

秦岭山阳-柞水地区燕山期中酸性侵入岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素组成*

吴发富^{1,2} 王宗起¹ 闫臻³ 陈雷¹ 夏长玲⁴ 郭延辉⁴ 彭远民⁴

WU FaFu^{1,2}, WANG ZongQi¹, YAN Zhen³, CHEN Lei¹, XIA ChangLing⁴, GUO YanHui⁴ and PENG YuanMin⁴

1. 中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与矿产资源评价重点实验室,北京 100037

2. 中国地质调查局武汉地质调查中心,武汉 430205

3. 中国地质科学院地质研究所,北京 100037

4. 西北有色地质勘查局 713 总队,商洛 726000

1. MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China

3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

4. No. 713 Geological Team, Northwest Mining and Geological Exploration Bureau for Nonferrous Metals, Shangluo 726000, China

2013-02-06 收稿, 2013-08-11 改回.

Wu FF, Wang ZQ, Yan Z, Chen L, Xia CL, Guo YH and Peng YM. 2014. Geochemical characteristics, zircons U-Pb ages and Lu-Hf isotopic composition of the Yanshanian intermediate-acidic plutons in the Shanyang-Zhushui areas, Qinling Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2):451–471

Abstract A large number of Yanshanian intermediate-acidic granite (porphyry) are widely exposed in the Shanyang-Zhushui region, Qinling, and among of them are associated porphyry-skarn Cu-Mo-Fe and Cu-Au-Fe mineralization. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages reveal porphyry bodies are formed in the 144.6 ~ 141.5Ma. Geochemical analysis results showing that intermediate-acidic granite (porphyry) have $\text{SiO}_2 = 55.73\% \sim 67.80\%$, $\text{K}_2\text{O} = 2.52\% \sim 6.40\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 1.94\% \sim 5.19\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.61\% \sim 16.10\%$, $\text{FeO}^T = 2.1\% \sim 9.0\%$ and $\text{MgO} = 1.32\% \sim 5.52\%$, proving that they belong to high-K calc-alkaline granites. $A/\text{CNK} < 1.1$, negative correlation between P_2O_5 and SiO_2 , $\text{Mg}^\#$ average values 49 and mineral ingredients (hornblende, biotite, sphenes and magnetite), all of these reveal the characteristics of I-type granites. REE fractionation obviously, no manifest Eu anomaly, enriched in large ion lithophile elements, such as K, Rb, Sr and Ba, and depleted in high field strength elements, e. g. Nb, Ta, Ti, P and Hf, show that they belong to post-collision granites. Zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ range from -4.5 to $+1.78$ (average -0.87), indicating that the magma may sourcing from subducted mafic crustal material mixing with mantle material, and crustal melting are main ingredients. Hf isotopes two-stage model ages ($t_{\text{DM}2}$), 1479 ~ 1084Ma, indicated its crustal source is formed in Middle to Late Proterozoic (ca. 1.4 ~ 1.0Ga).

Key words Granite; Zircons U-Pb ages; Lu-Hf isotope; Yanshanian; Shanyang-Zhushui

摘要 秦岭山阳-柞水地区广泛出露燕山期中酸性花岗(斑)岩体,并有大量与其相关的斑岩-矽卡岩型 Cu-Mo-Fe、Cu-Au-Fe 矿化。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明,与矿化密切相关的斑岩体形成于 144.6 ~ 141.5Ma。岩石地球化学分析结果表明,这些花岗(斑)岩体 SiO_2 含量为 55.73% ~ 67.80%, K_2O 含量为 2.52% ~ 6.40%, Na_2O 含量为 1.94% ~ 5.19%, Al_2O_3 含量为 14.61% ~ 16.10%, FeO^T 含量为 2.1% ~ 9.0%, MgO 含量为 1.32% ~ 5.52%, 主体显高钾钙碱性准铝质特征。 $A/\text{CNK} < 1.1$, P_2O_5 与 SiO_2 负相关, $\text{Mg}^\#$ 平均为 49, 含有角闪石、黑云母、榍石、磁铁矿等矿物,属 I 型花岗岩类;稀土元素分异明显,无明

* 本文受国家科技支撑计划课题(2011BAB04B05、2006BAB01A11)和国家自然科学基金项目(41172178、40772137)联合资助。

第一作者简介:吴发富,男,1980年生,博士,构造地质学专业,E-mail: wufafu@126.com

显 Eu 异常;富集 K、Rb、Sr、Ba 等大离子亲石元素, Nb、Ta、Ti、P 和 Hf 等高场强元素亏损, 属后碰撞型花岗岩。岩体的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-4.5 \sim +1.78$, 平均为 -0.87 , 表明其岩浆源区为地壳物质的熔融岩浆与幔源岩浆的混合, 且以地壳熔融成份为主; Hf 同位素二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 为 $1479 \sim 1084\text{Ma}$, 表明其壳源区物质可能形成于中晚元古代 ($1.4 \sim 1.0\text{Ga}$)。

关键词 花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; Lu-Hf 同位素; 燕山期; 山阳-柞水

中图法分类号 P588.121; P597.3

秦岭造山带是华北板块和扬子板块古生代俯冲-增生造山作用和中生代碰撞造山作用共同形成的叠合型造山带(王宗起等, 2009)。该造山带被商(县)丹(凤)和勉(县)略(阳)两条缝合带所分割, 自北而南依次被称为北秦岭、南秦岭构造带和扬子板块。该造山带内的岩浆活动强烈, 主要发育中-晚印支期(237~199Ma)花岗岩(严阵, 1985; 尚瑞钧和严阵, 1988; 李先梓等, 1993; 卢欣祥等, 1996, 1999, 2007; 胡健民等, 2004; 王晓霞等, 2005; 弓虎军等, 2009a, b; Qin *et al.*, 2009, 2010; 秦江锋, 2010; Jiang *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2011; 刘树文等, 2011)。在山阳-柞水地区出露有沙河湾、柞水和东江口等岩体, 它们分布于商丹断裂带南侧中秦岭弧前盆地和弧前增生杂岩带(Yan *et al.*, 2006, 2012)中。这些花岗岩多属于高钾钙碱性 I 型花岗岩, 并具有埃达克岩的地球化学特征(秦江锋等, 2005, 2007; Zhang *et al.*, 2007; 张成立等, 2008; Qin *et al.*, 2009, 2010; Jiang *et al.*, 2010; 秦江锋, 2010), 是由亏损地幔岩浆与古老下地壳部分熔融岩浆发生混合作用所形成(王晓霞等, 2005; 王娟等, 2008; 弓虎军等, 2009a, b; 田伟等, 2009; 秦江锋, 2010; 刘树文等, 2011; Liu *et al.*, 2011)。同时, 在商丹缝合带两侧也有大量的侏罗纪-白垩纪岩浆作用。在该缝合带北侧主要表现为莽岭岩体、蓝田岩体、华山岩体、合峪岩体等岩基, 而在其南侧的山阳-柞水地区主要表现为闪长岩、石英闪长岩、花岗岩闪长岩、二长花岗岩等中酸性小岩珠、小岩枝。

近年来, 在山阳-柞水地区相继发现了众多与燕山中晚期中酸性花岗(斑)岩体密切相关的斑岩-矽卡岩型 Cu-Mo-Fe、Cu-Mo-Au-Fe 矿床(点), 然而, 对于这些花岗岩的岩相学、岩石地球化学和形成时代研究相对较弱。尽管前人对山阳-柞水地区的花岗(斑)岩体进行了不同程度的研究, 并获得了一系列同位素年龄证据, 但这些年龄数据主要是花岗岩黑云母 K-Ar 年龄和全岩 Rb-Sr 等时线模式年龄, 年龄范围变化较大(276.6~94.6Ma)(万义文, 1980; 严阵, 1985; 尚瑞钧和严阵, 1988; 李先梓等, 1993), 缺乏相对系统的锆石 U-Pb 同位素年代学研究。此外, 系统的岩石学和岩石地球化学研究也相对缺乏。这些均影响和制约了该区与花岗质岩浆作用相关的矿产的地质找矿预测。因此, 准确厘定山阳-柞水地区花岗(斑)岩体的形成时代、岩石学及其地球化学特征和岩浆源区, 对于探讨侏罗纪-白垩纪秦岭造山带构造演化乃至指导该区的区域找矿都具有重要的理论和实际意义。

本文对山阳-柞水地区白沙沟 Au 矿化点、池沟 Cu-Mo-Au 矿区以及土地沟 Cu-Mo 矿化点内出露的闪长(玢)岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩等主要岩类进行了系统

的野外调查, 采集了相关分析样品。室内在岩石学和地球化学研究基础上, 运用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年方法进行了成岩年龄测定, 并研究了锆石 Lu-Hf 同位素组成, 进而探讨了这些含矿岩体的岩石类型、地球化学特征、形成时代及岩浆源区性质和形成的构造背景。

1 地质背景

研究区位于陕西省山阳县-柞水县一带, 属南秦岭造山带, 其北部边界为商丹断裂, 南部为凤镇-山阳断裂(图 1a)。商丹断裂将秦岭造山带分为北秦岭和南秦岭(李春昱等, 1978)。近 EW 向的凤镇-山阳断裂为本区南界断层, 是一条由 NS 向逆冲推覆与近 EW 向走滑剪切叠加形成的大型断层带, 控制了本研究区南界。在凤镇-山阳断裂及其以北的多条与其近于平行的断层被 NS、NNE 向左行走滑断层所切割(图 1a), 它们共同控制了区内花岗(斑)岩体和地层的产出与分布。山阳-柞水地区主要出露泥盆纪地层, 研究区内主要出露中泥盆世刘岭群, 为一套滨浅海相-三角洲相沉积组合(闫臻等, 2007); 研究区南侧主要出露石炭系和中上泥盆统, 属深海相-浅海相沉积组合(Yan *et al.*, 2006)(图 1a)。区域构造分析以及砂岩碎屑组成等综合研究表明, 山阳-柞水地区的晚古生代沉积为一套弧前盆地沉积组合(王宗起等, 2002; 闫臻等, 2007; Yan *et al.*, 2006, 2012)。在凤镇-山阳断裂内部, 自西向东断续分布有新元古代小磨岭杂岩、冷水沟杂岩和板板山岩体等, 它们以构造透镜体形式与泥盆系碎屑岩相互混杂。

山阳-柞水地区以印支期和燕山期两期岩浆活动最为显著(严阵, 1985; 尚瑞钧和严阵, 1988; 张本仁等, 1989; 卢欣祥等, 1999, 2007; 胡健民等, 2004; 王晓霞等, 2005; 弓虎军等, 2009a, b; Qin *et al.*, 2009, 2010; Jiang *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2011; 刘树文等, 2011)。在西北部及北部分别出露柞水、曹坪以及沙河湾等印支中-晚期花岗岩基(图 1a), 主要为黑云母二长花岗岩、石英二长岩、二长花岗岩和黑云角闪二长花岗岩(严阵, 1985; 尚瑞钧和严阵, 1988; 李先梓等, 1993); 这些岩基内均发育大量大小不一且不规则、无变形的辉长岩及闪长岩包体(崔建堂等, 1998; 胡健民等, 2004; 王晓霞等, 2005; 秦江锋, 2010; Jiang *et al.*, 2010)。

燕山期中酸性岩类在山阳-柞水地区广泛出露(图 1a), 主要发育闪长岩、花岗闪长岩、石英闪长岩、二长花岗岩等花岗(斑)岩体。岩体以长数百米、厚数米至十余米者较多, 出露面积一般小于 0.12km^2 , 最大 0.17km^2 , 呈岩枝、岩株、岩瘤

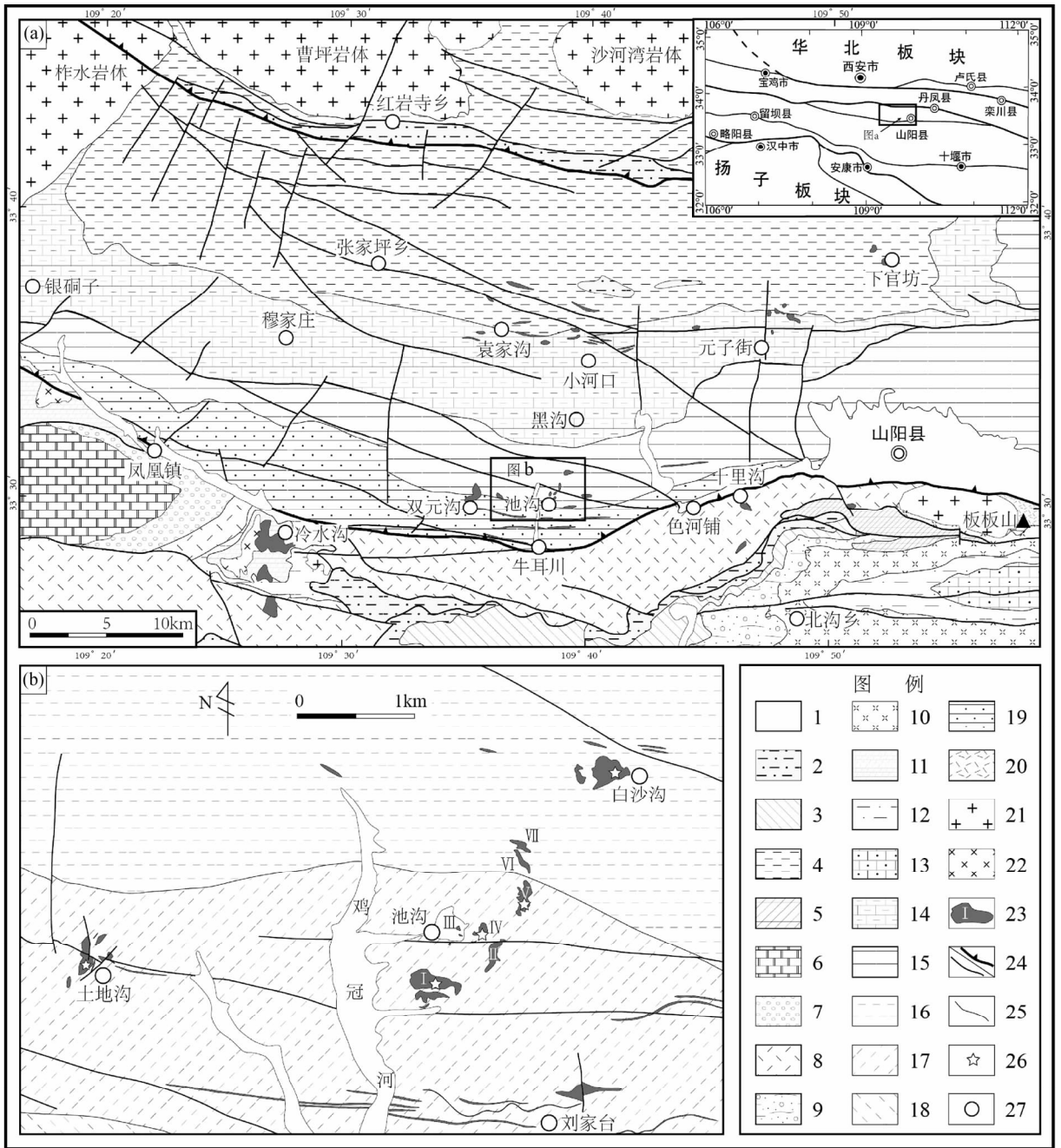


图 1 秦岭山阳-柞水地区地质简图(a)及池沟地区地质简图(b)

1-新生界;2-石炭系;3-早石炭世到晚泥盆世油房坪组;4-晚泥盆世桐峪寺组;5-晚泥盆世馒头山组;6-晚泥盆世沙河湾组;7-晚泥盆世火星沟组;8-晚泥盆世云镇组;9-晚泥盆世罗家湾组;10-晚泥盆世星红铺组;11-中泥盆世龙洞组;12-中泥盆世古道岭组;13-中泥盆世大枫沟组;14-中泥盆世青石垭组;15-中泥盆世池沟组;16-池沟组一段;17-池沟组二段;18-池沟组三段;19-中泥盆世牛耳川组;20-前寒武纪地层;21-印支期花岗岩;22-辉绿岩;23-燕山期花岗岩类;24-逆冲推覆构造及断层;25-地层界线;26-采样点;27-地名

Fig. 1 Geological sketch map of Shanyang-Zhushui region in Qinling orogenic belt (a) and geological sketch map of Chigou area (b)
 1-Cenozoic; 2-Carboniferous; 3-Early Carboniferous to Late Devonian Youfangping Fm.; 4-Late Devonian Tongyusi Fm.; 5-Late Devonian Mantoushan Fm.; 6-Late Devonian Shahewan Fm.; 7-Late Devonian Huoxingou Fm.; 8-Late Devonian Yunzhen Fm.; 9-Late Devonian Luojiawan Fm.; 10-Late Devonian Xinghongpu Fm.; 11-Middle Devonian Longdong Fm.; 12-Middle Devonian Gudaoling Fm.; 13-Middle Devonian Dafengou Fm.; 14-Middle Devonian Qingshiya Fm.; 15-Middle Devonian Chigou Fm.; 16-the first member of Chigou Fm.; 17-the second member of Chigou Fm.; 18-the third member of Chigou Fm.; 19-Middle Devonian Niuerchuan Fm.; 20-Precambrian; 21-Indosinian granite; 22-diabase; 23-Yanshanian granitoids; 24-thrust nappes and faults; 25-geological boundary; 26-sampling location; 27-village and town

状产出(张银龙,2002),岩体分布受近EW、NE/NNE向2组断裂的控制,成群成带出露,侵入于刘岭群中,约40余个。在这些燕山期花岗(斑)岩体内及其与地层接触带广泛出露斑岩-矽卡岩型矿化。区内目前已发现下官坊Fe-Cu矿床、园子街Cu-Au-Fe多金属矿床、小河口Cu-Mo矿床、池沟Cu-Mo-Au矿床、冷水沟Cu-Mo矿床等一系列斑岩-矽卡岩型多金属矿床。

2 花岗岩岩相学特征

本文在对白沙沟、池沟和土地沟一带出露的中酸性花岗(斑)岩体(图1b)进行了详细的野外研究的基上,采集了代表性分析样品,室内对其进行了显微结构分析,具体如下。

(1)白沙沟岩体:出露于池沟Ⅶ号岩体东北侧约1km处(图1b)。岩体呈不规则的斜三角状产出,出露面积约0.07km²,在主岩体附近有小型岩枝产出,由闪长玢岩(图2a)、石英闪长岩、花岗闪长岩共同构成。闪长玢岩:斑状结构(图2b),斑晶为斜长石,粒径2.5~4mm左右,斜长石斑晶以发育环带状结构为特征。主要矿物成分为斜长石(60%)、钾长石(8%~10%)、角闪石(15%)、石英(5%)和黑云母(4%);副矿物主要见榍石、磷灰石、锆石、磁铁矿等;发育绿泥石化、绿帘石化。石英闪长岩:细粒结构,粒径<2mm;主要矿物成分为斜长石(40%)、钾长石(10%)、石英(18%)、角闪石(15%)、黑云母(8%);副矿物有磷灰石、榍石、磁铁矿和锆石等;风化较强。花岗闪长岩:细粒结构,粒径约1mm左右;主要矿物为斜长石(35%)、钾长石(15%)、石英(25%)、角闪石(11%)、黑云母(4%~5%);副矿物主要为磷灰石、榍石以及锆石;长石发育简单双晶;见弱绿泥石化。

(2)池沟岩体:包括Ⅰ号、Ⅱ号、Ⅲ号、Ⅳ号、Ⅴ号、Ⅵ号以及Ⅶ号小岩体(图1b)。Ⅰ号岩体岩性为黑云母二长花岗岩,出露于最南侧,出露两支,均呈东西向展布,岩体长80~430m,宽10~160m,面积约0.06km²。Ⅱ~Ⅶ号岩体岩性为闪长岩、闪长玢岩、石英闪长岩、花岗闪长岩等。Ⅱ号岩体出露于Ⅰ号岩体东北约500m处,呈岩枝(脉)状南北向延伸,长320m,宽20~70m,面积0.02km²。Ⅳ号岩体出露于Ⅱ号岩体北西侧约150m,呈不规则小岩珠产出,长、宽都在40~60m之间,出露面积约0.006km²,Ⅲ号岩体出露于Ⅳ号岩体正西侧,是本区出露最小的岩体,面积不到0.001km²。Ⅴ号、Ⅵ号和Ⅶ号岩体全部出露于Ⅱ号及Ⅳ号岩体北侧,与Ⅱ号岩体呈北北东向串珠状排列。Ⅴ号岩体相对较大,出露面积约0.02km²,Ⅵ号和Ⅶ号岩体出露面积都在0.001km²以下。这些岩体发育不同程度的绿泥石化、绿帘石化以及黄铁矿化、黄铜矿化和少量辉钼矿化等。此外,在池沟小(斑)岩体的钻孔岩芯中见到多个闪长质暗色包体。

Ⅰ号岩体黑云母二长花岗岩,呈斑状结构,斑晶包括钾长石(Kfs)、斜长石(Pl)以及少量黑云母,粒径0.9~1.8mm;主要矿物成分为钾长石(30%)、斜长石(25%)、石英

(32%),黑云母(8%)和角闪石(4%),副矿物主要有榍石、锆石、磁铁矿等。Ⅱ号和Ⅳ号闪长岩(图2c):细粒结构(2d),粒径0.5~1.2mm;主要矿物为斜长石(60%)、钾长石(11%)、石英(5%)、角闪石(16%)和黑云母(5%)组成,斜长石发育卡钠双晶;副矿物有榍石、磷灰石和锆石等;可见绿泥石化、绿帘石化和泥化。Ⅲ号石英闪长岩:细粒结构,粒径<0.2mm,局部见斜长石斑晶,粒径1mm左右。主要由石英(15%)、斜长石(35%)、钾长石(15%)、角闪石(15%)、黑云母(5%);副矿物磷灰石、榍石、磁铁矿和锆石等;风化较强,长石多绿泥石化。Ⅴ号、Ⅵ号以及Ⅶ号为花岗闪长岩(图2e),呈细粒结构(图2f),粒径约0.5mm左右;主要矿物为斜长石(35%)、钾长石(15%)、石英(25%)、角闪石(11%)、黑云母(4~5%);含少量磷灰石、榍石、磁铁矿等副矿物;长石具卡斯巴双晶、简单双晶;见弱绿泥石化。

(3)土地沟岩体:在平面上呈近南北向展布,向东南端突出,南北方向长约300m,东西宽约20~120m,出露面积约0.03km²(图1b);岩体风化及矿化显著,发育高岭土化。岩性为二长花岗斑岩(图2g),呈斑状结构(图2h),斑晶为钾长石(Kfs)和斜长石(Pl),粒径0.8~1.5mm,基质为隐晶结构,主要由石英、钾长石和斜长石组成;主要矿物成分为钾长石(30%)、斜长石(25%)、石英(32%);暗色矿物为角闪石和黑云母,总含量不到5%;副矿物有榍石、磷灰石、锆石、磁铁矿等;发育绿泥石化以及绿帘石化。

上述岩相学特征表明,山阳-柞水地区出露的小(斑)岩体包括中性和酸性两类。其中,白沙沟小(斑)岩体和池沟Ⅱ~Ⅶ号岩体为中性岩类,包括闪长岩、闪长玢岩、石英闪长岩、花岗闪长岩几种岩性;而池沟Ⅰ号岩体和土地沟岩体为酸性岩,其岩性为二长花岗岩。岩体野外地质特征显示各岩体的不同岩性间呈渐变过渡,无明显界限,因此山阳-柞水地区出露的小(斑)岩体可能为同源岩浆结晶分异形成。

3 测试分析方法

本文在对区研区小(斑)岩体进行显微结构分析的基础上,选择白沙沟闪长玢岩、石英闪长岩和花岗闪长岩,池沟黑云母二长花岗岩、闪长岩、闪长玢岩、石英闪长岩以及花岗闪长岩,土地沟二长花岗斑岩样品进行了岩石地球化学分析。并选取白沙沟石英闪长玢岩、池沟(Ⅳ号)闪长岩、池沟(Ⅴ号)花岗闪长岩和土地沟二长花岗岩进行LA-LCP-MS锆石U-Pb年龄测定和Lu-Hf同位素分析。

全岩主量、微量和稀土元素测试分析在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。测试过程中3个标准样品GSR1、GSR2和GSR3一同被测试,用于控制实验分析误差和精度。主量元素利用Phillips 4400 X-荧光光谱仪进行测试,烧失量(LOI)通过对样品加热至1000℃后1小时称量其重量变化获得,FeO采用容量滴定法测定。微量元素和稀土元素采用等离子体质谱仪(ICP-MS)来测定。主量元素检测限

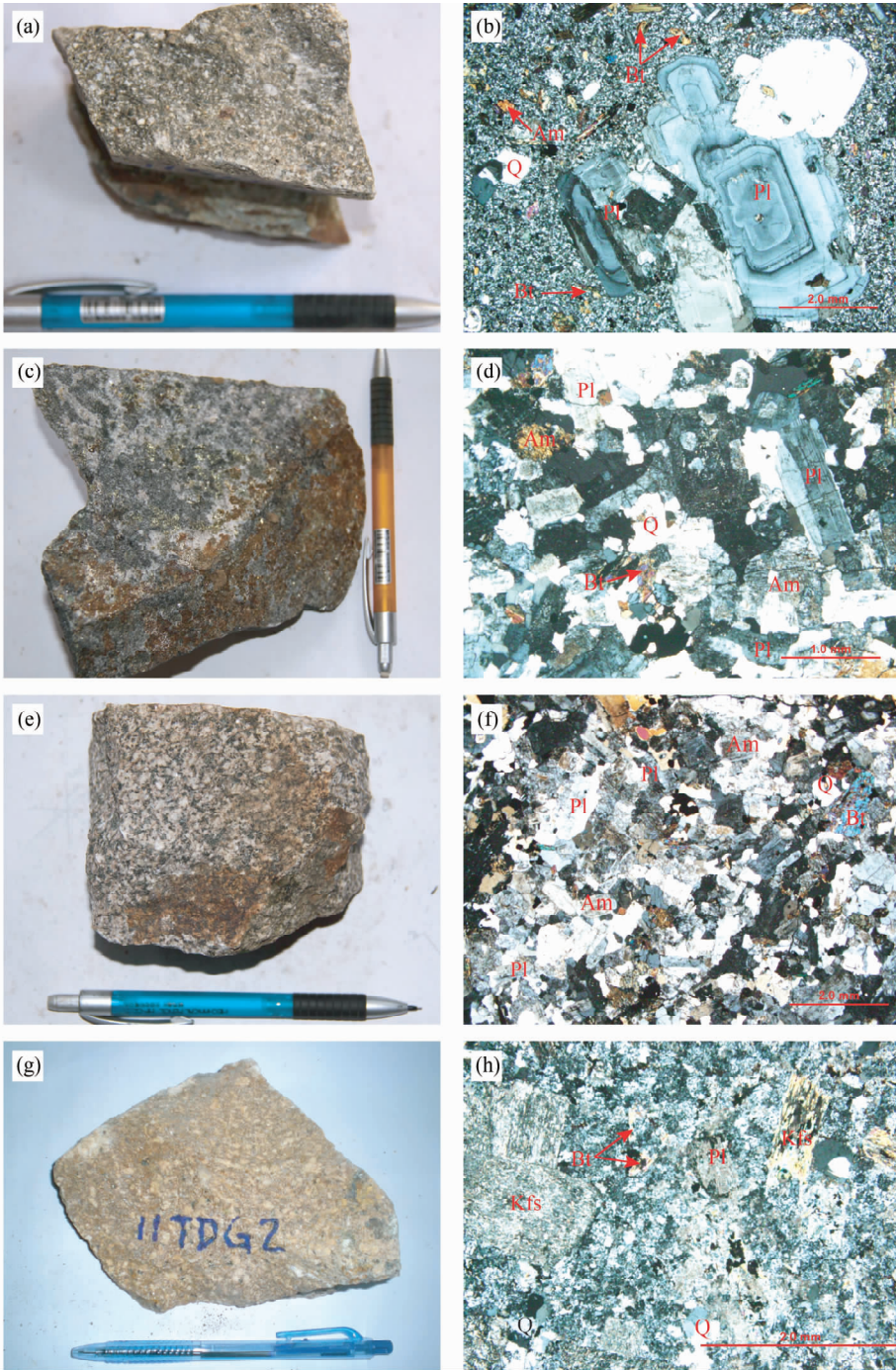


图 2 池沟地区燕山期花岗(斑)岩体标本及镜下照片

(a)-白沙沟闪长玢岩标本;(b)-白沙沟闪长玢岩镜下照片;(c)-池沟 IV 号岩体闪长岩标本;(d)-池沟 IV 号岩体闪长岩镜下照片;(e)-池沟 V 号岩体花岗闪长岩标本;(f)-池沟 V 号岩体花岗岩闪长岩镜下照片;(g)-土地沟二长花岗岩标本;(h)-土地沟二长花岗斑岩镜下照片。Qtz-石英;Kfs-钾长石;Pl-斜长石;Am-角闪石;Bi-黑云母

Fig. 2 Photos and micrographs of the Yanshanian granite (porphyry) from the Chigou area

(a)-photo of the diorite-porphyrityte in Baishagou; (b)-micrograph of the diorite-porphyrityte in Baishagou; (c)-photo of the diorite from the IV pluton in Chigou; (d)-micrograph of the diorite from the IV pluton in Chigou; (e)-photo of the granodiorite from the V pluton in Chigou; (f)-the micrograph of the granodiorite from the V pluton in Chigou; (g)-photo of the monzonite granite in Tudigou; (h)-micrograph of the monzonite granite in Tudigou. Qtz-quartz; Kfs-K-feldspar; Pl-plagioclase; Am-amphibole; Bi-biotite

为 $<0.01\%$ (TiO_2 和 MnO 为 $<0.001\%$) ; 微量、稀土元素检测限为 $1 \times 10^{-6} \sim 0.05 \times 10^{-6}$ 。 主量元素分析结果精度优于 1% , 误差小于 5% , 微量稀土元素分析误差为 $5\% \sim 10\%$ 。

锆石的分离在河北省廊坊地质调查研究院选矿实验室进行。样品经人工破碎后,用常规重力和磁选方法分选出锆石,然后在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石。将待测样品的锆石颗粒置于树脂台上,经打磨、抛光后并镀环氧树脂制靶,用于阴极发光、U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析。锆石阴极发光在北京锆年领航科技有限公司完成。锆石 U-Pb 测年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完成,所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。采用单点剥蚀的方式,激光剥蚀所用斑束直径为 $25\mu\text{m}$, 频率为 10Hz , 能量密度约为 $2.5\text{J}/\text{cm}^2$, 以 He 为载气。锆石 U-Pb 测年以锆石 GJ-1 为外标, U、Th 含量以锆石 M127 ($U = 923 \times 10^{-6}$; $Th = 439 \times 10^{-6}$; $Th/U = 0.475$) (Nasdala *et al.* , 2008) 为外标进行校正。测试过程中每测定 10 个样品前后重复测定两个标样锆石 GJ1 对样品进行校正,并测量一个锆石标样 Plesovice, 观察仪器的状态和测试的重现性, 锆石标准的重现性在 1% (2σ) 左右。数据处理采用程序 (ICPMS Data Calt) (Liu *et al.* , 2008) , 测量过程中大多数分析点 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 1000$, 未进行普通铅校正, ^{204}Pb 由离子计数器检测, ^{204}Pb 含量异常高的分析点可能受包体普通 Pb 的影响, 这些点在计算时剔除, 锆石年龄谱和图用 Isoplot 3.0 程序制作, 表达式中所列单个数据点的误差均为 1σ , 加权平均年龄具 95% 的置信度。实验测试过程见侯可军等(2009)。本次样品分析过程中, Plesovice 标样作为未知样品的分析结果为 $337.1 \pm 2.9\text{Ma}$ ($n = 5, 2\sigma$) , 对应的年龄推荐值为 $337.13 \pm 0.37\text{Ma}$ (2σ) (Slama *et al.* , 2008) , 两者在误差范围内一致。

锆石 Lu-Hf 同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP 213 紫外激光剥蚀系统 (LA-MC-ICP-MS) 上进行, 实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气, 剥蚀直径采用 $55\mu\text{m}$ 。测定时使用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质, 分析点与 U-Pb 测年分析点位于同一颗锆石的相同位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。分析过程中锆石标准 GJ1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值分别为 0.282008 ± 20 ($2\sigma, n = 12$) , 分别与推荐值 0.2823075 ± 58 (2σ) (Wu *et al.* , 2006) 和 0.282015 ± 0.000019 (2σ) (Elhlou *et al.* , 2006) 在误差范围内完全一致。 ε_{Hf} 的计算采用 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ (Scherer *et al.* , 2001) , 球粒陨石现今的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282772$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332$ (Blichert-Toft and Albarede, 1997) , Hf 亏损地幔二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 的计算采用平均陆壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值 0.015 (Griffin *et al.* , 2002) 。

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素特征

4.1.1 白沙沟岩体

对白沙沟小(斑)岩体的花岗闪长岩、石英闪长岩和闪长玢岩三种主要岩性进行了主量元素分析(表1), 结果显示其 SiO_2 变化范围 $56.61\% \sim 64.37\%$, K_2O 含量为 $2.52\% \sim 3.60\%$, Na_2O 含量为 $4.47\% \sim 5.19\%$, 里特曼指数 (σ) 为 $3.37 \sim 3.47$, Al_2O_3 含量为 $14.83\% \sim 16.10\%$, CaO 含量为 $3.55\% \sim 4.96\%$, FeO^{T} 含量为 $3.95\% \sim 9.00\%$, TiO_2 含量为 $0.55\% \sim 0.83\%$, P_2O_5 含量为 $0.38\% \sim 0.60\%$, MgO 含量为 $1.60\% \sim 3.74\%$, $\text{Mg}^{\#}$ 值为 $50.06 \sim 56.00$ 。 A/CNK 比值为 $0.75 \sim 0.86$, A/NK 比值为 $1.29 \sim 1.47$ 。

4.1.2 池沟岩体

对池沟小(斑)岩体的闪长岩、闪长玢岩、石英闪长岩、花岗闪长岩以及二长花岗岩进行了主量元素分析, 其 SiO_2 变化范围 $55.73\% \sim 67.80\%$, K_2O 含量为 $3.25\% \sim 4.64\%$, Na_2O 含量为 $3.48\% \sim 4.82\%$, 里特曼指数 (σ) 为 $2.41 \sim 4.66$, Al_2O_3 含量为 $14.61\% \sim 16.00\%$, CaO 含量为 $2.34\% \sim 6.18\%$, FeO^{T} 含量为 $2.06\% \sim 6.38\%$, TiO_2 含量为 $0.44\% \sim 0.95\%$, P_2O_5 含量为 $0.29\% \sim 0.83\%$, MgO 含量为 $1.32\% \sim 5.52\%$, $\text{Mg}^{\#}$ 值为 $49.90 \sim 67.14$, A/CNK 比值为 $0.64 \sim 1.07$, A/NK 比值为 $1.31 \sim 1.68$ 。

4.1.3 土地沟岩体

土地沟二长花岗斑岩的 SiO_2 变化范围 $64.11\% \sim 64.18\%$, K_2O 含量为 $6.25\% \sim 6.40\%$, Na_2O 含量为 $1.94\% \sim 2.15\%$, σ 值为 $3.28 \sim 3.37$, Al_2O_3 含量为 $15.08\% \sim 15.47\%$, CaO 含量为 $2.63\% \sim 2.71\%$, FeO^{T} 含量为 $2.42\% \sim 2.44\%$, TiO_2 含量为 $0.44\% \sim 0.45\%$, P_2O_5 含量为 0.24% , MgO 含量为 1.34% , $\text{Mg}^{\#}$ 值为 $51.55 \sim 51.65$, A/CNK 比值为 $1.00 \sim 1.03$, A/NK 比值为 $1.49 \sim 1.50$ 。

以上分析结果表明, 白沙沟、池沟以及土地沟小(斑)岩体的地球化学组成相似, 均显示钙碱性花岗岩特征; 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 岩石系列判别图(图3a)中, 分析样品属于高钾钙碱性系列, 部分属钾玄岩系列; 在 $A/\text{CNK}-A/\text{NK}$ 图解(图3b)中, 分析样品属于准铝质花岗岩, 有 2 件池沟闪长岩样品属过铝质花岗岩。样品的 A/CNK 比值全部小于 1.1 , 属 I 型花岗岩, 在 $\text{Zr}-\text{SiO}_2$ 图(图4a)和 $\text{Y}-\text{SiO}_2$ 图(图4b)上, 样品投点也全部落入 I 型花岗岩范围内。

4.2 稀土及微量元素特征

白沙沟闪长玢岩、石英闪长岩、花岗闪长岩的稀土元素和微量元素组成高度一致(表1)。 $\Sigma\text{REE} = 196.9 \times 10^{-6} \sim 257.1 \times 10^{-6}$, $\text{LREE} = 181.0 \times 10^{-6} \sim 239.7 \times 10^{-6}$, $\text{HREE} = 15.6 \times 10^{-6} \sim 17.4 \times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 11.37 \sim 13.80$,

表 1 山阳县池沟地区燕山期花岗岩(斑)岩体的主量(wt%)、微量和稀土元素($\times 10^{-6}$)组成Table 1 Major (wt%), trace and rare earth elements ($\times 10^{-6}$) concentration of the Yanshanian granite (porphyry) from the Chigou area in the Shanyang County

样品号	BSC-2	BSC-4	BSC-7	BSG-9	BSG-12	TDC-8	TDC-9	CG201 -165	CG201 -166	CG201 -334	CG1301 -122	CG1301 -505	CG-1	CG-4	CG II-1	CG II-2	CG III-2	CG III-3	CG V-2	CG V-5	CG V-3	CG VI-4
SiO ₂	56.61	60.20	59.98	64.37	62.70	64.11	64.18	67.80	67.20	63.68	60.21	60.83	60.49	61.71	65.98	64.21	63.14	62.60	55.73	57.64	62.10	63.21
Al ₂ O ₃	14.83	15.58	15.83	15.81	16.10	15.47	15.08	15.40	15.62	15.32	15.43	15.21	15.43	15.66	15.43	15.44	15.86	16.00	14.61	15.54	15.70	15.93
Fe ₂ O ₃	5.87	3.84	4.18	3.07	3.63	0.49	0.47	1.31	1.75	2.01	2.73	1.64	2.51	2.34	2.70	3.03	2.33	2.56	3.16	3.73	3.28	3.47
FeO	3.72	2.42	1.65	1.19	1.19	2.00	2.00	0.88	1.00	1.67	2.53	2.14	2.56	2.78	1.13	1.40	1.76	2.14	3.32	3.02	1.83	1.22
CaO	4.96	4.70	4.15	3.55	3.74	2.63	2.71	2.34	2.37	2.54	3.76	4.03	4.12	3.06	2.67	3.13	2.60	3.31	6.18	5.12	3.39	3.65
MgO	3.74	2.99	2.53	1.60	1.60	1.34	1.34	1.41	1.40	2.14	3.02	2.35	3.36	3.22	1.32	1.93	2.31	2.44	5.52	3.21	2.24	1.92
K ₂ O	2.52	3.57	3.17	3.59	3.60	6.25	6.40	4.64	4.48	4.33	3.25	3.90	3.42	3.34	3.96	4.00	3.33	3.51	4.21	3.55	3.73	3.86
Na ₂ O	4.94	5.01	4.47	5.04	5.19	2.15	1.94	3.90	4.11	3.61	3.84	3.53	3.70	3.48	4.57	4.18	3.98	4.37	3.56	4.82	4.81	4.69
MnO	0.16	0.17	0.09	0.10	0.10	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.07	0.04	0.07	0.07	0.05	0.06	0.05	0.07	0.17	0.16	0.09	0.07
TiO ₂	0.83	0.79	0.67	0.56	0.55	0.44	0.45	0.47	0.44	0.60	0.75	0.64	0.77	0.76	0.49	0.56	0.66	0.67	0.95	0.76	0.67	0.59
P ₂ O ₅	0.60	0.58	0.47	0.38	0.38	0.24	0.24	0.32	0.29	0.49	0.58	0.49	0.60	0.58	0.31	0.41	0.52	0.52	0.55	0.83	0.50	0.44
H ₂ O ⁺	0.58	0.46	1.34	0.38	0.34	1.95	1.47	0.68	0.77	1.64	1.44	1.70	1.75	2.38	0.68	0.86	2.04	1.26	1.58	0.98	0.98	0.70
CO ₂	0.14	0.11	1.49	0.21	0.53	2.90	3.69	0.16	0.13	0.19	0.61	0.60	1.21	0.19	0.12	0.11	0.11	0.11	0.30	0.11	0.12	0.11
LOI	0.45	0.35	0.00	0.57	0.85	0.00	0.00	0.78	0.94	1.82	1.88	2.24	0.00	2.24	0.59	0.76	2.12	0.94	1.52	0.61	0.79	0.43
Total	99.95	100.77	100.00	100.42	100.50	100.00	100.00	100.11	100.52	100.06	100.10	99.34	100.00	101.81	100.00	100.08	100.81	100.50	101.36	100.08	100.23	100.29
W	1.01	1.12	0.81	1.27	1.08	4.11	3.07	1.44	1.26	2.15	1.85	3.89	10.80	2.96	1.32	2.34	2.32	1.36	1.70	1.66	1.00	0.62
Sn	2.24	1.23	2.64	1.38	1.75	1.29	1.19	1.44	1.19	1.26	2.10	1.73	2.57	1.89	1.45	2.09	2.15	2.13	2.73	0.98	1.70	2.62
Mo	0.47	0.40	0.77	0.78	0.57	53.00	139	44.80	35.00	157	1.14	2.30	39.30	1.43	0.96	0.76	1.74	1.08	1.11	0.43	1.07	1.26
Bi	0.14	0.22	0.18	0.17	0.16	0.11	0.08	<0.05	<0.05	0.19	0.25	0.14	0.82	0.20	0.14	0.16	0.14	0.13	0.20	0.25	0.13	0.17
Cu	22.6	15.7	9.2	25.9	29.6	1465	1535	256	213	1100	282	1076	340	170	154	152	410	218	56.3	80.4	10.9	46.4
Pb	22.1	34.4	43.5	37.0	44.2	10.7	11.1	12.4	11.6	9.6	11.7	9.8	13.5	107	13.7	11.2	12.0	12.1	14.4	31.0	16.4	21.9
Zn	107	105	83.8	72.9	75.8	31.7	31.6	25.7	27.9	35.2	50.5	33.6	54.9	49.1	34.3	37.7	43.4	50.4	81.9	109	47.3	65.6
Cd	0.12	0.17	0.28	0.16	0.33	0.30	0.72	0.24	0.14	0.70	0.08	0.06	0.30	0.11	<0.05	0.05	0.13	0.06	0.07	0.08	<0.05	0.09
Sb	0.13	0.11	0.58	0.57	0.43	0.22	0.25	0.06	0.05	0.05	0.07	0.11	0.09	0.10	0.18	0.31	0.14	0.08	0.14	0.38	0.19	0.13
Zr	229	198	198	243	268	158	161	219	154	219	221	210	209	243	203	187	227	209	185	160	230	233
Hf	6.11	5.84	5.72	7.18	7.39	4.77	4.76	6.19	4.79	6.37	6.22	6.10	6.11	7.00	6.23	5.72	6.49	6.03	5.33	4.98	6.68	6.61
Nb	13.40	14.90	14.90	21.10	18.90	9.01	9.57	17.90	13.60	16.10	16.90	14.70	16.10	15.90	17.50	16.20	15.90	15.20	17.90	13.10	17.80	16.20
Ta	0.86	1.05	1.00	1.43	1.15	0.54	0.80	1.21	0.99	1.12	1.10	0.99	1.01	1.07	1.39	1.17	1.11	1.00	0.75	0.93	1.22	1.01

续表 1

Continued Table 1

样品号	BSG-2	BSG-4	BSG-7	BSG-9	BSG-12	TDG-8	TDG-9	CG201 -165	CG201 -166	CG201 -334	CG1301 -122	CG1301 -505	CG-1	CG-4	CG II-1	CG II-2	CG III-2	CG III-3	CG V-2	CG V-5	CG V-3	CG VI-4
V	127	127	119	76	78	50.5	49.9	55.6	55.6	91.0	122	111	126	120	69.2	93.4	113	112	149	167	108	93.9
Co	19.10	16.10	13.50	6.53	7.62	2.97	2.58	6.01	7.01	12.20	16.10	11.20	13.90	8.74	6.61	7.24	13.90	9.62	21.20	20.00	9.64	7.93
Ni	41.70	31.50	10.80	7.97	8.08	4.96	4.74	11.60	10.70	12.90	23.30	12.20	22.10	22.80	9.78	8.54	15.80	11.50	38.50	13.30	10.60	9.17
Sc	12.80	11.70	11.60	7.90	7.95	5.79	5.82	6.24	5.18	8.94	12.40	10.90	12.50	12.40	7.27	9.40	10.40	10.60	18.90	15.60	10.00	9.50
Cr	96.20	70.70	19.40	13.30	12.80	5.38	3.93	17.10	13.80	25.40	47.80	16.00	66.30	56.20	18.70	18.90	22.40	18.00	182.00	16.30	22.90	15.30
Th	7.24	9.48	12.10	19.20	14.60	6.63	6.44	15.50	14.90	16.30	13.30	13.50	12.40	13.40	19.90	18.40	14.50	13.40	8.06	11.70	16.60	13.40
U	1.94	1.59	2.75	4.16	3.60	1.53	1.65	2.13	1.83	4.13	4.50	4.25	3.47	3.06	2.82	4.21	4.24	3.50	3.22	2.18	3.23	3.47
Li	11.20	18.30	29.60	10.70	18.00	8.92	5.03	26.50	12.70	9.46	85.00	51.30	22.50	17.90	3.68	3.84	13.60	13.30	32.20	19.10	17.60	6.01
Rb	61.9	88.5	88.0	88.5	92.6	125	129	81.6	72.6	114	112	128	116	96.8	94.1	90.8	87.0	83.2	128	100	103	89.2
Cs	1.36	2.16	2.65	1.80	1.94	5.84	5.77	1.73	1.52	3.09	5.32	4.89	5.65	4.87	2.02	2.36	3.74	2.54	5.24	3.97	2.68	1.48
Sr	1222	1335	1122	1540	1620	274	256	1116	1035	1213	1430	1352	1207	1273	1157	1315	1288	1438	938	1149	1361	1415
Ba	2717	3544	3263	4758	4816	1905	2097	4145	3450	3520	3799	3522	3590	3800	3314	3365	3737	3822	3588	2919	3575	4006
Be	2.64	2.62	2.57	3.48	2.54	1.02	1.06	2.07	2.27	2.53	2.85	2.31	2.52	2.55	3.08	2.73	2.65	2.83	2.51	2.40	2.94	2.48
La	45.40	49.60	46.40	61.80	61.90	34.40	34.00	52.60	52.20	57.00	55.70	46.90	52.50	41.50	44.40	53.20	46.10	47.40	47.10	46.50	54.30	53.20
Ce	83.20	87.50	88.30	108	112	66.90	65.50	96.90	90.00	106	104	87.80	101	83.10	77.80	91.70	89.50	90.90	84.70	86.00	103	101
Pr	9.41	10.20	9.77	11.70	12.20	7.61	7.24	11.40	9.69	11.50	11.70	9.99	11.50	9.86	9.63	10.60	10.10	10.20	10.10	10.20	11.40	11.40
Nd	35.20	38.60	36.30	42.30	44.50	29.10	28.80	39.70	34.00	42.50	44.10	35.80	43.00	38.10	35.80	39.50	38.40	38.80	39.40	39.00	43.60	42.70
Sm	6.30	6.80	6.32	6.83	7.34	4.97	5.17	6.33	5.08	6.99	7.59	6.18	7.53	6.74	6.06	6.73	6.79	7.18	6.66	6.93	7.37	7.13
Eu	1.49	1.52	1.67	1.48	1.77	1.60	1.50	1.57	1.65	1.63	1.85	1.42	2.02	1.73	1.49	1.65	1.83	1.67	1.65	2.06	1.93	1.88
Gd	5.20	4.99	4.90	5.14	5.39	3.58	3.77	4.17	3.55	5.09	5.84	4.51	5.49	5.60	4.41	4.91	5.36	5.86	5.64	5.88	5.43	5.48
Tb	0.77	0.80	0.75	0.80	0.87	0.58	0.63	0.66	0.55	0.77	0.86	0.65	0.81	0.73	0.67	0.70	0.78	0.81	0.80	0.86	0.86	0.84
Dy	4.03	4.13	4.12	4.40	4.29	3.03	3.13	3.36	2.66	4.07	4.11	3.25	4.19	4.07	3.47	3.78	3.90	3.99	4.23	4.45	4.22	4.07
Ho	0.81	0.76	0.81	0.85	0.88	0.57	0.61	0.63	0.49	0.70	0.77	0.65	0.78	0.74	0.62	0.70	0.78	0.80	0.81	0.85	0.83	0.78
Er	2.40	2.33	2.48	2.64	2.67	1.85	1.88	1.98	1.68	2.21	2.46	2.18	2.27	2.38	1.99	2.12	2.43	2.51	2.54	2.77	2.56	2.42
Tm	0.32	0.31	0.31	0.36	0.32	0.24	0.27	0.28	0.22	0.30	0.33	0.27	0.33	0.30	0.28	0.30	0.31	0.34	0.31	0.34	0.34	0.34
Yb	2.06	2.02	2.19	2.50	2.58	1.69	1.93	1.70	1.39	2.06	2.05	1.79	2.09	1.96	1.82	1.87	2.39	2.01	2.21	2.28	2.24	2.11
Lu	0.33	0.30	0.34	0.37	0.37	0.23	0.27	0.28	0.21	0.30	0.32	0.28	0.30	0.30	0.28	0.28	0.33	0.30	0.31	0.34	0.31	0.30
Y	21.70	21.40	21.80	24.30	23.50	15.20	16.20	18.40	13.60	19.70	21.60	18.70	21.30	19.90	17.40	18.80	21.90	22.80	22.20	21.90	21.70	20.80

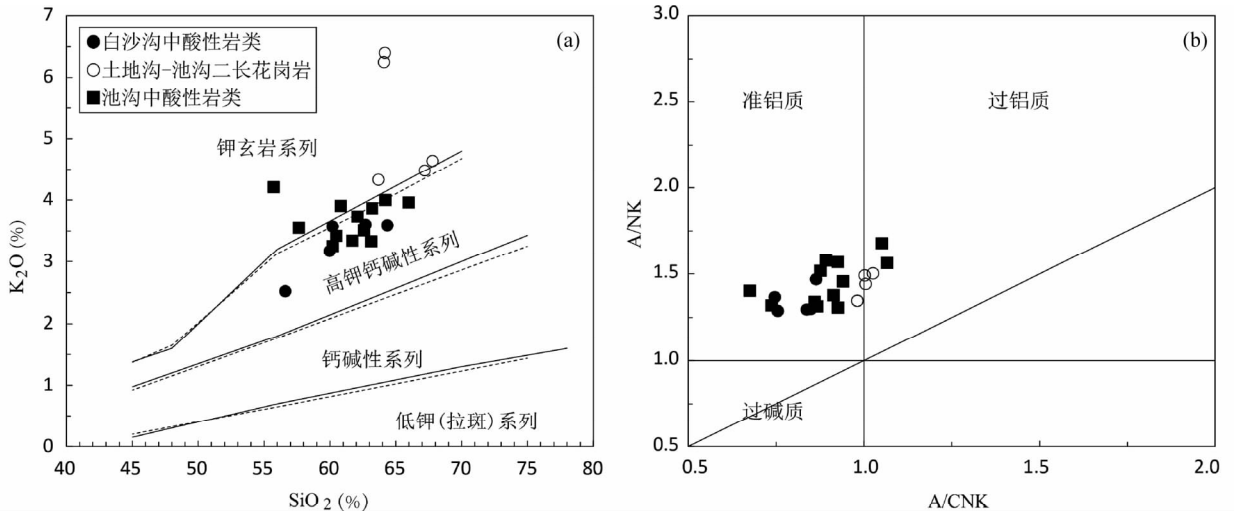


图 3 池沟地区燕山期花岗(斑)岩体 K_2O-SiO_2 岩石系列判别(a, 据 Peccerillo and Taloy, 1976)和 $A/NK-A/CNK$ 铝质-准铝判别图(b, 据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 3 K_2O vs. SiO_2 diagram (a, after Peccerillo and Taloy, 1976) and A/NK vs. A/CNK diagram (b, after Maniar and Piccoli, 1989) of the Yanshanian granite (porphyry) from the Chigou area

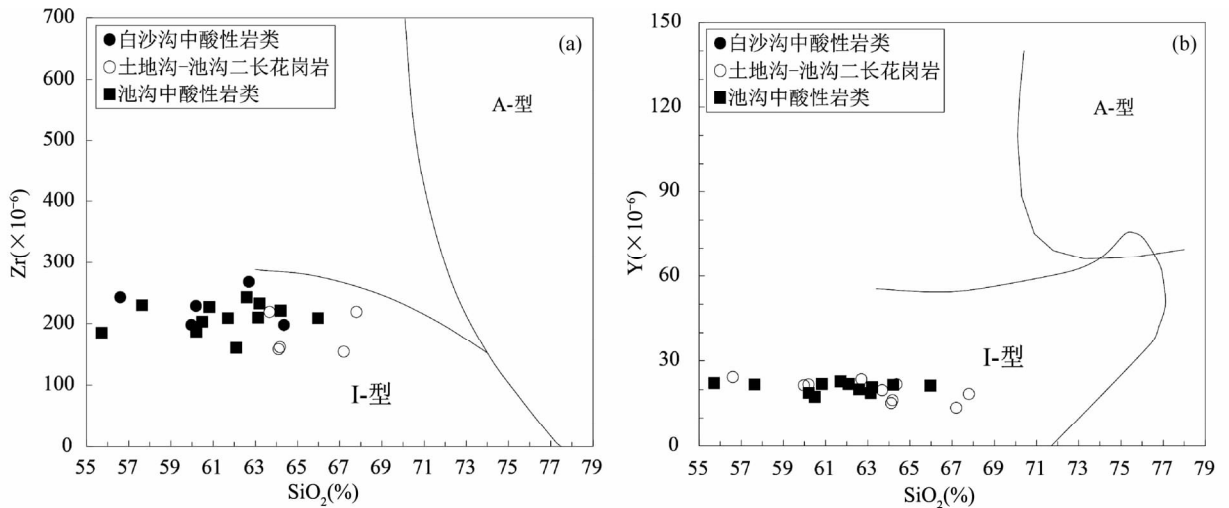


图 4 池沟地区燕山期花岗(斑)岩体 $Zr-SiO_2$ 判别图(a)和 $Y-SiO_2$ 判别图(b) (据 Collins, 1982)

Fig. 4 Zr vs. SiO_2 diagram (a) and Y vs. SiO_2 diagram (b) of the intermediate-acid porphyry plutons from the Chigou area (after Collins, 1982)

$(La/Yb)_N = 15.20 \sim 17.73$ 。稀土配分模式图明显呈右倾型(图 5a), 轻稀土富集、重稀土亏损; 轻稀土分异显著 ($(La/Sm)_N = 4.65 \sim 5.84$); 重稀土分异程度低 ($(Gd/Lu)_N = 1.72 \sim 2.06$); 铈异常不明显 ($\delta Eu = 0.76 \sim 0.92$)。在微量元素标准化蛛网图上(图 5b), 这些岩石样品富集 K、Rb、Sr 和 Ba 等大离子亲石元素, 显著富集 Pb, 亏损 Nb、Ta、Ti、P 和 Hf 等高场强元素。不同分析样品的稀土及微量元素组成特征相似, 显示其具有相似的源区及形成构造环境。

池沟闪长岩、闪长玢岩、石英闪长岩以及花岗闪长岩的稀土元素和微量元素组成也极为相近, $\Sigma REE = 188.7 \times 10^{-6}$

$\sim 241.6 \times 10^{-6}$, $LREE = 175.2 \times 10^{-6} \sim 225.0 \times 10^{-6}$, $HREE = 13.5 \times 10^{-6} \sim 17.8 \times 10^{-6}$, $LREE/HREE = 10.73 \sim 13.87$, $(La/Yb)_N = 13.84 \sim 20.41$ 。稀土配分模式图也明显呈右倾型(图 5c), 轻稀土富集、重稀土亏损; 轻稀土分异显著 ($(La/Sm)_N = 3.97 \sim 5.10$); 重稀土分异程度低 ($(Gd/Lu)_N = 1.95 \sim 2.41$); 具弱铈负异常 ($\delta Eu = 0.79 \sim 0.99$)。在微量元素标准化蛛网图上(图 5d), 所有岩石样品均富集 K、Rb、Sr 和 Ba 等大离子亲石元素, 显著富集 Pb, 亏损 Nb、Ta、Ti、P 和 Hf 等高场强元素。

池沟(I号)与土地沟二长花岗岩具有非常相近的稀土

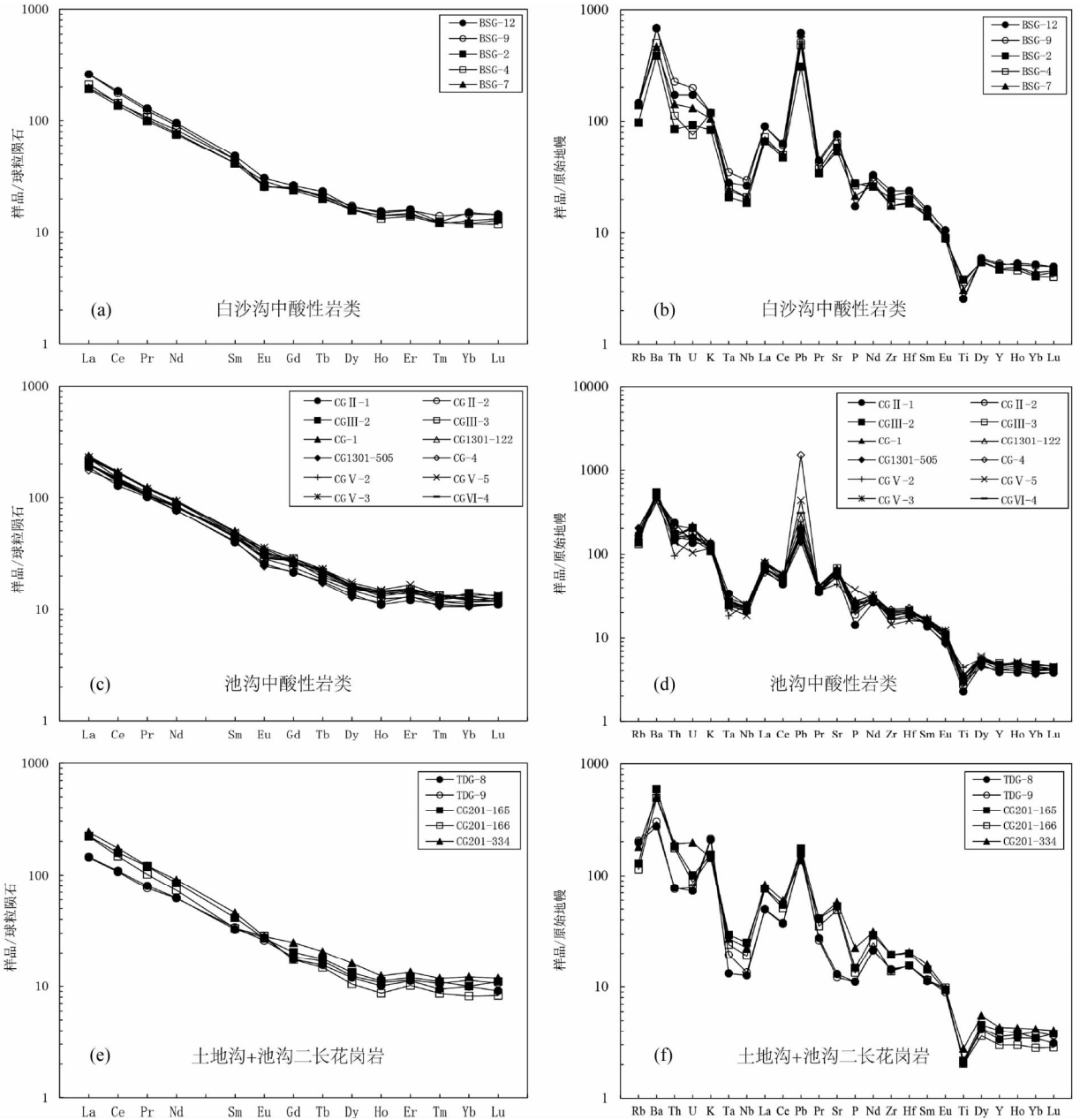


图5 池沟地区燕山期花岗(斑)岩体的球粒陨石标准化稀土元素配分模式图和原始地幔标准化微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace elements distribution patterns of the Yanshanian granite (porphyry) from the Chigou area (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

元素和微量元素组成, $\Sigma\text{REE} = 154.7 \times 10^{-6} \sim 241.7 \times 10^{-6}$, $\text{LREE} = 142.2 \times 10^{-6} \sim 225.6 \times 10^{-6}$, $\text{HREE} = 12.5 \times 10^{-6} \sim 15.5 \times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 11.39 \sim 14.56$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 12.64 \sim 26.94$ 。稀土配分模式图同样呈右倾型(图5e), 轻稀土富集、重稀土亏损; 轻稀土分异显著($(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 4.25 \sim 6.63$); 重稀土分异程度低($(\text{Gd}/\text{Lu})_{\text{N}} = 1.73 \sim 2.09$); 无明显铈异常($\delta\text{Eu} = 0.84 \sim 1.19$)。在微量元素标准化蛛网图上(图5f), 分析样品均富集 K、Rb、Sr 和 Ba 等大离子亲石元素,

亏损 Nb、Ta、Ti、P 和 Hf 等高场强元素, 其中土地沟样品的 Nb、Ta 亏损程度相对更高。

5 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素

本文选取白沙沟石英闪长玢岩(BSG-10)、池沟闪长岩(IV号:CG-2)、池沟花岗闪长岩(V号:CG V-1)、土地沟二长

表 2 沟池地区燕山期花岗(斑)岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of the Yanshanian granite (porphyry) from the Chigou area

测点号	Th U		同位素比值						年龄(Ma)						
	$(\times 10^{-6})$		Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ
BSG-10. 1	115	109	1. 05	0. 05004	0. 00056	0. 15507	0. 00187	0. 02248	0. 00012	198. 2	30. 5	146. 4	1. 6	143. 3	0. 8
BSG-10. 2	199	184	1. 08	0. 05015	0. 00036	0. 15391	0. 00142	0. 02224	0. 00012	211. 2	18. 5	145. 4	1. 2	141. 8	0. 8
BSG-10. 3	155	133	1. 16	0. 04876	0. 00056	0. 14739	0. 00178	0. 02192	0. 00011	200. 1	27. 8	139. 6	1. 6	139. 8	0. 7
BSG-10. 4	195	142	1. 38	0. 04958	0. 00049	0. 15469	0. 00161	0. 02263	0. 00010	176. 0	22. 2	146. 0	1. 4	144. 3	0. 6
BSG-10. 5	212	160	1. 32	0. 04999	0. 00045	0. 15434	0. 00165	0. 02239	0. 00015	194. 5	22. 2	145. 7	1. 5	142. 8	0. 9
BSG-10. 6	107	92	1. 17	0. 04944	0. 00064	0. 15266	0. 00226	0. 02241	0. 00019	168. 6	29. 6	144. 3	2. 0	142. 9	1. 2
BSG-10. 7	167	126	1. 33	0. 04875	0. 00054	0. 15155	0. 00187	0. 02257	0. 00015	200. 1	25. 9	143. 3	1. 6	143. 9	0. 9
BSG-10. 8	238	184	1. 30	0. 04887	0. 00045	0. 15143	0. 00171	0. 02248	0. 00016	142. 7	22. 2	143. 2	1. 5	143. 3	1. 0
BSG-10. 9	171	152	1. 13	0. 04887	0. 00050	0. 14903	0. 00182	0. 02214	0. 00018	142. 7	24. 1	141. 1	1. 6	141. 2	1. 1
BSG-10. 10	150	127	1. 18	0. 04910	0. 00055	0. 15339	0. 00199	0. 02270	0. 00020	153. 8	30. 6	144. 9	1. 8	144. 7	1. 2
BSG-10. 11	285	222	1. 28	0. 04992	0. 00038	0. 15540	0. 00184	0. 02259	0. 00022	190. 8	18. 5	146. 7	1. 6	144. 0	1. 4
BSG-10. 12	97	103	0. 93	0. 04962	0. 00058	0. 15269	0. 00221	0. 02235	0. 00022	176. 0	30. 6	144. 3	1. 9	142. 5	1. 4
BSG-10. 13	161	140	1. 14	0. 04954	0. 00050	0. 15324	0. 00169	0. 02249	0. 00017	172. 3	24. 1	144. 8	1. 5	143. 4	1. 1
BSG-10. 14	98	100	0. 98	0. 05118	0. 00058	0. 15700	0. 00202	0. 02226	0. 00016	250. 1	21. 3	148. 1	1. 8	142. 0	1. 0
BSG-10. 15	150	140	1. 07	0. 04904	0. 00053	0. 15274	0. 00191	0. 02259	0. 00014	150. 1	25. 9	144. 3	1. 7	144. 0	0. 9
BSG-10. 16	107	110	0. 97	0. 04903	0. 00052	0. 15296	0. 00198	0. 02261	0. 00016	150. 1	25. 9	144. 5	1. 7	144. 1	1. 0
BSG-10. 17	146	122	1. 19	0. 04888	0. 00054	0. 15162	0. 00178	0. 02252	0. 00013	142. 7	23. 1	143. 3	1. 6	143. 6	0. 8
BSG-10. 18	80	84	0. 95	0. 04930	0. 00065	0. 15353	0. 00209	0. 02262	0. 00013	161. 2	29. 6	145. 0	1. 8	144. 2	0. 8
BSG-10. 19	68	77	0. 88	0. 04925	0. 00068	0. 15256	0. 00227	0. 02249	0. 00016	166. 8	31. 5	144. 2	2. 0	143. 4	1. 0
BSG-10. 20	186	146	1. 27	0. 04888	0. 00051	0. 15080	0. 00181	0. 02238	0. 00015	142. 7	24. 1	142. 6	1. 6	142. 7	0. 9
CG-2. 1	200	135	1. 48	0. 04974	0. 00057	0. 15303	0. 00188	0. 02234	0. 00014	183. 4	21. 3	144. 6	1. 7	142. 4	0. 9
CG-2. 3	87	62	1. 42	0. 04902	0. 00080	0. 15060	0. 00266	0. 02230	0. 00018	150. 1	38. 9	142. 4	2. 4	142. 2	1. 1
CG-2. 4	105	101	1. 04	0. 04959	0. 00069	0. 15220	0. 00249	0. 02231	0. 00024	176. 0	33. 3	143. 8	2. 2	142. 2	1. 5
CG-2. 5	72	63	1. 14	0. 04934	0. 00070	0. 15127	0. 00259	0. 02225	0. 00023	164. 9	33. 3	143. 0	2. 3	141. 8	1. 5
CG-2. 6	124	84	1. 47	0. 05002	0. 00071	0. 15331	0. 00284	0. 02224	0. 00026	194. 5	33. 3	144. 8	2. 5	141. 8	1. 6
CG-2. 7	112	94	1. 19	0. 05029	0. 00067	0. 15286	0. 00280	0. 02212	0. 00032	209. 3	31. 5	144. 4	2. 5	141. 0	2. 0
CG-2. 8	49	51	0. 96	0. 05038	0. 00090	0. 15209	0. 00340	0. 02195	0. 00032	213. 0	40. 7	143. 8	3. 0	140. 0	2. 0
CG-2. 9	190	136	1. 40	0. 04892	0. 00049	0. 15085	0. 00209	0. 02243	0. 00026	142. 7	24. 1	142. 7	1. 8	143. 0	1. 6
CG-2. 10	62	63	0. 98	0. 04928	0. 00079	0. 15216	0. 00312	0. 02245	0. 00032	161. 2	37. 0	143. 8	2. 7	143. 1	2. 0
CG-2. 11	110	97	1. 13	0. 05023	0. 00060	0. 15653	0. 00253	0. 02262	0. 00026	205. 6	27. 8	147. 7	2. 2	144. 2	1. 6
CG-2. 12	107	99	1. 08	0. 04997	0. 00057	0. 15465	0. 00250	0. 02245	0. 00027	194. 5	25. 9	146. 0	2. 2	143. 1	1. 7
CG-2. 13	100	85	1. 18	0. 04913	0. 00066	0. 14764	0. 00233	0. 02187	0. 00025	153. 8	29. 6	139. 8	2. 1	139. 4	1. 6
CG-2. 15	184	125	1. 48	0. 04964	0. 00049	0. 14960	0. 00235	0. 02185	0. 00027	189. 0	28. 7	141. 6	2. 1	139. 4	1. 7
CG-2. 17	52	55	0. 94	0. 04908	0. 00085	0. 14815	0. 00274	0. 02197	0. 00023	150. 1	40. 7	140. 3	2. 4	140. 1	1. 4
CG-2. 18	88	79	1. 11	0. 04872	0. 00076	0. 14680	0. 00260	0. 02186	0. 00022	200. 1	37. 0	139. 1	2. 3	139. 4	1. 4
CG-2. 19	196	122	1. 61	0. 04891	0. 00058	0. 15056	0. 00214	0. 02236	0. 00021	142. 7	25. 0	142. 4	1. 9	142. 5	1. 3
CG-2. 20	142	85	1. 67	0. 04987	0. 00073	0. 15021	0. 00250	0. 02188	0. 00022	187. 1	39. 8	142. 1	2. 2	139. 6	1. 4
CG-2. 21	73	67	1. 09	0. 04999	0. 00069	0. 15058	0. 00230	0. 02189	0. 00018	194. 5	36. 1	142. 4	2. 0	139. 6	1. 1
CG-2. 22	237	168	1. 41	0. 04946	0. 00043	0. 15380	0. 00156	0. 02257	0. 00015	168. 6	20. 4	145. 3	1. 4	143. 9	0. 9
CG-2. 24	85	75	1. 12	0. 04952	0. 00069	0. 15069	0. 00233	0. 02209	0. 00019	172. 3	36. 1	142. 5	2. 1	140. 9	1. 2
CG-2. 25	172	114	1. 51	0. 04956	0. 00057	0. 14971	0. 00198	0. 02193	0. 00017	176. 0	32. 4	141. 7	1. 7	139. 8	1. 0
CGV-1. 1	133	103	1. 29	0. 04970	0. 00052	0. 15271	0. 00179	0. 02229	0. 00012	189. 0	19. 4	144. 3	1. 6	142. 1	0. 7
CGV-1. 2	108	104	1. 03	0. 04882	0. 00058	0. 14788	0. 00184	0. 02201	0. 00014	139. 0	29. 6	140. 0	1. 6	140. 4	0. 9
CGV-1. 3	104	89	1. 16	0. 05086	0. 00068	0. 15646	0. 00237	0. 02236	0. 00021	235. 3	26. 8	147. 6	2. 1	142. 6	1. 3
CGV-1. 4	119	96	1. 23	0. 04929	0. 00059	0. 15273	0. 00219	0. 02252	0. 00022	161. 2	29. 6	144. 3	1. 9	143. 6	1. 4
CGV-1. 5	82	82	1. 00	0. 04866	0. 00064	0. 14787	0. 00233	0. 02203	0. 00019	131. 6	29. 6	140. 0	2. 1	140. 5	1. 2
CGV-1. 6	76	72	1. 05	0. 04945	0. 00078	0. 15170	0. 00271	0. 02222	0. 00018	168. 6	37. 0	143. 4	2. 4	141. 7	1. 1
CGV-1. 7	85	75	1. 14	0. 04911	0. 00069	0. 15117	0. 00236	0. 02234	0. 00018	153. 8	31. 5	142. 9	2. 1	142. 4	1. 1
CGV-1. 8	61	62	0. 99	0. 04983	0. 00084	0. 15225	0. 00264	0. 02224	0. 00020	187. 1	43. 5	143. 9	2. 3	141. 8	1. 3
CGV-1. 9	59	75	0. 78	0. 04973	0. 00072	0. 15399	0. 00228	0. 02252	0. 00017	189. 0	33. 3	145. 4	2. 0	143. 6	1. 1

续表 2

Continued Table 2

测点号	Th U		同位素比值						年龄 (Ma)						
	$(\times 10^{-6})$		Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ
CGV-1.10	69	84	0.82	0.05009	0.00067	0.15376	0.00222	0.02231	0.00018	198.2	31.5	145.2	2.0	142.3	1.1
CGV-1.11	141	117	1.20	0.04941	0.00058	0.15116	0.00199	0.02221	0.00017	168.6	27.8	142.9	1.8	141.6	1.1
CGV-1.12	70	70	1.00	0.04998	0.00078	0.15343	0.00263	0.02229	0.00018	194.5	32.4	144.9	2.3	142.1	1.1
CGV-1.13	147	126	1.16	0.04989	0.00054	0.15550	0.00201	0.02262	0.00019	190.8	25.9	146.8	1.8	144.2	1.2
CGV-1.14	81	70	1.14	0.04898	0.00075	0.14991	0.00257	0.02226	0.00022	146.4	37.0	141.8	2.3	141.9	1.4
CGV-1.15	62	51	1.21	0.04875	0.00084	0.14665	0.00266	0.02190	0.00021	200.1	40.7	139.0	2.4	139.6	1.3
CGV-1.17	129	96	1.35	0.04857	0.00062	0.14812	0.00235	0.02207	0.00017	127.9	34.3	140.3	2.1	140.8	1.0
TDG-3.1	163	207	0.79	0.04963	0.00041	0.15588	0.00136	0.02280	0.00010	176.0	15.7	147.1	1.2	145.3	0.7
TDG-3.2	194	183	1.06	0.04913	0.00038	0.15239	0.00128	0.02251	0.00009	153.8	-13.9	144.0	1.1	143.5	0.6
TDG-3.3	84	114	0.74	0.04891	0.00048	0.15189	0.00155	0.02255	0.00012	142.7	22.2	143.6	1.4	143.8	0.7
TDG-3.4	108	142	0.76	0.04984	0.00045	0.15456	0.00156	0.02250	0.00012	187.1	22.2	145.9	1.4	143.5	0.7
TDG-3.5	66	105	0.62	0.04876	0.00052	0.15079	0.00177	0.02244	0.00013	200.1	25.9	142.6	1.6	143.1	0.8
TDG-3.6	65	119	0.55	0.04975	0.00054	0.15514	0.00173	0.02266	0.00013	183.4	21.3	146.4	1.5	144.4	0.8
TDG-3.9	129	127	1.01	0.04974	0.00049	0.15451	0.00159	0.02255	0.00011	183.4	19.4	145.9	1.4	143.8	0.7
TDG-3.10	135	131	1.03	0.05077	0.00053	0.15945	0.00187	0.02278	0.00014	231.6	24.1	150.2	1.6	145.2	0.9
TDG-3.11	204	220	0.93	0.04958	0.00036	0.15498	0.00130	0.02270	0.00014	176.0	12.0	146.3	1.1	144.7	0.9
TDG-3.14	386	240	1.60	0.04911	0.00034	0.15472	0.00134	0.02285	0.00013	153.8	-15.7	146.1	1.2	145.7	0.8
TDG-3.15	226	245	0.92	0.04981	0.00038	0.15702	0.00146	0.02287	0.00013	187.1	21.3	148.1	1.3	145.7	0.8
TDG-3.16	69	64	1.09	0.05122	0.00080	0.16042	0.00242	0.02281	0.00017	250.1	37.0	151.1	2.1	145.4	1.0
TDG-3.17	177	184	0.96	0.04946	0.00040	0.15547	0.00161	0.02281	0.00016	168.6	18.5	146.7	1.4	145.4	1.0
TDG-3.18	93	109	0.85	0.05006	0.00054	0.15677	0.00184	0.02275	0.00015	198.2	30.5	147.9	1.6	145.0	1.0
TDG-3.19	136	122	1.12	0.05007	0.00049	0.15810	0.00186	0.02289	0.00014	198.2	22.2	149.0	1.6	145.9	0.9
TDG-3.20	114	132	0.86	0.04911	0.00049	0.15453	0.00170	0.02283	0.00014	153.8	22.2	145.9	1.5	145.5	0.9

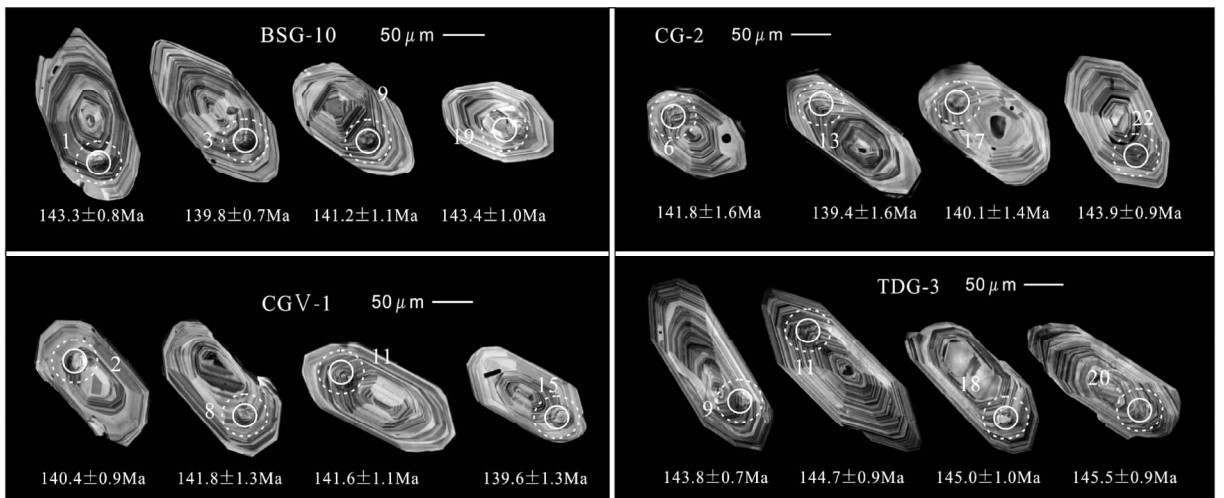


图 6 池沟地区燕山期花岗(斑)岩体代表锆石的阴极发光(CL)图像及测试位置

实线圆和虚线圆分别代表 U-Pb 年龄测试和 Lu-Hf 同位素测试的位置

Fig. 6 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircon grains of the Yanshanian granite (porphyry) from the Chigou area

The continuous-line circles and dashed circles represent locations of U-Pb dating and Lu-Hf analysis, respectively

花岗岩(TDG-3)4件样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年和 Lu-Hf 同位素组成分析,测试结果分别见表 2 和表 3。

表 3 池沟地区燕山期花岗(斑)岩体的 LA-ICP-MS 锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 3 LA-ICP-MS zircon Lu-Hf isotopic results of the Yanshanian granite (porphyry) from the Chigou area

测点号	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
白沙沟石英闪长玢岩 (BSG-10)											
BSG-10.01	143	0.035007	0.000786	0.282683	0.000014	0.282681	-3.16	-0.09	802	1202	-0.98
BSG-10.02	142	0.056703	0.001379	0.282657	0.000019	0.282653	-4.08	-1.10	852	1265	-0.96
BSG-10.03	140	0.039290	0.000860	0.282669	0.000017	0.282667	-3.64	-0.65	823	1235	-0.97
BSG-10.04	144	0.037188	0.000803	0.282635	0.000018	0.282633	-4.84	-1.75	869	1309	-0.98
BSG-10.05	143	0.039774	0.000846	0.282627	0.000021	0.282625	-5.12	-2.07	881	1327	-0.97
BSG-10.06	143	0.045103	0.000959	0.282668	0.000021	0.282666	-3.66	-0.62	826	1235	-0.97
BSG-10.07	144	0.047879	0.001042	0.282704	0.000020	0.282701	-2.40	0.66	777	1155	-0.97
BSG-10.08	143	0.041353	0.000873	0.282694	0.000021	0.282692	-2.74	0.32	787	1176	-0.97
BSG-10.09	141	0.041614	0.000892	0.282626	0.000019	0.282623	-5.17	-2.16	884	1332	-0.97
BSG-10.10	145	0.060616	0.001289	0.282718	0.000022	0.282715	-1.90	1.15	762	1124	-0.96
BSG-10.11	144	0.048821	0.001025	0.282618	0.000020	0.282615	-5.44	-2.38	898	1348	-0.97
BSG-10.12	142	0.063012	0.001380	0.282686	0.000024	0.282683	-3.03	-0.03	809	1198	-0.96
BSG-10.13	143	0.052828	0.001144	0.282703	0.000023	0.282700	-2.45	0.59	781	1159	-0.97
BSG-10.14	142	0.072169	0.001534	0.282639	0.000029	0.282634	-4.72	-1.75	881	1306	-0.95
BSG-10.15	144	0.049855	0.001055	0.282691	0.000021	0.282688	-2.88	0.18	796	1185	-0.97
BSG-10.16	144	0.043598	0.000897	0.282653	0.000020	0.282651	-4.20	-1.13	846	1269	-0.97
BSG-10.17	144	0.034670	0.000707	0.282666	0.000019	0.282665	-3.73	-0.65	823	1238	-0.98
BSG-10.18	144	0.036815	0.000771	0.282611	0.000022	0.282608	-5.71	-2.62	903	1364	-0.98
BSG-10.19	143	0.055210	0.001160	0.282617	0.000023	0.282614	-5.47	-2.43	902	1351	-0.97
BSG-10.20	143	0.045985	0.000964	0.282693	0.000022	0.282691	-2.78	0.26	791	1179	-0.97
池沟(IV号)闪长岩 (CG-2)											
CG-2.01	142	0.054398	0.001182	0.282717	0.000025	0.282714	-1.93	1.09	761	1126	-0.96
CG-2.02	145	0.048515	0.001060	0.282682	0.000026	0.282679	-3.18	-0.09	808	1203	-0.97
CG-2.03	142	0.031027	0.000662	0.282621	0.000021	0.282619	-5.34	-2.28	885	1340	-0.98
CG-2.04	142	0.049548	0.001077	0.282690	0.000022	0.282687	-2.90	0.12	798	1188	-0.97
CG-2.05	142	0.053276	0.001104	0.282631	0.000024	0.282628	-4.97	-1.96	881	1320	-0.97
CG-2.06	142	0.034850	0.000779	0.282640	0.000021	0.282638	-4.67	-1.63	861	1299	-0.98
CG-2.07	141	0.038666	0.000824	0.282643	0.000022	0.282641	-4.57	-1.55	859	1293	-0.98
CG-2.08	140	0.030252	0.000649	0.282657	0.000026	0.282655	-4.07	-1.06	835	1261	-0.98
CG-2.09	143	0.033227	0.000703	0.282666	0.000028	0.282664	-3.75	-0.67	823	1239	-0.98
CG-2.10	143	0.031714	0.000674	0.282688	0.000024	0.282686	-2.99	0.09	793	1190	-0.98
CG-2.11	144	0.035767	0.000755	0.282624	0.000024	0.282622	-5.23	-2.14	883	1333	-0.98
CG-2.12	143	0.054581	0.001249	0.282666	0.000026	0.282663	-3.74	-0.72	835	1242	-0.96
CG-2.13	139	0.040594	0.000875	0.282627	0.000022	0.282625	-5.13	-2.15	882	1330	-0.97
CG-2.14	138	0.044534	0.000943	0.282672	0.000023	0.282669	-3.55	-0.61	821	1231	-0.97
CG-2.15	139	0.056696	0.001245	0.282727	0.000025	0.282723	-1.60	1.34	749	1107	-0.96
CG-2.16	138	0.045439	0.001001	0.282635	0.000024	0.282632	-4.85	-1.92	874	1314	-0.97
CG-2.17	140	0.030356	0.000683	0.282614	0.000023	0.282612	-5.58	-2.57	895	1358	-0.98
CG-2.18	139	0.029468	0.000683	0.282635	0.000020	0.282633	-4.85	-1.85	866	1311	-0.98
CG-2.19	143	0.039974	0.000925	0.282647	0.000022	0.282645	-4.41	-1.37	855	1283	-0.97
CG-2.20	140	0.035740	0.000816	0.282655	0.000022	0.282653	-4.15	-1.16	842	1267	-0.98
CG-2.21	140	0.017084	0.000418	0.282634	0.000019	0.282633	-4.88	-1.86	862	1312	-0.99
CG-2.22	144	0.054794	0.001337	0.282632	0.000020	0.282628	-4.95	-1.92	886	1319	-0.96
CG-2.23	146	0.063436	0.001425	0.282679	0.000021	0.282675	-3.30	-0.23	821	1213	-0.96
CG-2.24	141	0.052494	0.001174	0.282643	0.000024	0.282640	-4.57	-1.59	867	1296	-0.96
CG-2.25	140	0.046986	0.001023	0.282640	0.000024	0.282637	-4.67	-1.69	867	1301	-0.97
池沟(V号)花岗岩闪长岩 (CGV-1)											
CGV-1.01	142	0.061476	0.001464	0.282679	0.000023	0.282675	-3.31	-0.32	822	1216	-0.96
CGV-1.02	140	0.036719	0.000760	0.282644	0.000021	0.282642	-4.52	-1.51	855	1290	-0.98
CGV-1.03	143	0.039198	0.000817	0.282671	0.000022	0.282669	-3.56	-0.51	819	1228	-0.98
CGV-1.04	144	0.037393	0.000775	0.282648	0.000018	0.282645	-4.40	-1.32	851	1281	-0.98

续表 3

Continued Table 3

测点号	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
CGV-1.05	140	0.056723	0.001195	0.282734	0.000028	0.282731	-1.34	1.63	738	1090	-0.96
CGV-1.06	142	0.047014	0.000970	0.282699	0.000023	0.282696	-2.58	0.44	783	1167	-0.97
CGV-1.07	142	0.058085	0.001170	0.282686	0.000023	0.282683	-3.05	-0.03	805	1197	-0.96
CGV-1.08	142	0.048246	0.000969	0.282622	0.000023	0.282620	-5.29	-2.27	891	1340	-0.97
CGV-1.09	144	0.032529	0.000677	0.282674	0.000021	0.282672	-3.47	-0.38	812	1221	-0.98
CGV-1.10	142	0.035424	0.000736	0.282657	0.000020	0.282655	-4.07	-1.01	837	1260	-0.98
CGV-1.11	142	0.032067	0.000665	0.282630	0.000020	0.282628	-5.02	-1.98	873	1321	-0.98
CGV-1.12	142	0.046547	0.000998	0.282653	0.000022	0.282651	-4.20	-1.17	848	1270	-0.97
CGV-1.13	144	0.077175	0.001645	0.282673	0.000023	0.282668	-3.50	-0.50	834	1228	-0.95
CGV-1.14	142	0.038960	0.000818	0.282618	0.000024	0.282616	-5.45	-2.41	893	1349	-0.98
CGV-1.15	140	0.030361	0.000660	0.282669	0.000021	0.282667	-3.65	-0.65	819	1235	-0.98
CGV-1.16	138	0.032146	0.000677	0.282561	0.000022	0.282559	-7.48	-4.50	970	1479	-0.98
CGV-1.17	141	0.033706	0.000730	0.282725	0.000022	0.282723	-1.66	1.36	741	1108	-0.98
CGV-1.18	139	0.035282	0.000811	0.282631	0.000022	0.282629	-4.97	-2.01	874	1320	-0.98
CGV-1.19	138	0.046400	0.001034	0.282625	0.000022	0.282622	-5.22	-2.29	889	1338	-0.97
CGV-1.20	138	0.035125	0.000803	0.282610	0.000022	0.282608	-5.73	-2.77	904	1369	-0.98
土地沟二长花岗岩(TDG-3)											
TDG-3.01	145	0.059176	0.001329	0.282686	0.000017	0.282683	-3.03	0.03	808	1196	-0.96
TDG-3.02	143	0.082491	0.001798	0.282668	0.000019	0.282663	-3.67	-0.69	845	1240	-0.95
TDG-3.03	144	0.077233	0.001685	0.282695	0.000016	0.282691	-2.72	0.28	803	1179	-0.95
TDG-3.04	143	0.076300	0.001717	0.282693	0.000020	0.282689	-2.78	0.20	807	1183	-0.95
TDG-3.05	143	0.074273	0.001599	0.282730	0.000022	0.282726	-1.48	1.51	751	1100	-0.95
TDG-3.06	144	0.070585	0.001563	0.282700	0.000021	0.282696	-2.55	0.47	794	1167	-0.95
TDG-3.07	145	0.080870	0.001729	0.282713	0.000021	0.282708	-2.09	0.92	779	1138	-0.95
TDG-3.08	145	0.070464	0.001496	0.282648	0.000020	0.282644	-4.39	-1.36	867	1284	-0.95
TDG-3.09	144	0.072976	0.001514	0.282684	0.000021	0.282680	-3.10	-0.09	815	1202	-0.95
TDG-3.10	145	0.091619	0.001890	0.282667	0.000027	0.282662	-3.70	-0.69	848	1242	-0.94
TDG-3.11	145	0.067717	0.001417	0.282667	0.000023	0.282663	-3.71	-0.67	838	1240	-0.96
TDG-3.12	145	0.062526	0.001334	0.282615	0.000024	0.282611	-5.57	-2.52	910	1358	-0.96
TDG-3.13	142	0.076631	0.001599	0.282675	0.000023	0.282671	-3.42	-0.46	830	1224	-0.95
TDG-3.14	146	0.080012	0.001589	0.282696	0.000022	0.282691	-2.70	0.34	801	1176	-0.95
TDG-3.15	146	0.064836	0.001366	0.282669	0.000022	0.282666	-3.63	-0.56	833	1234	-0.96
TDG-3.16	145	0.054936	0.001158	0.282735	0.000024	0.282732	-1.30	1.78	735	1084	-0.97
TDG-3.17	145	0.068381	0.001459	0.282664	0.000024	0.282660	-3.82	-0.77	843	1247	-0.96
TDG-3.18	145	0.067806	0.001506	0.282600	0.000020	0.282596	-6.07	-3.03	935	1391	-0.95
TDG-3.19	146	0.089544	0.002117	0.282667	0.000024	0.282662	-3.70	-0.70	853	1242	-0.94
TDG-3.20	146	0.057080	0.001313	0.282665	0.000020	0.282661	-3.79	-0.73	839	1244	-0.96

5.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

白沙沟石英闪长玢岩样品(BSG-10)的锆石为柱状,粒径 $80 \sim 160 \mu\text{m}$,长宽比为 $1.2 : 1 \sim 2.3 : 1$,阴极发光图像显示锆石振荡环带发育(图6),为典型的岩浆锆石(Hanchar and Miller, 1993; Hoskin *et al.*, 2000)。对样品的20颗锆石共进行了20个点的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄测试。锆石的Th、U含量分别为 $67.6 \times 10^{-6} \sim 285.1 \times 10^{-6}$ 和 $76.8 \times 10^{-6} \sim 222.3 \times 10^{-6}$,Th/U比值为 $0.88 \sim 1.38$,平均1.14。所测的20颗锆石的年龄比较集中,其中16个点的数据落于谐和曲线上,另外4个点 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 值较大,偏离谐和曲线(图

7a)。锆石的CL图像和反射、透射光图像均显示锆石结晶完好,无包体、裂纹、晶格缺陷,因此4个点偏离谐和曲线可能是由于测试过程中Pb丢失造成。20个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $143.32 \pm 0.43 \text{Ma}$ (MSWD=0.96),代表白沙沟岩体的形成年龄。

池沟(IV号)闪长岩样品(CG-2)的锆石多呈柱状、短柱状,粒径 $80 \sim 200 \mu\text{m}$,长宽比 $1.2 : 1 \sim 3 : 1$,振荡环带清晰(图6),为典型的岩浆锆石(Hanchar and Miller, 1993; Hoskin *et al.*, 2000)。对该样品的21颗锆石进行了一共21个点的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄测试。锆石的Th、U含量分别为 $48.9 \times 10^{-6} \sim 237.4 \times 10^{-6}$ 和 $50.8 \times 10^{-6} \sim 167.8 \times 10^{-6}$,Th/U比值为 $0.94 \sim 1.67$,平均1.26。所测21颗锆石的年龄

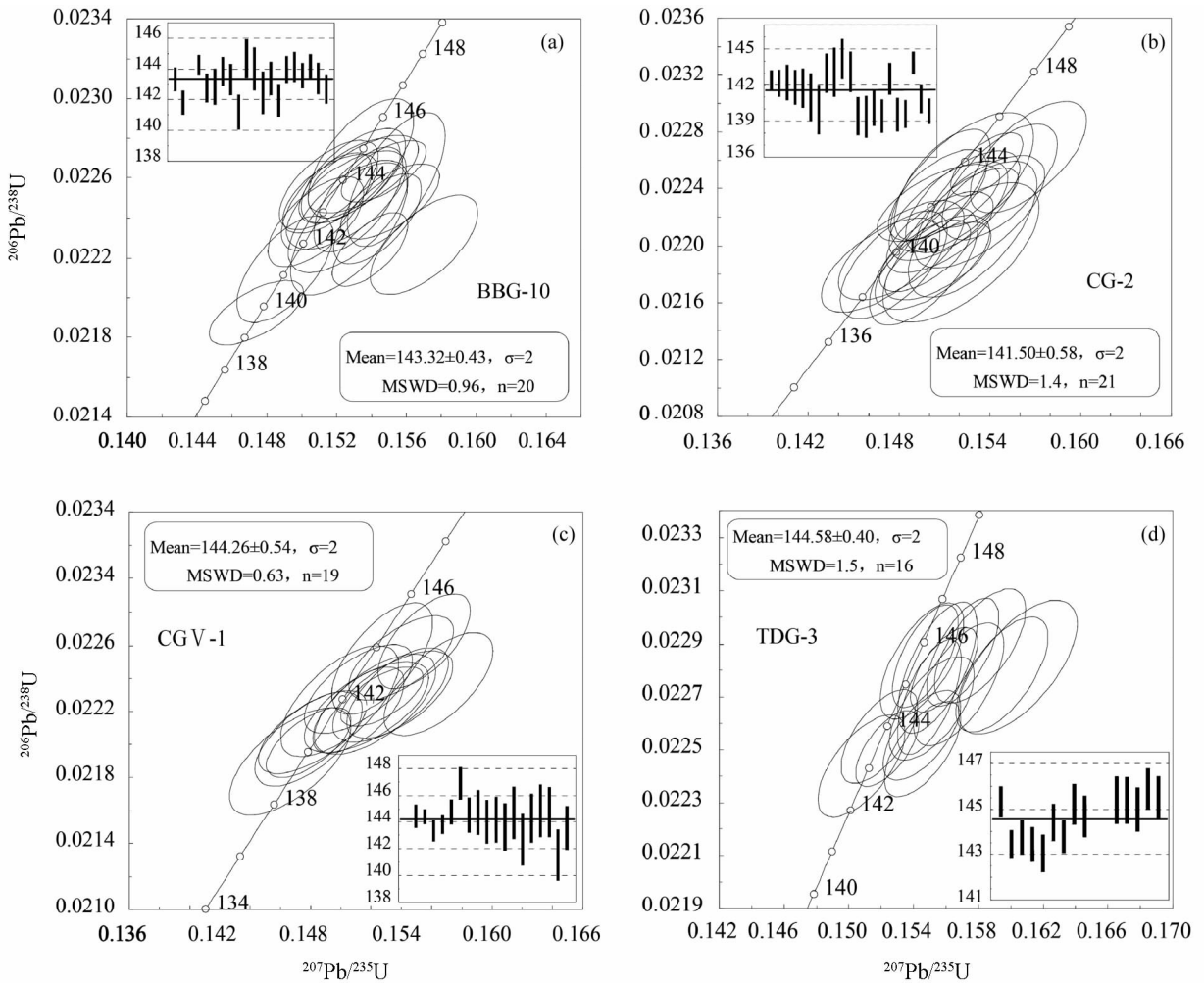


图7 池沟地区燕山期花岗(斑)岩体的锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig.7 Zircon U-Pb Concordia diagrams of the Yanshanian granite (porphyry) from the Chigou area

集中,全部落入谐和曲线上(图7b),21个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $141.50 \pm 0.58\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.4$),代表池沟IV号岩体的形成时代。

池沟(V号)花岗闪长岩样品(CG V-1)的锆石形态也多呈柱状、短柱状,粒径 $80 \sim 180\mu\text{m}$,岩浆振荡环带清楚,暗示锆石为典型的岩浆锆石(Hanchar and Miller, 1993; Hoskin *et al.*, 2000)。对样品的16颗锆石进行了16个点的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄测试。锆石的Th、U含量分别为 $59.1 \times 10^{-6} \sim 146.5 \times 10^{-6}$ 和 $51.2 \times 10^{-6} \sim 126.0 \times 10^{-6}$,Th/U比值为 $0.78 \sim 1.35$,平均1.1。所测的16颗锆石的年龄数值集中,16个点的数据落于谐和曲线上(图7c),16个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $144.26 \pm 0.54\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.63$),代表池沟V号岩体的形成年龄。

土地沟二长花岗岩样品(TDG-3)的锆石大多为柱状、短柱状,粒径 $60 \sim 180\mu\text{m}$,锆石振荡环带清晰,为典型的岩浆锆石(Hanchar and Miller, 1993; Hoskin *et al.*, 2000)。该样品的16颗锆石共进行了16个点的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄测

试。锆石的Th、U含量分别为 $64.7 \times 10^{-6} \sim 385.5 \times 10^{-6}$ 和 $64.0 \times 10^{-6} \sim 244.9 \times 10^{-6}$,Th/U比值为 $0.55 \sim 1.60$,平均0.93。所测的16个点的年龄相对集中,其中12个点的数据落于谐和曲线上,4个点的数据偏离谐和曲线(图7d)。在锆石的CL图像和反射、透射光图像上均显示锆石结晶完好,无包体、裂纹、晶格缺陷,因此4个点偏离谐和曲线可能是由于测试过程中的Pb丢失或U含量较高造成。16个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $144.58 \pm 0.40\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.5$),可代表土地沟岩体的成岩年龄。

5.2 锆石 Lu-Hf 同位素

4件测年样品(BSG-10、CG-2、CGV-1、TDG-3)的锆石原位Lu-Hf同位素测试数据表明大多数锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 小于0.002,这说明锆石在形成以后具有较低的放射成因Hf积累。4件样品的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ 平均值分别为 -0.97 、 -0.97 、 -0.97 和 -0.95 ,明显小于镁铁质地壳的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ (-0.34 ; Amelin *et al.*, 1999)和硅铝质地壳的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ (-0.72 ; Vervoort *et al.*,

1999),因此二阶段模式年龄更能反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间。根据 Hf 同位素相关计算公式,采用平均陆壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值 0.015 (Griffin *et al.*, 2002) 计算各样品的初始 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 、 t_{DMI} 和 t_{DM2} , 计算结果见表 3。

白沙沟石英闪长玢岩 (BSG-10) 20 颗锆石对应的 20 个分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.282611 ~ 0.282718 (平均 0.282663), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -2.62 ~ +1.15 (平均 -0.81), Hf 同位素二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 变化范围为 1364 ~ 1124Ma (平均 1248Ma)。池沟闪长岩 (IV 号: CG-2) 锆石的 25 个分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.282614 ~ 0.282727 (平均 0.282655), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -2.57 ~ +1.34 (平均 -1.14), Hf 同位素二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 变化范围为 1358 ~ 1107Ma (平均 1267Ma)。池沟花岗闪长岩 (V 号: CG V-1) 锆石的 20 个分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.282561 ~ 0.282734 (平均 0.282655), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -4.50 ~ +1.63 (平均 -1.11), Hf 同位素二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 变化范围为 1479 ~ 1090Ma (平均为 1265Ma)。土地沟二长花岗岩 (TDG-3) 锆石的 20 个分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.282600 ~ 0.282735 (平均 0.282677), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -3.03 ~ +1.78 (平均为 -0.34), Hf 同位素二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 变化范围为 1391 ~ 1084Ma (平均 1218Ma)。

6 讨论

6.1 成岩时代

山阳-柞水地区出露的燕山期花岗岩 (斑) 岩体均侵入于泥盆系中,且在区内白垩纪地层中可见花岗岩砾石 (张银龙, 2002),由此可见这些花岗岩 (斑) 岩体的形成时代应为石炭纪至白垩纪之间。万义文 (1980) 测得本区小岩体的黑云母 K-Ar 成岩年龄范围为 276.6 ~ 101.7Ma,并测得袁家沟花岗岩斑岩和小河口花岗闪长斑岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 149Ma 和 141Ma。严阵 (1985) 获得采自小河口、袁家沟以及马阴沟 (双元沟) 花岗 (斑) 岩体的 4 件样品的 U-Pb 等时线年龄为 148Ma; 尚瑞钧等 (1988) 获得小河口岩体的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 230Ma; 牛宝贵等 (2006) 测得冷水沟正长闪长斑岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $141.7 \pm 1.4\text{Ma}$; 谢桂青等 (2012) 获得池沟石英闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 $146 \pm 1\text{Ma}$ 和 $145.1 \pm 1\text{Ma}$ 。上述研究结果表明山阳-柞水地区出露的燕山期花岗岩 (斑) 岩体的成岩时代测年结果变化范围较大,但最新的精确的锆石 U-Pb 测年结果则趋向于认为成岩时代为晚侏罗世-早白垩世。

本文对山阳-柞水地区中部中酸性花岗岩 (斑) 岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果表明,白沙沟闪长玢岩的形成年龄 $143.32 \pm 0.43\text{Ma}$,池沟 (IV 号) 闪长岩的形成时代为 $141.50 \pm 0.58\text{Ma}$,池沟 (V 号) 花岗闪长岩的形成年龄为 $144.26 \pm 0.54\text{Ma}$,土地沟二长花岗岩的形成年龄为 $144.58 \pm 0.40\text{Ma}$ 。各花岗岩 (斑) 岩体成岩年龄相近,岩体成岩时代变化范围为 144.6 ~ 141.5Ma,为晚侏罗世至早白垩世。结合

前人对山阳-柞水地区的花岗 (斑) 岩体的测年结果,我们认为山阳-柞水地区广泛出露的小规模花岗岩 (斑) 岩体形成时代为 149 ~ 141Ma。

6.2 岩浆源区

前人对本区燕山期中酸性花岗岩 (斑) 岩体的岩浆源区及成因进行过一定的研究,但存在不同认识。严阵 (1985) 根据袁家沟、小河口、马阴沟 (又称双元沟)、土地沟等地花岗岩 (斑) 岩体的岩相学特征以及硫同位素组成,认为这些花岗岩 (斑) 岩体是上地幔 (包括部分下地壳) 部分熔融和结晶分异的产物,属于地幔分异型花岗岩; 张本仁等 (1989) 根据小河口、双元沟等地花岗岩 (斑) 岩体的稀土元素组成特征以及黑云母单矿物的化学组成特点认为这些岩体的成岩物质来自于上地幔,是上地幔岩石圈物质部分熔融的产物; 谢桂青 (2012) 根据池沟 (斑) 岩体的黑云母和角闪石的化学成分特征、全岩 Sr-Nd 同位素组成以及与斑岩体相关的辉钼矿的 Re 含量特征认为其成岩物质来自深部。

山阳-柞水地区燕山期花岗岩 (斑) 岩体均侵入于泥盆系中,且全部为小型花岗岩 (斑) 岩体; 岩相学分析表明小斑岩体的岩石组合相似,主要包括闪长岩、闪长玢岩、石英闪长岩、花岗闪长岩几种岩性,不同岩性间呈渐变过渡,无明显界限; 成岩主要矿物 (斜长石、钾长石、石英) 与副矿物 (磷灰石、榍石、磁铁矿以及锆石) 都相近; 小 (斑) 岩体成岩时代相近,集中于 149 ~ 141Ma 之间。这些特征均表明山阳-柞水地区出露的小 (斑) 岩体应具有相同的岩浆源区及相似的形成环境,同源岩浆结晶分异形成小 (斑) 岩体从中性到酸性的多种岩石类型组合。

岩石地球化学分析结果表明白沙沟、池沟、土地沟的花岗 (斑) 体均富集 K、Rb、Sr 和 Ba 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti、P 和 Hf 等高场强元素; 稀土元素分异明显,轻稀土富集,重稀土亏损,无明显的铈异常,这表明它们具有相似的地球化学特征。多数样品 $\text{Na}_2\text{O} > 3.2\%$, $\text{A}/\text{CNK} < 1.1$, 并富集 Ca (CaO 介于 0.88% ~ 2.35% 之间) 等,含大量角闪石、黑云母、榍石、磁铁矿等矿物,表明这些岩体属 I 型花岗岩 (Chappell, 1999); P_2O_5 与 SiO_2 呈负相关性 (图 8), 也显示了 I 型花岗岩特征 (Chappell, 1999; 李献华等, 2007), 进一步说明它们为 I 型花岗岩。白沙沟、池沟以及土地沟花岗岩 (斑) 岩体的化学成分总体偏基性,具准铝质花岗岩的特征,其成岩物质可能来源于偏基性的地壳物质的熔融岩浆 (Wolf and Wyllie, 1992; Johannes and Holtz, 1996; Sisson *et al.*, 2005)。典型 MORB 的 $\text{Mg}^\#$ 为 60 左右,而玄武岩部分熔融产生的熔体的 $\text{Mg}^\# < 45$ (Rapp *et al.*, 1997), 白沙沟、池沟以及土地沟花岗岩 (斑) 岩体的 $\text{Mg}^\#$ 介于 45 ~ 60 之间,平均为 49,因此其岩浆源区并非源于单一的基性地壳熔融岩浆,可能有地幔物质的混染 (Yogodzinski, 1995; Rapp *et al.*, 1999)。分析样品具有高的 Sr 含量和低的 Y 及 Yb 含量,暗示源区存在石榴石相的残余,并且所有样品都富集大离子亲石元素 (LILE) 亏损高

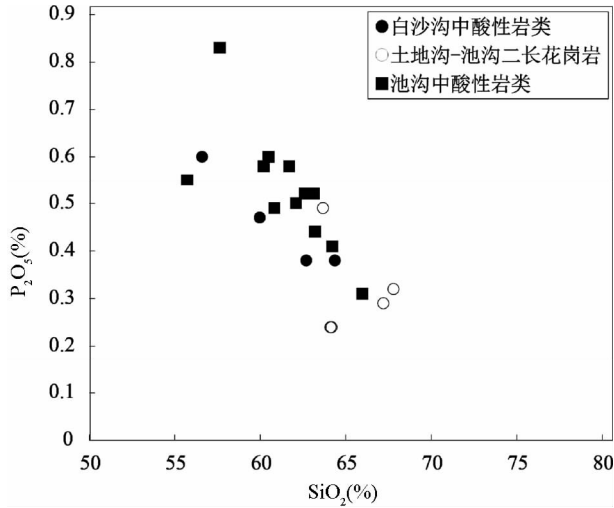


图 8 池沟地区燕山期花岗(斑)岩体的 P_2O_5 与 SiO_2 相关图

Fig. 8 P_2O_5 vs. SiO_2 diagrams of the Yanshanian granite (porphyry) from the Chigou area

场强元素 (HFSE), 均表明岩浆源区可能源于加厚地壳的熔融(张旗等, 2006)。上述分析表明区内燕山期花岗(斑)岩体的岩浆源区可能是基性下地壳脱水熔融产生的熔融岩浆与底侵的地幔物质的混合。

白沙沟、池沟以及土地沟花岗(斑)岩体 4 件样品的 Hf 同位素组成相似(图 9), 也进一步说明了区内不同花岗(斑)岩体间的源区及岩浆演化特征类似。从图 9 中可见 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值介于 $-4.5 \sim 1.78$ 之间, 分布于球粒陨石线上及侧附近。白沙沟石英闪长玢岩的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值介于 $-2.62 \sim 1.15$ 之间, 平均为 -0.81 。在 20 个分析点中, 有 14 个分析点的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为负值, 占分析点总数的 70%, 介于 $-2.62 \sim -0.03$ 之间; 其余 6 个点的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为正值, 介于 $0.18 \sim 1.15$ 之间。池沟(IV 号)闪长岩的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值介于 $-2.57 \sim 1.34$ 之间, 平均为 -1.14 。在 25 个分析点中, 有 21 个点的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为负值, 占分析点总数的 84%, 介于 $-2.57 \sim -0.09$ 之间; 其余 4 个点的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为正值, 介于 $0.09 \sim 1.34$ 之间。池沟(V 号)花岗闪长岩的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值介于 $-4.5 \sim 1.63$ 之间, 平均为 -1.11 。在 20 个分析点中, 有 17 个点的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为负值, 占分析点总数的 85%, 介于 $-4.5 \sim -0.03$ 之间; 其余 3 个点的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为正值, 介于 $0.44 \sim 1.63$ 之间; 土地沟二长花岗岩的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值介于 $-3.03 \sim 1.78$ 之间, 平均为 -0.34 。在 20 个分析点中, 有 12 个点的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为负值, 占分析点总数的 60%, 介于 $-3.03 \sim -0.09$ 之间; 其余 8 个点的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为正值, 介于 $0.03 \sim 1.78$ 之间。上述事实表明, 所有测试样品都既有 $\epsilon_{Hf}(t) > 0$ 又有 $\epsilon_{Hf}(t) < 0$ 的值, 其中以 $\epsilon_{Hf}(t) < 0$ 的值为主, 进一步表明区内花岗(斑)岩体的岩浆源区可能来自幔源岩浆与古老地壳物质的混合, 这一认识与岩体的岩石地球化学特征所反映的结果吻合。但研究区 Hf 同位素组成变化范围不大, 这

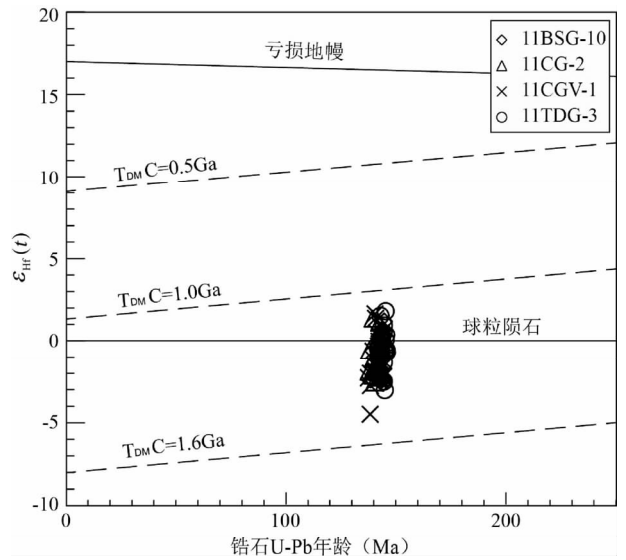


图 9 池沟地区燕山期花岗(斑)岩体锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 与 U-Pb 年龄图

Fig. 9 $\epsilon_{Hf}(t)$ vs. U-Pb ages for zircons of the Yanshanian granite (porphyry) from the Chigou area

可能是岩浆混熔程度较高, 从而使得壳源和幔源岩浆的 Hf 同位素组成趋于均一化。该 Hf 同位素组成特征与北侧的柞水岩体 ($\epsilon_{Hf}(t) = -5.8 \sim +4.4$)、曹坪岩体 ($\epsilon_{Hf}(t) = -6.0 \sim +3.3$)、沙湾岩体 ($\epsilon_{Hf}(t) = -1.7 \sim +5.0$) 等相似, 这几个岩体都被认为是壳幔岩浆混合形成(弓虎军等, 2009a, b)。以上分析表明山阳-柞水地区的岩浆源区可能为地壳熔融岩浆与幔源岩浆的混合。

白沙沟、池沟以及土地沟花岗(斑)岩体的二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 为 1479 ~ 1084 Ma (表 3), 其中白沙沟石英闪长玢岩的二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 为 1364 ~ 1124 Ma, 池沟(IV 号)闪长岩的二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 为 1358 ~ 1107 Ma, 池沟(V 号)花岗闪长岩的二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 为 1479 ~ 1090 Ma, 土地沟二长花岗岩的二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 为 1391 ~ 1084 Ma, 各花岗(斑)岩体的二阶段模式年龄相近, 均为中-新元古代。二阶段模式年龄反应的是岩浆源区物质的年龄, 对于岩浆源区为壳幔混合的花岗岩, 如果其幔源源区为古老岩石圈地幔的熔融, 其二阶段模式年龄应该反应该岩石圈地幔从原始地幔分离的时间。张宏飞等(1997)研究认为南秦岭地区中新元古代(1.7 ~ 1.0 Ga 之间, 峰期为 1.1 Ga 左右)发生了强烈的地壳增生事件, 形成大量的基性火山岩物质。山阳-柞水地区的小(斑)岩体的岩浆源区可能源于新元古代地壳物质的熔融岩浆与岩石圈地幔熔融岩浆的混合。这说明区内花岗岩类的岩浆源区物质的形成时代应为中-新元古代。在研究区北侧的三叠纪花岗岩体也存在相近的 Hf 同位素二阶段模式年龄, 东江口、柞水、曹坪以及沙湾 4 个花岗岩体的锆石 Hf 同位素二阶段模式年龄变化范围分别为 2348 ~ 1068 Ma (集中于 1400 Ma 左右)、1353 ~ 883 Ma、1366 ~ 887 Ma 和 1138

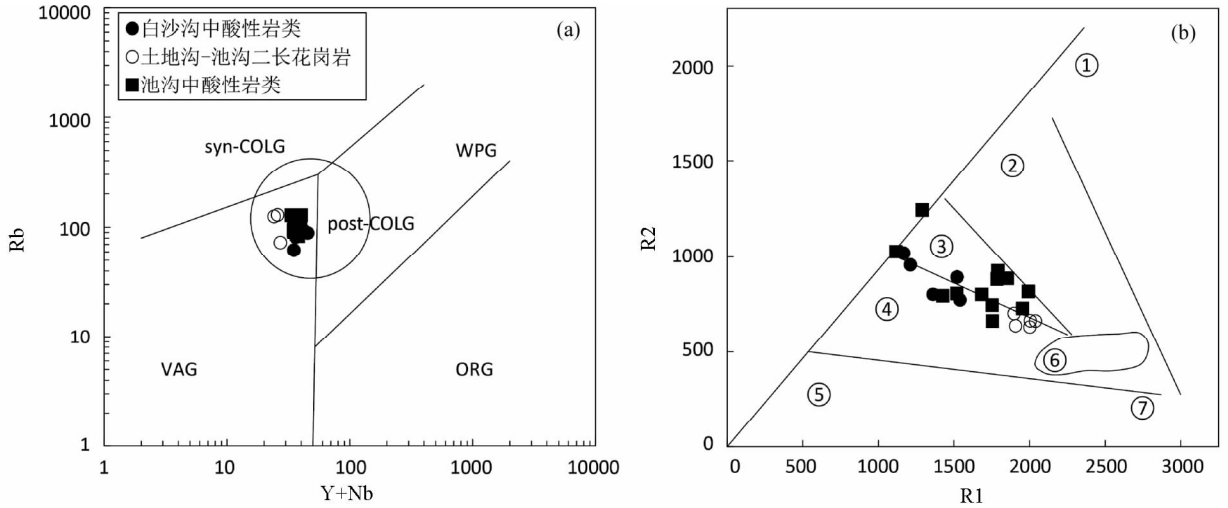


图 10 池沟地区燕山期花岗(斑)岩 Rb-(Y+Nb) (a, 据 Pearce, 1996) 和 R1-R2 (b, 据 Batchelor and Bowden, 1985) 构造环境判别图

WPG-板内花岗岩; ORG-大洋脊花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; syn-COLG-同碰撞花岗岩; Post-COLG-后碰撞花岗岩; ①地幔斜长花岗岩; ②板块碰撞前消减地区花岗岩; ③板块碰撞后隆起期花岗岩; ④晚造山期花岗岩; ⑤非造山区 A 型花岗岩; ⑥同碰撞(S 型)花岗岩; ⑦造山期后 A 型花岗岩; $R1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$; $R2 = 6Ca + 2Mg + Al$

Fig. 10 Rb-(Y+Nb) (a, after Pearce, 1996) and R1-R2 (b, after Batchelor and Bowden, 1985) discrimination diagrams of the Yanshanian granite (porphyry) from the Chigou area

In Fig. a: WPG-within-plate granite; ORG-ocean-ridge granite; VAG-volcanic-arc granite; syn-COLG-syn-collision granite; post-COLG-post-collision granite; In Fig. b: ①mantle fractionates granite; ②pre-plate collision granite; ③post-collision uplift granite; ④late-orogenic granite; ⑤anorogenic granite; ⑥syn-collision granite; ⑦post-orogenic granite; $R1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$; $R2 = 6Ca + 2Mg + Al$

~791Ma(弓虎军等, 2009a, b)。可见区内印支期花岗岩和燕山期中酸性花岗(斑)岩体的源区物质的形成时代都为中新元古代(1.4~1.0Ga)。

综上所述, 山阳-柞水地区的燕山期花岗(斑)岩体源于基性地壳熔融岩浆与岩石圈地幔熔融岩浆的混合, 其源区物质可能与南秦岭地区中新元古代(1.7~1.0Ga 之间)发生的地壳增生事件有关。通过与研究区北部印支期东江口、柞水、曹坪以及沙河湾花岗岩体的 Hf 同位素组成特征对比, 发现二者岩浆源区具相似性, 都源于地壳熔融岩浆与地幔物质的混合, 且源区物质与南秦岭新元古代增生事件相关。

6.3 成岩构造背景

在花岗岩 Rb-(Y+Nb) 构造环境判别图(图 10a)中, 白沙沟、池沟以及土地沟花岗(斑)岩体分析样品落入后碰撞型花岗岩范围内; 在 R1-R2 图解(图 10b)中, 样品投点落入板块碰撞后隆起期花岗岩和晚造山期花岗岩区域。前述岩石地球化学分析还说明燕山中晚期本地区地壳加厚, 造山带抬升, 符合碰撞后花岗岩的形成环境。这些事实都说明本区燕山期花岗(斑)岩体属碰撞后花岗岩类。对白沙沟、池沟以及冷水沟花岗(斑)岩体的锆石 U-Pb 测年结果显示其成岩时代介于 144.6~141.5Ma 之间, 为晚侏罗世至早白垩世, 与秦岭造山带从陆内俯冲向伸展转变的时期(Chen *et al.*, 2000)对应; 花岗(斑)岩体具后碰撞型花岗岩的岩石地球化学特征,

也与造山带从陆内俯冲向伸展转变的构造背景(Chen *et al.*, 2000)相吻合, 可见本区花岗(斑)岩体形成于造山带从陆内俯冲向伸展转变的构造背景之下。造山作用晚期发生拆沉作用的阶段被认为是花岗岩形成的重要构造背景(Kay and Kay, 1991; Rudnick, 1995), 常形成大规模的花岗岩基, 而山阳-柞水地区小(斑)岩体规模都较小。对此, 目前有两种推测: 一是认为造山带后期抬升有可能对岩体有剥蚀作用; 二是认为可能有燕山期隐伏大岩基, 而目前出露的小(斑)岩体仅为其岩枝, 西北有色地勘局 2011 年的 1:50000 航磁异常图显示小(斑)岩体出露区有较强的正异常(与西北有色地勘局 713 任涛高级工程师交流), 但目前未得到钻探工作的证实。此外, 造山带由于后期大规模的走滑剪切等作用, 也可能会破坏岩体, 从而造成出露岩体的规模较小。综上, 山阳-柞水地区燕山期小(斑)岩体可能是在碰撞造山向造山后伸展的转换期间, 随着造山带应力由挤压转向松弛, 加厚的地壳发生熔融形成花岗岩质岩浆, 大量花岗岩浆经过多期次重熔作用, 并与底侵的地幔岩浆混合, 上升侵位形成。

7 结论

(1) 山阳-柞水地区燕山期花岗(斑)岩体由闪长岩、闪长玢岩、石英闪长岩、花岗闪长岩以及二长花岗岩共同构成, 形成于 149~141Ma。

(2) 山阳-柞水地区燕山期花岗(斑)岩属于高钾钙碱性、准铝质 I 型花岗岩。岩体稀土元素分异显著, 无明显铈异常; 大离子亲石元素 K、Rb、Sr 和 Ba 等富集, 高场强元素 Nb、Ta、Ti、P 和 Hf 等亏损, 高 Sr 低 Y(Yb), 为碰撞后花岗岩, 形成于晚侏罗世至早白垩世秦岭造山带由陆内俯冲转为造山后伸展的构造体制转换阶段。

(3) 区内燕山期花岗(斑)岩体锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-4.5 \sim +1.78$ (平均为 -0.87), Hf 同位素二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 为 $1479 \sim 1084\text{Ma}$, 说明成岩物质源于基性地壳物质的熔融岩浆与幔源岩浆的混合(以地壳熔融成份为主), 且其壳源区物质可能形成于中晚元古代。

致谢 在野外地质考察过程中得到了西北有色地质勘查局 713 总队李剑斌、任涛、李向阳高级工程师以及中国科学院地质与地球物理研究所李继亮研究员的指导; 岩石地球化学分析和锆石 U-Pb 年龄、Lu-Hf 同位素测定分别得到了中国地质科学院国家地质实验测试中心相关实验人员以及中国地质科学院矿产资源研究所成矿作用与资源评价重点开放实验室侯可军、郭春丽博士的帮助; 两位匿名审稿人和贵刊编辑翁良军博士对本文提出了建设性的修改意见; 在此一并表示感谢!

References

Amelin Y, Lee DC, Halliday AN and Pidgeon RT. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. *Nature*, 399(6733): 252 - 255

Batchelor RA and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoids rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 48(1-4): 43 - 55

Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-2): 243 - 258

Chappell BW. 1999. Aluminum saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535 - 551

Chen YJ, Li C, Zhang J, Li Z and Wang HH. 2000. Sr and Q isotopic characteristics of porphyries in the Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type. *Science in China (Series D)*, 43(Suppl.): 82 - 94

Collins WJ, Beams SD, White AJR. *et al.* 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189 - 200

Cui JT and Zhao CY. 1998. The geological characteristic of ring-mottled granite in Dongjiangkou and Zhushui masses, Shaanxi Province. *Geology of Shaanxi*, 16(1): 51 - 57 (in Chinese with English abstract)

Cui JT, Zhao CY and Wang JC. 1999. The rock-lineage units classification and evolution of Dongjiangkou and Zhushui rock bodies in southern Qinling. *Geology of Shaanxi*, 17(2): 7 - 15 (in Chinese with English abstract)

Elhlou S, Belousova E, Griffin WL, Pearson NJ and O'Reilly SY. 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A158

Gong HJ, Zhu LM, Sun BY, Li B and Guo B. 2009a. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics and their geological significance of the Shahewan, Caoping and Zhushui granitic plutons in the South

Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 248 - 264 (in Chinese with English abstract)

Gong HJ, Zhu LM, Sun BY, Li B, Guo B and Wang JQ. 2009b. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of the Dongjiangkou granitic pluton and its mafic enclaves in the South Qinling terrain. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3029 - 3042 (in Chinese with English abstract)

Griffin WL, Wang X, Jackson SE, Pearson SE, O'Reilly SY and Zhou XM. 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

Hanchan JM and Miller CF. 1993. Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: Implications for interpretation of complex crustal histories. *Chemical Geology*, 110(1-3): 1 - 13

Hoskin PWO and Black LP. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423 - 439

Hou KJ, Li YH, Zou TR, Qu XM, Shi YR and Xie GQ. 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)

Hou KJ, Li YH and Tian YR. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multiturn counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28(4): 481 - 492 (in Chinese with English abstract)

Hu JM, Cui JT, Meng QR and Zhao CY. 2004. The U-Pb age of zircons separated from the Zhushui granite in Qinling Orogen and its significance. *Geological Review*, 50(3): 323 - 329 (in Chinese with English abstract)

Jiang YH, Jin GD, Liao SY, Qing Z and Peng Z. 2010. Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the origin of Late Triassic granitoids from the Qinling orogen, central China: Implications for a continental arc to continent-continent collision. *Lithos*, 117(3-4): 183 - 197

Johannes W and Holtz F. 1996. *Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks*. Berlin: Springer, 1 - 254

Kay RW and Kay SM. 1991. Creation and destruction of lower continental crust. *Geologische Rundschau*, 80(2): 259 - 278

Li CY, Liu YW, Zhu BQ, Feng YM and Wu HQ. 1978. Tectonic evolution of Qinling and Qilian Mountains. *Northwestern Geology*, 4: 1 - 12 (in Chinese)

Li XH, Li WX and Li ZX. 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(14): 1873 - 1885

Li XZ, Yan Z and Lu XX. 1993. *Granitoids of Mt. Qinling-Dabieshan*. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 218 (in Chinese with English abstract)

Liu SW, Li QG, Tian W, Wang ZQ, Yang PT, Wang W, Bai X and Guo RR. 2011. Petro-genesis of Indosinian granitoids in middle-segment of south Qinling tectonic belt: Constraints from Sr-Nd isotopic systematics. *Acta Geologica Sinica*, 85(3): 610 - 628

Liu SW, Yang PT, Li QG, Wang ZQ, Zhang WY and Wang W. 2011. Indosinian granitoids and orogenic processes in the middle segment of the Qinling orogen, China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(6): 1928 - 1943 (in Chinese with English abstract)

Liu YS, Hu ZC, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C and Chen H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34 - 43

Lu XX, Dong Y, Chang QL, Xiao QH, Li XB and Wang XX. 1996. Indosinian Shahewan rapakivi granite in Qinling and its dynamic significance. *Science in China (Series D)*, 39(3): 266 - 272

Lu XX, Wei XD, Xiao QH, Zhang ZQ, Li HM and Wang W. 1999. Geochronological studies of rapakivi granites in Qinling and its geological implications. *Geological Journal of China Universities*, 5(4): 372 - 377 (in Chinese with English abstract)

Lu XX, Wang XX, Xiao QH and Xing ZY. 2007. Comparison of

- Qinling-Kunlun orogenic-type rapakivi granite with world typical rapakivi granite. *Geological Science and Technology Information*, 26 (1): 1–10 (in Chinese with English abstract)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, Martinson JM, Corfu F, Dorr W, Kamo SL, Kennedy AK, Kronz A, Reiners PW, Frei D, Kosler J, Wan YS, Gotze J, Hager T, Kroner A and Valley JW. 2008. Zircon M257: A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(3): 247–265
- Niu BG, He ZJ, Ren JS, Wang J and Deng P. 2006. SHRIMP U-Pb ages of zircon from the intrusion in the western Douling-Xiaomaoling uplift and their geological significances. *Geological Review*, 52(6): 826–835 (in Chinese with English abstract)
- Pearce JA. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19 (4): 120–125
- Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81
- Qin JF, Lai SC and Li YF. 2005. Petrogenesis and geological significance of Yangba granodiorites from Bikou area, north margin of Yangtze Plate. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 697–710 (in Chinese with English abstract)
- Qin JF, Lai SC and Li YF. 2007. Genesis of the Indosinian Guangtoushan adakitic biotite plagiogranite in the Mianxian-Lueyang (Mianlue) suture, South Qinling, China, and its tectonic implications. *Geological Bulletin of China*, 26(4): 466–471 (in Chinese with English abstract)
- Qin JF, Lai SC, Grapes, Diwu CR, Ju YJ and Li YF. 2009. Geochemical evidence for origin of magma mixing for the Triassic monzonitic granite and its enclaves at Mishuling in the Qinling orogeny (central China). *Lithos*, 112(3–4): 259–276
- Qin JF. 2010. Petrogenesis and geodynamic implications of the Late-Triassic granitoids from the Qinling Orogenic Belt. Ph. D. Dissertation. Xi'an: Northwest University, 1–266 (in Chinese with English summary)
- Qin JF, Lai SC, Grapes R, Diwu CR, Ju YJ and Li YF. 2010. Origin of Late Triassic high-Mg adakitic granitoid rocks from the Dongjiangkou area, Qinling orogen, central China: Implication for subduction of continent crust. *Lithos*, 120(3–4): 347–367
- Rapp RP. 1997. Heterogeneous source regions for Archean granitoids. In: de Wit MJ and Ashwal LD (eds.). *Greenstone Belts*. Oxford: Oxford University Press, 35–37
- Rapp RP, Shimizu N, Norman MD and Applegate GS. 1999. Reaction between slab-derived melt and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335–356
- Rudnick RL. 1995. Making continental crust. *Nature*, 378(6557): 571–578
- Scherer E, Munker C and Mezger K. 2001. Calibration of the Lutetium-hafnium clock. *Science*, 293(5530): 683–687
- Shan RJ and Yan Z. 1988. *Granites of Qinling-Dabashan Mountains*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1–229 (in Chinese)
- Sisson TW, Ratajeski K and Hankins WB. 2005. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(6): 635–661
- Slama J, Kosler J, Condon DJ, Crowley JL, Gerdes A, Hancher JM, Horstwood MSA, Morris GA, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett MN and Whitehouse MJ. 2008. Plesovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1–2): 1–35
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313–345
- Tian W, Dong SB, Chen MM and Zhu WP. 2009. “Mantle signature” on the Indosinian granitoid belt in south Qinling, Central China. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 119–128 (in Chinese with English abstract)
- Vervoort JD and Blicher-Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3–4): 533–556
- Wan YW. 1980. Mineralization characteristics and ore deposit model of intermediate-acid granitoid porphyry from Shanyang region. *Regional Characteristics of Qinling*, (3): 1–36 (in Chinese)
- Wang J, Li X, Lai SC and Qin JF. 2008. Petrogenesis of the Early Triassic Xichahe and Wulong plutons in the South Qinling Mountains and their tectonic significance. *Geology in China*, 35(2): 207–216 (in Chinese with English abstract)
- Wang XX, Wang T, Ilmari H and Lu XX. 2005. Genesis of mafic enclaves from rapakivi-textured granites in the Qinling and its petrological significance: Evidence of elements and Nd, Sr isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 935–946 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZQ, Wang T, Yan Z and Yan QR. 2002. Late Paleozoic forearc accretionary piggyback type basin system in the South Qinling, Central China. *Regional Geology of China*, 21(8–9): 456–464 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZQ, Yan QR, Yan Z, Wang T, Jiang CF, Gao LD, Li QG, Chen JL, Zhang YL, Liu P, Xie CL and Xiang ZJ. 2009. New division of the main tectonic units of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1527–1546 (in Chinese with English abstract)
- Wolf MB and Wyllie PJ. 1992. The formation of tonalitic liquids during the vapor-absent partial melting of amphibolite at 10 kbar. *Eos*, 70: 506–518
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1–2): 105–126
- Xie GQ, Ren T, Li JB, Wang RT, Xia CL, Guo YH, Dai JZ and Shen ZC. 2012. Zircon U-Pb age and Petrogenesis of ore-bearing granitoids for the Chigou Cu-Mo deposit from the Zhashan basin, Shaanxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 15–26 (in Chinese with English abstract)
- Yan Z. 1985. *Granite from Shaanxi Province*. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1–321 (in Chinese)
- Yan Z, Wang ZQ, Yan QR, Wang T, Xiao WJ, Li JL, Han FL, Chen JL and Yang YC. 2006. Devonian sedimentary environments and provenance of the Qinling Orogen: Constraints on Late Paleozoic southward accretionary tectonics of the North China Craton. *International Geology Review*, 48(7): 585–618
- Yan Z, Wang ZQ, Wang T, Yan QR, Xiao WJ, Li JL, Han FL and Chen JL. 2007. Tectonic setting of Devonian sediments in the Qinling orogen: Constraints from detrital modes and geochemistry of elastic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1023–1042 (in Chinese with English abstract)
- Yan Z, Wang ZQ, Yan QR, Wang T and Guo XQ. 2012. Geochemical constraints on the provenance and depositional setting of the Devonian Liuling Group, East Qinling Mountains, Central China: Implications for the tectonic evolution of the Qinling orogenic belt. *Journal of Sedimentary Research*, 82(1): 9–20
- Yogodzinski CM, Kay RW, Volynets ON, Koloskov AV and Bolynets ON. 1995. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge. *Geological Society of America Bulletin*, 107(5): 505–519
- Zhang BR, Chen DX, Li ZJ *et al.* 1989. *Region Geochemistry of Shanyang-Zhashui Metallogenic Belt, Shaanxi Province*. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1–221 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CL, Wang T and Wang XX. 2008. Origin and tectonic setting of the Early Mesozoic granitoids in Qinling Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 304–316 (in Chinese with English abstract)

- Zhang HF, Zhang BR, Ling WL, Gao S and Ouyang JP. 1997. Late Proterozoic crustal accretion of South Qinling: Na isotopic study from granitic rocks. *Geochimica*, 26(5): 16 - 24 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Parrish R, Zhang L Xu WC, Yuan HL, Gao S and Crowley QG. 2007. A-type granite and adakitic magmatism association in Songpan Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau; Implication for lithospheric delamination. *Lithos*, 97(3-4): 323 - 335
- Zhang Q, Wang Y, Li CD, Wang YL, Jin WJ and Jia XQ. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249 - 2269 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YL. 2002. Geological features and the metallogenic conditions of acid-intermediate acid small rock bodies in Xiaohokou area of Shanyang County, Shaanxi Province. *Shaanxi Geology*, 20(2): 27 - 38 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZQ, Zhang GW, Tang SH and Lu XX. 1999. Age of the Shahewan rapakivi granite in the Qinling orogen, China, and its constraints on the end time of the main orogenic stage of this orogen. *Chinese Science Bulletin*, 44(21): 2001 - 2004

附中文参考文献

- 崔建堂, 赵长纓. 1998. 东江口-柞水岩体环斑花岗岩地质特征. *陕西地质*, 16(1): 51 - 57
- 崔建堂, 赵长纓, 王炬川. 1999. 南秦岭东江口-柞水岩体岩石谱系单位划分及演化. *陕西地质*, 17(2): 7 - 15
- 弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 李犇, 郭波. 2009a. 南秦岭沙河湾-曹坪和柞水岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义. *岩石学报*, 25(2): 248 - 264
- 弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 李犇, 郭波, 王建其. 2009b. 南秦岭地体东江口花岗岩及其基性包体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成. *岩石学报*, 25(11): 3029 - 3042
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 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
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. *矿床地质*, 28(4): 481 - 492
- 胡健民, 崔建堂, 孟庆任, 赵长纓. 2004. 秦岭柞水岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地质论评*, 50(3): 323 - 329
- 李春昱, 刘仰文, 朱宝清, 冯益民, 吴汉泉. 1978. 秦岭及祁连山构造发展史. *西北地质*, 4: 1 - 12
- 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
- 李先梓, 严阵, 卢欣祥. 1993. 秦岭-大别山花岗岩. 北京: 地质出版社, 1 - 218
- 刘树文, 杨朋涛, 李秋根, 王宗起, 张万益, 王伟. 2011. 秦岭中段印支期花岗质岩浆作用与造山过程. *吉林大学学报(自然科学版)*, 41(6): 1928 - 1943
- 卢欣祥, 董有, 常秋岭, 肖庆辉, 李晓波, 王晓霞. 1996. 秦岭印支期沙河湾奥长环斑花岗岩及其动力学意义. *中国科学(D辑)*, 26(3): 244 - 248
- 卢欣祥, 尉向东, 肖庆辉, 张宗清, 李惠民, 王卫. 1999. 秦岭环斑花岗岩的年代学研究及其意义. *高校地质学报*, 5(4): 372

- 377

- 卢欣祥, 王晓霞, 肖庆辉, 邢作云. 2007. 秦岭-昆仑造山型环斑花岗岩与世界典型环斑花岗岩的对比. *地质科技情报*, 26(1): 1 - 10
- 牛宝贵, 何政军, 任纪舜, 王军, 邓平. 2006. 秦岭地区陡岭-小磨岭隆起西段几个岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义. *地质论评*, 52(6): 826 - 835
- 秦江锋, 赖绍聪, 李永飞. 2005. 扬子板块北缘碧口地区坝坝花岗岩长岩体成因研究及其地质意义. *岩石学报*, 21(3): 697 - 710
- 秦江锋, 赖绍聪, 李永飞. 2007. 南秦岭勉县-略阳缝合带印支期光头山埃达克质花岗岩的成因及其地质意义. *地质通报*, 26(4): 466 - 471
- 秦江锋. 2010. 秦岭造山带晚三叠世花岗岩类成因机制及其动力学背景. 博士学位论文. 西安: 西北大学, 1 - 266
- 尚瑞钧, 严阵. 1988. 秦巴花岗岩. 武汉: 中国地质大学出版社, 1 - 229
- 田伟, 董申保, 陈咪咪, 朱文萍. 2009. 南秦岭印支期花岗岩带的“地幔印记”. *地学前缘*, 16(2): 119 - 128
- 万义文. 1980. 山阳一带中酸性斑岩体的成矿特点与成矿模式. *秦岭区测*, (3): 1 - 36
- 王娟, 李鑫, 赖绍聪, 秦江锋. 2008. 印支期南秦岭西荥河、五龙岩体成因及构造意义. *中国地质*, 35(2): 207 - 216
- 王晓霞, 王涛, Ilmari H, 卢欣祥. 2005. 秦岭环斑结构花岗岩中暗色包体的岩浆混合成因及岩石学意义——元素和 Nd, Sr 同位素地球化学证据. *岩石学报*, 21(3): 935 - 946
- 王宗起, 王涛, 闫臻, 闫全人. 2002. 秦岭晚古生代弧前增生的背驮型盆地体系. *地质通报*, 21(8-9): 456 - 464
- 王宗起, 闫全人, 闫臻, 王涛, 姜春发, 高联达, 李秋根, 陈隽璐, 张英利, 刘平, 谢春林, 向忠金. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分. *地质学报*, 83(11): 1527 - 1546
- 谢桂青, 任涛, 李剑斌, 王瑞廷, 夏长玲, 郭延辉, 代军治, 申志超. 2012. 陕西柞山盆地池沟铜钼矿区含矿岩体的锆石年龄和岩石成因. *岩石学报*, 28(1): 15 - 26
- 闫臻, 王宗起, 王涛, 闫全人, 肖文交, 李继亮, 韩芳林, 陈隽璐. 2007. 秦岭造山带泥盆系形成构造环境: 来自碎屑岩组成和地球化学方面的约束. *岩石学报*, 23(5): 1023 - 1042
- 严阵. 1985. 陕西省花岗岩. 西安: 西安交通大学出版社, 1 - 321
- 张本仁, 陈德兴, 李泽九等. 1989. 陕西柞水山阳成矿带区域地球化学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1 - 221
- 张成立, 王涛, 王晓霞. 2008. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境. *高校地质学报*, 14(3): 304 - 316
- 张宏飞, 张本仁, 凌文黎, 高山, 欧阳建平. 1997. 南秦岭新元古代地壳增生事件: 花岗质岩石钨同位素示踪. *地球化学*, 26(5): 16 - 24
- 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义. *岩石学报*, 22(9): 2249 - 2269
- 张银龙. 2002. 陕西省山阳县小河口地区酸性-中酸性岩体地质特征及其成矿地质条件分析. *陕西地质*, 20(2): 27 - 38