

doi:10.3799/dqkx.2016.022

豫西火神庙岩体锆石 U-Pb 年代学、 地球化学及 Hf 同位素组成

王 赛¹,叶会寿^{2*},杨永强¹,张兴康³,苏慧敏⁴,杨晨英¹

1.中国地质大学地球科学与资源学院,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

3.河北省地质调查院,河北石家庄 050081

4.中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074

摘要:火神庙岩体位于华北陆块南缘栾川矿集区西部,为一杂岩体,该岩体与火神庙钼矿床密切相关。目前,人们对火神庙岩体的研究程度较低,严重制约了对火神庙钼矿床成因的认识。系统开展了年代学、地球化学和 Hf 同位素组成研究。结果表明,石英闪长岩、二长花岗岩和花岗斑岩的形成年龄分别为 150.3 ± 0.6 Ma、 146.0 ± 0.6 Ma 和 145.1 ± 0.5 Ma,为栾川矿集区晚侏罗世第 2 次大规模岩浆活动的产物。火神庙杂岩体属于 I 型花岗岩,是不同源区部分熔融形成的岩浆上升就位的结果。石英闪长岩是富集岩石圈地幔部分熔融的产物;二长花岗岩和花岗斑岩是富集岩石圈地幔部分熔融形成的镁铁质岩浆与太华群 TTG 岩系部分熔融形成的长英质岩浆混合后上升就位的结果。

关键词:锆石 U-Pb 年代学;地球化学;Hf 同位素;火神庙岩体;豫西。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2016)02-0293-24

收稿日期: 2015-07-21

Zircon U-Pb Chronology, Geochemistry and Hf Isotopic Compositions of the Huoshenmiao Pluton, Western Henan

Wang Sai¹, Ye Huishou^{2*}, Yang Yongqiang¹, Zhang Xingkang³, Su Huimin⁴, Yang Chenying¹

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, China Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Hebei Institute of Geological Survey, Shijiazhuang 050081, China

4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The Huoshenmiao pluton located in the west of the Luanchuan ore district, southern margin of the North China Craton (NCC) is mainly composed of quartz diorite, monzo-granite and granite porphyry. The Huoshenmiao pluton is closely related to the Huoshenmiao Mo deposit. While the degree of research on the Huoshenmiao pluton is very low, which seriously restrict the understanding of the genesis of the Huoshenmiao Mo deposit. Three types of rock including quartz diorite, monzo-granite and granite porphyry has been researched by zircon U-Pb chronology, geochemistry and Hf isotope. The forming ages of quartz diorite, monzo-granite and granite porphyry are 150.3 ± 0.6 Ma, 146.0 ± 0.6 Ma and 145.1 ± 0.5 Ma respectively, and are products of the second magmatism of the Luanchuan ore district, Late Jurassic. Geochemistry and zircon Hf isotope show that the Huoshenmiao pluton belongs to I-type granite, and it results from ascending magma formed by partial melting of different source regions. The quartz diorite stems from remelting of the enriched mantle, while the monzo-granite and granite por-

基金项目:国家科技支撑计划项目(No.2011BAB04B06);国家自然科学基金项目(No.41272104);国土资源部公益性行业基金项目(No.200911007-08)。

作者简介:王赛(1989—),男,硕士研究生,主要从事斑岩—矽卡岩型钼矿床成矿理论方面的研究.E-mail: wangsainb@163.com

* 通讯作者:叶会寿,E-mail: yehuishou@163.com

引用格式:王赛,叶会寿,杨永强,等,2016.豫西火神庙岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素组成.地球科学,41(2):293-316.

phyry are the products of mafic magma derived from remelting of the enriched mantle mixed with felsic magma derived from remelting of the Taihua TTG.

Key words: zircon U-Pb chronology; geochemistry; Hf isotope; Huoshenmiao pluton; West Henan.

华北陆块南缘东秦岭钼矿带东部的栾川矿集区是中国最重要的钼多金属矿集区之一(吕文德等, 2006; 叶会寿等 2006), 研究人员已在矿集区中东部的南泥湖、上房沟、石宝沟等花岗斑岩体周围发现了众多的斑岩—矽卡岩型钼(钨)矿床、矽卡岩型多金属硫铁矿床和热液脉型铅锌银矿床, 探明钼资源储量达 300×10^4 t、铅锌达 700×10^4 t、银达 8 000t, 但矿集区西部的找矿工作一直没有取得重大进展。近年来, 随着中国地质调查局地质调查项目的开展, 在栾川矿集区西部火神庙岩体周围发现了火神庙钼矿床, 查明钼资源储量 5 万余吨, 平均品位 0.12% (辛志刚, 2010), 它的发现显示了矿集区西部具有巨大的找矿潜力, 为在该地区寻找钼多金属矿产提供了依据。矿床地质特征研究显示火神庙钼矿床与火神庙岩体密切相关, 为一矽卡岩型钼矿床(焦二中, 2007; 卢克学等, 2008; 辛志刚, 2010; 何亚清和陈凤群, 2013; 王赛等, 2014a, 2014b)。然而, 目前火神庙岩体的研究程度较低, 徐兆文和任启江(1988)报道了火神庙岩体二长(石英)闪长岩和二长花岗岩的地球化学特征, 尚缺少花岗斑岩地球化学特征的报道; 杨荣勇等(1997)测得火神庙岩体全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 162.8 ± 6.2 Ma, 由于全岩 Rb-Sr 同位素体系的局限性(封闭温度较低(650 ± 50 °C; Harrison *et al.*, 1979), 亚固相扩散和热液蚀变均可导致 Rb-Sr 同位素体系重置)等条件的影响, 导致该年龄误差较大, 不能对火神庙岩体的形成时代进行较好的约束, 其与王赛等(2014a)报道的辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄(145.7 ± 3.9 Ma)差距也较大(>10 Ma), 远超过一般成矿系统的持续时间(Bodnar, 2009), 因此这一较大的年龄差严重制约了对火神庙钼矿床成因的认识。本文在前人研究的基础上, 结合野外地质调查, 进一步厘定了火神庙岩体的岩石组成, 并对不同类型岩石进行了系统的年代学、地球化学及 Hf 同位素组成研究, 旨在精确厘定火神庙岩体的形成时代、探讨火神庙岩体的成因, 并为进一步确定火神庙钼矿床的成因提供依据。

1 栾川矿集区地质

栾川矿集区位于华北陆块南缘栾川断裂带与马

超营断裂带之间的栾川台缘褶皱带内(图 1)。区内出露地层主要有中元古界官道口群、新元古界栾川群和新元古界—早古生界陶湾群。官道口群主要由中浅变质滨浅海相碎屑岩和含燧石条带白云质大理岩组成; 栾川群主要包括碎屑岩、碳酸盐岩和碱性火山岩; 陶湾群主要由含砾灰岩、大理岩、千枚岩和石英岩组成。

矿集区内发育一系列倒转褶皱和逆掩推覆断层(吕文德等, 2006)。褶皱构造主要有杨树凹—白沙洞向斜、银河沟背斜、增河口向斜、黄背岭—石宝沟背斜和核桃岔向斜(叶会寿等, 2006)。断裂构造按走向可分为 NWW 向和 NE 向 2 组, NWW 向断裂有栾川断裂、庙子断裂以及一系列自北向南推覆的逆冲断裂, 其延伸长、规模大, 是矿集区内的主要断裂; NE 向断裂呈近等间距“行列式”分布(杨阳等, 2012), 主要有黄背岭—南泥湖—马圈断裂带和石宝沟—庄科断裂带。

矿集区内岩浆多期次侵位, 主要发育有新元古代变辉长岩(830 Ma, Wang *et al.*, 2011)和晚侏罗世花岗斑岩、晚侏罗世花岗斑岩, 如南泥湖、上房沟、石宝沟、黄背岭等, 主要分布于 NWW 向与 NE 向断裂交汇处, 具有数量多、规模小(出露面积 <3 km²)、分异程度高的特点, 在时间、空间和成因上与钼多金属矿化密切相关(李永峰等, 2003, 2005; 吕文德等, 2006; 叶会寿等, 2006; 毛景文等, 2009)。年代学、地球化学及同位素研究显示花岗斑岩具有高硅、富钾、碱性—钙碱性以及准铝质—弱过铝质的特点, 属 I 型花岗岩, 主要形成于古老地壳物质的部分熔融、并有少量地幔组分的参与, 形成于中生代晚侏罗世挤压向伸展转换的构造环境(毛景文等, 2005; 包志伟等, 2009; Mao *et al.*, 2010; 王晓霞等, 2011; 杨阳等, 2012)。

矿集区内发育大量斑岩—矽卡岩型钼矿床、矽卡岩型多金属硫铁矿床和热液脉型铅锌银矿床, 它们围绕花岗斑岩体由内向外规律性分布: 钼矿床(如南泥湖—三道庄、上房沟、火神庙等)主要赋存于花岗岩体内及外接触带中; 多金属硫铁矿床(如骆驼山、银和沟等)主要赋存于花岗岩体外接触带的层状矽卡岩中; 铅锌银矿床(如冷水北沟、杨树凹、百炉沟、银洞沟等)主要赋存于花岗岩体外围围岩 NE 向断裂带中, 为栾川矿集区晚侏罗世同一构造—岩浆—流体活动的产物(叶会寿等, 2006; 毛景文等, 2009)。

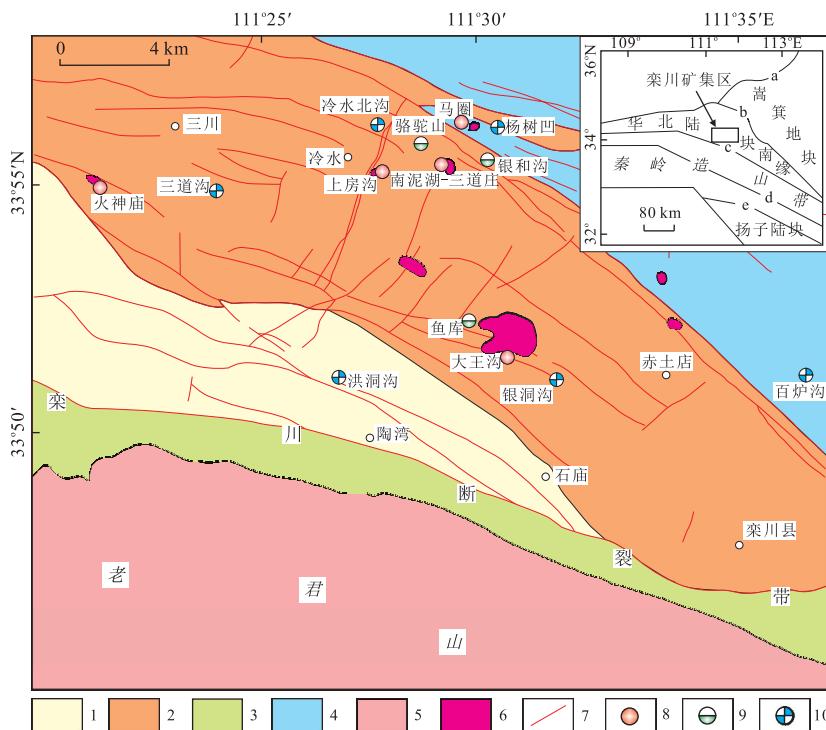


图1 栾川钼多金属矿集区地质简图

Fig.1 Geological sketch of the Luanchuan ore district

1.新元古界—早古生界陶湾群含砾灰岩、大理岩、千枚岩和石英岩；2.新元古界栾川群碎屑岩、碳酸盐岩和碱性火山岩；3.中元古界—新元古界宽坪群大理岩和基性火山岩；4.中元古界官道口群碎屑岩和含燧石条带大理岩；5.早白垩世花岗岩；6.晚侏罗世花岗斑岩；7.断裂；8.斑岩—矽卡岩型钼矿床；9.矽卡岩型多金属硫铁矿床；10.热液脉型铅锌银矿床；a.太行山断裂带；b.三门峡—宝丰断裂带；c.栾川断裂带；d.商丹断裂带；e.南漳断裂带；据叶会寿等(2006)修改

2 岩体地质及岩相学特征

火神庙岩体位于栾川矿集区西部、石家沟—火神庙背斜的北翼，呈小岩珠侵位于三川组大理岩中，在平面上呈近EW向眼球状产出，长约650 m，宽约300 m，出露面积约0.2 km²(杨荣勇等, 1997)。火神庙岩体为一杂岩体，主要由石英闪长岩、二长花岗岩和花岗斑岩组成。石英闪长岩出露于火神庙岩体的外围，构成了火神庙岩体的主体；花岗斑岩呈带状出露于火神庙岩体的中部；二长花岗岩呈椭圆状出露于火神庙岩体的中心、包裹于花岗斑岩中，钼矿体则主要赋存于火神庙岩体东南部花岗斑岩与三川组大理岩接触带的矽卡岩中(图2)。

石英闪长岩(图3a)：深灰色，中细粒花岗结构(图3b)，块状构造，主要矿物有斜长石(50%~70%)、角闪石(15%~20%)和石英(5%~10%)，次要矿物有钾长石(3%~5%)、黑云母(2%~4%)和辉石(1%~2%)。斜长石，半自形—自形板柱状，粒径为2~6 mm，发育聚片双晶(图3b)、卡钠复合双晶和环带结构(图3c)，部分发生微弱绢云母化；角闪石，半自形—

自形长柱状，粒径为1~4 mm，可见角闪石简单双晶(图3d)，部分发生微弱的绿泥石化；石英，他形粒状，粒径为0.5~2.0 mm，主要分布于其他矿物颗粒之间；钾长石，半自形—他形板状，粒径为2~3 mm，发育卡式双晶，部分发生微弱的高岭土化；黑云母，褐绿色，

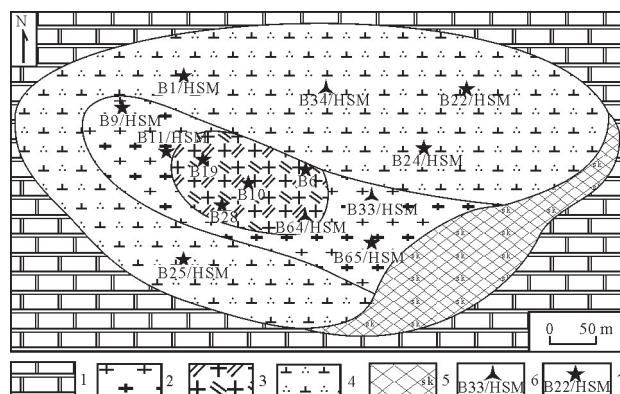


图2 火神庙岩体地质简图

Fig.2 Geological sketch of the Huoshenmiao pluton

1.三川组大理岩；2.花岗斑岩；3.二长花岗岩；4.石英闪长岩；5.矽卡岩型钼矿体；6.年代学及Hf同位素分析样品及编号；7.地球化学分析样品及编号

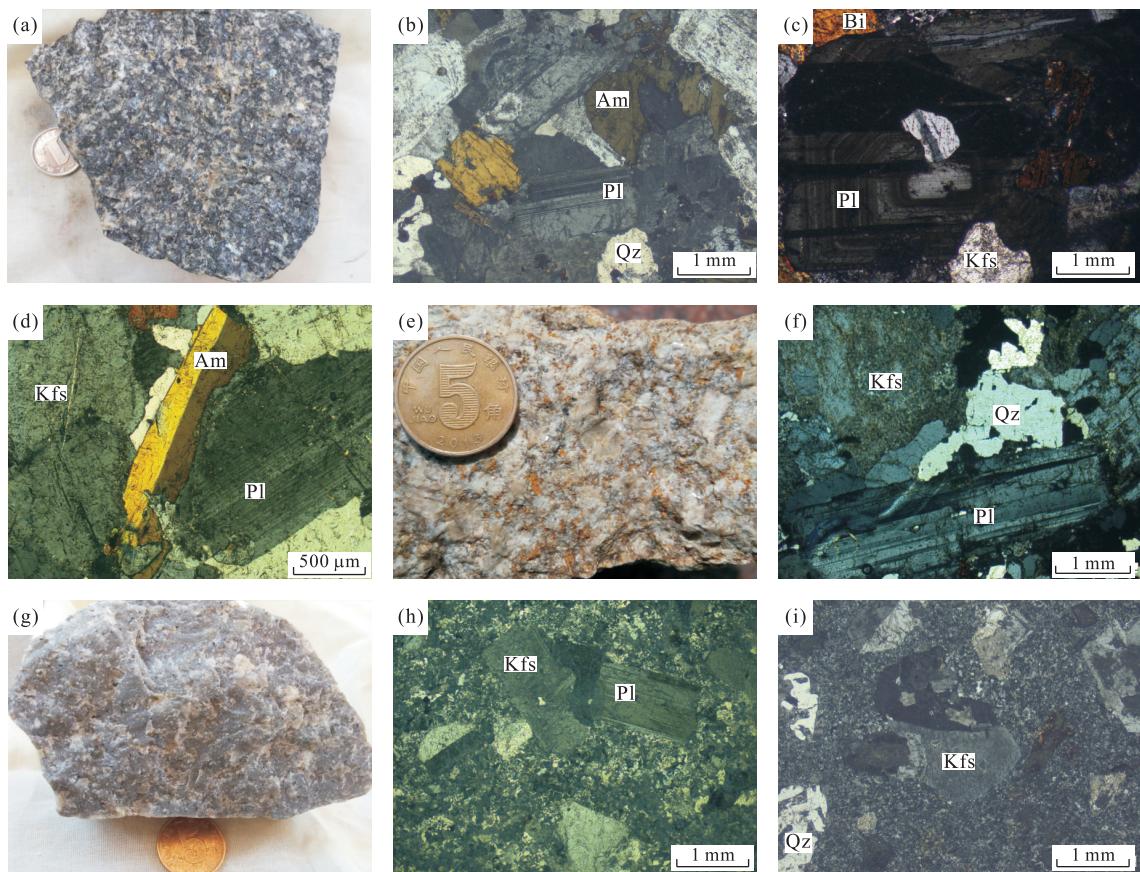


图 3 火神庙岩体岩相学特征

Fig.3 Petrography of the Huoshenmiao pluton

a.石英闪长岩;b.石英闪长岩的中细粒粒状结构和斜长石聚片双晶;c.石英闪长岩中的斜长石环带结构;d.石英闪长岩中的角闪石简单双晶;e.二长花岗岩;f.二长花岗岩的中细粒粒状结构和斜长石聚片双晶;g.花岗斑岩;h.花岗斑岩的斑状结构;i.花岗斑岩中的石英发生溶蚀;Qz.石英;Pl.斜长石;Am.角闪石;Bi.黑云母;Kfs.钾长石

半自形—自形鳞片状,粒径为0.5~2.0 mm;辉石,粒状,粒径为0.5~1.0 mm,发育不完全解理.副矿物有锆石、磷灰石、磁铁矿、钛铁矿等.

二长花岗岩(图3e):灰白色—肉红色,中细粒花岗结构(图3f),块状构造,主要矿物有钾长石(30%~40%)、石英(25%~35%)和斜长石(20%~30%),次要矿物为黑云母(1%~2%).钾长石,半自形—他形板柱状,粒径为1~3 mm,见卡式双晶,部分发生微弱高岭土化;石英,他形粒状,粒径为0.5~1.5 mm,主要分布于其他矿物颗粒之间;斜长石,半自形—自形板状,粒径为1~3 mm,见聚片双晶(图3f)和卡钠复合双晶,部分发生微弱绢云母化;黑云母,褐色,半自形鳞片状,粒径为0.5~1.0 mm.副矿物有锆石、磷灰石、磁铁矿、钛铁矿等.

花岗斑岩(图3g):灰白色,斑状结构(图3h 和3i),块状构造.斑晶为钾长石、斜长石和石英,含量约为15%~25%,粒径为0.5~2.0 mm.钾长石斑

晶,半自形—他形板柱状,发育卡式双晶,部分发生微弱高岭土化;斜长石斑晶,半自形—他形板状,发育聚片双晶,部分发生微弱的绢云母化;石英斑晶,他形粒状,普遍被基质交代,发生溶蚀现象(图3i).基质为隐晶质,成分与斑晶相同.副矿物有锆石、磷灰石、磁铁矿、钛铁矿等.

3 样品采集与分析方法

用于LA-(MC)-ICPMS锆石U-Pb定年、地球化学及Hf同位素分析的石英闪长岩、二长花岗岩和花岗斑岩分别来自于火神庙岩体3个不同类型的岩石,具体采样位置见图2.锆石分选工作是在北京天和信矿业技术开发有限公司完成的,阴极发光(cathode luminescence,简称CL)照相是在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成的.LA-(MC)-ICPMS锆石U-Pb定年是在中国地质调查局天津

地质矿产研究所同位素实验室完成的,仪器配置和实验流程见李怀坤等(2010).实验过程中采用锆石标样 GJ1 进行 U/Pb 同位素分馏校正(Jackson *et al.*, 2004),并通过²⁰⁸Pb 校正法对普通铅进行校正(Andersen, 2002),同时利用 NIST612 作为外标计算锆石的 U/Th/Pb 含量,最后利用 ICPMSData-Cal 程序(Liu *et al.*, 2010)和 Isoplot 程序(Ludwig, 2003)对数据进行处理。

样品主量、微量及稀土元素的分析测试工作是在广州澳实矿物实验室完成的. 主量元素由荷兰 PANalytical 公司生产的 Axios 仪器利用熔片 X 射线荧光光谱法进行测定,并采用等离子光谱和化学法测定进行互相检测. 微量及稀土元素利用美国 PerkinElmer 公司生产的 Elan9000 电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行测定. 主量元素的分析精度和准确度优于 5%,微量及稀土元素的分析精度和准确度优于 10%.

锆石 Hf 同位素测试是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进行的,仪器配置和实验流程见侯可军等(2007). 实验过程中采用锆石标样 GJ1 作为参考物质(Jackson *et al.*, 2004),其¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 加权平均值为 0.281 997 ± 12 (*n* = 24),与文献报道值(0.282 015 ± 19, Elhlou *et al.*, 2006; 0.282 008 ± 25, 侯可军等, 2007)在误差范围内基本一致.

4 分析结果

4.1 LA-(MC)-ICPMS 锆石 U-Pb 定年

对火神庙岩体石英闪长岩(样品编号:B34/HSM)、二长花岗岩(B64/HSM)和花岗斑岩(B33/HSM)进行了锆石 U-Pb 年代学研究,具体结果见表 1,所测锆石的 CL 图像、测点位置及相应的 U-Pb 年龄见图 4,年龄谐和图见图 5.

CL 图像显示所测锆石多呈柱状或长柱状,自形程度较高,颗粒较大,长为 100~300 μm,宽为 50~100 μm,长宽比为 2:1~4:1,锆石 U 含量为 106 × 10⁻⁶~1 077 × 10⁻⁶,Th/U 比值为 0.32~2.79,平均为 1.14,具有岩浆锆石高 Th/U 比值(>0.4)的特征(Wu and Zheng, 2004),并发育清晰的震荡韵律环带,显示其为岩浆成因(Connely, 2001).

对石英闪长岩和花岗斑岩分别进行了 24 个和 26 个点的锆石 U-Pb 同位素分析,年龄谐和图显示所获锆石 U-Pb 年龄具有很高的谐和度(图 5a 和

5b),所有测点均投影在谐和线上,表明所测锆石未受后期热液的影响. 由于²³⁵U 和²³⁸U 的半衰期和丰度存在差异,导致在年轻锆石中放射性成因²⁰⁷Pb 的丰度比²⁰⁶Pb 低一个数量级,因此对于年龄较小(<1 Ga)的锆石,采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄更为准确(Compton *et al.*, 1992; Griffin *et al.*, 2004). 对所获得的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄进行加权平均计算,得到石英闪长岩 LA-(MC)-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 150.3 ± 0.6 Ma (MSWD = 0.22)、花岗斑岩 LA-(MC)-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 145.1 ± 0.5 Ma (MSWD=2.0).

对二长花岗岩进行了 24 个点的锆石 U-Pb 同位素分析,其中 B64/HSM-17 的 Th/U 比值为 0.063,与变质锆石相当,所以其²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄无法代表岩体的形成年龄;由于 B64/HSM-1、B64/HSM-8 和 B64/HSM-14 的 Pb 含量较高,且²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄变化较大、精度较低,故舍去; B64/HSM-7 所获²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 156 ± 1 Ma,与矿集区内南泥湖、石宝沟岩体较老的年龄相当(毛景文等, 2005; 向君峰等, 2012; 杨阳等, 2012),可能记录了该地区一次更早的岩浆侵位事件;其余 19 个点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄基本一致,获得加权平均年龄为 146.0 ± 0.4 Ma (MSWD=0.08),但年龄谐和图显示所获锆石 U-Pb 年龄谐和度较低(图 5c),除少数点位于谐和线上外,多数锆石均发生不同程度的铅丢失,沿不一致线分布,不一致线的上交点年龄为 146.0 ± 0.6 Ma (MSWD = 0.08),与利用 Tera-Wasserburg 图解(图 5d; Tera and Wasserburg, 1972)获得不一致线的下交点年龄(146.0 ± 0.6 Ma, MSWD=0.09)完全一致,显示测年结果具有很高的可靠性,因此笔者认为二长花岗岩的 LA-(MC)-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 146.0 ± 0.6 Ma (MSWD=0.09).

4.2 岩石地球化学

对火神庙岩体石英闪长岩(B22/HSM、B24/HSM、B1/HSM 和 B25/HSM)、二长花岗岩(B6、B10、B19 和 B28)和花岗斑岩(B9/HSM、B11/HSM、B33/HSM 和 B65/HSM)进行了主量、微量和稀土元素分析,主量元素分析结果见表 2,微量元素分析结果见表 3.

4.2.1 主量元素 火神庙岩体中,石英闪长岩 SiO₂ 含量较低(SiO₂ = 56.79%~61.96%),镁、铁、钙含量较高(MgO = 1.49%~2.73%, Fe₂O₃ = 4.15%~8.02%, CaO = 4.44%~5.75%),与一般中偏酸性岩

表 1 火神庙岩体 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄测定结果

Table 1 LA-MC-ICPMS zircon U-Pb data of the Huoshenniao pluton

样品号	Pb(10^{-6})	U(10^{-6})	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	同位素比值				同位素年龄(Ma)							
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\text{l}\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ		
B34HSM1	9	350	0.700	0.049 6	0.002 1	0.162 5	0.007 0	0.023 7	0.000 2	178	97	153	7	151	1
B34HSM2	9	346	0.750	0.049 1	0.002 0	0.160 3	0.006 7	0.023 7	0.000 2	154	96	151	6	151	1
B34HSM-3	15	575	1.020	0.049 4	0.001 6	0.161 1	0.005 4	0.023 6	0.000 2	168	77	152	5	151	1
B34HSM-4	12	471	0.850	0.049 8	0.003 2	0.161 0	0.010 2	0.023 4	0.000 2	188	148	152	10	149	2
B34HSM-5	11	436	0.800	0.049 4	0.002 5	0.161 0	0.008 4	0.023 6	0.000 2	168	119	152	8	151	1
B34HSM-6	8	324	0.850	0.049 6	0.005 9	0.161 8	0.019 4	0.023 7	0.000 3	176	277	152	18	151	2
B34HSM-7	11	433	0.750	0.049 5	0.001 9	0.160 6	0.006 7	0.023 5	0.000 2	170	90	151	6	150	2
B34HSM-8	12	460	0.980	0.049 8	0.001 4	0.161 7	0.004 6	0.023 5	0.000 2	187	64	152	4	150	1
B34HSM-9	11	443	0.720	0.049 3	0.001 3	0.160 1	0.004 3	0.023 6	0.000 2	162	61	151	4	150	1
B34HSM-10	6	245	0.710	0.049 6	0.002 2	0.161 2	0.007 1	0.023 6	0.000 2	178	101	152	7	150	1
B34HSM-11	8	333	0.660	0.049 7	0.002 4	0.161 4	0.007 9	0.023 5	0.000 2	183	112	152	7	150	1
B34HSM-12	11	435	0.700	0.049 4	0.001 3	0.160 6	0.004 4	0.023 6	0.000 2	168	62	151	4	150	1
B34HSM-13	11	419	0.670	0.049 9	0.001 5	0.162 5	0.005 1	0.023 6	0.000 2	191	70	153	5	150	2
B34HSM-14	10	363	0.750	0.049 9	0.001 3	0.162 6	0.004 4	0.023 6	0.000 2	191	61	153	4	151	1
B34HSM-15	13	488	0.940	0.049 1	0.001 3	0.159 5	0.004 4	0.023 6	0.000 2	152	62	150	4	150	1
B34HSM-16	13	512	0.860	0.049 6	0.001 5	0.161 7	0.005 5	0.023 7	0.000 3	174	71	152	5	151	2
B34HSM-17	10	395	0.640	0.049 2	0.002 0	0.160 6	0.006 9	0.023 7	0.000 2	159	97	151	6	151	1
B34HSM-18	7	296	0.580	0.049 6	0.001 8	0.160 1	0.006 0	0.023 4	0.000 2	177	85	151	6	149	1
B34HSM-19	11	427	0.660	0.049 8	0.001 5	0.160 9	0.005 0	0.023 4	0.000 2	186	70	151	5	149	1
B34HSM-20	6	230	0.540	0.049 4	0.002 4	0.161 1	0.008 0	0.023 7	0.000 2	167	115	152	8	151	1
B34HSM-21	11	454	0.730	0.049 7	0.001 4	0.159 8	0.004 7	0.023 3	0.000 2	183	67	151	4	148	1
B34HSM-22	11	453	0.730	0.049 1	0.001 3	0.160 3	0.004 3	0.023 7	0.000 2	154	62	151	4	151	1
B34HSM-23	10	418	0.680	0.049 3	0.001 3	0.161 0	0.004 4	0.023 7	0.000 2	161	61	152	4	151	1
B34HSM-24	8	321	0.620	0.049 4	0.001 8	0.161 6	0.006 1	0.023 7	0.000 2	169	87	152	6	151	1
B64/HSM-1	30	527	0.585	0.096 2	0.002 5	0.752 1	0.051 2	0.056 7	0.002 9	1551	48	569	39	356	18
B64/HSM-2	13	567	0.593	0.054 1	0.001 4	0.170 5	0.004 4	0.023 9	0.000 2	154	58	160	4	146	1
B64/HSM-3	11	446	0.937	0.059 2	0.001 3	0.186 8	0.004 2	0.022 9	0.000 1	573	48	174	4	146	1
B64/HSM-4	12	480	0.808	0.050 2	0.000 9	0.158 6	0.002 9	0.022 9	0.000 1	204	42	149	3	146	1
B64/HSM-5	11	460	0.883	0.067 1	0.002 8	0.211 9	0.008 9	0.022 9	0.000 2	841	86	195	8	146	1
B64/HSM-6	11	462	0.890	0.061 6	0.004 0	0.195 0	0.013 8	0.022 9	0.000 1	374	58	181	13	146	1
B64/HSM-7	11	420	1.037	0.063 5	0.001 1	0.214 8	0.004 0	0.024 5	0.000 1	725	37	198	4	156	1
B64/HSM-8	33	466	0.692	0.093 5	0.000 9	0.862 7	0.026 7	0.066 9	0.001 7	1497	18	632	20	418	11
B64/HSM-9	9	378	1.235	0.054 4	0.001 2	0.172 5	0.004 0	0.023 0	0.000 1	388	48	162	4	147	1
B64//HSM-10	13	551	0.640	0.051 3	0.000 7	0.161 9	0.002 2	0.022 9	0.000 1	253	31	152	2	146	1
B64//HSM-11	13	554	0.625	0.051 7	0.000 8	0.163 0	0.002 6	0.022 9	0.000 1	270	37	153	2	146	1
B64//HSM-12	9	338	1.428	0.054 8	0.000 7	0.173 3	0.002 2	0.022 9	0.000 1	403	28	162	2	146	1
B64//HSM-13	9	346	1.380	0.075 1	0.001 9	0.237 0	0.006 1	0.022 9	0.000 1	1071	52	216	6	146	1
B64//HSM-14	49	504	0.461	0.086 6	0.000 9	1.137 1	0.034 3	0.095 3	0.002 5	1351	20	771	23	587	15
B64//HSM-15	8	326	1.545	0.049 4	0.001 9	0.156 1	0.006 1	0.022 9	0.000 1	165	89	147	6	146	1
B64//HSM-16	9	393	0.317	0.058 7	0.001 2	0.185 1	0.003 9	0.022 9	0.000 1	554	43	172	4	146	1

续表 1

样品号	Pb(10 ⁻⁶)	U(10 ⁻⁶)	²³² Th/ ²³⁸ U	同位素比值				同位素年龄(Ma)							
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	^{1σ}	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	^{1σ}	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	^{1σ}	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb					
B64/HSM-17	9	452	0.063	0.058 3	0.000 6	0.182 0	0.001 9	0.022 6	0.000 1	543	22	170	2	144	1
B64/HSM-18	14	573	0.581	0.055 4	0.001 0	0.174 8	0.003 3	0.022 9	0.000 1	429	40	164	3	146	1
B64/HSM-19	8	291	1.829	0.053 1	0.001 3	0.167 3	0.004 2	0.022 9	0.000 1	332	55	157	4	146	1
B64/HSM-20	14	585	0.557	0.055 5	0.000 9	0.175 2	0.003 0	0.022 9	0.000 1	433	37	164	3	146	1
B64/HSM-21	13	540	0.658	0.054 7	0.000 9	0.172 4	0.002 7	0.022 9	0.000 1	401	36	162	3	146	1
B64/HSM-22	9	367	1.309	0.051 0	0.001 1	0.160 7	0.003 4	0.022 9	0.000 1	241	48	151	3	146	1
B64/HSM-23	12	507	0.738	0.057 7	0.001 2	0.182 4	0.004 1	0.022 9	0.000 1	519	48	170	4	146	1
B64/HSM-24	10	396	1.142	0.067 6	0.001 2	0.212 9	0.004 1	0.022 8	0.000 1	857	36	196	4	146	1
B33HSM-1	7	246	2.300	0.049 1	0.002 1	0.152 5	0.006 7	0.022 6	0.000 1	150	102	144	6	144	1
B33HSM-2	3	115	1.440	0.048 5	0.009 3	0.152 6	0.028 9	0.022 8	0.000 2	122	450	144	27	146	2
B33HSM-3	16	626	1.730	0.048 9	0.000 7	0.151 3	0.002 0	0.022 4	0.000 1	144	32	143	2	143	1
B33HSM-4	4	164	1.700	0.049 2	0.001 9	0.152 7	0.006 0	0.022 5	0.000 1	158	92	144	6	144	1
B33HSM-5	10	416	1.420	0.049 1	0.000 9	0.152 1	0.002 9	0.022 5	0.000 1	152	44	144	3	143	1
B33HSM-6	10	386	1.740	0.048 9	0.000 9	0.152 3	0.002 8	0.022 6	0.000 1	145	42	144	3	144	1
B33HSM-7	9	318	2.420	0.048 7	0.001 3	0.152 8	0.003 9	0.022 8	0.000 1	134	61	144	4	145	1
B33HSM-8	29	1077	1.990	0.048 9	0.000 7	0.154 4	0.002 0	0.022 9	0.000 1	141	33	146	2	146	1
B33HSM-9	19	705	1.730	0.049 2	0.000 8	0.153 3	0.002 4	0.022 6	0.000 1	158	37	145	2	144	1
B33HSM-10	19	596	2.570	0.048 8	0.000 8	0.153 3	0.002 5	0.022 8	0.000 1	139	38	145	2	145	1
B33HSM-11	7	268	1.500	0.049 1	0.001 7	0.154 7	0.005 4	0.022 9	0.000 1	151	81	146	5	146	1
B33HSM-12	11	384	1.560	0.048 9	0.001 1	0.154 4	0.003 5	0.022 9	0.000 1	141	54	146	3	146	1
B33HSM-13	10	286	2.270	0.048 6	0.001 3	0.153 8	0.004 0	0.022 9	0.000 1	129	61	145	4	146	1
B33HSM-14	16	539	1.400	0.048 9	0.001 2	0.154 3	0.003 8	0.022 9	0.000 1	145	57	146	4	146	1
B33HSM-15	17	528	1.510	0.048 0	0.000 8	0.152 0	0.002 5	0.023 0	0.000 1	100	40	144	2	146	1
B33HSM-16	19	466	2.790	0.048 8	0.000 9	0.154 4	0.002 8	0.023 0	0.000 1	141	43	146	3	146	1
B33HSM-17	10	253	2.390	0.048 8	0.001 8	0.155 1	0.005 6	0.023 0	0.000 1	140	84	146	5	147	1
B33HSM-18	3	106	0.970	0.048 9	0.003 1	0.153 7	0.009 9	0.022 8	0.000 2	143	150	145	9	145	1
B33HSM-19	16	516	1.390	0.048 8	0.000 7	0.153 4	0.002 2	0.022 8	0.000 1	140	34	145	2	145	1
B33HSM-20	22	761	1.090	0.048 9	0.000 8	0.154 6	0.002 5	0.022 9	0.000 1	143	38	146	2	146	1
B33HSM-21	16	555	1.320	0.048 5	0.000 7	0.152 3	0.002 0	0.022 8	0.000 1	122	32	144	2	145	1
B33HSM-22	12	419	1.250	0.049 0	0.001 2	0.153 7	0.003 8	0.022 7	0.000 1	148	57	145	4	145	1
B33HSM-23	14	493	1.310	0.049 4	0.000 9	0.154 0	0.002 6	0.022 6	0.000 1	167	40	145	2	144	1
B33HSM-24	8	228	2.430	0.048 8	0.001 6	0.152 2	0.005 1	0.022 6	0.000 1	136	76	144	5	144	1
B33HSM-25	10	367	1.020	0.049 1	0.001 5	0.154 9	0.004 6	0.022 9	0.000 1	152	69	146	4	146	1
B33HSM-26	7	228	1.470	0.048 8	0.001 7	0.154 1	0.005 5	0.022 9	0.000 1	138	83	145	5	146	1

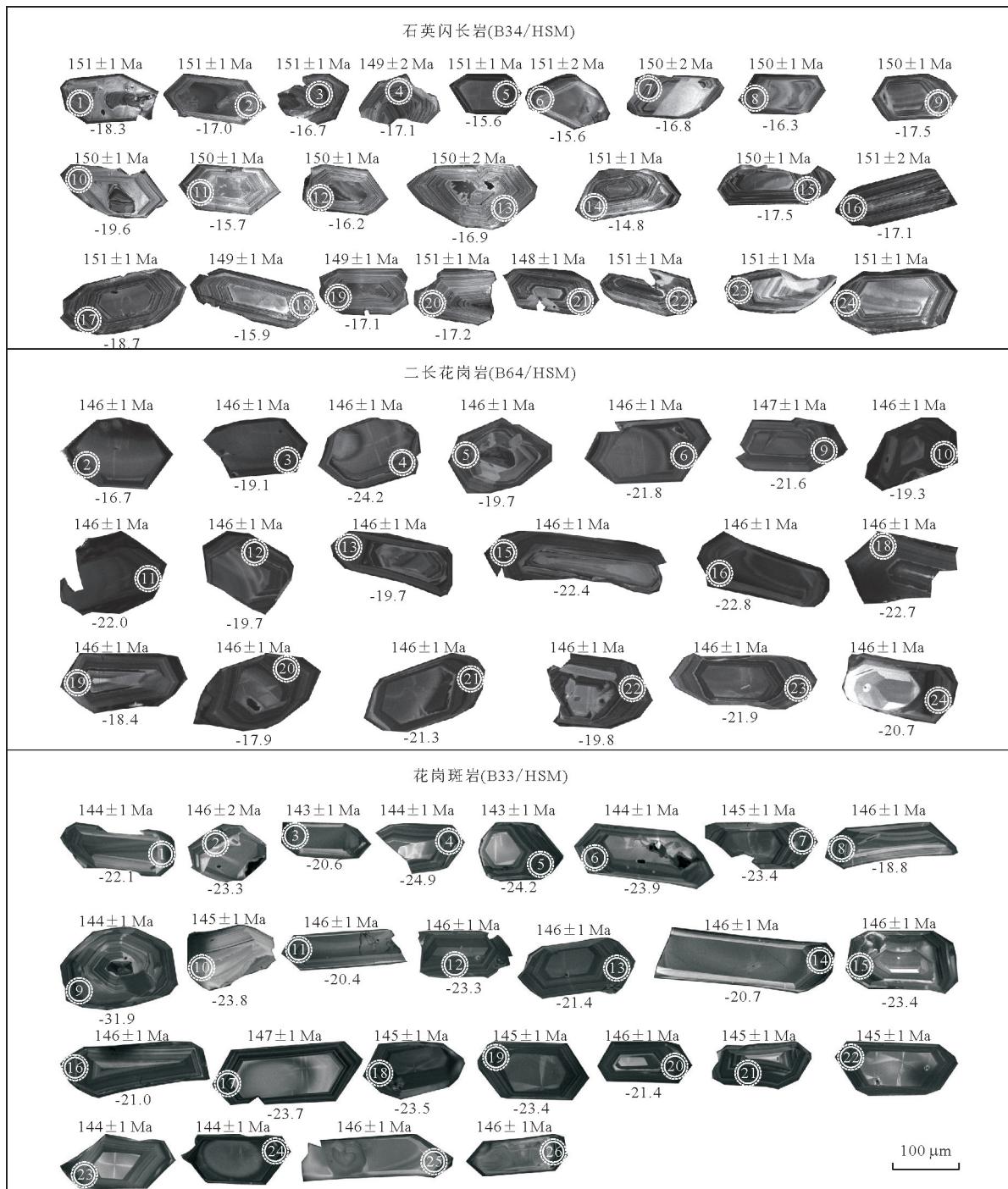


图 4 火神庙岩体锆石 CL 图像

Fig.4 CL images of Zircons from the Huoshenmiao pluton

小圈为 U-Pb 分析点, 大圈为 Hf 同位素分析点, 内部数字为分析点号, 图像外部数字为 U-Pb 年龄(上方)和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(下方)

浆岩的镁、铁、钙含量相当(华仁民等, 2013), 全碱含量较高($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 6.98\% \sim 9.36\%$), 富钠($\text{Na}_2\text{O} = 3.88\% \sim 4.56\%$, $\text{K}_2\text{O} = 2.92\% \sim 4.80\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.95 \sim 1.43$), 里特曼指数 $\sigma = 3.11 \sim 4.62$, Al_2O_3 含量较高($\text{Al}_2\text{O}_3 = 16.13\% \sim 17.97\%$), 铝饱和指数 $A/\text{CNK} = 0.78 \sim 0.94$, 属准铝质系列和

高钾钙碱性—钾玄岩系列岩石(图 6)。

与石英闪长岩相比, 二长花岗岩 SiO_2 含量明显升高($\text{SiO}_2 = 69.70\% \sim 71.90\%$), 与世界范围内花岗岩的平均值($69.26\% \sim 71.63\%$)相当(Le Maitre, 1976), 镁、铁、钙含量急剧降低($\text{MgO} = 0.17\% \sim 0.19\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.97\% \sim 1.39\%$, $\text{CaO} = 1.05\% \sim$

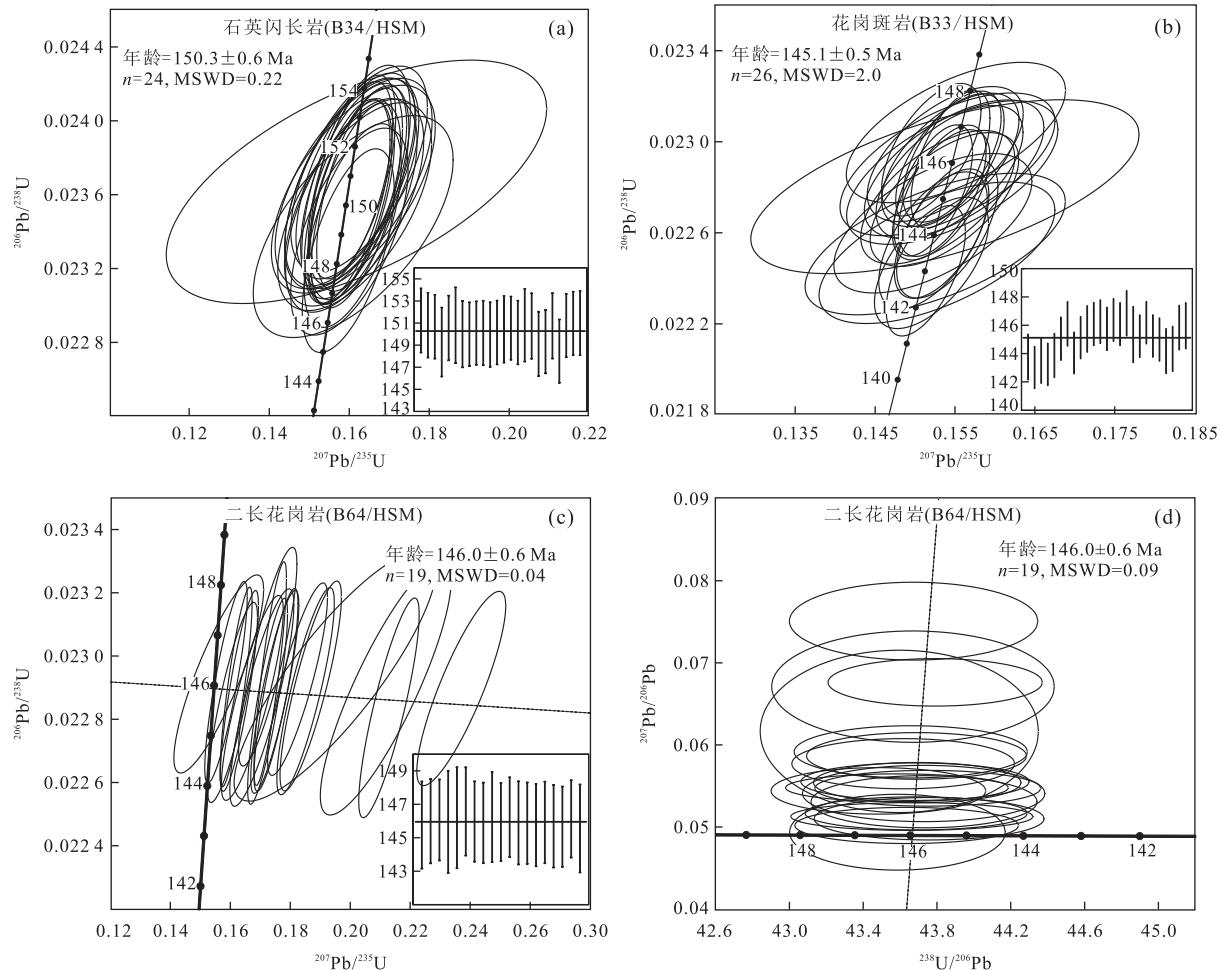


图5 火神庙岩体石英闪长岩(a)、花岗斑岩(b)和二长花岗岩(c)锆石U-Pb年龄谐和图及二长花岗岩锆石U-Pb年龄的Tera-Wasserburg图解(d)

Fig.5 Zircon U-Pb concordia diagram for quartz diorite (a), granite porphyry (b) and monzo-granite(c) of the Huoshenmiao pluton and the Tera-Wasserburg plot for Monzo-granite (d)

1.57%),全碱含量进一步升高($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 9.50\% \sim 10.40\%$),富钾($\text{K}_2\text{O} = 5.56\% \sim 6.78\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 3.49\% \sim 3.94\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.41 \sim 1.93$),里特曼指数 $\sigma = 3.29 \sim 3.85$, Al_2O_3 含量略有降低($\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.90\% \sim 15.90\%$),铝饱和指数 $A/\text{CNK} = 0.99 \sim 1.04$,属准铝质—弱过铝质系列和钾玄岩系列岩石(图6)。

花岗斑岩主量元素特征与二长花岗岩基本一致,具有高硅($\text{SiO}_2 = 70.36\% \sim 72.40\%$)、高碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 8.71\% \sim 9.57\%$)、富钾($\text{K}_2\text{O} = 5.02\% \sim 5.75\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 3.05\% \sim 4.20\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.20 \sim 1.86$)、富铝($\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.09\% \sim 14.95\%$)、贫镁、铁、钙($\text{MgO} = 0.16\% \sim 0.19\%$, $\text{Fe}_{2}\text{O}_3 = 1.12\% \sim 1.31\%$, $\text{CaO} = 0.96\% \sim 1.70\%$)的特征,里特曼指数 $\sigma = 2.71 \sim 3.35$,铝饱和指数 $A/\text{CNK} = 0.93 \sim 1.04$,属准铝质—弱过铝质系列和钾

玄岩系列岩石(图6)。

4.2.2 微量元素

火神庙岩体中,石英闪长岩、二长花岗岩和花岗斑岩的原始地幔标准化微量元素配分曲线均呈现出富集大离子亲石元素、亏损高场强元素的右倾特征(图7),并具有较为一致的Rb($88 \times 10^{-6} \sim 285 \times 10^{-6}$)、Th($11.27 \times 10^{-6} \sim 24.85 \times 10^{-6}$)、Nb($28.10 \times 10^{-6} \sim 50.47 \times 10^{-6}$)、Ta($1.29 \times 10^{-6} \sim 2.98 \times 10^{-6}$)、Zr($151 \times 10^{-6} \sim 238 \times 10^{-6}$)、Hf($3.18 \times 10^{-6} \sim 6.25 \times 10^{-6}$)及差异明显的Ba($512 \times 10^{-6} \sim 3600 \times 10^{-6}$)、Sr($138 \times 10^{-6} \sim 1652 \times 10^{-6}$)、P($87 \times 10^{-6} \sim 2663 \times 10^{-6}$)和Ti($839 \times 10^{-6} \sim 4496 \times 10^{-6}$)含量,从石英闪长岩→二长花岗岩→花岗斑岩,Ba、Sr、P和Ti含量逐渐降低。微量元素原始地幔标准化蛛网图显示石英闪长岩相对富集Ba、U、K和Sr,相对亏损Rb、Th、Nb、Ta、Hf和Ti;二长花岗岩相对富集Rb、Ba、Th、K

表 2 火神庙岩体主量(%)测定结果
Table 2 Major elements (%) data of the Huoshenmiao pluton

样品号	石英闪长岩				二长花岗岩				花岗斑岩			
	B1/HSM	B22/HSM	B24/HSM	B25/HSM	B6	B10	B19	B28	B9/HSM	B11/HSM	B33/HSM	B65/HSM
SiO ₂	61.96	56.79	56.87	60.84	71.10	70.40	71.90	69.70	70.91	70.36	72.40	71.10
TiO ₂	0.50	0.75	0.75	0.53	0.21	0.21	0.19	0.23	0.16	0.16	0.14	0.16
Al ₂ O ₃	16.13	16.88	17.97	17.57	15.10	15.75	14.90	15.90	14.09	14.49	14.60	14.95
TFe ₂ O ₃	4.15	8.02	6.62	5.16	0.97	0.91	1.32	1.39	1.12	1.17	1.31	1.26
MnO	0.13	0.18	0.13	0.11	0.04	0.03	0.03	0.04	0.08	0.13	0.09	0.07
MgO	1.49	2.73	2.33	1.83	0.16	0.15	0.17	0.19	0.17	0.16	0.18	0.19
CaO	4.44	5.75	5.71	4.58	1.05	1.44	1.00	1.57	1.62	1.70	0.96	1.59
Na ₂ O	4.56	3.88	4.18	4.12	3.62	3.94	3.49	3.53	3.05	3.82	4.20	3.66
K ₂ O	4.80	3.10	2.92	3.33	6.78	5.56	6.75	6.55	5.66	5.75	5.02	5.07
P ₂ O ₅	0.28	0.61	0.58	0.35	0.08	0.09	0.07	0.08	0.04	0.04	0.02	0.03
LOI	0.95	1.20	1.04	0.91	0.82	0.50	0.67	0.73	2.00	1.67	0.35	1.31
TOTAL	99.39	99.89	99.10	99.33	99.93	98.98	100.49	99.91	98.90	99.45	99.30	99.40
K ₂ O+Na ₂ O	9.36	6.98	7.10	7.45	10.40	9.50	10.24	10.08	8.71	9.57	9.22	8.73
K ₂ O/Na ₂ O	1.05	0.80	0.70	0.81	1.87	1.41	1.93	1.86	1.86	1.51	1.20	1.39
A/CNK	0.78	0.83	0.88	0.94	0.99	1.04	1.00	1.01	1.00	0.93	1.04	1.04
A/NK	1.27	1.73	1.79	1.69	1.13	1.26	1.14	1.23	1.26	1.16	1.18	1.30
σ	4.62	3.53	3.63	3.11	3.85	3.29	3.63	3.81	2.72	3.35	2.89	2.71
DI	76	59	60	67	93	90	93	90	90	91	92	89
Mg [#]	46	44	45	45	28	28	23	24	26	24	24	26
T _{zr}	736	735	733	762	791	795	777	797	769	765	776	781

注: A/CNK=(Al₂O₃)/(CaO+K₂O+Na₂O)摩尔数分数比; A/NK=(Al₂O₃)/(K₂O+Na₂O)摩尔数分数比; 里特曼指数 $\delta=(K_2O+Na_2O)^2/(SiO_2-43)$; Mg[#]=100×(MgO/40.31)/(MgO/40.31+T_{Fe₂O₃}×0.899/8/71.85×0.85); 全岩锆饱和温度 T_{zr}=12 900/(ln D_{zr}+0.85M+2.95)-273.15, D_{zr}=49 600/w(Zr), M=(2Ca+K+Na)/(Si×Al), w(Zr)为岩石中 Zr 的质量分数; 熔体组成参数 FM=(1/Si)[Na+K+2(Ca+Mg+Fe)]/Al。

和 Hf, 相对亏损 U、Ta、P 和 Ti; 花岗斑岩则表现为 Rb、Th、U、K 和 Hf 的相对富集以及 Ba、Ta、Sr、P 和 Ti 的相对亏损。总体而言, 二长花岗岩和花岗斑岩微量元素特征基本一致, 但与石英闪长岩具有明显的差异。

4.2.3 稀土元素 火神庙岩体中, 石英闪长岩、二长花岗岩和花岗斑岩的球粒陨石标准化稀土元素配分曲线均呈现出轻稀土富集、重稀土亏损的右倾特征, 但稀土总量、轻重稀土分馏程度和 Eu 异常等不尽相同(图 7)。石英闪长岩稀土总量较高, $\Sigma REE=210 \times 10^{-6} \sim 325 \times 10^{-6}$, 轻重稀土分馏明显, LREE/HREE=16~17, (La/Yb)_N=27~30, 负 Eu 异常微弱, $\delta Eu=0.80 \sim 0.93$ 。与石英闪长岩相比, 二长花岗岩稀土总量显著降低, $\Sigma REE=99 \times 10^{-6} \sim 133 \times 10^{-6}$, 轻重稀土分馏程度显著降低, LREE/HREE=9~13, (La/Yb)_N=7~14, 负 Eu 异常微弱, $\delta Eu=0.78 \sim 0.99$ 。花岗斑岩稀土元素总量较二长花岗岩略有升高, $\Sigma REE=160 \times 10^{-6} \sim 189 \times 10^{-6}$, 轻重稀土分馏程度略有升高, LREE/HREE=12~16, (La/Yb)_N=13~22, 负 Eu 异常中等, $\delta Eu=0.62 \sim 0.67$ 。

4.3 锆石 Hf 同位素

在进行 LA-(MC)-ICPMS 锆石 U-Pb 定年后, 又在锆石 U-Pb 年龄分析点处进行了 Hf 同位素分析, 具体结果见表 4, 测点位置及相应的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值见图 4。

由于锆石化学性质稳定, 抗风化能力强, Lu/Hf 比值低($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} < 0.0005$)且不受部分熔融作用和分离结晶的影响, 故锆石 Hf 同位素组成基本代表了岩体结晶时的初始 Hf 同位素组成(Griffin et al., 2004; Zheng et al., 2007)。因此, 近年来锆石 Hf 同位素组成已成为岩石成因的重要示踪剂, 是探讨岩浆起源、演化以及揭示壳幔相互作用过程的最有利工具之一(Griffin et al., 2002; 吴福元等, 2007b; 董增产等, 2015)。本次研究的所有测点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.000 564~0.003 313, 表明锆石在岩体形成之后仅发生了极少量放射性成因 Hf 积累, 因此所测定的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值基本代表了岩浆形成时的源区 Hf 同位素组成。由于所测锆石的 $f_{Lu/Hf}$ 值(-0.98~-0.90)明显低于镁铁质地壳的 $f_{Lu/Hf}$ 值(-0.34, Amelin et al., 1999)和硅铝质地壳的 $f_{Lu/Hf}$ 值(-0.72, Vervoort et al., 1996), 因此锆石 Hf 同位素两阶段模式年龄(T_{DM2})能够指示岩石

表3 火神庙岩体微量元素(10^{-6})测定结果
Table 3 Trace elements (10^{-6}) data of the Huoshenmiao pluton

样品号	石英闪长岩				二长花岗岩				花岗斑岩			
	B1/HSM	B22/HSM	B24/HSM	B25/HSM	B6	B10	B19	B28	B9/HSM	B11/HSM	B33/HSM	B65/HSM
Li	6.67	5.81	3.32	5.12	4.00	1.90	2.00	1.90	6.97	9.73	2.10	7.90
Be	2.15	1.82	2.65	1.68	2.82	2.45	1.71	2.23	4.00	2.21	2.69	2.72
Sc	12.45	9.24	5.93	8.59	1.80	1.70	1.70	1.70	2.83	2.05	1.40	1.60
V	140.1	145.0	78.5	87.3	18.0	13.0	15.0	9.0	12.0	8.7	5.0	7.0
Cr	6.30	9.45	8.72	7.57	1.00	1.00	2.00	1.00	5.43	3.52	1.47	3.66
Co	15.18	14.49	13.64	10.40	1.00	1.20	1.60	1.40	1.07	0.71	1.30	0.90
Ni	4.03	6.34	4.20	3.39	2.20	1.40	1.70	2.70	1.48	1.19	1.30	0.70
Cu	15.34	2.86	13.99	5.23	4.40	1.00	14.60	3.20	5.38	8.77	11.80	4.30
Zn	252.1	144.7	101.8	86.4	50.0	24.0	103.0	44.0	52.7	53.5	55.0	63.0
Ga	32.7	31.3	26.9	31.3	21.2	19.6	18.0	18.8	19.0	21.7	17.9	18.0
Rb	98	88	165	129	140	120	142	146	285	192	148	141
Sr	1 377	1 652	1 062	1 433	406	552	448	502	152	190	138	156
Y	20.4	18.9	16.2	20.6	17.0	13.7	12.2	14.4	13.9	13.6	15.2	12.1
Zr	176	154	177	177	187	185	156	201	238	151	168	180
Cd	0.86	0.77	0.47	0.61	0.19	0.11	0.26	0.17	0.27	0.26	0.21	0.26
In	0.09	0.07	0.09	0.07	0.07	0.06	0.05	0.07	0.04	0.03	0.04	0.03
Nb	31.2	28.8	33.2	32.8	39.7	34.4	28.1	39.4	50.5	33.1	37.9	35.6
Cs	4.43	5.09	3.80	4.73	2.38	1.87	1.58	1.83	1.93	1.26	1.22	1.19
Ba	2 367	3 108	3 600	3 155	2 200	1 980	1 475	2 050	1 678	1 537	512	823
La	76.4	62.2	53.4	72.0	22.7	23.9	26.6	16.1	50.5	49.5	39.0	47.7
Ce	149.6	116.2	97.8	132.2	64.3	57.4	53.6	40.4	87.7	82.9	70.2	86.0
Pr	16.12	11.96	9.06	12.64	7.23	7.45	6.35	5.81	7.73	7.37	7.78	9.61
Nd	52.8	45.2	31.6	45.5	24.2	25.1	21.2	21.7	24.9	23.5	25.4	29.1
Sm	9.28	8.17	5.41	7.76	3.97	3.75	3.27	3.94	4.29	3.95	4.04	4.16
Eu	2.19	2.17	1.48	1.89	0.90	1.00	0.93	1.13	0.78	0.77	0.81	0.84
Gd	6.90	5.86	3.99	5.75	2.88	2.81	2.64	2.80	3.11	2.98	3.35	3.32
Tb	0.87	0.73	0.50	0.74	0.46	0.43	0.39	0.44	0.44	0.41	0.52	0.52
Dy	4.64	3.91	2.81	4.10	2.68	2.40	2.11	2.65	2.69	2.46	3.36	2.90
Ho	0.88	0.72	0.55	0.80	0.53	0.51	0.43	0.56	0.56	0.51	0.64	0.61
Er	2.43	1.94	1.61	2.29	1.69	1.53	1.27	1.52	1.75	1.60	1.89	1.85
Tm	0.33	0.25	0.24	0.32	0.22	0.22	0.16	0.23	0.29	0.28	0.32	0.30
Yb	1.76	1.69	1.63	1.73	1.53	1.56	1.33	1.66	1.88	1.65	2.18	2.12
Lu	0.32	0.23	0.25	0.30	0.28	0.25	0.21	0.27	0.33	0.29	0.33	0.33
Hf	3.66	3.18	3.87	3.85	5.10	4.70	3.90	5.10	6.25	3.90	5.90	5.70
Ta	1.42	1.29	1.82	1.85	2.98	2.24	2.03	2.61	2.66	1.70	2.03	1.92
Pb	69.9	59.0	57.3	48.6	29.1	38.0	42.4	20.4	51.6	35.3	47.3	52.0
Bi	0.05	0.05	0.13	0.07	0.08	0.07	0.06	0.06	0.12	0.11	0.09	0.07
Th	13.3	11.3	18.0	18.1	24.8	20.9	17.1	20.6	24.9	23.5	24.5	23.8
U	3.12	2.44	3.85	3.63	2.28	1.31	2.43	1.33	5.28	4.18	4.94	5.21
Σ REE	325	261	210	288	134	128	120	99	187	178	160	189
LREE	306	246	199	272	123	119	116	89	176	168	147	177
HREE	18.34	15.13	11.38	16.22	10.27	9.71	8.54	10.13	11.05	10.19	12.59	11.95
LREE/HREE	17	16	17	17	12	12	13	9	16	16	12	15
(La/Yb) _N	28	30	27	27	11	11	14	7	19	22	13	16
δ Eu	0.80	0.91	0.93	0.83	0.78	0.90	0.94	0.99	0.62	0.66	0.65	0.67
Sr/Y	66	68	87	70	24	40	37	35	11	14	9	13
Y/Yb	9.9	11.6	11.2	11.9	11.1	8.8	9.2	8.7	7.4	8.3	7.0	5.7
(Ho/Yb) _N	1.01	1.50	1.28	1.39	1.04	0.98	0.97	1.01	0.89	0.93	0.88	0.86
Nb/La	0.62	0.41	0.46	0.46	1.75	1.44	1.06	2.45	1.00	0.67	0.97	0.75

注: δ Eu = 2Eu_N/(Sm_N+Gd_N).

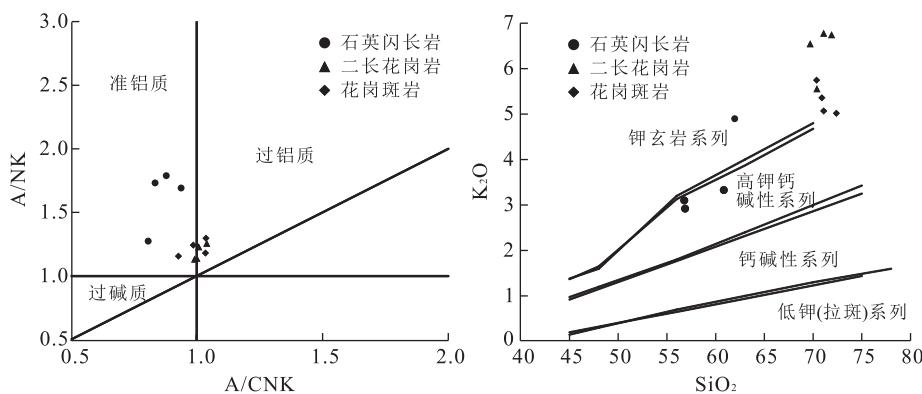
图 6 火神庙岩体 A/CNK-A/NK 图解(a)及 SiO₂-K₂O 图解(b)

Fig.6 SiO₂-K₂O diagrams (a) and A/CNK-A/NK (b) of the granites from the Huoshenmiao pluton
据 Peccerillo and Taylor(1976)和 Rickwood(1989)

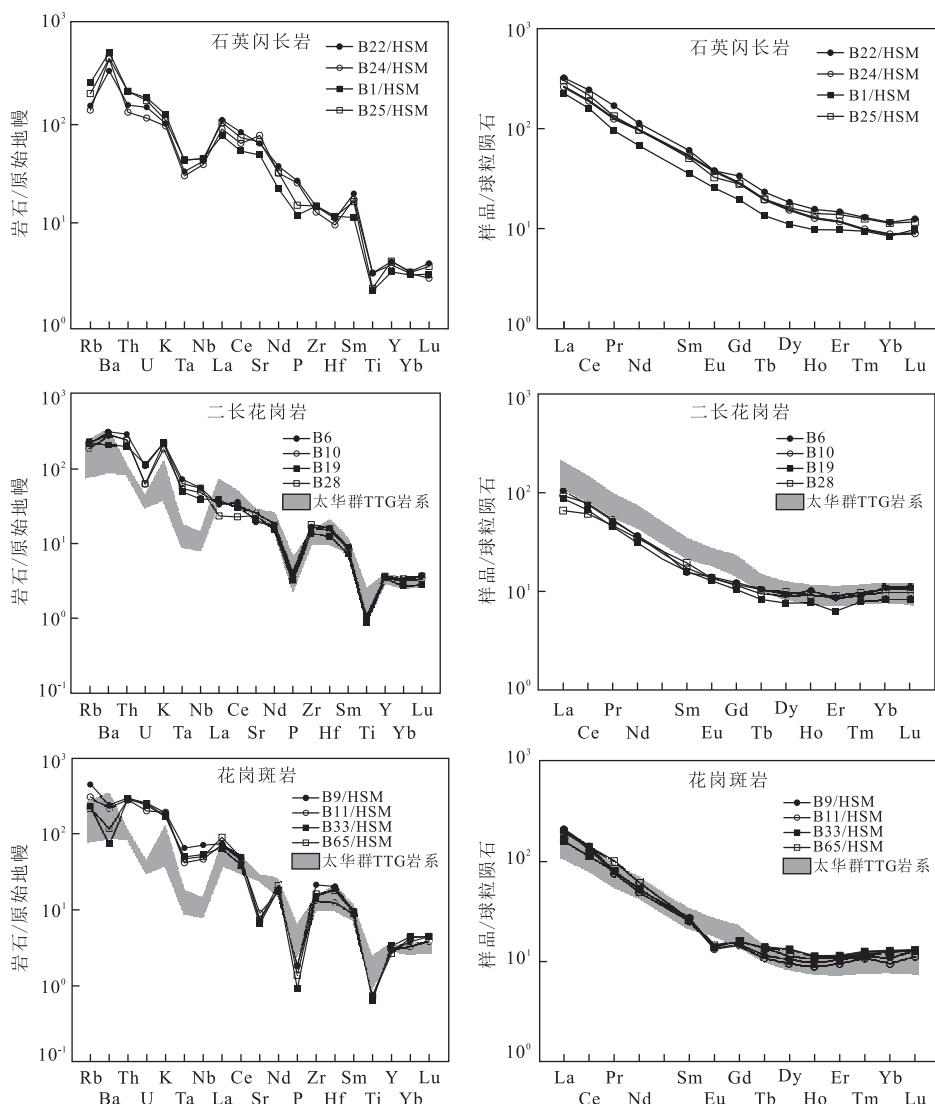


图 7 火神庙岩体微量元素原始地幔标准化蛛网图和稀土元素球粒陨石标准化图

Fig.7 Primitive mantle normalized trace element spider diagrams and chondrite normalized REE patterns of the granites from the Huoshenmiao pluton

标准值据 Sun and McDonough(1989)

表4 火神庙岩体的锆石Hf同位素分析结果

Table 4 Hf isotopic data of zircon from the Huoshenmiao pluton

测点号	年龄(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	$T_{\text{DM1}}(\text{Ga})$	$T_{\text{DM2}}(\text{Ga})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
B34-HSM-1	151.2	0.018 591	0.000 844	0.282 164	0.000 020	-21.5	-18.3	0.7	1.53	2.36	-0.97
B34-HSM-2	150.8	0.020 692	0.000 938	0.282 200	0.000 018	-20.2	-17.0	0.6	1.48	2.28	-0.97
B34-HSM-3	150.7	0.024 327	0.001 090	0.282 208	0.000 021	-19.9	-16.7	0.8	1.47	2.26	-0.97
B34-HSM-4	149.3	0.019 685	0.000 886	0.282 199	0.000 017	-20.3	-17.1	0.6	1.48	2.28	-0.97
B34-HSM-5	150.6	0.024 672	0.001 110	0.282 239	0.000 017	-18.8	-15.6	0.6	1.43	2.19	-0.97
B34-HSM-6	150.8	0.021 276	0.000 977	0.282 240	0.000 017	-18.8	-15.6	0.6	1.43	2.19	-0.97
B34-HSM-7	150.0	0.024 471	0.001 076	0.282 208	0.000 020	-20.0	-16.8	0.7	1.48	2.26	-0.97
B34-HSM-8	150.0	0.017 605	0.000 783	0.282 222	0.000 018	-19.5	-16.3	0.6	1.44	2.23	-0.98
B34-HSM-9	150.1	0.024 608	0.001 104	0.282 186	0.000 020	-20.7	-17.5	0.7	1.51	2.31	-0.97
B34-HSM-10	150.1	0.014 042	0.000 641	0.282 127	0.000 019	-22.8	-19.6	0.7	1.57	2.44	-0.98
B34-HSM-11	150.0	0.018 052	0.000 807	0.282 238	0.000 018	-18.9	-15.7	0.6	1.42	2.20	-0.98
B34-HSM-12	150.1	0.021 176	0.000 970	0.282 225	0.000 020	-19.3	-16.2	0.7	1.45	2.22	-0.97
B34-HSM-13	150.4	0.022 847	0.001 042	0.282 203	0.000 018	-20.1	-16.9	0.6	1.48	2.27	-0.97
B34-HSM-14	150.5	0.021 699	0.000 963	0.282 262	0.000 018	-18.0	-14.8	0.7	1.39	2.14	-0.97
B34-HSM-15	150.1	0.030 340	0.001 324	0.282 189	0.000 022	-20.6	-17.5	0.8	1.51	2.31	-0.96
B34-HSM-16	150.8	0.028 744	0.001 169	0.282 198	0.000 020	-20.3	-17.1	0.7	1.49	2.28	-0.96
B34-HSM-17	150.7	0.017 027	0.000 727	0.282 152	0.000 020	-21.9	-18.7	0.7	1.54	2.38	-0.98
B34-HSM-18	149.1	0.020 268	0.000 897	0.282 233	0.000 019	-19.1	-15.9	0.7	1.43	2.21	-0.97
B34-HSM-19	149.3	0.020 957	0.000 929	0.282 198	0.000 019	-20.3	-17.1	0.7	1.48	2.28	-0.97
B34-HSM-20	150.7	0.017 157	0.000 768	0.282 193	0.000 020	-20.5	-17.2	0.7	1.48	2.29	-0.98
B64/HSM-2	145.8	0.062 678	0.001 776	0.282 215	0.000 019	-19.7	-16.7	0.7	1.49	2.25	-0.9
B64/HSM-3	146.0	0.086 674	0.002 499	0.282 147	0.000 015	-22.1	-19.1	0.5	1.62	2.41	-0.92
B64/HSM-4	146.1	0.086 041	0.002 449	0.282 005	0.000 017	-27.1	-24.2	0.6	1.82	2.72	-0.93
B64/HSM-5	146.0	0.075 861	0.002 098	0.282 129	0.000 018	-22.7	-19.7	0.6	1.63	2.45	-0.94
B64/HSM-6	146.2	0.068 784	0.001 907	0.282 071	0.000 016	-24.8	-21.8	0.6	1.70	2.58	-0.94
B64/HSM-9	146.6	0.078 074	0.002 465	0.282 079	0.000 017	-24.5	-21.6	0.6	1.72	2.56	-0.93
B64/HSM-10	146.0	0.081 658	0.002 413	0.282 142	0.000 018	-22.3	-19.3	0.6	1.62	2.42	-0.93
B64/HSM-11	145.9	0.103 577	0.002 919	0.282 068	0.000 015	-24.9	-22.0	0.5	1.76	2.59	-0.91
B64/HSM-12	146.2	0.093 207	0.002 458	0.282 132	0.000 019	-22.6	-19.7	0.7	1.64	2.44	-0.93
B64/HSM-13	145.9	0.082 043	0.002 161	0.282 132	0.000 019	-22.6	-19.7	0.7	1.63	2.44	-0.93
B64/HSM-15	146.2	0.077 833	0.002 103	0.282 053	0.000 017	-25.4	-22.4	0.6	1.74	2.62	-0.94
B64/HSM-16	145.9	0.086 980	0.002 270	0.282 044	0.000 020	-25.7	-22.8	0.7	1.76	2.64	-0.93
B64/HSM-18	145.9	0.070 262	0.001 851	0.282 046	0.000 017	-25.7	-22.7	0.6	1.74	2.63	-0.94
B64/HSM-19	145.8	0.082 071	0.002 452	0.282 169	0.000 022	-21.3	-18.4	0.8	1.59	2.36	-0.93
B64/HSM-20	145.9	0.106 288	0.002 679	0.282 184	0.000 017	-20.8	-17.9	0.6	1.58	2.33	-0.92
B64/HSM-21	145.7	0.080 087	0.002 110	0.282 086	0.000 015	-24.2	-21.3	0.5	1.69	2.54	-0.94
B64/HSM-22	145.7	0.059 791	0.001 771	0.282 127	0.000 015	-22.8	-19.8	0.5	1.62	2.45	-0.95
B64/HSM-23	146.1	0.071 882	0.001 942	0.282 068	0.000 016	-24.9	-21.9	0.6	1.71	2.58	-0.94
B64/HSM-24	145.6	0.073 187	0.001 883	0.282 101	0.000 015	-23.7	-20.7	0.5	1.66	2.51	-0.94
B33HSM-1	143.8	0.059 567	0.002 304	0.282 063	0.000 022	-25.1	-22.1	0.8	1.73	2.59	-0.93
B33HSM-2	145.6	0.051 845	0.002 094	0.282 027	0.000 019	-26.3	-23.3	0.7	1.77	2.67	-0.94
B33HSM-3	143.0	0.087 118	0.003 313	0.282 110	0.000 019	-23.4	-20.6	0.7	1.71	2.50	-0.90
B33HSM-4	143.5	0.057 238	0.002 296	0.281 986	0.000 020	-27.8	-24.9	0.7	1.84	2.77	-0.93
B33HSM-5	143.2	0.047 320	0.001 895	0.282 005	0.000 018	-27.1	-24.2	0.6	1.80	2.72	-0.94
B33HSM-6	143.9	0.055 502	0.002 218	0.282 012	0.000 018	-26.9	-23.9	0.6	1.80	2.71	-0.93
B33HSM-7	145.1	0.050 196	0.002 038	0.282 026	0.000 016	-26.4	-23.4	0.6	1.77	2.68	-0.94
B33HSM-8	146.1	0.045 996	0.001 832	0.282 156	0.000 020	-21.8	-18.8	0.7	1.58	2.38	-0.94
B33HSM-9	144.0	0.013 993	0.000 564	0.281 782	0.000 022	-35.0	-31.9	0.8	2.04	3.21	-0.98
B33HSM-10	145.1	0.050 278	0.002 057	0.282 014	0.000 018	-26.8	-23.8	0.6	1.79	2.70	-0.94
B33HSM-11	145.7	0.064 744	0.002 488	0.282 112	0.000 020	-23.3	-20.4	0.7	1.67	2.49	-0.93
B33HSM-12	146.1	0.082 368	0.003 161	0.282 032	0.000 021	-26.2	-23.3	0.7	1.82	2.67	-0.90
B33HSM-13	146.2	0.043 282	0.001 750	0.282 080	0.000 018	-24.5	-21.4	0.6	1.68	2.55	-0.95
B33HSM-14	145.7	0.056 086	0.002 168	0.282 102	0.000 022	-23.7	-20.7	0.8	1.67	2.51	-0.93
B33HSM-15	146.4	0.047 132	0.001 883	0.282 026	0.000 022	-26.4	-23.4	0.8	1.77	2.67	-0.94
B33HSM-16	146.4	0.041 251	0.001 646	0.282 093	0.000 020	-24.0	-21.0	0.7	1.66	2.52	-0.95
B33HSM-17	146.8	0.053 522	0.002 131	0.282 018	0.000 019	-26.7	-23.7	0.7	1.79	2.69	-0.94
B33HSM-18	145.3	0.049 323	0.001 949	0.282 022	0.000 017	-26.5	-23.5	0.6	1.77	2.68	-0.94
B33HSM-19	145.2	0.064 493	0.002 550	0.282 027	0.000 018	-26.3	-23.4	0.6	1.80	2.68	-0.92
B33HSM-20	146.2	0.040 575	0.001 599	0.282 082	0.000 023	-24.4	-21.4	0.8	1.67	2.55	-0.95

注: $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = [([^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}]_s - ([^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}]_s \times (e^{\lambda t} - 1))] / ([^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}]_{\text{CHUR},0} - ([^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}]_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)) - 1] \times 10000$; $T_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \ln\{1 + [([^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}]_s - ([^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}]_{\text{DM}})] / ([^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}]_s - ([^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}]_{\text{DM}}])\}$; $T_{\text{DM2}} = 1/\lambda \times \ln\{1 + [([^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}]_{s,t} - ([^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}]_{\text{DM},t})) / ([^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}]_{\text{DM},t} - ([^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}]_{\text{DM},t}))\}$; $t_s = \text{sample}$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$, 其中 $t_{\text{Hf}} = \text{锆石结晶年龄}$, $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_c = 0$.

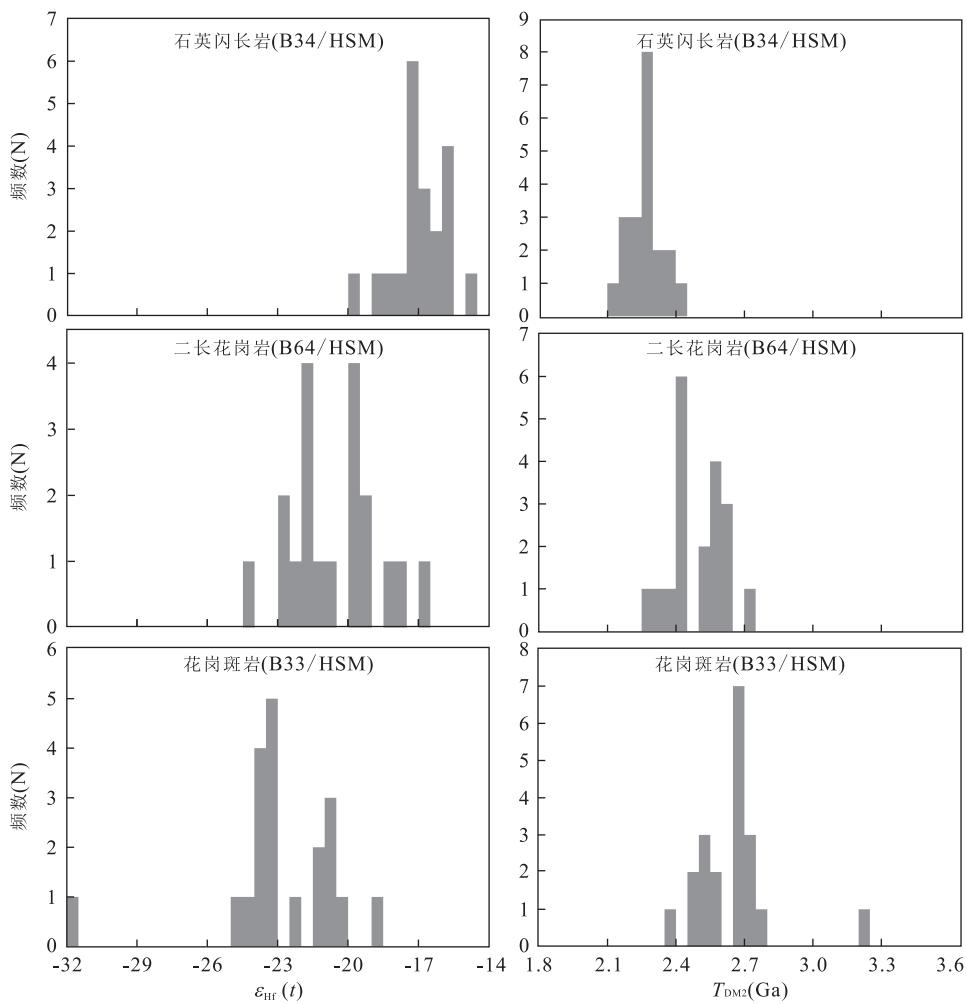


图 8 火神庙岩体锆石 Hf 同位素组成 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和两阶段模式年龄 T_{DM2} 柱状图

Fig.8 Zircon Hf isotopic compositions and T_{DM2} of the Huoshenmiao pluton

源区物质从地幔中分离出来的时限。

对石英闪长岩(B34/HSM)进行了 20 个点的 Hf 同位素分析,结果显示 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 127~0.282 262,由对应测点的锆石 U-Pb 年龄计算得到初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 125~0.282 260, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -19.6~-14.8,单阶段模式年龄(T_{DM1})为 1.57~1.39 Ga,两阶段模式年龄(T_{DM2})为 2.44~2.14 Ga。锆石 Hf 同位素组成 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和两阶段模式年龄(T_{DM2})直方图(图 8)显示 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主体为 -17.5~-15.5, T_{DM2} 主体为 2.30~2.25 Ga。

对二长花岗岩(B64/HSM)进行了 19 个点的 Hf 同位素分析,结果显示 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 005~0.282 214,由对应测点的锆石 U-Pb 年龄计算得到初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.281 999~0.282 210, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -24.2~-16.7,单阶段模式年龄(T_{DM1})为 1.82~1.49 Ga,两阶段模式年龄(T_{DM2})为 2.72~2.25 Ga。锆石 Hf 同位素组成 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和两阶

段模式年龄(T_{DM2})直方图(图 8)显示 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主体为 -22.0~-19.0, T_{DM2} 主体为 2.65~2.40 Ga。

对花岗斑岩(B33/HSM)共进行了 20 个点的 Hf 同位素分析,结果显示 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.281 782~0.282 156,由对应测点的锆石 U-Pb 年龄计算得到初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.281 781~0.282 151, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -31.9~-18.8,单阶段模式年龄(T_{DM1})为 2.04~1.58 Ga,两阶段模式年龄(T_{DM2})为 3.21~2.38 Ga。锆石 Hf 同位素组成 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和两阶段模式年龄(T_{DM2})直方图(图 8)显示 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主体为 -24.0~-20.0, T_{DM2} 主体为 2.75~2.50 Ga。

5 讨论

5.1 成岩年代学

锆石具有很高的 U-Pb 同位素体系封闭温度,

是确定岩浆结晶年龄的理想对象(Meinhold, 2010)。由于本次研究所测锆石均为岩浆锆石,故所获得的 LA-(MC)-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄可以作为火神庙岩体的形成年龄,因此笔者认为石英闪长岩、二长花岗岩和花岗斑岩的形成年龄分别为 150.3 ± 0.6 Ma、 146.0 ± 0.6 Ma 和 145.1 ± 0.5 Ma,与王赛等(2014a)报道的火神庙钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄(145.7 ± 3.9 Ma)相当,因此笔者认为火神庙岩体和火神庙钼矿床均形成于晚侏罗世,应该为同一地质事件的产物。

鉴于栾川矿集区钼多金属的巨量堆积,前人在此进行了大量的成岩、成矿年代学研究(李永峰等,2003,2005;毛景文等,2005;Mao *et al.*, 2008,2010;包志伟等,2009;向君峰等,2012;杨阳等,2012;王赛等,2014a),研究结果显示栾川矿集区在晚侏罗世发生过两次大规模的岩浆侵位事件(约 158 Ma 和约 145 Ma),如南泥湖岩体(158.2 ± 3.1 Ma,毛景文等,2005; 145.2 ± 1.5 Ma~ 146.7 ± 1.2 Ma,向君峰等,2012)及内部的暗色包体(148.3 ± 0.6 Ma,未发表)、上房沟岩体(157.6 ± 2.7 Ma,毛景文等,2005)、石宝沟岩体(145.3 ± 1.7 Ma~ 147.2 ± 1.7 Ma,包志伟等,2009; 156 ± 1 Ma~ 157 ± 1 Ma,杨阳等,2012)及西沟辉长岩墙(147.5 ± 1.7 Ma,包志伟等,2009);钼成矿作用仅发生在 145 Ma 左右,如南泥湖—三道庄钼矿床(146.1 ± 1.1 Ma,向君峰等,2012)、上房沟钼矿床(144.8 ± 2.1 Ma,李永峰等,2005)、大王沟钼矿床(145.3 ± 2.9 Ma,Mao *et al.*, 2008)和火神庙钼矿床(145.7 ± 3.9 Ma,王赛等,2014a)。综上笔者认为,火神庙岩体和火神庙钼矿床均为栾川矿集区晚侏罗世第 2 次大规模岩浆活动的产物。

5.2 岩石类型

岩石矿物学和地球化学特征是判别花岗岩类型的重要手段,但当花岗岩经历了高度结晶分异作用之后,矿物组成和化学成分都趋向于低共熔花岗岩,从而导致岩石类型的判断变得十分困难,此时最可靠的方法是寻找与高分异花岗岩相关的、更多保留有原始矿物学和地球化学特征的偏镁铁质岩石(吴福元等,2007a)。

研究显示角闪石、堇青石和碱性暗色矿物分别为判别 I 型、S 型及 A 型花岗岩重要的矿物学标志(Miller, 1985)。石英闪长岩具有较低的硅以及较高的镁、钙、铁含量,表明岩石结晶分异程度较低(分异指数 $DI = 59 \sim 76$),且内部见大量角闪石,因此说明石英闪长岩属于 I 型花岗岩。二长花岗岩和花岗

斑岩中均未见角闪石,并具有高硅、富碱和贫镁、钙、铁的地球化学特征,显示岩石经历了高度的结晶分异(图 9a),分异指数 DI ($89 \sim 93$)与西藏冈底斯东部的察隅高分异 I 型花岗岩($82 \sim 92$)相当(朱弟成等,2009),但因其与同时代偏镁铁质的 I 型花岗岩(石英闪长岩)伴生,故笔者认为二长花岗岩和花岗斑岩亦应属于 I 型花岗岩(吴福元等,2007a),这亦得到了岩石地球化学特征的支持。二长花岗岩和花岗斑岩均为准铝质—弱过铝质岩石($A/CNK = 0.93 \sim 1.04$), P_2O_5 含量极低($< 0.09\%$)、且与 SiO_2 含量呈明显的负相关(图 9b),符合 HW 磷灰石饱和规则(Harrison and Watson, 1984),具有高分异 I 型和 A 型花岗岩的特征(李献华等,2007;敬海鑫等,2015),但利用全岩锆饱和温度计(Watson and Harrison, 1983; Miller *et al.*, 2003)获得的全岩锆饱和温度($777 \sim 797$ °C 和 $765 \sim 781$ °C)与 I 型花岗岩平均温度(781 °C)相当、较 A 型花岗岩(> 800 °C)明显偏低(King *et al.*, 1997)。上述结果表明,火神庙岩体属于 I 型花岗岩,与栾川矿集区内的南泥湖、上房沟、石宝沟等花岗斑岩体岩石类型一致(杨阳等,2012; Bao *et al.*, 2014)。

5.3 岩浆源区

栾川矿集区内未见晚侏罗世大规模发育的中基性火山岩,且中生代时下地壳基底岩石主要为具有拉斑玄武岩质组分的高压基性麻粒岩、榴辉岩(郑建平等,2005)和太华群 TTG 岩系,由此表明火神庙岩体既不是地幔玄武岩/玄武安山岩的结晶分异的产物(Grove *et al.*, 1997),也不是受幔源岩浆改造沉积物重熔的产物(Kemp *et al.*, 2007),而更可能是火山岩部分熔融的产物(Chappell and White, 2001; 李献华等,2009)。研究显示,单个侵入体从岩浆形成到锆石 U-Pb 同位素体系封闭的时间一般不超过 1 Ma(Glazner *et al.*, 2004),因此二长花岗岩和花岗斑岩基本一致,但较石英闪长岩差异明显的 LA-(MC)-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄暗示火神庙岩体是源区部分熔融形成的不同批次岩浆就位的结果(Coleman *et al.*, 2004),这亦得到了地球化学及同位素特征的支持。二长花岗岩和花岗斑岩具有基本一致的地球化学特征和锆石 Hf 同位素组成,但较石英闪长岩具有明显的差异,且在 Th/Sr-Th 图上二长花岗岩和花岗斑岩呈现出明显的线性关系(图 9c),表明二长花岗岩和花岗斑岩是同批岩浆结晶形成的(Zhu *et al.*, 2008),而石英闪长岩则是另一批岩浆上升就位的产物。二长花岗岩和花岗斑岩成分

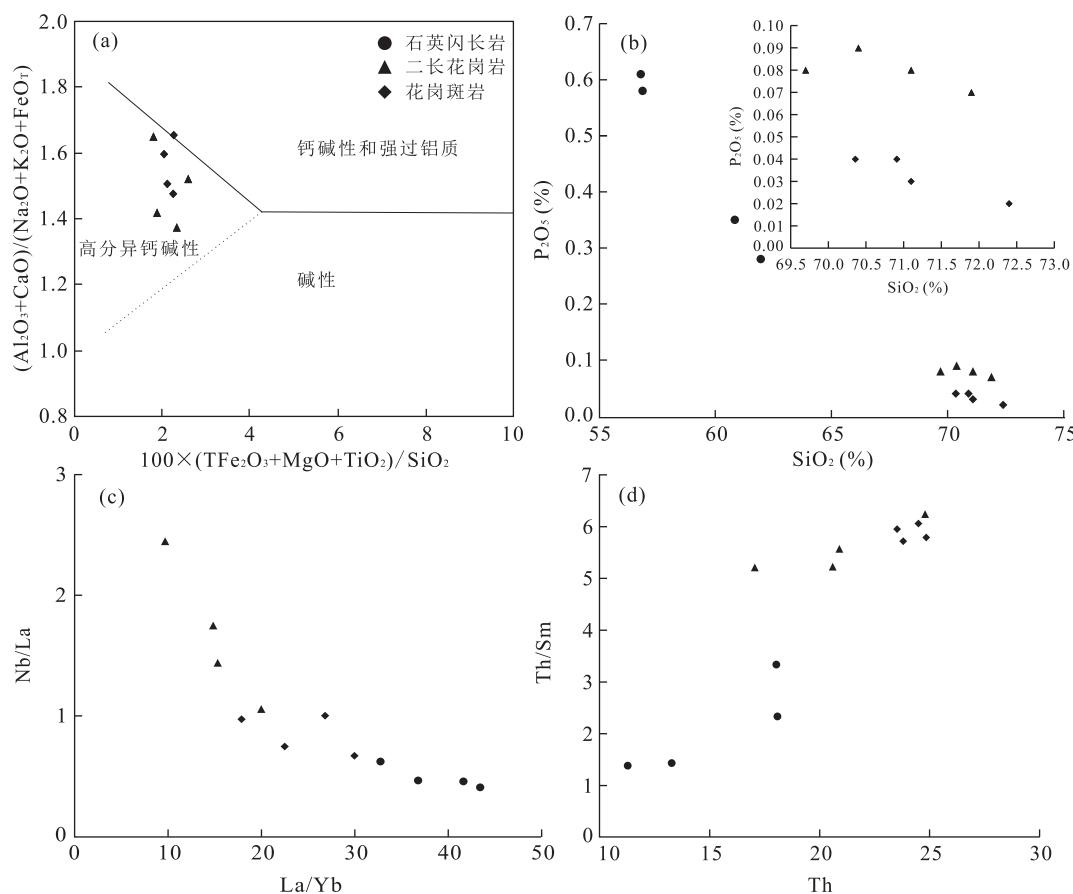


图 9 火神庙岩体地球化学判别图解

Fig.9 Geochemical discrimination diagrams for the Huoshenmiao pluton

的差异是岩浆结晶分异的结果(如花岗斑岩 Ba、Sr、Eu、P、Ti 较二长花岗岩更为亏损,显示花岗斑岩是由二长花岗岩通过斜长石、钾长石、磷灰石和钛铁矿分离结晶而来),而与石英闪长岩成分的差异则是岩浆源区成分不同的反映(Coleman *et al.*, 2004)。

石英闪长岩低 SiO_2 ($56.79\% \sim 61.96\%$)、高 $\text{Mg}^{\#}$ ($44 \sim 46$)、富 Na_2O ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.95 \sim 1.43$) 及富集大离子亲石元素和轻稀土元素、亏损高场强元素和重稀土元素的地球化学特征表明岩浆源区有壳源物质和岩石圈地幔组分的参与(杨承海等, 2008; 熊小林等, 2011)。通常地幔组分参与花岗岩的形成主要有 2 种机制,即(1)幔源岩浆底侵形成的镁铁质下地壳部分熔融;(2)幔源镁铁质岩浆与壳源长英质岩浆混合(邱检生等, 2008)。石英闪长岩的微量和稀土元素地球化学特征与华北陆块南缘下地壳基性麻粒岩具有明显的差异(郑建平等, 2005),且实验岩石学研究已经证明玄武岩部分熔融形成的熔体通常具有低 $\text{Mg}^{\#}$ (< 44) 和富 Na_2O ($> 4.3\%$) 的特征(Wolf and Wyllie, 1994; Rapp and Waston, 1995),

因此石英闪长岩即使是镁铁质下地壳部分熔融的产物也必须有高 Mg、低 Na 的富集地幔新生幔源玄武质岩浆的混入(徐夕生等, 2007),但基本一致的锆石 Hf 同位素组成($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -19.6 \sim -14.8$, 集中于 $-17.5 \sim -15.5$)排除了岩浆混合的可能(Bolhar *et al.*, 2008),暗示岩浆源区可能是富集岩石圈地幔(陈立辉和周新华, 2003)。石英闪长岩与矿集区内同时代的镁铁质暗色包体和辉长岩墙具有基本一致的微量元素和稀土元素地球化学特征及锆石 Hf 同位素组成(杨阳等, 2012; Bao *et al.*, 2014),因此笔者认为它们拥有相同的岩浆源区,均为富集岩石圈地幔部分熔融的产物,而石英闪长岩较幔源基性岩浆更高的 SiO_2 含量可能是岩浆结晶分异的结果。由于富集岩石圈地幔主要继承了壳源物质的放射性成因同位素特征(郑永飞等, 2013),石英闪长岩两阶段锆石 Hf 同位素模式年龄(T_{DM2})与大别—苏鲁造山带超高压变火成岩相似(Chen *et al.*, 2007)、明显不同于华北陆壳所具有的太古代两阶段锆石 Hf 同位素模式年龄(Wu *et al.*, 2005),因此说明混入岩石圈地

幔的是俯冲的华南陆壳而不是拆沉的华北陆壳,这亦得到了岩石Pb同位素组成的 support (Bao *et al.*, 2014)。

二长花岗岩和花岗斑岩高SiO₂(69.70%~72.40%)、低Mg[#](23~28)、富K₂O(K₂O/Na₂O=1.20~1.93)及富集大离子亲石元素和轻稀土元素、亏损高场强元素和重稀土元素的地球化学特征表明其主要来自于下地壳的部分熔融(熊小林等,2011)。二长花岗岩和花岗斑岩的微量和稀土元素地球化学特征及Sr同位素初始比值(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i=0.7085,杨荣勇等,1996)与新太古界太华群TTG岩系基本一致(图7)(第五春荣等,2007;肖娥等,2012),且两阶段锆石Hf同位素模式年龄(T_{DM2} =3.76~2.25 Ga,集中于2.75~2.40 Ga)与太华群TTG岩系锆石U-Pb年龄相当(倪志耀等,2003;第五春荣等,2010),由此说明二长花岗岩和花岗斑岩是太华群TTG岩系部分熔融的产物,这亦得到了实验岩石学的支持(熊小林等,2011),但将太华群TTG岩系锆石Hf同位素组成(第五春荣等,2007,2010)按t=145 Ma(二长花岗岩和花岗斑岩的形成年龄)计算的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为-42.1~-64.6,较二长花岗岩和花岗斑岩的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(-16.7~-31.9)具有明显的差异,表明岩浆源区除太华群TTG岩系外还有其他组分的参与。二长花岗岩和花岗斑岩明显不均匀的锆石Hf同位素组成(变化范围达15个 ϵ 单位)(Chiu *et al.*, 2009)暗示岩浆熔体处于一个开放的系统(Kemp *et al.*, 2007)。由于锆石Hf同位素组成不受岩浆分离结晶和部分熔融的影响,因此锆石Hf同位素组成的不均一性很可能指示了幔源镁铁质岩浆与壳源长英质岩浆的混合(Bolhar *et al.*, 2008),

且最高的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(-16.7)与石英闪长岩相当,由此说明二长花岗岩和花岗斑岩是太华群TTG岩系部分熔融形成的长英质岩浆与富集岩石圈地幔部分熔融形成的镁铁质岩浆混合的产物,但二长花岗岩和花岗斑岩中未见镁铁质暗色微粒包体等指示存在岩浆混合的岩石学证据,这可能是在足够长的时间及地壳深部岩浆房较高的温压条件下,均匀的长英质岩浆与少量镁铁质岩浆发生了完全混合的缘故(Martin *et al.*, 1994)。

5.4 岩浆形成的温压条件

5.4.1 温度 由于花岗岩大多是绝热上升就位的,所以岩浆早期结晶时的温度可以近似代表岩浆形成的温度(吴福元等,2007a)。全岩锆饱和温度计显示石英闪长岩岩浆形成温度为733~762℃,二长花岗岩岩浆形成温度为777~797℃,花岗斑岩岩浆形成温度为765~781℃(表2)。由于石英闪长岩、二长花岗岩和花岗斑岩中基本未见残留锆石,表明早期岩浆中Zr含量很低(未饱和),因此全岩锆饱和温度仅能代表岩浆形成时的最低温度(Miller *et al.*, 2003),此时岩浆形成温度的估算可以利用熊小林等(2011)提出的长英质熔体TiO₂溶解度模型(图10)。二长花岗岩和花岗斑岩Mg[#]值为23~28,且基本处于TiO₂饱和状态(图10a),利用该模型获得岩浆形成温度为750~850℃(图10b),综上笔者认为二长花岗岩和花岗斑岩岩浆形成温度为765~850℃。石英闪长岩处于TiO₂不饱和状态(图10a),无法利用该模型计算岩浆形成温度,但因其来自于富集岩石圈地幔,故笔者认为岩浆形成温度更高,即从石英闪长岩→二长花岗岩→花岗斑岩,岩浆形成温度逐渐降低。

5.4.2 压力 岩浆形成压力的判断主要基于熔体

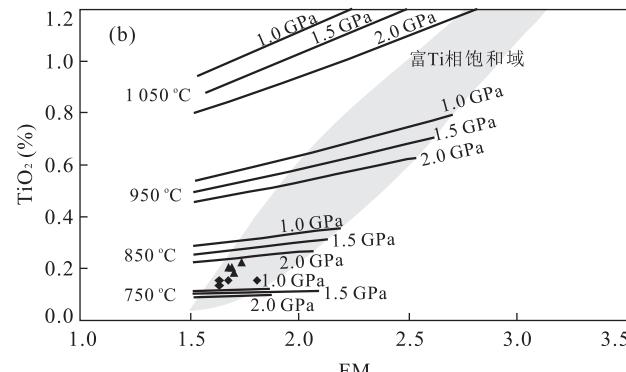
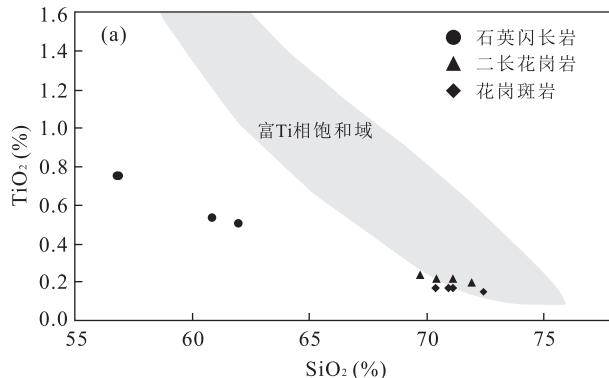


图10 火神庙岩体岩浆形成温度判别图

Fig.10 The diagram of temperature of the Huoshenmiao pluton

据熊小林等(2011)

与残留相平衡的理论(张旗等,2011).火神庙岩体石英闪长岩、二长花岗岩和花岗斑岩的稀土元素配分曲线均呈现出轻稀土富集、重稀土亏损的右倾特征(图 7),暗示岩浆源区残留有石榴子石和角闪石;石英闪长岩和二长花岗岩高 Sr(406×10^{-6} ~ 1652×10^{-6})和弱负 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.78\sim0.99$)的地球化学特征暗示岩浆源区残留有少量斜长石,花岗斑岩低 Sr(138×10^{-6} ~ 190×10^{-6})及中等负 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.62\sim0.67$)的地球化学特征表明岩浆源区残留有较多的斜长石.石英闪长岩 Sr/Y 比值为 66~87、Y/Yb 比值为 9.9~11.9、(Ho/Yb)_N 比值为 1.01~1.50,表明岩浆源区残留相为石榴子石+角闪石+斜长石;二长花岗岩 Sr/Y 比值为 24~40、Y/Yb 比值为 8.7~11.1、(Ho/Yb)_N 比值为 0.97~1.04,表明岩浆源区残留相为角闪石+石榴子石+斜长石;花岗斑岩 Sr/Y 比值为 9~14、Y/Yb 比值为 5.7~8.3、(Ho/Yb)_N 比值为 0.86~0.93,表明岩浆源区残留相为斜长石+角闪石+石榴子石(葛小月等,2002;Haschke *et al.*,2010).二长花岗岩和花岗斑岩 Nb/La 比值为 0.67~2.45,较华北陆块下地壳(0.2~1.0)明显偏高,可能是岩浆源区混入了 Nb/La 比值较高的富集岩石圈地幔组分的缘故,且 Nb/La 比值随 La/Yb 比值的增加而降低(图 9c),表明岩浆源区残留有金红石(熊小林等,2011),而起源于富集岩石圈地幔的石英闪长岩 Nb/La 比值为 0.46~0.61,较二长花岗岩和花岗斑岩明显偏低,暗示岩浆源区残留有更多的金红石(熊小林等,2011).根据部分熔融域相平衡关系(图 11),笔者根据 Winther and Newton(1991) 和 Xiong *et al.*(2005) 的研究结果估算火神庙岩体岩浆形成压力约为 1.5~1.9 GPa,且从石英闪长岩→二长花岗岩→花岗斑岩,岩浆形成压力逐渐降低.

5.5 成岩与成矿

华北陆块与华南陆块在三叠纪发生了强烈的俯冲—碰撞作用,形成了规模巨大的秦岭—大别—苏鲁造山带(李曙光等,1989;Chen *et al.*,1995;Ames *et al.*,1996;Rowley *et al.*,1997).在华南陆块俯冲和折返过程中,温压条件的改变致使陆壳物质在俯冲隧道内发生变质脱水和部分熔融,生成的富水流体和长英质熔体交代上覆华北岩石圈地幔,形成了富集岩石圈地幔(郑永飞等,2013).在晚侏罗世中国东部构造体制大转换引起的伸展背景下(毛景文等,2005),富集岩石圈地幔不仅部分熔融形成了镁铁质岩浆,而且诱发上覆的太华群 TTG 岩系部分熔融

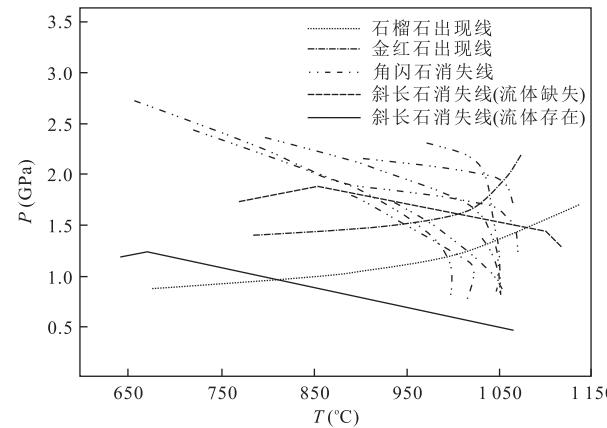


图 11 火神庙岩体岩浆形成压力判别图解

Fig.11 The diagram of pressure of the Huoshenmiao pluton
据熊小林等(2011)

形成了长英质岩浆.由于两种岩浆侵位时间间隔较短,导致长英质岩浆侵位时镁铁质岩浆尚未完全固结,其可以比较容易推挤未固结或半固结的镁铁质岩浆而侵入其中,形成了由“内侵式”主导的“正环带”结构(冯佐海等,2009).镁铁质岩浆不仅结晶分异形成了石英闪长岩,而且与长英质岩浆混合、并经高度结晶分异形成了二长花岗岩和花岗斑岩.在岩浆的结晶分异过程中,岩浆系统的温压条件发生过突变,导致了石英闪长岩中“反环带”斜长石的出现(未发表),这亦可能是稍早形成的二长花岗岩具有典型的花岗结构、而稍晚形成的花岗斑岩出现斑状结构的主要原因.由于辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄与二长花岗岩和花岗斑岩的 LA-(MC)-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄基本一致,且钼矿体主要富存于花岗斑岩与三川组大理岩接触带的矽卡岩中(图 2),因此笔者认为火神庙钼矿床与花岗斑岩密切相关,是混合后的长英质岩浆结晶分异过程中释放出的成矿流体经沸腾作用和水—岩反应形成的(王赛等,2014b).

6 结论

(1)火神庙岩体石英闪长岩、二长花岗岩和花岗斑岩的形成年龄分别为 150.3 ± 0.6 Ma、 146.0 ± 0.6 Ma 和 145.1 ± 0.5 Ma,为栾川矿集区晚侏罗世第 2 次大规模岩浆活动的产物.

(2)火神庙岩体属于 I 型花岗岩,是不同源区部分熔融形成的岩浆上升就位的结果.石英闪长岩是富集岩石圈地幔部分熔融的产物,二长花岗岩和花

岗斑岩是富集岩石圈地幔形成的镁铁质岩浆与太华群 TTG 岩系部分熔融形成的长英质岩浆混合后就位的结果。

(3)火神庙岩体不同岩浆形成的温压条件不同,从石英闪长岩→二长花岗岩→花岗斑岩,岩浆形成的温度和压力逐渐降低。

致谢:室内 LA-(MC)-ICPMS 锆石 U-Pb 定年过程中得到中国地质调查局天津地质研究所叶利娟的热心帮助,成文过程中得到了中国科学院地质与地球物理研究所李献华研究员、中国地质大学(北京)朱弟成教授、中国地质科学院向君峰博士的无私指导,在此一并表示衷心感谢。

References

- Amelin, Y., Lee, D.C., Halliday, A.N., et al., 1999. Nature of the Earth's Earliest Crust from Hafnium Isotopes in Single Detrial Zircons. *Nature*, 399 (6733): 252—255. doi:10.1038/20426
- Ames, L., Zhou, G.Z., Xiong, B.C., 1996. Geochronology and Isotopic Character of Ultrahigh-Pressure Metamorphism with Implications for Collision of the Sino-Korean and Yangtze Cratons, Central China. *Tectonics*, 15 (2): 472—489. doi:10.1029/95tc02552
- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that Do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192 (1—2): 59—79. doi:10.1016/s0009-2541(02)00195-x
- Bao, Z.W., Li, C.J., Qi, J.P., 2009. SHRIMP Zircon U-Pb Age of the Gabbro Dyke in the Luanchuan Pb-Zn-Ag Ore-field, East Qinling Orogen and Its Constraint on Mineralization Time. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2951—2956 (in Chinese with English abstract).
- Bao, Z.W., Wang, Y.C., Zhao, T.P., et al., 2014. Petrogenesis of the Mesozoic Granites and Mo Mineralization of the Luanchuan Ore Field in the East Qinling Mo Mineralization Belt, Central China. *Ore Geology Reviews*, 57: 132—153. doi:10.1016/j.oregeorev.2013.09.008
- Bodnar, R.J., 2009. Heavy Metals or Punk Rocks? *Science*, 323(5915): 724—725. doi:10.1126/science.1166394
- Bolhar, R., Weaver, S. D., Whitehouse, M. J., et al., 2008. Sources and Evolution of Arc Magmas Inferred from Coupled O and Hf Isotope Systematics of Plutonic Zircons from the Cretaceous Separation Point Suite (New Zealand). *Earth and Planetary Science Letters*, 268(3—4): 312—324. doi:10.1016/j.epsl.2008.01.022
- Chappell, B.W., White, A.J.R., 2001. Two Contrasting Granite Types: 25 Years Later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489—499. doi:10.1046/j.1440—0952.2001.00882.x
- Chen, J.F., Xie, Z., Liu, S.S., et al., 1995. Cooling Age of Dabie Orogen, China, Determined by ^{40}Ar - ^{39}Ar and Fission Track Techniques. *Science in China (Series B)*, 38(6): 749—757.
- Chen, L.H., Zhou, X.H., 2003. Ultramafic Xenoliths in Mesozoic Diorite in West Shandong Province. *Science in China (Series D)*, 33(8): 489—499 (in Chinese).
- Chen, R.X., Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., et al., 2007. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Evidence for Contrasting Origin of Bimodal Protoliths for Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks from the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Journal of Metamorphic Geology*, 25 (8): 873—894. doi:10.1111/j.1525—1314.2007.00735.x
- Chiu, H.Y., Chung, S.L., Wu, F.Y., et al., 2009. Zircon U-Pb and Hf Isotopic Constraints from Eastern Transhimalayan Batholiths on the Precollisional Magmatic and Tectonic Evolution in Southern Tibet. *Tectonophysics*, 477(1—2): 3—19. doi:10.1016/j.tecto.2009.02.034
- Coleman, D.S., Gray, W., Glazner, A.F., 2004. Rethinking the Emplacement and Evolution of Zoned Plutons: Geochronologic Evidence for Incremental Assembly of the Tuolumne Intrusive Suite California. *Geology*, 32 (5): 433—436. doi:10.1130/g20220.1
- Compston, W., Williams, I.S., Kirschvink, J.L., et al., 1992. Zircon U-Pb Ages for the Early Cambrian Time-Scale. *Journal of the Geological Society*, 149(2): 171—184. doi:10.1144/gsjgs.149.2.0171
- Connelly, J.N., 2001. Degree of Preservation of Igneous Zonation in Zircon as a Signpost for Concordancy in U/Pb Geochronology. *Chemical Geology*, 172(1—2): 25—39. doi:10.1016/s0009—2541(00)00234—5
- Diwu, C.R., Sun, Y., Lin, C.L., et al., 2007. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes and Their Geological Significance of Yiyang TTG Gneisses from Henan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (2): 253—262 (in Chinese with English abstract).
- Diwu, C.R., Sun, Y., Lin, C.L., 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. *Chinese Science Bulletin*, 55 (21): 2112—2128 (in Chinese).
- Dong, Z.C., Gu, P.Y., Chen, R.M., 2015. Geochronology, Geochemistry and Hf Isotope of Yanchangbeishan Adamellite of Lenghu Area in Qinghai. *Earth Science*, 40(1): 130—144 (in Chinese with English abstract).
- Elhlou, S., Belousova, E., Griffin, W.L., et al., 2006. Trace Element and Isotopic Composition of GJ-Red Zircon

- Standard by Laser Ablation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A158. doi:10.1016/j.gca.2006.06.1383
- Feng, Z. H., Wang, C. Z., Wang, B. H., 2009. Granite Magma Ascent and Emplacement Mechanisms and Their Relation to Mineralization Process. *Journal of Guilin University of Technology*, 29(2): 183—194 (in Chinese with English abstract).
- Ge, X. Y., Li, X. H., Chen, Z. G., et al., 2002. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of Yanshannian High-Sr/Low-Y Intermediate-Felsic Igneous Rocks from Eastern China: Constrains on Crustal Thickness of Eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 47(6): 474—480 (in Chinese).
- Glazner, A. F., Bartley, J. M., Coleman, D. S., et al., 2004. Are Plutons Assembled over Millions of Years by Amalgamation from Small Magma Chambers? *GSA Today*, 14(4): 4—11. doi:10.1130/1052-5173(2004)014<0004:apaomo>2.0.co;2
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S. R., et al., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131(3—4): 231—282. doi:10.1016/j.precamres.2003.12.011
- Griffin, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3—4): 237—269. doi:10.1016/s0024-4937(02)00082-8
- Grove, T. L., Donnelly-Nolan, J. M., Hough, T., 1997. Magmatic Processes that Generated the Rhyolite of Glass Mountain, Medicine Lake Volcano, N. California. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127(3): 205—223. doi:10.1007/s004100050276
- Harrison, T. M., Armstrong, R. L., Naeser, C. W., et al., 1979. Geochronology and Thermal History of the Coast Plutonic Complex, near Prince Rupert British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16(3): 400—410. doi:10.1139/e79-038
- Harrison, T. M., Watson, E. B., 1984. The Behavior of Apatite during Crustal Anatexis: Equilibrium and Kinetic Considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7): 1467—1477. doi:10.1016/0016-7037(84)90403-4
- Haschke, M., Ahmadian, J., Murata, M., et al., 2010. Copper Mineralization Prevented by Arc-Root Delamination during Alpine-Himalayan Collision in Central Iran. *Economic Geology*, 105(4): 855—865. doi:10.2113/gsecongeo.105.4.855
- He, Y. Q., Chen, F. Q., 2013. Geological Characteristics and Ore Indicators of the Huoshenmiao Mo Deposit in Luanchuan County. *Mining Technology*, 13(3): 115—118 (in Chinese).
- Hou, K. J., Li, Y. H., Zou, T. R., et al., 2007. Laser Ablation-MC-ICP-MS Technique for Hf Isotope Microanalysis of Zircon and Its Geological Applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595—2604 (in Chinese with English abstract).
- Hua, R. M., Zhang, W. L., Chen, P. R., et al., 2013. Relationship between Caledonian Granitoids and Large-Scale Mineralization in South China. *Geological Journal of China Universities*, 19(1): 1—11 (in Chinese with English abstract).
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L., et al., 2004. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to in Situ U-Pb Zircon Geochronology. *Chemical Geology*, 211(1—2): 47—69. doi:10.1016/j.chemgeo.2004.06.017
- Jiao, E. Z., 2007. Geological Characteristics of the Huoshenmiao Mo(Pb) Deposit in Luanchuan. *Express Information of Mining Industry*, 7(7): 64—65 (in Chinese).
- Jing, H. X., Sun, D. Y., Gou, J., 2015. Chronology, Geochemistry and Hf Isotope of Granite from Southern Xingkai Block. *Earth Science*, 40(1): 130—144 (in Chinese with English abstract).
- Kemp, A. I. S., Hawkesworth, C. J., Foster, G. L., et al., 2007. Magmatic and Crustal Differentiation History of Granitic Rocks from Hf-O Isotopes in Zircon. *Science*, 315(5814): 980—983. doi:10.1126/science.1136154
- King, P. L., White, A. J. R., Chappell, B. W., et al., 1997. Characterization and Origin of Aluminous A-Type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371—391. doi:10.1093/petroj/38.3.371
- Le Maitre, R. W., 1976. The Chemical Variability of Some Common Igneous Rocks. *Journal of Petrology*, 17(4): 589—598. doi:10.1093/petrology/17.4.589
- Li, H. K., Zhu, S. X., Xiang, Z. Q., et al., 2010. Zircon U-Pb Dating on Tuff Bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing Beijing, Further Constraints on the New Subdivision of the Mesoproterozoic Stratigraphy in the Northern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2131—2140 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. G., Ge, N. J., Liu, D. L., et al., 1989. Sm-Nd Isotope Ages of the C-Type Eclogite from the Dabie Group in the North Dabieshan Area and Its Tectonic Significance. *China Science Bulletin*, 34(7): 522—525 (in Chinese).
- Li, X. H., Li, W. X., Li, Z. X., 2007. Re-Discussion on Genetic

- Type of Nanling Granitoid and Its Tectonic Significance. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 981—991 (in Chinese).
- Li, X.H., Li, W.X., Wang, X.C., et al., 2009. Role of Mantle-Derived Magma in Genesis of Early Yanshanian Granites in the Nanling Range, South China: In Situ Zircon Hf-O Isotopic Constraints. *Science in China (Series D)*, 39(7): 872—887 (in Chinese).
- Li, Y.F., Mao, J.W., Bai, F.J., et al., 2003. Re-Os Isotopic Dating of Molybdenites in the Nannihu Molybdenum (Tungsten) Orefield in the Eastern Qinling and Its Geological Significance. *Geological Review*, 49(6): 652—659 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y.F., Mao, J.W., Hu, H.B., et al., 2005. Geology, Distribution, Types and Tectonic Settings of Mesozoic Molybdenum Deposits in East Qinling Area. *Mineral Deposits*, 24(3): 292—304 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.S., Gao, S., Hu, Z.C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1—2): 537—571. doi:10.1093/petrology/egp082
- Lu, K.X., Chen, X.E., Wang, X., et al., 2008. Geological Characteristics and Genesis of the Heijiayuzhuang Mo Deposit in Luanchuan. *West-China Exploration Engineering*, 20(10): 144—146 (in Chinese).
- Ludwig, K.R., 2003. User's Manual for Isoplot/Ex, Version 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 4: 1—70.
- Lü, W.D., Zhao, C.H., Sun, W.Z., et al., 2006. Geological Characteristics and Genesis of Nanniu Lead Zinc Poly-metallic Ore Field in West Henan. *Mineral Sources and Geology*, 20(3): 219—226 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J.W., Xie, G.Q., Bierlein, F., et al., 2008. Tectonic Implications from Re-Os Dating of Mesozoic Molybdenum Deposits in the East Qinling-Dabie Orogenic Belt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(18): 4607—4626. doi:10.1016/j.gca.2008.06.027
- 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. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57(1): 51—78. doi: 10.1080/08120090903416203
- Mao, J.W., Xie, G.Q., Zhang, Z.H., et al., 2005. Mesozoic Large-Scale Metallogenic Pulses in North China and Corresponding Geodynamic Settings. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169—188 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J.W., Ye, H.S., Wang, R.T., et al., 2009. Mineral Deposit Model of Mesozoic Porphyry Mo and Vein-Type Pb-Zn-Ag Ore Deposits in the Eastern Qinling, Central China and Its Implication for Prospecting. *Geological Bulletin of China*, 28(1): 72—79 (in Chinese with English abstract).
- Martin, H., Bonin, B., Capdevila, R., et al., 1994. The Kuiqi Peralkaline Granitic Complex (SE China): Petrology and Geochemistry. *Journal of Petrology*, 35(4): 983—1015. doi:10.1093/petrology/35.4.983
- Meinhold, G., 2010. Rutile and Its Application in Earth Sciences. *Earth Science Review*, 102(1—2): 1—28. doi:10.1016/j.earscirev.2010.06.001
- Miller, C.F., 1985. Are Strongly Peraluminous Magmas Derived from Pelitic Sedimentary Sources? *The Journal of Geology*, 93(6): 673—689. doi:10.1086/628995
- Miller, C.F., McDowell, S.M., Mapes, R.W., 2003. Hot and Cold Granites? Implications of Zircon Saturation Temperatures and Preservation of Inheritance. *Geology*, 31: 529—532. doi:10.1130/0091—7613(2003)031<0529:hac>2.0.co;2
- Ni, Z.Y., Wang, R.M., Tong, Y., 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. *Geological Review*, 49(4): 361—366 (in Chinese with English abstract).
- Peccerillo, A., Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63—81. doi:10.1007/bf00384745
- Qiu, J.S., Xiao, E., Hu, J., et al., 2008. Petrogenesis of Highly Fractionated I-Type Granites in the Coastal Area of Northeastern Fujian Province: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Nd-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2468—2484 (in Chinese with English abstract).
- Rapp, R.P., Watson, E.B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8—32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891—931. doi:10.1093/petrology/36.4.891
- Rickwood, P.C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams Which Use Oxides of Major and Minor Elements. *Lithos*, 22(4): 247—263. doi: 10.1016/0024—4937(89)90028—5
- Rowley, D.B., Xue, F., Turker, R.D., et al., 1997. Ages of Ultra-

- high Pressure Metamorphism and Protolith Orthogneisses from the Eastern Dabie Shan: U/Pb Zircon Geochemistry. *Earth and Planetary Science Letters*, 151(3–4): 191–203.doi:10.1016/S0012-821X(97)81848-1
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Process. *Geological Society, London, Special Publications*, 42: 313–345.doi:10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Tera, F., Wasserburg, G.J., 1972. U-Th-Pb Systematics in Three Apollo 14 Basalts and the Problem of Initial Pb in Lunar Rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 14(3): 281–304.doi:10.1016/0012-821x(72)90128-8
- Vervoort, J.D., Patchett, P.J., Gehrels, G.E., et al., 1996. Constraints on Early Earth Differentiation from Hafnium and Neodymium Isotopes. *Nature*, 379(65–66): 624–627.doi:10.1038/379624a0
- Wang, S., Ye, H. S., Yang, Y. Q., et al., 2014a. Molybdenite Re-Os Isochron Age of the Huoshenmiao Mo Deposit in Luanchuan of Henan Province and Its Geological Implications. *Geological Bulletin of China*, 33(9): 1430–1438 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S., Ye, H. S., Yang, Y. Q., et al., 2014b. Ore Forming Fluids of Huoshenmiao Mo Deposit, Western Henan. *Mineral Deposits*, 33(9): 1430–1438 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. L., Jiang, S. Y., Dai, B. Z., et al., 2011. Age, Geochemistry and Tectonic Setting of the Neoproterozoic (ca 830 Ma) Gabbros on the Southern Margin of the North China Craton. *Precambrian Research*, 190(1–4): 35–47.doi:10.1016/j.precamres.2011.08.004
- Wang, X. X., Wang, T., Qi, Q. J., et al., 2011. Temporal-Spatial Variations, Origin and Their Tectonic Significance of the Late Mesozoic Granites in the Qinling, Central China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1573–1593 (in Chinese with English abstract).
- Watson, E.B., Harrison, T.M., 1983. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295–304.doi:10.1016/0012-821x(83)90211-x
- Winther, K.T., Newton, R.C., 1991. Experimental Melting of Hydrous Low-Ktholeiite: Evidence on the Origin of Archaean Cratons. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 39(6): 213–228.
- Wolf, M. B., Wyllie, P. J., 1994. Dehydration-Melting of Amphibolite at 10 kbar: The Effects of Temperature and Time. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115(4): 369–383.doi:10.1007/bf00320972
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. F., et al., 2007a. Discussions on the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217–1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007b. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Zhao, G. C., Wilde, S. A., et al., 2005. Nd Isotopic Constraints on Crustal Formation in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 523–545.doi:10.1016/j.jseas.2003.10.011
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569.doi:10.1007/bf03184122
- Xiang, J. F., Mao, J. W., Pei, R. F., et al., 2012. New Geochronological Data of Granites and Ores from the Nannihu-Sandaozhuang Mo (W) Deposit. *Geology in China*, 39(2): 458–473 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, E., Hu, J., Zhang, Z. Z., 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. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 4031–4046 (in Chinese with English abstract).
- Xin, Z. G., 2010. Geological Characteristics and Prospecting Message of Heijiazhuang Mo Deposit in Luanchuan. *West-China Exploration Engineering*, 22(5): 101–102 (in Chinese).
- Xiong, X. L., Adam, J., Green, T. H., 2005. Rutile Stability and Rutile/Melt HFSE Partitioning during Partial Melting of Hydrous Basalt Implications for TTG Genesis. *Chemical Geology*, 218(3–4): 339–359. doi: 10.1016/j.chemgeo.2005.01.014
- Xiong, X. L., Liu, X. C., Zhu, Z. M., et al., 2011. Adakite and Craton Destruction of North China: Basis on Experimental Petrology and Geochemistry. *Science in China (Series D)*, 54(5): 654–667 (in Chinese).
- Xu, X. S., Lu, W. M., He, Z. Y., 2007. Age and Generation of Fogang Granite Batholith and Wushi Diorite-Horblende Gabbro Body. *Science in China (Series D)*, 37(1): 27–38 (in Chinese).
- Xu, Z. W., Ren, Q. J., 1988. Characteristics of Magmatic Evolution of Shibaogou, Huoshenmiao and Daping Granitoids in Luanchuan County, Henan Province. *Journal of Nanjing University (Earth Science Edition)*, 1: 95–103 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C. H., Xu, W. L., Yang, D. B., et al., 2008. Petrogenesis

- of Shangyu Gabbro-Diorites in Western Shandong: Geochronological and Geochemical Evidence. *Science in China (Series D)*, 51(4): 481—492 (in Chinese).
- Yang, R.Y., Xu, Z.W., Lu, X.C., et al., 1996. The Contrasting Study between Mineralized and Barren Stocks of the Molybdenum Ore Belt in East Qinling. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 16(3): 49—53 (in Chinese with English abstract).
- Yang, R. Y., Xu, Z. W., Ren, Q. J., 1997. Ages and Magma Sources of Shibaogou and Huoshenmiao Complexes in East Qinling. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 16(1): 17—20 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y., Wang, X. X., Ke, C. H., et al., 2012. Zircon U-Pb Age, Geochemistry and Hf Isotopic Compositions of Shibaogou Granitoid Pluton in the Nannihu Ore District, Western Henan Province. *Geology in China*, 39 (6): 1525—1542 (in Chinese with English abstract).
- Ye, H.S., Mao, J.W., Li, Y.F., 2006. Characteristics and Metallogenetic Mechanism of Mo-W and Pb-Zn-Ag Deposits in Nannihu Ore Field, Western Henan Province. *Geoscience*, 20 (1): 165—174 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Jin, W.J., Li, C.D., et al., 2011. Granitic Rocks and Their Formation Depth in the Crust. *Geotectonica et Metallogenesis*, 35(2): 259—269 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. P., Sun, M., Lu, F. X., et al., 2005. Xinyang Mafic Granulitic Xenoliths and Its Significance for the Early Mesozoic Lower Crustal Nature on the South Margin of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (1): 91—98 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y.F., Zhang, S.B., Zhao, Z.F., et al., 2007. Contrasting Zircon Hf and O Isotopes in the Two Episodes of Neoproterozoic Granitoids in South China: Implications for Growth and Reworking of Continental Crust. *Lithos*, 96 (1—2): 127—150. doi: 10.1016/j.lithos.2006.10.003
- Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., Chen, Y.X., 2013. Continental Subduction Channel Processes: Plate Interface Interacting during Continental Collision. *Chinese Science Bulletin*, 58(23): 2233—2239 (in Chinese).
- Zhu, D.C., Mo, X.X., Wang, L.Q., et al., 2009. Petrogenesis of Highly Fractionated I-Type Granites in the Zayu Area of Eastern Gangdese, Tibet: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Science in China (Series D)*, 58(23): 2233—2239 (in Chinese).
- Zhu, D.C., Pan, G.T., Chung, S.L., et al., 2008. SHRIMP Zircon Age and Geochemical Constraints on the Origin of Lower Jurassic Volcanic Rocks from the Yeba Formation, Southern Gangdese, South Tibet. *International Geology Review*, 50 (5): 442—471. doi: 10.2747/0020-6814.50.5.442
- ### 附中文参考文献
- 包志伟,李创举,祁进平,2009.东秦岭栾川铅锌银矿田辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及成矿时代.岩石学报,25 (11): 2951—2956.
- 陈立辉,周新华,2003.鲁西中生代闪长岩中的深源超镁铁质岩捕虏体及其富硅交代特征.中国科学(D辑):地球科学,33(8): 734—744.
- 第五春荣,孙勇,林慈銮,等,2007.豫西宜阳地区 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学.岩石学报,23 (2): 253—262.
- 第五春荣,孙勇,林慈銮,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.科学通报,55(21): 2112—2123.
- 董增产,辜平阳,陈锐明,等,2015.柴北缘西端盐场北山二长花岗岩年代学、地球化学及其 Hf 同位素特征.地球科学,40(1): 130—144.
- 冯佐海,王春增,王葆华,2009.花岗岩侵位机制与成矿作用.桂林工学院学报,29(2): 183—194.
- 葛小月,李献华,陈志刚,等,2002.中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学特征及成因:对中国东部地壳厚度的制约.科学通报,47(6): 474—480.
- 何亚清,陈凤群,2013.栾川县火神庙钼矿地质特征及找矿标志.采矿技术,13(3): 115—118.
- 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.岩石学报,23(10): 2595—2604.
- 华仁民,张文兰,陈培荣,等,2013.初论华南加里东花岗岩与大规模成矿作用的关系.高校地质学报,19(1): 1—11.
- 焦二中,2007.栾川火神庙矿区铅钼矿床地质特征.矿业快报,7(7): 64—65.
- 敬海鑫,孙德有,苟军,等,2015.兴凯地块南部花岗岩年代学、地球化学及 Hf 同位素特征.地球科学,40(6): 982—994.
- 李怀坤,朱士兴,相振群,等,2010.北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束.岩石学报,26(7): 2131—2140.
- 李曙光,葛宁洁,刘德良,等,1989.大别山北翼大别群中 C 型榴辉岩的 Sm-Nd 同位素年龄及其构造意义.科学通报,34(7): 522—525.
- 李献华,李武显,李正祥,2007.再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义.科学通报,52(9): 981—991.
- 李献华,李武显,王选策,等,2009.漫源岩浆在南岭燕山早期花岗岩形成中的作用:锆石原位 Hf—O 同位素制约.中

- 国科学(D辑),39(7):872—887.
- 李永峰,毛景文,白凤军,等,2003.东秦岭南泥湖钼(钨)矿田 Re-Os 同位素年龄及其地质意义.地质论评,49(6):652—659.
- 李永峰,毛景文,胡华斌,等,2005.东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景.矿床地质,24(3):292—304.
- 卢克学,程相恩,王夏,等,2008.栾川黑家庄钼矿区矿床地质特征及成因探讨.西部探矿工程,20(10):144—146.
- 吕文德,赵春和,孙卫志,等,2006.豫西南泥湖多金属矿田铅锌矿地质特征与成因研究.矿产与地质,20(3):219—226.
- 毛景文,谢桂青,张作衡,等,2005.中国北方大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景.岩石学报,21(1):169—188.
- 毛景文,叶会寿,王瑞廷,等,2009.东秦岭中生代钼铅锌银多金属矿床成矿模型及其找矿评价.地质通报,28(1):72—79.
- 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.地质论评,49(4):361—366.
- 邱检生,肖娥,胡建,等,2008.福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因:锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约.岩石学报,24(11):2468—2484.
- 王赛,叶会寿,杨永强,等,2014a.河南栾川火神庙钼矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义.地质通报,33(9):1430—1438.
- 王赛,叶会寿,杨永强,等,2014b.豫西火神庙矽卡岩型钼矿床成矿流体研究.矿床地质,33(6):1233—1250.
- 王晓霞,王涛,齐秋菊,等,2011.秦岭南中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义.岩石学报,27(6):1573—1593.
- 吴福元,李献华,杨进辉,等,2007a.花岗岩成因研究的若干问题.岩石学报,23(6):1217—1238.
- 吴福元,李献华,郑永飞,等,2007b. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用.岩石学报,23(2):185—220.
- 向君峰,毛景文,裴荣富,等,2012.南泥湖—三道庄钼(钨)矿的成岩成矿年龄新数据及其地质意义.中国地质,39(2):458—473.
- 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.岩石学报,28(12):4031—4046.
- 辛志刚,2010.栾川黑家庄钼矿区成矿地质特征及找矿启示.西部探矿工程,22(5):101—102.
- 熊小林,刘星成,朱志敏,等,2011.华北埃达克质岩与克拉通破坏:实验岩石学和地球化学依据.中国科学(D辑),41(5):654—667.
- 徐夕生,鲁为敏,贺振宇,2007.佛冈花岗岩基及乌石闪长岩一角闪辉长岩体的形成年龄和起源.中国科学(D辑),37(1):27—38.
- 徐兆文,任启江,1988.河南栾川石宝沟、火神庙和大坪岩体岩浆演化特征及其与钼矿化关系.南京大学学报,1:95—103.
- 杨承海,许文良,杨德彬,等,2008.鲁西上峪辉长—闪长岩的成因:年代学与岩石地球化学证据.中国科学(D辑),38(1):44—45.
- 杨荣勇,徐兆文,陆现彩,等,1996.东秦岭钼矿带成矿岩体与非成矿岩体的对比研究.矿物岩石,16(3):49—53.
- 杨荣勇,徐兆文,任启江,1997.东秦岭地区石宝沟和火神庙岩体的时代及岩浆物质来源.矿物地球化学通报,16(1):17—20.
- 杨阳,王晓霞,柯昌辉,等,2012.豫西南泥湖矿集区石宝沟花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄、地球化学及 Hf 同位素组成.中国地质,39(6):1525—1542.
- 叶会寿,毛景文,李永峰,等,2006.豫西南泥湖矿体钼钨及铅锌银矿床地质特征及其成矿机理探讨.现代地质,20(1):165—174.
- 张旗,金惟俊,李承东,等,2011.花岗岩与地壳厚度关系探讨.大地构造与成矿学,35(2):259—269.
- 郑建平,孙敏,路风香,等,2005.信阳基性麻粒捕虏体及其华北南缘早中生代下地壳性质.岩石学报,21(1):91—98.
- 郑永飞,赵子福,陈伊翔,2013.大陆俯冲隧道过程:大陆碰撞过程中的板块界面相互作用.科学通报,58(23):2233—2239.
- 朱弟成,莫宣学,王立全,等,2009.西藏冈底斯东部察隅高分异 I 型花岗岩的成因:锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束.中国科学(D辑),39(7):833—848.