{-6})。Nb/Ta 值为 17.62 ~ 28.27, 平均为 19.97, 除去 1 个高值(样品 590-9 的 28.27)外, 平均值为 18.58, 远高于大陆地壳(13), 与原始地幔的 Nb/Ta 值相当(17)(Taylor and McLennan, 1985; Sun and McDonough, 1989)。Zr/Hf 值为 23.89 ~ 26.91, 平均为 25.67, 高于大陆地壳(11)而低于原始地幔(36)(Taylor and McLennan, 1985; Sun and McDonough, 1989)。相容元素 Cr 的含量为 $116 \times 10^{-6} \sim 129 \times 10^{-6}$, 平均为 122.7×10^{-6} ; Ni 的含量为 $28.8 \times 10^{-6} \sim 35.9 \times 10^{-6}$, 平均为 32.2×10^{-6} 。Cr 和 Ni 的含量均远低于原生岩浆(Cr 含量为 $300 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$, Ni 含量为 $300 \times$

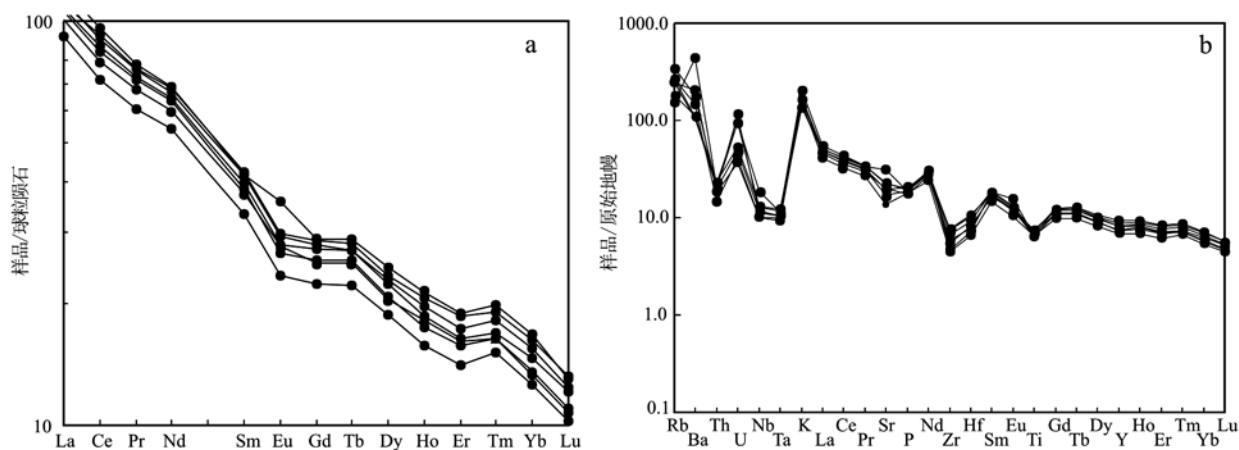


图3 马家河组安山岩稀土元素球粒陨石标准化图解(a, 标准值据 Boynton, 1984)和微量元素原始地幔标准化图解(b, 标准值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns (a) (normalization values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) (normalization values after Sun and McDonough, 1989) of andesites in the Majiahe Formation

$10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$), 代表岩浆为演化岩浆, 可能经历了橄榄石和单斜辉石的分离结晶(向坤鹏等, 2015)。在微量元素原始地幔标准化图解(图3b)上, 马家河组安山岩呈现出富集 U、K、Pb、Nd 等大离子亲石元素(LILE)而亏损 Th、Nb、Ta、Ce、Zr、Ti 等高场强元素(HFSE)的特征。与稀土元素配分曲线一样, 马家河组安山岩样品在微量元素原始地幔标准化图上的形态特征基本一致, 表明其为同源岩浆演化的产物。

5 讨论

5.1 岩石成因

正如上文所述, 马家河组安山岩样品具有相似的微量元素、稀土元素特征, 表明其为同源岩浆演化的产物。安山岩根据物源可分为幔源、壳幔混源、壳源等3种类型(吴华英等, 2008)。虽然缺乏详细的 Sr-Nd 或 Hf 同位素数据, 对准确限制马家河组安山岩的岩石成因等带来一定影响。但马家河组安山岩主量元素上具有较低的 SiO_2 含量(51.19% ~ 53.61%, 平均为 52.36%), 显示出幔源岩石的成分特征(王冠等, 2017); Nb/Ta 值除样品 590-9 (28.27)外平均为 18.58, 与原始地幔(17)相当, 远高于大陆地壳(13), 可能反映了其幔源成因; Nd/Th 值为 19.50 ~ 24.07, 平均为 22.79, 远高于壳源岩石(约为 3)而与幔源岩石(大于 15)相当(Bea *et al.*,

2001); Th/Nb 值为 0.13 ~ 0.22, 平均为 0.20, 略高于原始地幔(0.12)而不同于陆壳(0.44)(牛贺才等, 2009)。在 Nb-Zr 图解(Geng *et al.*, 2011)上, 马家河组安山岩投在过渡型地幔及其附近(图4)。综合微量、稀土元素特征, 认为马家河组安山岩为幔源。已有研究显示, 镁铁质岩石一般起源于软流圈地幔或岩石圈地幔, 区别在于起源于软流圈地幔的岩石相对原始地幔往往富集大离子亲石元素和高场强元素, 而起源于岩石圈地幔的岩石往往富集大离

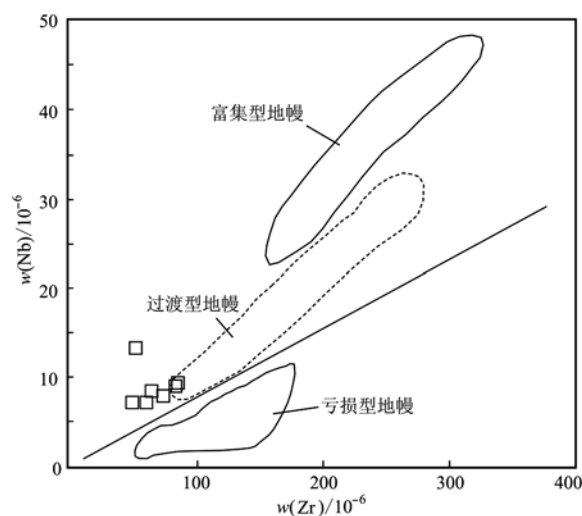


图4 马家河组安山岩 Nb-Zr 图解(底图据 Geng *et al.*, 2011)

Fig. 4 Nb-Zr diagram of andesites in the Majiahe Formation (after Geng *et al.*, 2011)

子亲石元素和轻稀土元素, 相对亏损高场强元素 (Sklyarov *et al.*, 2003; Zhao and Zhou, 2007)。马家河组安山岩在微量元素原始地幔标准化图解(图 3b)上呈现出富集 U、K、Pb、Nd 等大离子亲石元素 (LILE) 而亏损 Th、Nb、Ta、Ce、Zr、Ti 等高场强元素 (HFSE) 的特征, 显示源区应为岩石圈地幔。考虑到马家河组安山岩的 Zr/Hf 值为 23.89 ~ 26.91, 平均为 25.67, 低于原始地幔 (36) 而远高于大陆地壳 (11) (Taylor and McLennan, 1985; Sun and McDonough, 1989), 表明有陆壳物质的加入。负 Nb 异常亦指示可能有地壳物质参与了岩浆过程 (Rollison, 1993)。但其 La/Nb 值为 2.83 ~ 4.37, 平均为 3.82, 远低于典型陆壳岩石 (大于 12) (转引自吴玉峰等, 2016), 表明陆壳物质的混染作用不明显。La/Sm 值 (4.13 ~ 4.58) 均低于 5, 同样表明地壳物质混染不明显 (Lassiter and DePaolo, 1997)。赵太平等 (2002) 通过对比熊耳群及下伏结晶基底的 Nd 同位素组成, 认为熊耳群火山岩的地壳混染发生在岩浆源区, 且混染作用影响不大, 其地球化学特征是地幔源区性质的反映。

马家河组安山岩的 $Mg^\#$ 值以及相容元素 Cr、Ni 的含量均低于原生岩浆的范围, 表明岩浆可能为经历了结晶分异的演化岩浆。La/Sm 值随 La 含量的变化情况可以示踪岩浆中微量元素的变化是受控于部分熔融还是结晶分异 (赵振华, 1997)。马家河组

安山岩样品的 La/Sm 值为 4.13 ~ 4.58, 平均为 4.34, 基本不随 La 含量变化, 在 La/Sm - La 图解 (图 5a) 上大致呈一条水平线, 表明结晶分异是主要的控制因素。 δEu 为 0.83 ~ 1.02, 平均为 0.87, 显示弱的 Eu 负异常, 表明岩浆发生了程度较弱的斜长石分离结晶作用。在 Ni - Cr 图解 (图 5b) 上, 马家河组安山岩呈现单斜辉石的分离结晶趋势, 表明岩浆可能亦发生了单斜辉石的分离结晶作用。

根据以上地球化学特征, 本文认为马家河组安山岩具有幔源岩浆的特征, 并且其幔源区有陆壳物质的一定混染, 在岩浆演化过程中经历了单斜辉石、斜长石等的分离结晶作用。

5.2 构造环境

关于熊耳群形成的构造环境, 目前主要有以下认识: 一种是形成于裂谷环境, 甚至代表大陆裂解过程 (孙枢等, 1985; 杨忆, 1990; Zhao *et al.*, 2002; 谢良鲜等, 2014); 一种是形成于活动大陆边缘 (河南省地质局地质研究所和长春地质学院火山岩研究组, 1976; 贾承造等, 1988; 胡受奚等, 1988); 活动大陆边缘弧与裂谷并存 (陈衍景等, 1992)。

马家河组安山岩高碱 (全碱含量为 6.06% ~ 7.93%, 平均为 6.94%), 特别是富钾 (K_2O 含量为 4.11% ~ 6.16%, 平均为 4.91%), 这可能暗示其为板内熔岩 (吴国干等, 2005)。在微量元素原始地幔标准化图解中, 自 Ce 至 Lu 各元素的含量下降

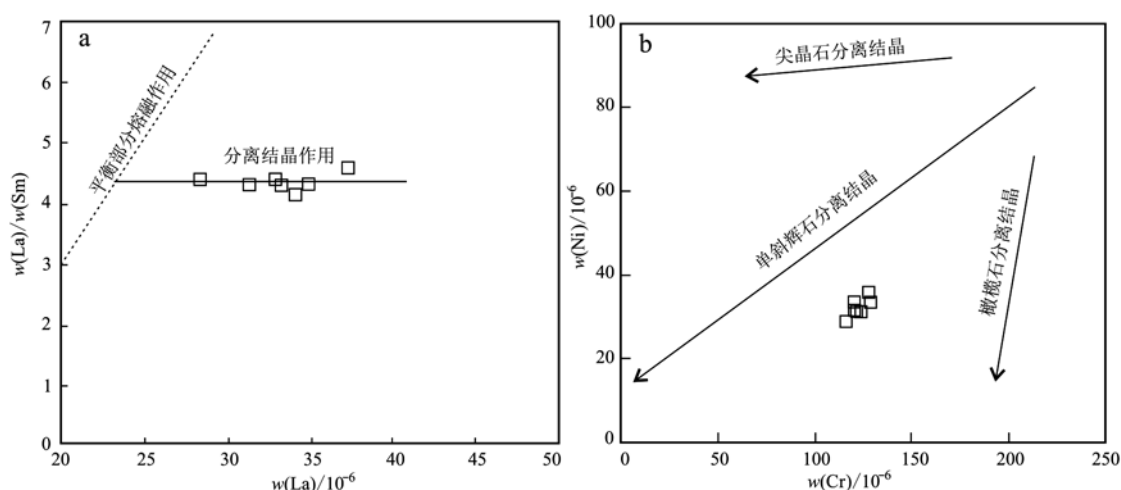


图5 马家河组安山岩 La/Sm - La 图解(a, 底图据 Treuil and Joron, 1975)、Ni - Cr 图解(b, 底图转引自王苏珊等, 2017)

Fig. 5 La/Sm - La (a, after Treuil and Joron, 1975) and Ni - Cr (b, after Wang Sushan *et al.*, 2017) diagrams of andesites in the Majiahe Formation

很快,表现出裂谷火山岩的特征(李欢等, 2012)。马家河组安山岩富集 U、K、Pb、Nd 等大离子亲石元素(LILE)而亏损 Th、Nb、Ta、Ce、Zr、Ti 等高场强元素(HFSE),这是岛弧岩浆作用的典型地球化学特征(陈越等, 2010)。但经历陆壳混染的板内岩浆岩也可以具有上述特征(马家河组安山岩的陆壳混染作用影响并不大),这是因为大陆的横向增生主要是通过板块汇聚边缘的岩浆活动和岛弧碰撞来进行的,故岛弧岩浆和大陆地壳物质地球化学特征相似(Plank, 2005)。源区保留有俯冲组分的大陆裂谷火山岩同样也可以产生上述地球化学特征(赵太平等, 2007)。马家河组安山岩轻重稀土元素分馏明显,其 $(La/Yb)_N$ 为 6.72 ~ 8.22, 平均为 7.31, 在稀土元素

球粒陨石标准化图解上向右下倾斜,这种较高分异度的稀土元素特征不但不同于轻稀土元素亏损的洋中脊玄武岩,也不同于平坦型或弱分异的岛弧型拉斑玄武岩,而与一些大陆裂谷火山岩的特征比较形似(徐勇航等, 2007)。马家河组安山岩在 Th/Ta - La/Yb 图解上投在大陆溢流玄武岩区域(图 6a), 在 Nb/U - Nb 图解上投在大陆玄武岩区域(图 6b), 在 Ti - Zr 图解上投在板内玄武岩(图 6c), 在 Cr - Y 图解上投在洋中脊玄武岩与板内玄武岩的共同区域(图 6d)。河南省地质科学研究所(1992)^①通过研究马家河组沉积夹层的稀土元素和微量元素特征,认为熊耳群沉积岩的形成构造背景为被动大陆边缘。结合以上特征,笔者认为马家河组安山岩形成于拉

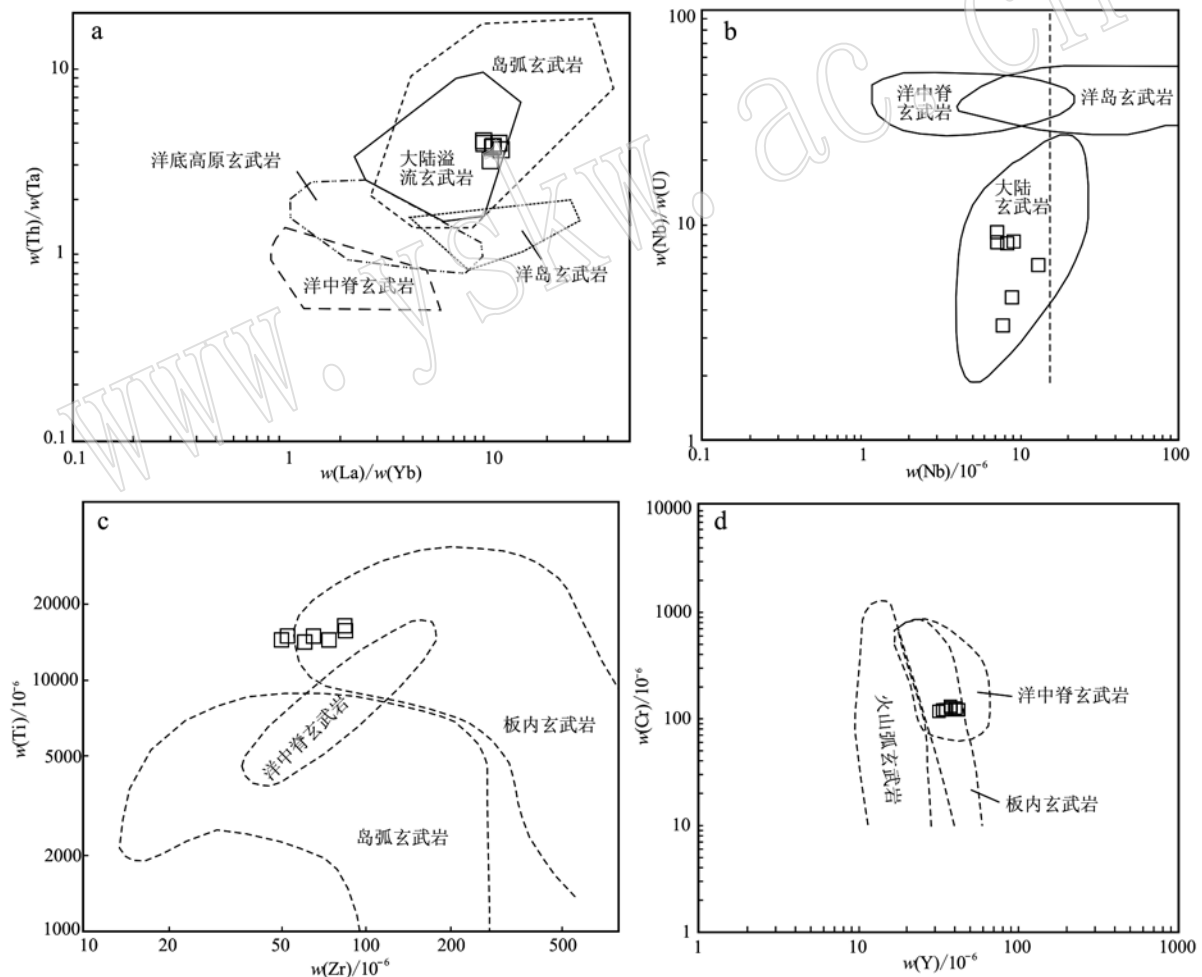


图6 马家河组安山岩 Th/Ta - La/Yb (a, Condie, 1997)、Nb/U - Nb (b, Le Roex *et al.*, 1989)、Ti - Zr (c, Pearce *et al.*, 1981; Pearce, 1982)、Cr - Y (d, Pearce *et al.*, 1981; Pearce, 1982) 图解

Fig. 6 Th/Ta - La/Yb (a, after Condie, 1997), Nb/U - Nb (b, after Le Roex *et al.*, 1989), Ti - Zr (c, after Pearce *et al.*, 1981; Pearce, 1982) and Cr - Y (d, after Pearce *et al.*, 1981; Pearce, 1982) diagrams of andesites in the Majiahe Formation

① 河南省地质科学研究所. 1992. 熊耳群地质环境演化及含矿性研究(报告). 1 ~ 196.

张的大陆裂谷环境。

赵太平等(2001)讨论了熊耳群的形成时代,认为熊耳期岩浆活动的时限大致为 1.95 ~ 1.75 Ga,而不是 1.85 ~ 1.40 Ga。He 等(2009)对崤山地区马家河组下部安山岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,获得的年龄为 $1\,778 \pm 6.5$ Ma。崔敏利等(2010)选择崤山地区侵入到马家河组上部的石英闪长岩和花岗斑岩进行测年工作,其中挑选石英闪长岩中的斜锆石和锆石分别进行了 SIMS U-Pb 定年,结果分别为 $1\,789 \pm 3.5$ Ma 和 $1\,778 \pm 12$ Ma,花岗斑岩中的锆石 SIMS U-Pb 定年结果为 $1\,786.4 \pm 7.7$ Ma,据此提出熊耳群火山岩形成时限为 1 800 ~ 1 770 Ma,主体作用于 1 780 Ma。整体来看,熊耳群火山岩的岩浆活动持续时间并不是很长,可能开始于 1.95 Ga 左右,这时的火山活动中心可能在豫西熊耳山地区。1.85 ~ 1.70 Ga 华北克拉通处于伸展和裂解时期(邵济安等, 2002),形成以崤山为中心,分别向西、东、北 3 个方向发展的三叉裂谷系。裂解早期形成熊耳群底部大古石组河湖相沉积岩,随着裂解活动的加强逐渐进入岩浆喷溢阶段,形成克拉通南缘巨厚的熊耳群火山岩。马家河组安山岩即是该时期的产物。

6 结论

(1) 马家河组安山岩具有高碱、尤其富钾的地球化学特征,岩石富集 U、K、Pb、Nd 等大离子亲石元素(LILE),亏损 Th、Nb、Ta、Ce、Zr、Ti 等高场强元素(HFSE),在稀土元素球粒陨石标准化图解上呈右倾型。

(2) 马家河组安山岩具有幔源岩浆的特征,其源区可能受俯冲组分的改造。岩浆演化过程中经历了单斜辉石、斜长石等的分离结晶。

(3) 马家河组安山岩形成于拉张背景下的大陆裂谷环境,可能与华北克拉通的伸展、裂解事件有关。

致谢 野外工作期间得到了潭头金矿相关领导和技术人员的大力支持,数据测试期间核工业北京地质研究院分析测试研究中心老师给予了很多帮助,审稿专家提出非常中肯的修改意见,在此一并表示衷心感谢。

References

Bea F, Arzamastsev A, Montero P, *et al.* 2001. Anomalous alkaline rocks of Soustov, Kola: Evidence of mantle-derived metasomatic flu-

ids affecting crustal materials[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140: 554 ~ 566.

Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry* [C]. Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo: Elsevier, 63 ~ 114.

Byerly G R, Melson W G and Vogt P R. 1976. Rhyodacites, andesites, ferro-basalts and ocean tholeiites from the galapagos spreading center [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 30(2): 215 ~ 221.

Byers C D, Muenow D W and Garcia M O. 1983. Volatiles in basalts and andesites from the Galapagos Spreading Center, 85° to 86° W [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(9): 1 551 ~ 1 558.

Chen Yanjing, Fu Shigu and Qiang Lizhi. 1992. The tectonic environment for the formation of the Xiong'er Group and the Xiyang Group[J]. *Geological Review*, 38(4): 325 ~ 333(in Chinese with English abstract).

Chen Yanjing, Li Jing, Pirajno F, *et al.* 2004. Hydrothermal metallogeny of the Shanggong gold deposit, East Qinling: Studies on ore geology and fluid inclusion geochemistry[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 1 ~ 12(in Chinese with English abstract).

Chen Yanjing, Pirajno Franco and Qi Jinping. 2008. The Shanggong gold deposit, Eastern Qinling Orogen, China: Isotope geochemistry and implications for ore genesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33: 252 ~ 266.

Chen Yue, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, *et al.* 2010. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Bamco andesites from the northern Gangdese, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2 193 ~ 2 206 (in Chinese with English abstract).

Condie K C. 1997. Source of Proterozoic mafic dyke swarms: constraints from Th/Ta and La/Yb ratios[J]. *Precambrian Research*, 81(1 ~ 2): 3 ~ 14.

Cui Minli, Zhang Baolin, Peng Peng, *et al.* 2010. Zircon/baddeleyite U-Pb dating for the Paleo-proterozoic intermediate-acid intrusive rocks in Xiaoshan Mountain, west of Henan Province and their constraints on the age of the Xiong'er Volcanic Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1 541 ~ 1 549(in Chinese with English abstract).

Deng Junliang, Gong Qingjie, Wang Changming, *et al.* 2014. Sequence of Late Jurassic-Early Cretaceous magmatic-hydrothermal events in the Xiongershan region, central China: An overview with new zircon U-Pb geochronology data on quartz porphyries[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 161 ~ 172.

Dungan M A and Davidson J. 2004. Partial assimilative recycling of the mafic plutonic roots of arc volcanoes: An example from the Chilean Andes[J]. *Geology*, 32(9): 773 ~ 776.

Fan Hongrui, Xie Yihan, Zhao Rui, *et al.* 1994. Stable isotope geochemistry of rocks and gold deposits in the Xiong'ershan area, western Henan Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources*

- Research, 9: 54 ~ 64 (in Chinese with English abstract).
- Gao Xinyu, Zhao Taiping, Yuan Zhenlei, *et al.* 2010. Geochemistry and petrogenesis of the Heyu batholith in the southern margin of the North China block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3 485 ~ 3 506 (in Chinese with English abstract).
- Geng Hongyan, Sun Min, Yuan Chao, *et al.* 2011. Geochemical and geochronological study of early Carboniferous volcanic rocks from the West Junggar: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(5): 854 ~ 866.
- Geological Bureau of Henan Province, Changchun College of Geology. 1976. Characteristics of potassium rich volcano rocks in the Xiong'er Group[J]. *Journal of Changchun College of Geology*, (2): 32 ~ 45 (in Chinese).
- Guo Bo, Zhu Laimin, Li Ben, *et al.* 2009. Zircon U-Pb age and Hf isotope composition of the Huashan and Heyu granite plutons at the southern margin of North China Craton: Implications for geodynamic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 265 ~ 281 (in Chinese with English abstract).
- Han Yigui. 2007. Structural and Magmatic Evolution in Western Henan Province and Their Implications to Gold Mineralization: New Geochronological Evidence (Ph. D thesis)[D]. China University of Geosciences (Beijing), 1 ~ 136 (in Chinese with English abstract).
- Han Yigui, Zhang Shihong, Pirajno Franco, *et al.* 2009. New ^{40}Ar - ^{39}Ar age constraints on the deformation along the Machaoying fault zone: Implications for Early Cambrian tectonism in the North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 16(2): 255 ~ 263.
- 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): 213 ~ 222.
- Hess P C. 1989. *Origins of Igneous Rocks*[M]. London: Harvard University Press, 109 ~ 275.
- Hou Hongxing and Zhang Dehui. 2014. Geological characteristics and genesis of Hongzhuang gold deposit in Xiong'er shan area[J]. *Mineral Deposits*, 33(2): 350 ~ 360 (in Chinese with English abstract).
- Hu Shouxi, Zhao Yiying, Xu Jinfang, *et al.* 1997. The North China Craton Gold Metallogenic[M]. Beijing: Science Press, 1 ~ 220 (in Chinese).
- Jia Chengzao. 1985. Geochemical characteristics and tectonic significance of volcanic rocks in the Xiong'er Group[J]. *Henan Geology*, (2): 39 ~ 43 (in Chinese).
- Jia Chengzao, Shi Yangshen and Guo Lingzhi. 1988. Plate Tectonics of the Eastern Qinling[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1 ~ 130 (in Chinese).
- Jia Yujie, Gong Qingjie, Han Dongyu, *et al.* 2013. Sample granularity of soils and stream sediments in geochemical surveys: A case study of the Niutougou gold deposit, Xiong'er shan gold mine in western Henan Province[J]. *Geology and Exploration*, 49(5): 928 ~ 938 (in Chinese with English abstract).
- Kroner A, Compston W, Zhang Guowei, *et al.* 1988. Age and tectonic setting of Late Archean greenstone-gneiss terrain in Henan Province, China, as revealed by single grain zircon dating[J]. *Geology*, 16: 211 ~ 215.
- Lassiter J C and DePaolo D J. 1997. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: Chemical and isotopic constraints[A]. Mahoney J and Coffin F. Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism, Geophys[C]. Washington, D C: Monogr. Ser., 100. AGU, 335 ~ 355.
- Le Roex A P, Dick H J B and Fisher R L. 1989. Petrology and geochemistry of MORB from 25 E to 46 E along the Southwest Indian Ridge: Evidence for contrasting styles of mantle enrichment[J]. *Journal of Petrology*, 30(4): 947 ~ 986.
- Li Guoping. 2013. Study on structural ore-controlling regularities of altered rock type gold deposit in the fracture zone of Xiong'er shan ore concentration area, Henan Province[J]. *Gold*, 34(7): 22 ~ 26 (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 Huan, Xi Xiaoshuang, Wu Chengming, *et al.* 2012. Geochemistry and genesis of andesite from Zhaokalong Fe-Cu polymetallic deposit, Yushu, Qinghai[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 43(9): 3 524 ~ 3 534 (in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang and Sang Longkang. 2002. *Petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 90 ~ 101 (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).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Pirajno Franco, *et al.* 2010. Late Jurassic-Early Cretaceous granitoid magmatism in East Qinling, central-eastern China: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57(1): 51 ~ 78.
- Ni Zhiyao, Wang Renmin, Tong Ying, *et al.* 2003. $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of zircon and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ of amphibole from plagioclase amphibolite in the Taihua Group, Luoning, Henan, China[J]. *Geological Review*, 49(4): 361 ~ 366 (in Chinese with English abstract).
- Niu Hecai, Shan Qiang, Yu Xueyuan, *et al.* 2009. Geochemistry of the Nb-enriched basalt and its significances in Zaheba ophiolite melange [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 916 ~ 924 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Pang Zhenshan, Du Yangsong, Yan Jianshe, *et al.* 2006. Geological Characteristics and Genesis of Mesozoic Granitoids in Western Henan Province[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 1~136(in Chinese).
- Parman S W and Grove T L. 2004. Harzburgite melting with and without H₂O: Experimental data and predictive modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B2): 2 201~2 220.
- Pearce J A, Alabaster T, Shelton A W, *et al.* 1981. The Oman ophiolite as a Cretaceous arc-basin complex: Evidence and implications[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 300(1 454): 299~317.
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [A]. Thorpe. *Orogenic Andesites and Related Rocks*[C]. Chichester, England: John Wiley and Sons, 525~548.
- Plank T. 2005. Constraints from Thorium/Lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents[J]. *Journal of Petrology*, 46(5): 921~944.
- Polat A and Hofmann A W. 2003. Alteration and geochemical patterns in the 3.7~3.8 Ga Isua greenstone belt, west Greenland[J]. *Precambrian Research*, 126(3~4): 197~218.
- Qu Xiaoming, Hou Zengqian and Li Youguo. 2004. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau[J]. *Lithos*, 74(3~4): 131~148.
- Ren Fugen, Li Huimin, Yin Yanjie, *et al.* 2002. Study of isotopic geochronology of Xiong'er Group Henan Province, China[J]. *Progress in Precambrian Research*, 25(1): 41~47(in Chinese with English abstract).
- Robyn T L. 1979. Miocene volcanism in eastern Oregon: An example of calc-alkaline volcanism unrelated to subduction[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 5(1~2): 149~161.
- Rollison H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. Singapore: Longman Singapore Publishers, 160~170.
- Sang Longkang and Ma Changqian. 2012. *Petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 168~180(in Chinese).
- Shao Ji'an, Zhang Lūqiao and Li Daming. 2002. Three Proterozoic extensional events in North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 152~160(in Chinese with English abstract).
- Sklyarov E V, Gladkochub D P, Mazukabzov A M, *et al.* 2003. Neoproterozoic mafic dike swarms of the Sharyzhalgai metamorphic massif, southern Siberian craton[J]. *Precambrian Research*, 122(1): 359~376.
- Sun Shu, Cong Bolin and Li Jiliang. 1981. Evolution of the Henan-Shanxi sedimentary basin of the middle and late Proterozoic age(Part I)[J]. *Scientia Geologica Sinica*, (4): 314~322(in Chinese with English abstract).
- Sun Shu, Zhang Guowei and Chen Zhiming. 1985. Geological Evolution of the Southern North China Block in Precambrian[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1~216(in Chinese).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic basalt: Implication for mantle composition and processes[A]. Saunders A D and Norry M J. *Magnetism in the Ocean Basins*[C]. Geological Society, Special Publication, 42: 313~345.
- Tatsumi Y, Takahashi T, Hirahara Y, *et al.* 2008. New insights into andesite genesis: the role of mantle-derived calc-alkaline and crust-derived tholeiitic melts in magma differentiation beneath Zao Volcano, NE Japan[J]. *Journal of Petrology*, 49(11): 1 971~2 008.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1~312.
- Taylor S R and McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241~265.
- Tian Zhixian, Li Yongjun, Tian Meng, *et al.* 2016. Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and geological significances of volcanic rocks of Haerjiawu Formation in Qiada, west Junggar[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 46(1): 135~145(in Chinese with English abstract).
- Tian Zhixian, Yan Jun, Li Yongjun, *et al.* 2013. LA-ICP-MS zircon U-Pb age, geochemistry and tectonic setting of the volcanic rocks in the Heishantou Formation from the area of Barleik, west Junggar[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(3): 343~352(in Chinese with English abstract).
- Treuil M and Joron J L. 1975. Utilisation des elements hydromagmatophiles pour la simplification de la modalisation quantitative des processus magmatiques: Exemples de l'Afar et de la dorsale medioatlantique[J]. *Society of Italia Mineralogy and Petrology*, 31: 125~174.
- Wang Guan, Xiao Xiaolin, Liu Qiang, *et al.* 2017. Zircon U-Pb age and geochemistry of basaltic andesite from the Songshunangou Au deposit and their geodynamic implication[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 37(3): 375~382(in Chinese with English abstract).
- Wang Qin, Tang Juxing, Fang Xiang, *et al.* 2015. Petrogenetic setting of andesites in Rongna ore block, Tiegelong Cu(Au-Ag) deposit, Duolong ore concentration area, Tibet: Evidence from zircon U-Pb LA-ICP-MS dating and petrogeochemistry of andesites[J]. *Geology in China*, 42(5): 1 324~1 336(in Chinese with English abstract).
- Wang Sushan, Liu Jiayi, Ji Hongwei, *et al.* 2017. Geochronology and geochemistry of the andesites of Longjiang Formation in the Sandaowanzi gold deposit, Heilongjiang Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(8): 2 604~2 618(in Chinese with English abstract).
- Wang Weixing, Deng Jun, Gong Qingjie, *et al.* 2010a. Relationship of

- Wuzhangshan, Huashan and Heyu granite rockmass with gold mineralization, in Xiong'ershan area, western Henan Province[J]. *Gold*, 31(4): 12~17 (in Chinese with English abstract).
- Wang Weixing, Gong Qingjie, Deng Jun, *et al.* 2010b. Study on the geological and geochemical characteristics of quartz porphyry in Song County, Henan Province[J]. *Geology and Exploration*, 46(2): 323~330 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaolei, Jiang Shaoyong, Dai Baozhang, *et al.* 2011. Age, geochemistry and tectonic setting of the Neoproterozoic (ca 830 Ma) gabbros on the southern margin of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 190(1~4): 35~47.
- Wang Zhongliang, Gong Qingjie, Sun Xiang, *et al.* 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb geochronology of quartz porphyry from the Niutougou gold deposit in Songxian County, Henan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86: 373~382.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman, 1~25.
- Wu Fafu, Gong Qingjie, Shi Jianxi, *et al.* 2012. Ore-controlling geological factors of gold deposit in the Xiong'ershan region, western Henan Province[J]. *Geology and Exploration*, 48(5): 865~875 (in Chinese with English abstract).
- Wu Guogan, Xia Bin, Li Wenqian, *et al.* 2005. Andesite of Takezhale ophiolite complex in Xinjiang: Geochemical characteristics and tectonic setting[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(2): 242~251 (in Chinese with English abstract).
- Wu Huaying, Zhang Lianchang, Zhou Xinhua, *et al.* 2008. Geochronology and geochemical characteristics of late Mesozoic andesites in the central Da-Hinggan Mountains, and its genesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1339~1352 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yufeng, Yang Fuquan and Liu Feng. 2016. Geochemical characteristics of basaltic andesite subvolcanic rocks in the Ashale Cu-Zn deposit and their geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(1): 65~80 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Kunpeng, Li Yongjun, Lin Zhao, *et al.* 2015. LA-ICP-MS Zircon age and geochemistry of the Aladeyikesai Formation volcanic rocks in the Halaalate Mountain of west Junggar, Xinjiang, and their tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(5): 843~855 (in Chinese with English abstract).
- Xiao E, Hu Jian, Zhang Junzhong, *et al.* 2012. Petrogeochemistry, zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotopic compositions of the Haoping and Jinshanmiao granites from the Huashan complex batholith in eastern Qinling Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 4031~4046 (in Chinese with English abstract).
- Xie Liangxian, Si Rongjun, Wang Shiyan, *et al.* 2014. Petrology, geochemistry and genesis for volcanics of Xiong'er Group in Songshan area[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 29(3): 408~416 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yonghang, Zhao Taiping, Peng Peng, *et al.* 2007. Geochemical characteristics and geological significance of the Paleoproterozoic volcanic rocks from the Xiaoliangling Formation in the Lüliang area, Shanxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1123~1132 (in Chinese with English abstract).
- Xue Liangwei, Yuan Zhenlei, Zhang Mengshu, *et al.* 1995. Sm-Nd isotopic age of the Taihua Group in Lushan area and its significance[J]. *Geochimica*, 24(supplement): 92~97 (in Chinese).
- Yang Yi. 1990. Petrological characteristics of Xionger Group volcanic rocks from the southern margin of North China Platform and their tectonic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 6(2): 20~29 (in Chinese with English abstract).
- Ye Huishou, Mao Jingwen, Xu Lingang, *et al.* 2008. SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry of the Taishanmiao aluminous A-type granite in western Henan Province[J]. *Geological Review*, 54(5): 699~711 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuanhou, Zhang Shihong, Han Yigui, *et al.* 2006. Strik-slip features of the Machaoying Fault zone and its evolution in the Huaxiong Terrane, southern North China Craton[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36(2): 169~176 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zongqing, Liu Dunyi and Fu Guomin. 1994. Study on Isotopic Age of Metamorphic Strata in Northern Qinling Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~191 (in Chinese).
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Liu Dunyi, *et al.* 2006. Geochronology and Geochemistry of the Ophiolite, Granite and Clastic Sedimentary Rocks in the Qinling Orogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~348 (in Chinese).
- Zhao Junhong and Zhou Meifu. 2007. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle[J]. *Precambrian Research*, 152(1): 27~47.
- Zhao Taiping, Guan Baode and Tu Sen. 1994. Some problems in the study of the volcanic rocks of the Xionger Group on the southern margin of the North China Plate[J]. *Geological Review*, 40(5): 446~455 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping and Jin Chengwei. 1999. Review on the study of Xiong'er Group in past 40-years[J]. *Jour. Geol. & Min. Res. North China*, 14(1): 18~26 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Jin Chengwei, Zhai Mingguo, *et al.* 2002. Geochemistry and petrogenesis of the Xiong'er Group in the southern regions of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 59~69 (in Chinese with English abstract).

- Zhao Taiping, Yuan Zhenlei and Guan Baode. 1998. The characteristics and sedimentary environment of sedimentary interbeds of Xiong'er Group distributed in the juncture of Henan-Shanxi-Shaanxi Provinces[J]. *Henan Geology*, 16(4): 261~272(in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Yuan Zhenlei, Qiang Lizhi, *et al.* 1995. Petrographic characteristics of volcanic lava from Xiong'er Group[J]. *Henan Geology*, 13(4): 268~275(in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Xu Yonghang and Zhai Mingguo. 2007. Petrogenesis and tectonic setting of the Paleoproterozoic Xiong'er Group in the southern part of the North China Craton: A Review[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 191~206(in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Zhai Mingguo, Xia Bin, *et al.* 2004. Zircon SHRIMP dating of the volcanic rocks in the Xiong'er Group: Constraints on initial development time of cover in North China Craton[J]. *Science Bulletin*, 48(22): 2342~2349(in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Zhou Meifu, Jin Chengwei, *et al.* 2001. Discussion on age of the Xiong'er Group in southern margin of North China Craton[J]. *Chinese Journal of Geology*, 36(3): 326~334(in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Zhou Meifu, Zhai Mingguo, *et al.* 2002. Palaeoproterozoic rift-related volcanism of the Xiong'er Group in the North China Craton: Implications for the breakup of Columbia[J]. *International Geology Review*, 44: 336~351.
- Zhao Taiping, Zhuang Jianmin and Yuan Zhenlei. 1996. Rock types and volcanic series of Xiong'er Group on the southern margin of the North China Plate[J]. *Jour. Geol. & Min. Res. North China*, 11(4): 599~606(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua. 1997. *Geochemical Principle of The Trace Elements*[M]. Beijing: Science Press, 7~55(in Chinese).
- 陈衍景, 富士谷, 强立志. 1992. 评熊耳群和西洋河群形成的构造背景[J]. *地质论评*, 38(4): 325~333.
- 陈衍景, 李晶, Pirajno F, 等. 2004. 东秦岭上宫金矿流体成矿作用: 矿床地质和包裹体研究[J]. *矿物岩石*, 24(3): 1~12.
- 陈越, 朱弟成, 赵志丹, 等. 2010. 西藏北冈底斯巴木错安山岩的年代学、地球化学及岩石成因[J]. *岩石学报*, 26(7): 2193~2206.
- 崔敏利, 张宝林, 彭澎, 等. 2010. 豫西崤山早元古代中酸性侵入岩锆石/斜锆石 U-Pb 测年及其对熊耳火山岩系时限的约束[J]. *岩石学报*, 26(5): 1541~1549.
- 范宏瑞, 谢亦汉, 赵瑞, 等. 1994. 豫西熊耳山地区岩石和金矿床稳定同位素地球化学研究[J]. *地质找矿论丛*, 9: 54~64.
- 高昕宇, 赵太平, 原振雷, 等. 2010. 华北陆块南缘中生代合峪花岗岩的地球化学特征与成因[J]. *岩石学报*, 26(12): 3485~3506.
- 郭波, 朱赖民, 李桦, 等. 2009. 华北陆块南缘华山和合峪花岗岩岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成与成岩动力学背景[J]. *岩石学报*, 25(2): 265~281.
- 韩以贵. 2007. 豫西地区构造岩浆作用与金成矿的关系——同位素年代学的新证据(博士学位论文)[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1~136.
- 河南省地质局地质研究所和长春地质学院火山岩研究组. 1976. 豫西熊耳群富钾火山岩建造特征[J]. *长春地质学院学报*, (2): 32~45.
- 侯红星, 张德会. 2014. 熊耳山地区红庄金矿床地质特征及成因[J]. *矿床地质*, 33(2): 350~360.
- 胡受奚, 林潜龙. 1988. 华北与华南古板块拼合带地质和成矿[M]. 南京: 南京大学出版社, 1~558.
- 胡受奚, 赵懿英, 徐金方, 等. 1997. 华北地台金成矿地质[M]. 北京: 科学出版社, 1~220.
- 贾承造. 1985. 熊耳群火山岩系岩石地球化学特征及其大地构造意义[J]. *河南地质*, (2): 39~43.
- 贾承造, 施央申, 郭令智. 1988. 东秦岭板块构造[M]. 南京: 南京大学出版社, 1~130.
- 贾玉杰, 龚庆杰, 韩东昱, 等. 2013. 化探方法技术之取样粒度研究——以豫西牛头沟金矿 1:5 万化探普查为例[J]. *地质与勘探*, 49(5): 928~938.
- 李国平. 2013. 河南熊耳山矿集区破碎带蚀变岩型金矿床构造控矿规律研究[J]. *黄金*, 34(7): 22~26.
- 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.
- 李欢, 奚小双, 吴城明, 等. 2012. 青海玉树赵卡隆铁铜多金属矿床安山岩地球化学特征及其成因[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 43(9): 3524~3534.
- 路凤香, 桑隆康. 2002. *岩石学*[M]. 北京: 地质出版社, 90~101.
- 卢仁, 梁涛, 白风军, 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.
- 倪志耀, 王仁民, 童英, 等. 2003. 河南洛宁太华岩群斜长角闪岩的锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 和角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄[J]. *地质论评*, 49(4): 361~366.
- 牛贺才, 单强, 于学元, 等. 2009. 扎河坝蛇绿混杂岩内富铌玄武岩(安山)岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 25(4): 916~924.
- 庞振山, 杜杨松, 燕建设, 等. 2006. 河南省西部地区中生代花岗岩类地质特征及成因[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1~136.
- 任富根, 李惠民, 殷艳杰, 等. 2002. 豫西地区熊耳群的地质年代学

- 研究[J]. 前寒武纪研究进展, 25(1): 41~47.
- 桑隆康, 马昌前. 2012. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 168~180.
- 邵济安, 张履桥, 李大明. 2002. 华北克拉通元古代的三次伸展事件[J]. 岩石学报, 18(2): 152~160.
- 孙 枢, 丛柏林, 李继亮. 1981. 豫、陕中-晚元古代沉积盆地[J]. 地质科学, (4): 314~322.
- 孙 枢, 张国伟, 陈志明. 1985. 华北断块区南部前寒武纪地质演化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1~216.
- 田陟贤, 李永军, 田 猛, 等. 2016. 西准噶尔恰达地区哈尔加乌组火山岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 46(1): 135~145.
- 田陟贤, 阎 军, 李永军, 等. 2013. 西准噶尔巴尔雷克一带石炭系黑山头组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造环境[J]. 地质学报, 87(3): 343~352.
- 王 冠, 肖晓林, 刘 强, 等. 2017. 松树南沟金矿区玄武安山岩锆石 U-Pb 年代学地球化学及其动力学意义[J]. 四川地质学报, 37(3): 375~382.
- 王 勤, 唐菊兴, 方 向, 等. 2015. 西藏多龙矿集区铁格隆南铜(金银)矿床荣那矿段安山岩成岩背景: 来自锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学的证据[J]. 中国地质, 42(5): 1 324~1 336.
- 王苏珊, 刘佳宜, 季洪伟, 等. 2017. 黑龙江三道湾子金矿区龙江组安山岩的年代学与地球化学[J]. 岩石学报, 33(8): 2 604~2 618.
- 王卫星, 邓 军, 龚庆杰, 等. 2010a. 豫西熊耳山五丈山、花山、合峪花岗岩体与金成矿关系[J]. 黄金, 31(4): 12~17.
- 王卫星, 龚庆杰, 邓 军, 等. 2010b. 河南嵩县地区石英斑岩地质与地球化学特征研究[J]. 地质与勘探, 46(2): 323~330.
- 吴发富, 龚庆杰, 石建喜, 等. 2012. 熊耳山矿集区金矿控矿地质要素分析[J]. 地质与勘探, 48(5): 865~875.
- 吴国干, 夏 斌, 李文铅, 等. 2005. 新疆塔克札勒蛇绿混杂岩中安山岩的地球化学特征及其构造环境[J]. 大地构造与成矿学, 29(2): 242~251.
- 吴华英, 张连昌, 周新华, 等. 2008. 大兴安岭中段晚中生代安山岩年代学和地球化学特征及成因分析[J]. 岩石学报, 24(6): 1 339~1 352.
- 吴玉峰, 杨富全, 刘 锋. 2016. 新疆阿舍勒铜锌矿区潜玄武安山岩的岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 35(1): 65~80.
- 向坤鹏, 李永军, 李 钊, 等. 2015. 新疆西准噶尔哈拉阿拉特山火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及意义[J]. 地质学报, 89(5): 843~855.
- 肖 娥, 胡 建, 张遵忠, 等. 2012. 东秦岭花山复式岩基中蒿坪与金山庙花岗岩体岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 28(12): 4 031~4 046.
- 谢良鲜, 司荣军, 王世炎, 等. 2014. 嵩山地区熊耳群火山岩岩石学、地球化学及成因探讨[J]. 地质找矿论丛, 29(3): 408~416.
- 徐勇航, 赵太平, 彭 澎, 等. 2007. 山西吕梁地区古元古界小两岭组火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 23(5): 1 123~1 132.
- 薛良伟, 原振雷, 张萌树, 等. 1995. 鲁山太华岩群 Sm-Nd 同位素年龄及其意义[J]. 地球化学, 24(增刊): 92~97.
- 杨 忆. 1990. 华北地台南缘熊耳群火山岩特点及形成的构造背景[J]. 岩石学报, 6(2): 20~29.
- 叶会寿, 毛景文, 徐林刚, 等. 2008. 豫西太山庙铝质 A 型花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征[J]. 地质论评, 54(5): 699~711.
- 张元厚, 张世红, 韩以贵, 等. 2006. 华熊地块马超营断裂走滑特征及演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 36(2): 169~176.
- 张宗清, 刘敦一, 付国民. 1994. 北秦岭变质地层同位素年代研究[M]. 北京: 地质出版社, 1~191.
- 张宗清, 张国伟, 刘敦一, 等. 2006. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1~348.
- 赵太平, 关保德, 屠 森. 1994. 华北板块南缘熊耳群火山岩研究的若干问题[J]. 地质论评, 40(5): 446~455.
- 赵太平, 金成伟. 1999. 熊耳群研究四十年[J]. 华北地质矿产杂志, 14(1): 18~26.
- 赵太平, 金成伟, 翟明国, 等. 2002. 华北陆块南部熊耳群火山岩的地球化学特征与成因[J]. 岩石学报, 18(1): 59~69.
- 赵太平, 徐勇航, 翟明国. 2007. 华北陆块南部元古宙熊耳群火山岩的成因与构造环境: 事实与争议[J]. 高校地质学报, 13(2): 191~206.
- 赵太平, 原振雷, 关保德. 1998. 豫晋陕熊耳群沉积岩夹层特征与沉积环境[J]. 河南地质, 16(4): 261~272.
- 赵太平, 原振雷, 强立志, 等. 1995. 熊耳群火山熔岩的岩相学特征[J]. 河南地质, 13(4): 268~275.
- 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, 48(22): 2 342~2 349.
- 赵太平, 周美夫, 金成伟, 等. 2001. 华北陆块南缘熊耳群形成时代讨论[J]. 地质科学, 36(3): 326~334.
- 赵太平, 庄建敏, 原振雷. 1996. 华北板块南缘熊耳群火山岩岩石类型及火山岩系列[J]. 华北地质矿产杂志, 11(4): 599~606.
- 赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 7~55.