

西秦岭北缘花岗质岩浆作用及构造演化*

徐学义¹ 陈隽璐¹ 高婷^{1,2} 李平¹ 李婷¹

XU XueYi¹, CHEN JunLu¹, GAO Ting^{1,2}, LI Ping¹ and LI Ting¹

1. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 西安 710054

2. 长安大学资源学院, 西安 710069

1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an 710054, China

2. College of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710069, China

2013-04-11 收稿, 2013-07-18 改回.

Xu XY, Chen JL, Gao T, Li P and Li T. 2014. Granitoid magmatism and tectonic evolution in northern edge of the Western Qinling terrane, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2):371–389

Abstract Zircon LA-ICP-MS dating indicates that Jiangligou monzonite, Ayishan granodiorite, Dewulu granodiorite, Wenquan granodiorite, and Zhongchuan monzonite in the northern margin of Western Qinling terrane formed at 264 ± 1.4 Ma, 241.6 ± 4 Ma, 233.5 ± 1.5 Ma, 216.2 ± 1.1 Ma, and 264.2 ± 1.3 Ma, respectively. Geochemical data suggest that these granitic rocks are mainly belonging to high-K calc-alkalic series and minor rocks are calc-alkalic. The Jiangligou, Ayishan and Zhongchuan intrusions are pre-aluminous granites with $ACNK > 1.05$, however, the Wenquan and Dewulu intrusions are metaluminous or prealuminous granites with $ACNK$ value of $0.95 \sim 1.05$. They also have the geochemical characters of adakite and Himalaya-type granites. The granites of adakite and Himalaya-type with low $Mg^\#$ may result from partial melting of basalts in thickened lower crust, which can provide some clues to the collision between the North China Plate and the Yangtze Plate and also direct Cu-Au prospecting.

Key words Granitic plutons; Zircon U-Pb dating; Petrogeochemistry; Tectonic evolution; Western Qinling terrane

摘要 西秦岭北部江里沟、阿夷山、德乌鲁、温泉和中川 5 个花岗质岩体岩石学、地球化学和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究结果表明, 花岗岩体的岩性主体为花岗闪长岩-二长花岗岩, 属高钾钙碱系列, 少数为钙碱系列; 形成时代为 264 ~ 216Ma。江里沟、阿夷山和中川岩体属弱过铝质花岗岩 ($ACNK > 1.05$), 温泉岩体和德乌鲁岩体属准铝和弱过铝质花岗岩 ($ACNK = 0.95 \sim 1.05$); 花岗岩具有埃达克岩 ($Sr > 400 \times 10^{-6}$, $Yb < 2 \times 10^{-6}$) 或喜马拉雅型花岗岩 ($Sr < 400 \times 10^{-6}$, $Yb > 2 \times 10^{-6}$) 的地球化学特征, 或两者兼而有之。花岗岩浆起源于下地壳的部分熔融, 源岩最有可能是古老的玄武质岩石。西秦岭北部存在埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩, 说明三叠纪时期存在陆陆碰撞或陆陆俯冲导致的地壳加厚, 加厚的下地壳的部分熔融以及部分熔融发生深度的不同, 形成本区具有埃达克或喜马拉雅型地球化学特点的花岗岩侵入体。埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩对寻找金铜矿产具有一定的指导意义。

关键词 花岗质侵入体; 锆石 U-Pb 定年; 岩石地球化学; 构造演化; 西秦岭

中图分类号 P588.121; P597.3

1 引言

西秦岭北缘同仁县、夏河县、合作市、武山县和礼县一带花岗质岩浆活动强烈, 成矿作用十分显著, 以斑岩型铜、钼、金矿床、矽卡岩型铜矿和浅成低温热液型金矿为特征, 是中

国西部重要的铜、钼、金成矿带。尽管近年来不少研究者对该花岗岩带从形成时代、岩浆源区以及成矿作用等不同角度进行了研究(李永军等, 2003; 宋忠宝等, 2004; 金惟俊等, 2005; 张宏飞等, 2005, 2007; 秦江峰等, 2005; 张成立等, 2008, 齐金忠等, 2005; 杨荣生等, 2006; 刘红杰等, 2008; 张旗等, 2009a, b; 殷勇和殷先明, 2009), 但对于西秦岭北缘与成矿作

* 本文受科技支撑计划课题(2011BAB04B05、2006BAB01A11)和国土资源大调查项目(1212010611804、1212010610319)联合资助。

第一作者简介: 徐学义, 男, 1966 年生, 研究员, 岩石学及地球化学专业, E-mail: xuxueyi1030@163.com

用密切的江里沟、德乌鲁、阿夷山等花岗岩体形成时代、形成构造环境以及其相互关系缺乏研究,严重影响了对西秦岭构造演化及成矿作用研究。为此,本文将以江里沟、阿夷山、德乌鲁、温泉和中川岩体为研究对象,通过岩石学、地球化学和锆石 LA-ICP-MS 测年综合研究,讨论西秦岭北缘花岗岩的成因及其与构造演化关系。

2 区域地质背景

西秦岭造山带大致指青海南山北缘断裂-土门关断裂以南,宝成铁路以西,玛沁-略阳断裂以北,柴达木地块以东的广阔区域(图1),是诸多地块和造山带汇聚交接地带(张旗等,2009b;冯益民等2003;闫臻等,2012)。西秦岭造山带自新元古代以来,大致经历了超级大陆裂解、秦祁昆洋形成、洋陆俯冲造山、大陆碰撞造山、板内伸展和陆内碰撞造山等多个构造演化过程。冯益民等(2003)称其为“碰撞-陆内复合型”造山带;张国伟等(2004)认为西秦岭基本构造格架是在印支期奠定的,其后又遭受中生代构造运动强烈改造。区域上,西秦岭的花岗岩主要发育于夏河-合作-临潭-岷县-宕昌断裂北侧,且以印支期为主,该断裂以南主要以巨厚的三叠系沉积为主,花岗质侵入体基本未见且分布零星。闫臻等(2012)通过综合研究,认为西秦岭是早古生代造山作用基础上形成的插入祁连和昆仑早古生代造山带内部的楔形地质体,以大面积出露三叠系和发育多条蛇绿混杂岩、韧性剪切带、中生代岩浆作用和相关斑岩-矽卡岩型矿床为典型特征,具有典型增生型造山带特征,该造山带在三叠纪时期与祁连、东昆仑造山带为一有机整体,自西向东发育一条增生岩浆弧,且三叠纪沉积组合为活动大陆边缘沉积。

3 花岗岩体基本地质特征与岩石学特征

3.1 江里沟岩体

该岩体位于岗察乡以南江里沟,出露面积约12km²,呈NW向展布。岩体与地层之间主体为侵入接触关系,只在岩体北侧和南侧局部地段见其与地层之间呈断层接触,同时在岩体最北侧局部段可见其被下三叠统古浪提组砂板岩所覆盖,二者之间为不整合接触。其中岩体北侧地层为中石炭-二叠统大关山组(C₂P₂dg)灰-灰白色中厚层含礁角砾灰岩、粘结灰岩及骨架灰岩、鲕状灰岩和生物碎屑灰岩组合;岩体南侧地层为大石关组细砂岩、钙质砂板岩组合。岩体和围岩之间热接触变质带发育,主要为大理岩、角闪化砂板岩以及石榴石砂卡岩等接触变质岩,发育金钼矿化,局部地段变质带宽约1m。岩体主体为灰白色似斑状二长花岗岩,往南局部过渡为中细粒花岗闪长岩和闪长岩,并被花岗斑岩脉所侵入。

二长花岗岩主要矿物为斜长石(25%~35%)、碱性长石(20%~30%)、石英(20%~25%)、黑云母(3%~10%),含

少量的白云母,副矿物主要有锆石、磷灰石、榍石等。斜长石为半自形板状,部分呈较大的晶体,相对含量约为斜长石总量的20%,见有绿帘石化和绢云母化。碱性长石和石英为他形粒状,部分粒度较大的碱性长石包裹了粒度较小的自形斜长石,石英一般充填于较粗粒的钾长石和斜长石之间,表现为似斑状构造。

花岗闪长岩为灰-灰白色,中细粒结构,块状构造。主要由斜长石(40%~60%)、石英(15%~25%)、角闪石(20%~30%)、碱性长石(5%~10%)组成,含少量黑云母(<5%)。斜长石不同程度发生绢云母化,角闪石发育弱的绿帘石化。副矿物有磷灰石、锆石、榍石等。

闪长岩主要由斜长石(50%~60%)、角闪石(30%~35%)、碱性长石(3%~5%)和石英(2%~3%)组成。斜长石发育绢云母化和绿帘石化,角闪石发育绿帘石化。副矿物主要为钛磁铁矿、榍石和磷灰石。

3.2 阿夷山岩体

位于夏河县达麦乡西约10km处,呈近东西向展布,出露面积为6km²。岩体与围岩呈明显的侵入关系,接触处以岩枝侵入地层中,未见明显的烘烤、冷凝现象。围岩为上二叠统毛毛隆组(P₂m)钙质砂岩和长石石英砂岩。岩体岩性较为单一,主体为中-中细粒花岗闪长岩,局部地段过渡为二长花岗岩。岩体中有较多早期细粒花岗闪长岩包体,包体形态变化较大,以椭圆状为主,也见长方状,定向性不明显。

花岗闪长岩主要矿物成分有:斜长石(45%~60%)、石英(20%~25%)、角闪石(10%~15%)、黑云母(3%~5%)、碱性长石(3%~5%)。斜长石呈半自形板状,角闪石呈柱状,石英和碱性长石呈他形粒状充填于斜长石和角闪石矿物之间,黑云母为细小片状晶体。副矿物主要为榍石、锆石和磷灰石。

二长花岗岩主要矿物为斜长石(35%)、碱性长石(30%)、石英(30%)、黑云母和角闪石约(5%)。斜长石呈半自形板状,发育聚片双晶,有弱的绢云母化,表面较混浊;碱性长石为它形粒状,表面干净,内部可见斜长石的包晶,二者含量相当。石英和碱性长石充填于斜长石矿物之间,黑云母为细小片状晶体,角闪石呈自形柱状分散于岩石中。副矿物主要为钛磁铁矿、榍石和磷灰石。

3.3 德乌鲁岩体

位于夏河县东麻隆乡南15km处,呈北西展布,出露面积约为4km²。岩体主要侵入于上三叠统毛毛隆组砂岩和粉砂岩中,接触带见有岩枝穿插于围岩中,部分地段有黄土覆盖。岩体岩性较为单一,为中粗粒花岗闪长岩。岩体中含有较多暗色闪长质包体。

花岗闪长岩主要矿物为斜长石(50%~55%)、石英(20%~25%)、角闪石(10%~15%)、黑云母(5%~10%)、碱性长石(5%)、其它矿物(3%~5%)。斜长石呈半自形板

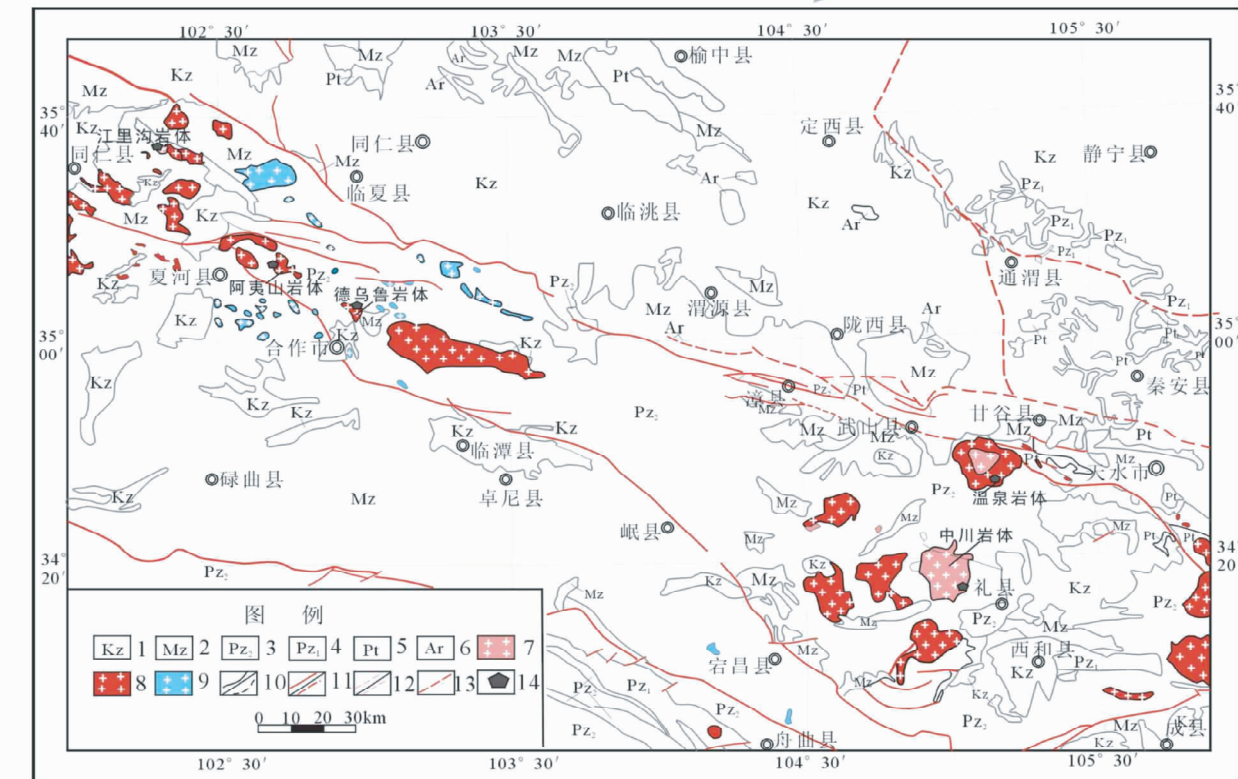
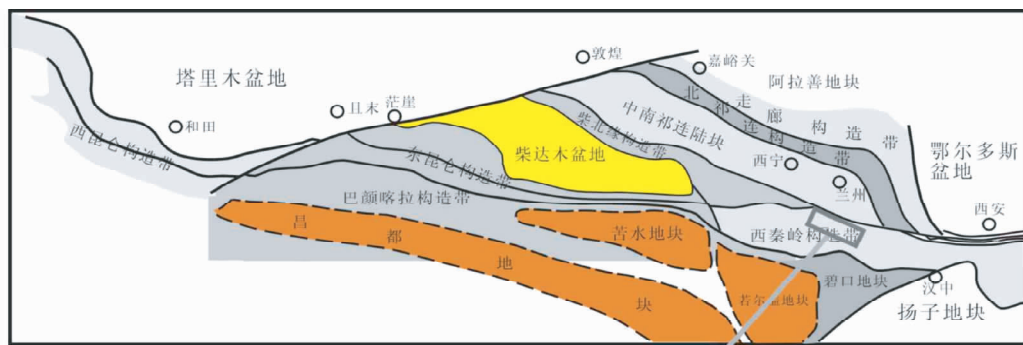


图1 西秦岭西段花岗岩分布地质简图

1-新生代;2-中生代;3-晚古生代;4-早古生代;5-元古代;6-太古代;7-二叠纪侵入岩;8-三叠纪侵入岩;9-侏罗纪侵入岩;10-实测/推测地质界线(含地层整合、平行不整合及侵入体界线);11-实测/推测区域性主干断裂;12-实测/推测一般断层;13-隐伏或半隐伏断层

Fig.1 Sketch geological map and granite distribution in the west segment of western Qinling Orogenic Belt

状,发育环带结构;角闪石呈自形柱状,石英和碱性长石呈他形粒状充填于斜长石和角闪石之间,石英粒径为0.5~1mm,碱性长石粒径为0.5~1mm,发育高岭土化;黑云母为细小片状晶体,颜色为浅黄色-黄褐色。副矿物为锆石、榍石、磷灰石。岩体内部含有闪长质包体,为灰黑色,直径介于2~20cm之间。

闪长质包体为黑色,细粒结构,主要矿物为角闪石(50%~60%),其次为斜长石(30%~40%)。角闪石为半自形柱状晶体,斜长石为半自形板状晶体。

3.4 温泉岩体

位于武山县温泉乡境内,呈一近圆形出露,出露面积达

260km²。岩体北部侵入于中下元古界秦岭岩群的绿泥钠长岩和斜长角闪岩中,南部侵入于泥盆系大草滩群(D₃dc)石英砂岩、长石石英砂岩及泥质粉砂岩中。岩体由内向外可划分为三个环带,最外环以似斑状黑云二长花岗岩、花岗闪长岩为主,两者之间岩性为过渡关系,出露面积占总面积的40%~45%。中部为黑云二长花岗岩,出露面积占整个岩体的20%~25%。内环为细粒花岗岩,出露面积相对较小。三个环带代表不同序次侵入体,均呈侵入接触关系(李永军等,2003)。温泉岩体的一大特征是围岩捕虏体发育且体积巨大。本次研究样品主要采于岩体外环带的花岗闪长岩。

花岗闪长岩为青灰或灰白色,似斑状中粗粒结构,块状构造。斑晶为斜长石,含量约为(5%~10%)。基质为中粒

结构,主要矿物为斜长石(40%~45%),角闪石(15%~20%),石英(15%~20%),碱性长石(5%~10%),黑云母(3%~5%)。副矿物主要为锆石、榍石和磷灰石。

二长花岗岩呈灰白色,中粗粒结构,块状构造。主要组成矿物为石英(20%~25%),斜长石(30%~40%),碱性长石(25%~35%),黑云母(3%~5%),黑云母为浅黄色-褐色,边部可见绿泥石化。副矿物主要为锆石、榍石和磷灰石。岩体中见有数量不等和大小不一的闪长质微粒包体。

3.5 中川岩体

位于礼县中川乡东约20km,呈近椭圆形展布,出露面积约为210km²,岩体北部侵入于泥盆系舒家坝群灰岩、细砂岩及粉砂岩或粉砂质泥岩中,西部侵入于泥盆系西汉水群碳酸盐岩-陆源碎屑岩中,南部侵入于石炭系中川组砂岩,灰岩及千枚状板岩中。中川岩体为复式岩体,目前认为发育3期侵入作用,不同期次岩体呈同心环状产出,从外到内形成时代由早至晚,基本属于同源岩浆近同期活动的产物。外环主要由中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩,花岗闪长岩,石英闪长岩及辉长岩组成,中环为中粒含斑黑云母二长花岗岩,内环主要为中细粒黑云母二长花岗岩。本次主要对外环黑云母二长花岗岩开展研究。

中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩为灰白色,主要矿物有石英(20%~30%)、斜长石(25%~35%)、碱性长石(20%~30%)、黑云母(3%~6%),含少量角闪石。斜长石发育环带和聚片双晶,以更长石为主,少量中长石,石英和碱性长石它形粒状,黑云母为片状,可见次生绿泥石化。

4 分析方法

4.1 化学全分析

本次研究选择了28件较新鲜的岩石样品在中国地质调查局西安地质调查中心进行了化学全分析。主量元素和微量元素分别利用X荧光光谱仪3080E和2100进行测试。其中Na₂O、MgO、Al₂O₃、SiO₂、P₂O₅、K₂O、CaO、TiO₂、MnO、Fe₂O₃、FeO按GB/T 14506.28—1993标准,H₂O⁺按GB/T 14506.2—1993标准;CO₂按GB 9835—1988标准;LOI按LY/T 1253—1999标准;稀土元素La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y和微量元素Cu、Pb、Th、U、Hf、Ta、Sc、Cs、V、Co、Ni按照DZ/T 0223—2001为标准;微量元素Sr、Ba、Zn、Rb、Nb、Zr、Ga以JY/T 016—1996为标准。测试结果见表1。

4.2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年

野外分别采集江里沟二长花岗岩(08-6)、阿夷山花岗闪长岩(08-12)、德乌鲁花岗闪长岩(08-22)、温泉花岗闪长岩(08-44)和中川二长花岗岩(08-49)样品3~5kg,室内将其分

别破碎至60~80目,用水淘洗粉尘后,先用磁铁除去磁铁矿等磁性矿物,再用重液选出锆石,最后在双目镜下选出锆石。该项工作由河北廊坊区调院完成。

锆石阴极发光图像以及LA-ICP-MS定年分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石U-Pb原位定年分析所采用的ICP-MS为Elan 6100DRC,激光剥蚀系统为德国Lamda Physik公司生产的Geolas 200M深紫外(DUV)193nmArF准分子(excimer)激光剥蚀系统,该系统相对常规的266nm或213nmND:YAG剥蚀系统具有较小的元素分馏效应。分析所采用的激光束直径为30μm,剥蚀深度为20~40μm。实验中采用He作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质NIST SRM610进行仪器最佳化调试,采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式,每完成4~5个待测样品测定,插入测标样一次。在所测锆石样品15~20个点前后各测2次NIST SRM610。锆石U-Pb年龄采用标准锆石91500作为外部标准物质,元素含量采用NIST SRM610作为外标。测试结果通过Glitter软件计算得出,获得的数据采用Andersen(2002)的方法进行同位素比值的校正,并采用Isoplot 3.23v进行最终的年龄计算和图表的绘制。分析点的同位素比值和同位素年龄的误差(标准偏差)为1σ,²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄按95%的置信度给出,详细分析参见文献(Yuan *et al.*, 2004)。测试结果见表2、表3、表4、表5、表6。

4.3 锆石 Lu-Hf 同位素分析

锆石原位微区Lu-Hf同位素测试仪器采用Nu Plasma HR(Wrexham, UK)多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)在西北大学大陆动力学实验室完成。激光束斑直径为63μm,激光脉冲宽度为15ns,试验中采用He气作为剥蚀物质载气,详细测试流程及条件等参见Yuan *et al.* (2004)。用¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu = 0.02655和¹⁷⁶Yb/¹⁷²Yb = 0.5886(Lizuka and Hirata, 2005)进行同量异位干扰校正计算测定样品的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf和¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf比值。在样品测定期间,对标准参考物质91500和GJ-1进行分析,以对仪器状态进行监控和对样品进行校正。¹⁷⁶Lu衰变常数为1.865 × 10⁻¹¹ a⁻¹(Scherer *et al.*, 2001),球粒陨石现今的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282772,¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.0332(Blichert-Toft and Albarede, 1997);亏损地幔现今¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.283250,¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.0384(Griffin *et al.*, 2000)。测试结果见表7。

5 分析结果

5.1 岩石地球化学特征

5.1.1 江里沟岩体

二长花岗岩样品的SiO₂含量为71.76%~75.86%,TiO₂含量为0.16%~0.28%,Al₂O₃含量变化于11.67%~14.84%,

表 1 西秦岭西段侵入岩化学成分(主量元素:wt%; 稀土和微量元素: $\times 10^{-6}$)Table 1 Major and trace element compositions of intrusions from the western Qinling (major element: wt%; REE and trace elements: $\times 10^{-6}$)

岩体 岩性	同仁江里沟岩体						夏河阿夷山岩体						夏河德乌鲁						武山温泉岩体						中川岩体						
	黑云母二长花岗岩		黑云母二长花岗岩		黑云母二长花岗岩		黑云母二长花岗岩		黑云母二长花岗岩		黑云母二长花岗岩		黑云母二长花岗岩		黑云母二长花岗岩		黑云母二长花岗岩		黑云母二长花岗岩		黑云母二长花岗岩		黑云母二长花岗岩		黑云母二长花岗岩		黑云母二长花岗岩		黑云母二长花岗岩		黑云母二长花岗岩
样品号	08-2	-3	-6	-7	-8	-9	-10	-12	-14	-15	-16	-18	-19	-20	-21	-22	-23	-24	-42	-43	-44	-45	-46	-47	-48	-49	-50	-51			
SiO ₂	73.42	71.76	75.86	75.71	75.18	78.31	63.74	62.28	62.72	64.98	65.68	69.15	73.34	63.55	67.51	65.55	65.4	65.14	70.63	68.99	68.07	58.41	71.21	67.12	58.87	68.93	70.13	68.16			
TiO ₂	0.28	0.28	0.22	0.18	0.16	0.18	0.74	0.79	0.76	0.64	0.62	0.48	0.14	0.54	0.41	0.46	0.51	0.54	0.37	0.45	0.52	0.9	0.35	0.52	1.04	0.44	0.49	0.50			
Al ₂ O ₃	14.02	14.84	12.34	12.95	12.91	11.67	16.76	16.66	16.41	16.79	16.41	15.8	15.14	16.4	16.02	16.3	16.28	15.88	14.75	14.7	14.73	16.91	14.59	15.12	16.51	15.60	14.40	15.42			
Fe ₂ O ₃	0.30	0.43	0.60	0.33	0.26	0.46	0.92	0.90	0.99	0.47	0.56	0.41	0.17	0.83	0.44	0.64	0.68	0.78	1.12	1.44	1.67	3.02	1.04	1.35	2.55	0.47	0.66	0.82			
FeO	1.52	1.37	1.02	0.90	0.88	0.82	4.08	4.52	4.20	3.92	3.48	2.33	0.82	3.20	2.40	2.73	2.96	3.09	1.28	1.67	1.78	3.44	1.10	1.88	3.66	2.24	2.37	2.48			
MnO	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.04	0.08	0.08	0.08	0.06	0.06	0.03	0.02	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.10	0.04	0.06	0.14	0.06	0.07			
MgO	0.64	0.70	0.50	0.35	0.36	0.36	2.26	2.52	2.44	1.44	1.58	0.96	0.25	3.30	2.22	2.70	2.96	3.14	1.02	1.44	1.66	3.12	0.93	1.72	3.20	0.95	1.07	1.20			
CaO	1.63	1.72	0.83	0.94	0.92	0.88	4.84	4.89	4.75	3.79	3.50	2.59	1.17	5.14	3.90	4.50	4.44	4.61	2.08	2.57	2.64	3.22	1.93	2.55	4.00	2.60	2.63	2.80			
Na ₂ O	3.58	4.04	3.09	3.49	3.28	3.17	2.68	2.68	2.64	2.90	2.87	3.32	3.69	3.11	3.17	3.21	3.20	3.05	3.64	3.59	3.64	4.73	3.65	3.64	3.97	3.63	3.46	3.66			
K ₂ O	4.11	3.69	4.29	4.48	4.42	3.91	2.76	2.86	3.11	3.34	3.34	3.64	4.17	2.42	2.70	2.76	2.80	2.60	3.92	3.66	3.70	2.71	3.94	4.32	3.99	3.83	3.34	3.73			
P ₂ O ₅	0.11	0.115	0.08	0.06	0.06	0.07	0.2	0.21	0.21	0.23	0.19	0.16	0.09	0.11	0.09	0.09	0.10	0.10	0.17	0.21	0.23	0.36	0.15	0.24	0.41	0.17	0.19	0.21			
LOI	0.81	0.997	1.1	0.6	1.12	0.55	1.29	1.31	1.33	1.01	1.28	1.13	0.91	1.33	1.35	0.92	0.97	0.94	1.09	0.94	1.13	2.68	0.87	1.43	1.48	0.74	0.72	1.05			
Total	100.50	99.99	99.98	100.00	99.58	100.40	100.40	99.70	99.64	99.57	100.00	99.91	99.99	100.30	99.92	100.40	99.93	100.10	99.71	99.83	99.60	99.80	99.95	99.82	99.66	99.52	100.10				
ALK	7.69	7.73	7.38	7.97	7.7	7.08	5.44	5.54	5.75	6.24	6.21	6.96	7.86	5.53	5.87	5.97	6	5.65	7.56	7.25	7.34	7.44	7.59	7.96	7.96	7.46	6.8	7.39			
K/Na	1.15	0.91	1.39	1.28	1.35	1.23	1.03	1.07	1.18	1.15	1.16	1.1	1.13	0.78	0.85	0.86	0.88	0.85	1.08	1.02	1.02	0.57	1.08	1.19	1.01	1.06	0.97	1.02			
AC	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0.01	0.02	0.02	0.02	-0.01	0.01	0	0	0	0.01	0	0	0	0.01	0	-0.02	0.01	0	0			
Rittman	1.94	2.08	1.66	1.94	1.84	1.42	1.43	1.59	1.68	1.77	1.7	1.85	2.04	1.49	1.41	1.58	1.61	1.44	2.07	2.02	2.15	3.59	2.04	2.63	3.99	2.15	1.7	2.17			
A/NK	1.35	1.39	1.27	1.22	1.27	1.23	2.26	2.22	2.13	2	1.97	1.68	1.43	2.12	1.97	1.97	1.96	2.03	1.44	1.49	1.47	1.58	1.42	1.42	1.52	1.54	1.55	1.53			
A/GNK	1.05	1.08	1.1	1.05	1.09	1.06	1.03	1.01	1	1.1	1.11	1.12	1.19	0.96	1.05	0.99	0.99	0.98	1.05	1.01	0.99	1.02	1.06	0.99	0.91	1.05	1.02	1.02			
AR	2.93	2.75	3.55	3.69	3.51	3.59	1.67	1.69	1.75	1.87	1.91	2.22	2.86	1.69	1.84	1.81	1.82	1.76	2.63	2.45	2.46	2.17	2.7	2.64	2.27	2.39	2.33	2.36			
Fe*	0.74	0.72	0.76	0.77	0.76	0.77	0.68	0.68	0.68	0.68	0.75	0.72	0.74	0.8	0.54	0.56	0.55	0.55	0.69	0.67	0.66	0.66	0.69	0.64	0.65	0.74	0.73	0.73			
MAII	6.06	6.01	6.55	7.03	6.78	6.2	6	6.65	1	2.45	2.71	4.37	6.69	0.39	1.97	1.47	1.56	1.04	5.48	4.68	4.7	4.22	5.66	5.41	3.96	4.86	4.17	4.59			
La	42.7	24.1	12.9	20.2	31.2	21.9	53.4	35.1	32.9	65.2	64.9	44.6	26.4	26.1	35.1	31.3	34.6	27.6	30.7	44.2	39.4	32.7	33.3	54.6	45.6	40.1	42.8	42.8			
Ce	79.1	47	25	37.3	53.7	39.6	103	68.8	65.4	119	121	80.6	43.9	50.6	66.5	59.4	65.2	54	55.9	74.4	70.8	63.2	59.7	85.8	87.5	43.4	75.5	77.3			
Pr	7.98	5.08	2.89	3.89	5.3	4.08	11.4	8.1	7.79	13.2	13.2	8.72	4.56	5.78	6.92	6.49	7.09	6.16	7.65	7.77	7.23	6.67	8.71	9.84	5.05	7.79	8.61	8.61			
Nd	26.3	18	10.4	13	16.5	13.4	42.9	32.3	31.2	48.5	48.7	31.3	15.8	21.6	24.4	23.8	25.5	23.5	22.7	27	28.5	27.6	24.8	30.6	36.8	19.5	28.3	32.4			
Sm	4.2	3.32	2.3	2.32	2.61	2.35	8	6.77	6.91	8.87	8.69	5.57	3.28	4.46	4.28	4.76	4.96	4.81	4.44	4.9	5.63	5.69	4.89	5.68	7.37	4.56	5.82	6.56			
Eu	0.66	0.64	0.27	0.25	0.33	0.26	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.41	0.72	1	0.86	0.91	0.9	0.91	1.15	1.26	1.21	1.1	1.38	1.43	1.25	1.15	1.22			
Gd	3.24	2.65	1.96	1.71	1.78	1.73	5.35	5.02	5.17	5.72	5.65	3.37	2.17	3.33	2.91	3.33	3.6	3.54	3.43	3.6	4.09	4.45	3.75	4.31	5.81	3.59	4.29	4.87			
Tb	0.41	0.37	0.35	0.28	0.27	0.28	0.76	0.77	0.77	0.78	0.72	0.44	0.34	0.46	0.42	0.52	0.52	0.5	0.52	0.56	0.65	0.66	0.57	0.65	0.91	0.6	0.67	0.77			
Dy	2.32	2.15	2.1	1.57	1.5	1.56	3.78	4	3.9	3.53	3.25	1.89	1.6	2.74	2.3	2.88	2.83	2.93	2.81	2.78	3.42	3.53	3.13	3.38	4.88	3.38	3.55	4.16			
Ho	0.47	0.44	0.46	0.33	0.33	0.34	0.68	0.73	0.74	0.61	0.55	0.31	0.27	0.53	0.43	0.53	0.57	0.55	0.5	0.52	0.61	0.64	0.54	0.59	0.9	0.63	0.63	0.76			
Er	1.32	1.22	1.33	0.97	0.92	1	1.68	1.72	1.78	1.42	1.35	0.76	0.59	1.39	1.2	1.49	1.43	1.49	1.36	1.32	1.51	1.66	1.4	1.59	2.32	1.7	1.72	2.07			
Tm	0.22	0.2	0.22	0.14	0.14	0.16	0.21	0.23	0.23	0.16	0.16	0.09	0.07	0.18	0.15	0.2	0.19	0.2	0.18	0.18	0.23	0.25	0.21	0.2	0.35	0.25	0.24	0.33			
Yb	1.65	1.4	1.76	1.28	1.21	1.37	1.5	1.49	1.4	1	1.01	0.52	0.43	1.16	1.04	1.31	1.29	1.38	1.21	1.13	1.31	1.4	1.2	1.28	2.02	1.55	1.46	1.86			
Lu	0.3	0.24	0.32	0.23	0.24	0.26	0.23	0.23	0.23	0.16	0.17	0.09	0.06	0.19	0.16	0.2	0.21	0.2	0.18	0.19	0.23	0.24	0.21	0.23	0.38	0.26	0.25	0.32			
REE	170	106	62	83	116	88	234	166	159	270	271	179	100	119	146	137	148	127	131	169	165	150	141	199	206	110	171	184			
LRE/HRE	16.2	11.3	6.3	11.8	17.2	12.2	15.5	10.8	10.3	19.2	20.1	23.1	17.1	11	16	12.1	13	10.8	11.9	15.5	12.7	10.7	11.8	15.3	10.7	8.2	12.4	11.2			

续表 1

Continued Table 1

岩体 岩性	同仁山里沟岩体							夏河阿夷山岩体							夏河德鸟鲁							武山温泉岩体							中川岩体				
	黑云母-二长花岗岩							花岗岩-二长花岗岩							花岗岩长岩							二长花岗岩-花岗岩长岩							黑云母-二长花岗岩				
样品号	08-2	-3	-6	-7	-8	-9	-10	-12	-14	-15	-16	-18	-19	-20	-21	-22	-23	-24	-42	-43	-44	-45	-46	-47	-48	-49	-50	-51					
La/Sm	10.17	7.26	5.61	8.71	11.95	9.32	6.68	5.18	4.76	7.35	7.47	8.01	8.05	5.85	8.2	6.58	6.98	5.74	6.91	9.02	7	5.75	6.81	9.61	6.19	5.35	6.89	6.52					
8Eu	0.55	0.66	0.39	0.38	0.47	0.39	0.76	0.84	0.8	0.81	0.75	1	0.83	0.79	0.75	0.7	0.65	0.67	0.79	0.84	0.8	0.74	0.79	0.85	0.67	0.94	0.7	0.66					
(La/Yb) _N	17.4	11.6	4.9	10.6	17.4	10.8	24	15.9	15.8	44	43.3	57.8	41.4	15.2	22.8	16.1	18.1	13.5	17.1	26.4	20.3	15.7	18.7	28.8	15.2	10.6	18.5	15.5					
(Th/Yb) _N	1.1	1.17	0.88	0.96	0.98	0.9	2.23	2.28	2.43	3.44	3.14	3.73	3.49	1.75	1.78	1.75	1.78	1.6	1.89	2.19	2.19	2.08	2.09	2.24	1.99	1.71	2.02	1.83					
Y	15.4	13.3	16.1	11.7	11.2	12.3	19.8	20.5	20.6	17.5	17.1	9.31	8.16	15	12.9	16	15.6	16.1	15.6	15.2	18.5	19.6	17.3	18	27.2	18.6	19.3	23					
Hf	4.81	4.33	4.49	3.56	3.46	4.43	5.53	5.25	6.13	5.48	4.67	4	2.34	3.81	3.68	3.64	3.81	4.11	4.49	4.52	4.99	5.56	4.35	4.74	5.64	4.53	5	6.39					
Zr	159	162	139	111	106	136	219	202	233	216	179	152	72.3	140	123	124	134	145	166	167	191	208	155	179	219	170	190	247					
Sc	3.89	3.67	3.63	3.2	2.93	2.92	11.9	12.5	13	7.46	7.3	3.69	1.6	11.9	7.89	10	10.8	11.5	4.7	5.89	6.63	10.6	4	6.51	14.4	4.79	6.18	6.6					
Cr	8.2	8	6.55	5.32	12.3	4.77	29.7	43.6	36	36.7	20.1	10.3	5.1	118	73.9	96.2	108	113	18.8	30	33.4	11.9	13.5	28.3	13.4	9.57	11.9	29					
Co	106	114	166	151	135	124	86.2	79.8	81.8	71.5	85.4	100	153	80.4	104	123	102	97	120	126	98.9	58.1	116	88.7	49.2	87.4	121	119					
Ni	3.72	3.9	2.76	2.39	6.2	2.31	6.21	17.1	8.09	13.7	5.94	3.92	1.98	33.5	20.4	25.5	29.5	29.8	6.72	9.33	12.1	14.7	5.6	9.19	7.78	3.17	3.78	11.9					
Cu	16.4	2.38	47	13.3	17	3.22	7.04	7.73	7.49	10	6.55	3.59	1.99	25.6	27.5	8.75	7.62	9.88	4.73	5.8	4.51	20.1	5.12	5.75	28.3	4.63	4.94	5.53					
Zn	37.1	48.5	27.7	29.2	21.5	26.5	72.5	72.2	64.9	74.8	73.6	50.1	33	42.5	34.5	43.7	47.1	53.7	40.9	41.6	36.6	63.1	41.9	34.7	77.6	61.8	66.9	64.6					
Ga	19.1	19.8	17.7	18.2	18.1	16.9	21.8	21.5	20.9	24.5	24	23.2	24.2	19.5	18	19.1	19.6	18.8	18.4	19.3	19.4	24.6	19.2	18.3	22.2	19.1	19.4	20.7					
Rb	303	286	392	402	361	353	126	132	131	160	165	189	243	122	119	134	137	128	193	190	189	217	202	203	277	189	165	189					
Nb	31.7	29.3	35.1	34.4	31.9	33.1	12.8	13.7	13.2	16.1	14.1	11.6	12.4	9.19	8.44	9.19	9.57	9.44	17.5	17	19.5	25.2	20.8	18	26	16.1	17.2	19					
Cs	17.1	13.9	20	19.6	14	14.8	8.27	9.43	8.05	10.3	16.2	19.3	17.1	15.4	10.5	10.3	13.3	12.1	8.04	6.65	9.08	14	8.29	8.59	14.8	11.7	9.15	21.8					
Ta	5	3.4	4.35	4.51	4.46	4.37	1.15	1.24	1.11	1.25	1.21	1.17	1.47	0.92	1.03	1.25	1.11	1.09	2.05	1.76	1.95	2.2	2.38	1.78	2.01	1.91	1.69	2.18					
Pb	37.9	39.7	53.7	55.4	46.7	53.9	25.5	26.9	28.8	49.6	45.5	52.2	75.2	20.4	26.8	30.1	26.9	29.3	25.9	22.5	21.6	20.1	27.1	23	17.7	33.1	28.4	27					
Th	28.5	26	33.5	30.8	30.4	30.5	18.4	10.8	11.6	20.3	20.5	12.2	14	13.7	18	17.6	17	12.7	19.2	21.6	21.4	12.7	22.3	15.6	12.7	10.8	16.8	17.9					
U	16.7	9.41	67.1	36	23.2	13.6	3.01	4.36	4	4.75	4.68	2.53	5.91	1.69	1.77	5.94	4.08	2.53	5.44	3.21	4.92	5.87	4.62	4.75	5.98	5.76	1.93	6.65					
Ba	487	440	122	122	198	118	930	1033	1039	1350	1202	1091	645	448	498	468	483	486	709	721	769	655	752	1087	494	727	604	686					
Sr	213	223	58	58.9	95.9	62.2	524	520	502	640	533	549	277	376	366	350	354	363	361	388	446	462	307	460	403	364	332	374					
V	21.7	20.9	15.8	11.5	12.2	13.2	56.7	62.7	59.3	33.6	36.8	18.1	3.15	65.6	41.9	53.6	59.9	64.4	38.3	49.8	56.7	122	31.1	56.7	124	29.6	34	38.2					
Li	90.2	74.7	71	62.6	37.6	54.4	75.3	75.4	68.5	99.7	93.2	106	219	62.1	62.1	93.1	74.9	85.2	48.1	53.6	44.9	91.5	49.9	40.3	64	58.7	61.3	91.2					
Th/U	1.71	2.76	0.5	0.86	1.31	2.24	6.11	2.48	2.9	4.27	4.38	4.82	2.37	8.11	10.17	2.96	4.17	5.02	3.53	6.73	4.35	2.16	4.83	3.28	2.12	1.88	8.7	2.69					
Y/Nb	0.49	0.45	0.46	0.34	0.35	0.37	1.55	1.5	1.56	1.09	1.21	0.8	0.66	1.63	1.53	1.74	1.63	1.71	0.89	0.89	0.95	0.78	0.83	1	1.05	1.16	1.12	1.21					
Yb/Ta	0.33	0.41	0.4	0.28	0.27	0.31	1.3	1.2	1.26	0.8	0.83	0.44	0.29	1.26	1.01	1.05	1.16	1.27	0.59	0.64	0.67	0.64	0.5	0.72	1	0.81	0.86	0.85					
Rb/Sr	1.42	1.28	6.76	6.83	3.76	5.68	0.24	0.25	0.26	0.25	0.31	0.34	0.88	0.32	0.33	0.38	0.39	0.35	0.53	0.49	0.42	0.47	0.66	0.44	0.69	0.52	0.5	0.51					
Ba/Rb	1.61	1.54	0.31	0.3	0.55	0.33	7.38	7.83	7.93	8.44	7.28	5.77	2.65	3.67	4.18	3.49	3.53	3.8	3.67	3.79	4.07	3.02	3.72	5.35	1.78	3.85	3.66	3.63					
Ba/Sr	2.29	1.97	2.1	2.07	2.06	1.9	1.77	1.99	2.07	2.11	2.26	1.99	2.33	1.19	1.36	1.34	1.36	1.34	1.96	1.86	1.72	1.42	2.45	2.36	1.23	2	1.82	1.83					
Nb/Ta	6.34	8.62	8.07	7.63	7.15	7.57	11.13	11.05	11.89	12.88	11.65	9.91	8.44	9.99	8.19	7.35	8.62	8.66	8.54	9.66	10	11.45	8.74	10.11	12.94	8.43	10.18	8.72					
Nb/U	1.9	3.11	0.52	0.96	1.38	2.43	4.25	3.14	3.3	3.39	3.01	4.58	2.1	5.44	4.77	1.55	2.35	3.73	3.22	5.3	3.96	4.29	4.5	3.79	4.35	2.8	8.91	2.86					
Zr/Nb	5	5.5	4	3.2	3.3	4.1	17.1	14.7	17.7	13.4	12.7	13.1	5.8	15.2	14.6	13.5	14	15.4	9.5	9.8	9.8	8.3	7.5	9.9	8.4	10.6	11	13					
Sm/Nd	0.13	0.11	0.07	0.07	0.08	0.07	0.63	0.49	0.52	0.55	0.62	0.48	0.26	0.49	0.51	0.52	0.52	0.51	0.25	0.29	0.29	0.23	0.24	0.32	0.28	0.28	0.34	0.35					
Sr/Y	13.8	16.8	3.6	5	8.6	5.1	26.5	25.4	24.4	36.6	31.2	59	33.9	25.1	28.4	21.9	22.7	22.5	23.1	25.5	24.1	23.6	17.7	25.6	14.8	19.6	17.2	16.3					
Sr/Yb	129	159	32	46	79	45	349	348	358	640	527	1055	644	324	351	267	274	263	298	343	340	350	255	359	199	234	227	201					

注: Fe* = FeO⁺/(FeO⁺ + MgO) (Fe-number), MAUI = Na₂O + K₂O-CaO (The modified alkali-time index)

表 2 西秦岭西段铜仁地区江里沟岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 2 LA-ICPMS zircon U-Pb data for the Jiangligou intrusion from Tongren County in west segment of the western Qinling

测点号	Th/U		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{238}\text{U}}{^{232}\text{Th}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		同位素年龄 (Ma)							
	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ						
08-06-02	0.08	0.05045	0.00066	0.00393	0.04133	0.00047	0.01274	0.00015	12.58	0.13	216	14	257	3	261	3	256	3
08-06-03	0.83	0.06429	0.00091	0.00249	0.04214	0.00049	0.01181	0.00014	1.2	0.01	751	14	322	4	266	3	237	3
08-06-07	0.93	0.05434	0.0008	0.00264	0.04116	0.00047	0.01089	0.00013	1.07	0.01	385	16	273	4	260	3	219	3
08-06-08	0.34	0.04909	0.00069	0.00217	0.04238	0.00048	0.01135	0.00014	2.91	0.03	152	16	256	3	268	3	228	3
08-06-09	0.19	0.05704	0.00166	0.00296	0.04267	0.0005	0.01325	0.0002	5.17	0.05	493	66	294	7	269	3	266	4
08-06-10	0.37	0.05957	0.00081	0.00287	0.04175	0.00047	0.01018	0.00012	2.72	0.03	588	14	299	4	264	3	205	3
08-06-11	0.50	0.06169	0.00209	0.00391	0.0416	0.00051	0.01281	0.00014	2.02	0.02	664	74	308	8	263	3	257	3
08-06-12	0.11	0.05015	0.00071	0.00215	0.04169	0.00047	0.01529	0.00019	8.96	0.09	202	15	257	3	263	3	307	4
08-06-14	0.08	0.05059	0.00072	0.00215	0.04154	0.00047	0.01386	0.00017	12.33	0.12	222	15	258	3	263	3	278	3
08-06-15	0.49	0.05106	0.00081	0.00272	0.04204	0.00048	0.01033	0.00014	2.06	0.02	244	18	263	4	265	3	208	3
08-06-16	0.63	0.08002	0.00152	0.00271	0.04234	0.0005	0.01957	0.00028	1.6	0.02	1197	19	389	6	267	3	392	6
08-06-17	1.05	0.04605	0.00381	0.002177	0.04177	0.00045	0.02056	0.001	0.95	0.01	182	17	239	17	264	3	411	20
08-06-18	0.26	0.05361	0.00083	0.00273	0.04146	0.00047	0.0114	0.00015	3.91	0.04	355	17	271	4	262	3	229	3
08-06-20	0.43	0.05019	0.00091	0.00216	0.04186	0.00048	0.00979	0.00014	2.31	0.02	204	21	258	4	264	3	197	3
08-06-22	0.43	0.05092	0.00087	0.00195	0.03567	0.00045	0.01206	0.00017	2.3	0.02	237	19	261	4	264	3	242	3
08-06-24	1.05	0.05171	0.00271	0.00249	0.04214	0.00049	0.01301	0.00013	0.95	0.01	272	123	263	12	261	3	261	3
08-06-25	0.89	0.0566	0.00257	1.8367	0.23848	0.06831	0.00213	0.01303	1.12	0.01	476	103	287	11	265	3	262	3

注: 使用 Anderson (2002) 的软件进行普通铅校正。

表 3 西秦岭西段夏河地区阿夷山岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 3 LA-ICPMS zircon U-Pb data for the Aiyishan intrusion from Tongren County in west segment of the western Qinling

测点号	Th/U		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{238}\text{U}}{^{232}\text{Th}}$		同位素年龄 (Ma)										
	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ									
08-12TW-002	99.38	392.77	0.025	0.07197	0.00249	0.38452	0.01344	0.03915	0.0122	0.0003	3.95	0.04	985	47	330	10	248	4	245	6	
08-12TW-003	106.13	499.67	0.21	0.07012	0.00223	0.36898	0.01196	0.03854	0.00056	0.0114	0.00027	4.71	0.05	932	43	319	9	244	3	229	5
08-12TW-004	124.87	480.22	0.26	0.06043	0.00203	0.31357	0.01066	0.03798	0.00056	0.01161	0.00027	3.85	0.04	619	48	277	8	240	3	233	5
08-12TW-005	189.76	614.6	0.31	0.06278	0.00284	0.33106	0.01414	0.03825	0.00057	0.01175	0.00015	3.24	0.03	701	99	290	11	242	4	236	5
08-12TW-006	83.27	508.47	0.16	0.05939	0.00254	0.31099	0.0125	0.03798	0.00056	0.01174	0.00015	6.11	0.06	581	95	275	10	240	3	236	3
08-12TW-007	101.34	947.19	0.11	0.06006	0.00189	0.31858	0.0102	0.03876	0.00056	0.00779	0.00032	9.35	0.09	606	44	281	8	245	3	157	6
08-12TW-008	82.28	496.73	0.17	0.05754	0.00196	0.30778	0.0106	0.03908	0.00058	0.01195	0.00032	6.04	0.06	512	50	272	8	247	4	240	6
08-12TW-010	165.73	648.66	0.26	0.0581	0.00191	0.29734	0.00989	0.03736	0.00055	0.01495	0.00034	3.91	0.04	534	47	264	8	236	3	300	7
08-12TW-011	184.86	835.78	0.22	0.05974	0.00192	0.3141	0.01026	0.03834	0.00057	0.01198	0.00031	4.52	0.05	594	45	277	8	243	4	241	6
08-12TW-012	104.51	474.99	0.22	0.05884	0.00261	0.31103	0.01293	0.03834	0.00059	0.01187	0.00015	4.54	0.05	561	99	275	10	243	4	238	3
08-12TW-014	121.46	460.44	0.26	0.05698	0.00213	0.29143	0.01095	0.03726	0.00058	0.01186	0.00033	3.79	0.04	491	55	260	9	236	4	238	7
08-12TW-015	159.21	575.14	0.28	0.05651	0.00283	0.30609	0.01458	0.03928	0.0006	0.01222	0.00016	3.61	0.04	472	114	271	11	248	4	245	3
08-12TW-017	122.13	520.14	0.23	0.05544	0.00212	0.29628	0.01138	0.03888	0.00061	0.01198	0.00036	4.26	0.04	430	58	263	9	246	4	241	7
08-12TW-019	92.89	340.74	0.27	0.05424	0.00298	0.28324	0.01484	0.03787	0.00062	0.01184	0.00016	3.67	0.04	381	127	253	12	240	4	238	3
08-12TW-021	73.9	330.83	0.22	0.0541	0.00296	0.26704	0.01391	0.0358	0.0006	0.01119	0.00016	4.48	0.04	375	127	240	11	227	4	225	3
08-12TW-022	97.97	496.64	0.2	0.05347	0.00258	0.27877	0.0127	0.03782	0.0006	0.01184	0.00016	5.07	0.05	349	112	250	10	239	4	238	3
08-12TW-023	94.73	372.25	0.25	0.05213	0.00221	0.27743	0.01175	0.03862	0.00064	0.01379	0.00049	3.93	0.04	291	66	249	9	244	4	277	10
08-12TW-025	220.96	648.4	0.34	0.05193	0.0029	0.26719	0.01427	0.03731	0.00061	0.01172	0.00016	2.93	0.03	282	131	240	11	236	4	236	3
08-12TW-026	71.14	538.81	0.13	0.0618	0.00246	0.32756	0.01308	0.03844	0.00064	0.02417	0.00088	7.57	0.08	667	57	288	10	243	4	483	17

注: 使用 Anderson (2002) 的软件进行普通铅校正。

表 4 西秦岭西段夏河地区德与鲁岩体 LA-ICPMS U-Pb 同位素分析结果

Table 4 LA-ICPMS zircon U-Pb data for the Dewlu intrusion from Xiahe County in west segment of the western Qinling

测点号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)		同位素比值										同位素年龄 (Ma)								
	U	Th	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	1 σ	$\frac{^{238}\text{U}}{^{232}\text{Th}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	1 σ
08-22-02	299.84	94.51	0.32	0.05123	0.00079	0.26382	0.00414	0.03734	0.00042	0.01143	0.00013	1.65	0.02	251	17	238	3	236	3	230	3
08-22-03	424.55	253.58	0.60	0.09314	0.00153	0.48898	0.00808	0.03807	0.00044	0.02396	0.00031	2.92	0.03	1491	15	404	6	241	3	479	6
08-22-04	234.78	147.24	0.63	0.05107	0.00095	0.26012	0.00484	0.03694	0.00042	0.01104	0.00015	2.31	0.02	244	23	235	4	234	3	222	3
08-22-05	398.68	147.17	0.37	0.05496	0.00203	0.27241	0.0095	0.03595	0.00043	0.01122	0.00012	2.25	0.02	411	84	245	8	228	3	225	2
08-22-06	174.01	93.4	0.54	0.05228	0.00103	0.26945	0.00532	0.03737	0.00043	0.01149	0.00016	1.93	0.02	298	25	242	4	237	3	231	3
08-22-07	900.51	159.32	0.18	0.0493	0.00101	0.25016	0.00514	0.03679	0.00043	0.01134	0.00017	2.73	0.03	162	27	227	4	233	3	228	3
08-22-08	302.55	156.66	0.52	0.04878	0.00096	0.24733	0.00488	0.03676	0.00042	0.0112	0.00015	1.67	0.02	137	26	224	4	233	3	225	3
08-22-09	338.02	129.12	0.38	0.05615	0.00214	0.28069	0.01017	0.03626	0.00043	0.01128	0.00012	1.94	0.02	458	87	251	8	230	3	227	2
08-22-10	910.43	429.22	0.47	0.05302	0.001	0.26894	0.00507	0.03678	0.00042	0.01152	0.00016	2.52	0.03	330	23	242	4	233	3	232	3
08-22-11	125.5	76.74	0.61	0.05075	0.00099	0.25372	0.00497	0.03625	0.00042	0.01081	0.00015	1.84	0.02	229	25	230	4	230	3	217	3
08-22-12	561.69	204.66	0.36	0.05101	0.00107	0.26266	0.00548	0.03734	0.00043	0.01165	0.00017	2.24	0.02	241	27	237	4	236	3	234	3
08-22-13	806.33	263.81	0.33	0.05394	0.00089	0.27875	0.00467	0.03747	0.00042	0.01183	0.00015	1.96	0.02	369	19	250	4	237	3	238	3
08-22-14	190.77	187.88	0.98	0.04971	0.00088	0.25676	0.00456	0.03745	0.00043	0.01147	0.00016	2.5	0.03	181	21	232	4	237	3	231	3
08-22-15	170.98	121.08	0.71	0.05009	0.00094	0.25711	0.00482	0.03722	0.00043	0.01113	0.00016	2.31	0.02	199	23	232	4	236	3	224	3
08-22-16	639.02	239.62	0.37	0.05026	0.00128	0.25759	0.0065	0.03716	0.00045	0.0113	0.00019	1.93	0.02	207	36	233	5	235	3	227	4
08-22-17	218.78	166.1	0.76	0.05099	0.00094	0.25722	0.00476	0.03658	0.00042	0.0113	0.00017	3.65	0.04	240	23	232	4	232	3	227	3
08-22-18	830.52	190.78	0.23	0.05771	0.00297	0.28042	0.01393	0.03524	0.00048	0.01093	0.00012	1.65	0.02	519	116	251	11	223	3	220	2
08-22-19	260.21	240.43	0.92	0.05025	0.00114	0.25499	0.00573	0.0368	0.00044	0.01115	0.00017	1.66	0.02	207	30	231	5	233	3	224	3
08-22-20	172.87	107.32	0.62	0.05079	0.00095	0.26082	0.00487	0.03724	0.00043	0.01113	0.00015	1.69	0.02	231	23	235	4	236	3	224	3
08-22-21	658.17	342.25	0.52	0.05227	0.00097	0.26639	0.00494	0.03695	0.00042	0.0113	0.00016	1.92	0.02	297	23	240	4	234	3	227	3
08-22-22	379.77	235.46	0.62	0.0507	0.00098	0.25753	0.00495	0.03683	0.00043	0.01126	0.00016	1.61	0.02	227	24	233	4	233	3	226	3
08-22-23	142.036	79.54	0.56	0.05083	0.0011	0.25594	0.00549	0.03651	0.00043	0.01105	0.00017	1.8	0.02	233	28	231	4	231	3	222	3
08-22-24	298.72	179.23	0.60	0.05083	0.0011	0.25717	0.00553	0.03669	0.00043	0.01116	0.00017	1.66	0.02	233	29	232	4	232	3	224	3
08-22-25	153.77	95.34	0.62	0.05056	0.00095	0.25788	0.00486	0.03698	0.00043	0.0109	0.00016	1.62	0.02	221	23	233	4	234	3	219	3

注:使用 Anderson (2002) 的软件进行普通铅校正

表 5 西秦岭西段武山地区温泉岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 5 LA-ICPMS zircon U-Pb data for Wenquan intrusion from Wushan County in west segment of the western Qinling

测点号	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$			同位素比值			$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$			同位素年龄 (Ma)							
		1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ						
08-44-03	0.87	0.05117	0.00092	0.00435	0.03367	0.00039	0.01064	0.00013	1.15	0.01	248	22	216	4	213	2	214	3
08-44-04	0.64	0.05058	0.00077	0.00378	0.03457	0.00039	0.01037	0.00013	1.56	0.02	222	17	219	3	219	2	209	3
08-44-05	0.61	0.05246	0.00082	0.00392	0.03405	0.00039	0.01054	0.00013	1.63	0.02	306	17	224	3	216	2	212	3
08-44-09	0.81	0.05508	0.00272	0.01207	0.03333	0.00044	0.01039	0.00011	1.24	0.01	415	113	229	10	214	3	209	2
08-44-10	1.28	0.05103	0.00094	0.00444	0.03386	0.00039	0.01234	0.00015	0.78	0.01	242	23	217	4	215	2	248	3
08-44-11	0.57	0.05108	0.00083	0.00396	0.03391	0.00039	0.01045	0.00013	1.74	0.02	244	19	218	3	215	2	210	3
08-44-12	0.76	0.05092	0.00115	0.00416	0.03434	0.00041	0.0103	0.00015	1.32	0.01	237	30	219	4	218	3	207	3
08-44-13	0.46	0.05148	0.00088	0.00421	0.03424	0.0004	0.01073	0.00015	2.18	0.02	262	20	221	3	217	2	216	3
08-44-15	0.7	0.05021	0.001	0.00472	0.03398	0.0004	0.01091	0.00015	1.43	0.01	205	26	215	4	217	2	219	3
08-44-17	0.52	0.05441	0.00182	0.00795	0.03409	0.00041	0.01065	0.00011	1.94	0.02	388	77	231	6	217	2	214	2
08-44-19	0.87	0.05138	0.00263	0.0119	0.03386	0.00044	0.01065	0.0001	1.15	0.01	258	120	218	10	217	3	214	2
08-44-20	0.52	0.05313	0.00088	0.00417	0.03387	0.00039	0.01035	0.00014	1.92	0.02	334	19	225	3	215	2	208	3
08-44-21	0.67	0.05095	0.00101	0.00482	0.03436	0.00041	0.01013	0.00015	1.5	0.01	239	25	220	4	218	3	204	3
08-44-23	1.03	0.05226	0.00099	0.0047	0.03441	0.0004	0.0098	0.00014	0.97	0.01	297	23	225	4	218	2	197	3
08-44-25	0.7	0.05267	0.00107	0.00501	0.03391	0.0004	0.01018	0.00015	1.42	0.01	315	26	224	4	215	2	205	3

注: 使用 Anderson (2002) 的软件进行普通铅校正

表 6 西秦岭西段武山地区中川岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 6 LA-ICPMS zircon U-Pb data for Zhongchuan intrusion from Wushan County in west segment of the western Qinling

测点号	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$			同位素比值			$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$			同位素年龄 (Ma)							
		1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ						
08-49-01	0.2	0.05085	0.00069	0.00411	0.04198	0.00047	0.01108	0.00014	5.11	0.05	234	15	262	3	265	3	223	3
08-49-03	0.63	0.05306	0.00072	0.00429	0.04174	0.00047	0.0101	0.00012	1.58	0.02	331	15	271	3	264	3	203	2
08-49-04	0.22	0.05456	0.00073	0.00432	0.04175	0.00047	0.01189	0.00014	4.64	0.05	394	14	277	3	264	3	239	3
08-49-06	0.19	0.05053	0.0007	0.00418	0.04177	0.00047	0.01051	0.00013	5.22	0.05	219	15	259	3	264	3	211	3
08-49-08	0.18	0.05397	0.00075	0.00447	0.04171	0.00047	0.01231	0.00016	5.66	0.06	370	15	274	3	263	3	247	3
08-49-09	0.18	0.05102	0.00071	0.00427	0.04192	0.00047	0.01068	0.00014	5.41	0.05	242	15	262	3	265	3	215	3
08-49-10	0.44	0.06368	0.00171	0.00878	0.04123	0.00048	0.01265	0.00013	2.28	0.02	731	58	314	7	260	3	254	3
08-49-11	0.42	0.05508	0.00095	0.00548	0.04138	0.00048	0.01105	0.00015	2.39	0.02	415	20	277	4	261	3	222	3
08-49-12	0.27	0.05485	0.00081	0.00484	0.04217	0.00048	0.01127	0.00015	3.69	0.04	406	16	281	4	266	3	227	3
08-49-13	0.71	0.05569	0.00083	0.00492	0.0416	0.00048	0.01282	0.00017	1.41	0.01	440	16	281	4	263	3	257	3
08-49-14	0.22	0.05279	0.00082	0.00491	0.04226	0.00049	0.01193	0.00017	4.63	0.05	320	17	272	4	267	3	240	3
08-49-15	0.3	0.05682	0.00086	0.00511	0.04195	0.00048	0.01538	0.0002	3.35	0.03	485	16	289	4	265	3	308	4
08-49-17	0.27	0.05737	0.00169	0.00883	0.04149	0.00049	0.01288	0.00015	3.75	0.04	506	66	288	7	262	3	259	3
08-49-18	0.22	0.05895	0.0015	0.00769	0.04173	0.00049	0.01292	0.00014	4.51	0.05	565	57	297	6	264	3	259	3
08-49-19	0.45	0.05878	0.00095	0.00568	0.04209	0.00049	0.01532	0.00021	2.23	0.02	559	18	298	4	266	3	307	4
08-49-20	0.23	0.05185	0.00087	0.00518	0.0421	0.0005	0.01111	0.00016	4.27	0.04	279	19	267	4	266	3	223	3
08-49-22	0.3	0.05298	0.00095	0.00564	0.04211	0.0005	0.01084	0.00017	3.31	0.03	328	21	272	4	266	3	218	3
08-49-23	0.15	0.0563	0.00163	0.00845	0.04117	0.00049	0.01281	0.00017	6.52	0.07	464	66	282	7	260	3	257	3
08-49-24	0.35	0.05782	0.00107	0.00641	0.04227	0.00051	0.01218	0.0002	2.89	0.03	523	22	295	5	267	3	245	4
08-49-25	0.19	0.05555	0.00146	0.0076	0.04222	0.00051	0.01316	0.00015	5.25	0.05	433	60	284	6	267	3	264	3
08-49-26	0.22	0.05263	0.00101	0.00596	0.04181	0.00051	0.01073	0.00018	4.49	0.04	313	24	269	5	264	3	216	4

注: 使用 Anderson (2002) 的软件进行普通铅校正

表7 阿夷山岩体锆石 Lu-Hf 同位素测试数据

Table 7 Hf isotopic data of zircon grains from the Ayishan intrusion in west segment of the western Qinling

测点号	t (Ma)	表面 年龄	$\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$	2σ	$\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$	2SE	$\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM} (Ma)	$t_{2\text{DM}}$ (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
08-12TW-004	240	0.010547	0.000053	0.000410	0.000002	0.282187	0.000034	-20.70	-15.47	1.20	1480	1857	-0.99	
08-12TW-005	242	0.016165	0.000142	0.000619	0.000004	0.282141	0.000033	-22.33	-17.13	1.18	1552	1941	-0.98	
08-12TW-006	240	0.011113	0.000054	0.000452	0.000002	0.282074	0.000025	-24.70	-19.48	0.89	1637	2059	-0.99	
08-12TW-007	245	0.017175	0.000051	0.000699	0.000002	0.282159	0.000026	-21.69	-16.51	0.92	1530	1909	-0.98	
08-12TW-008	247	0.009860	0.000037	0.000407	0.000002	0.282309	0.000023	-16.39	-11.15	0.83	1312	1638	-0.99	
08-12TW-010	236	0.008998	0.000038	0.000350	0.000002	0.282316	0.000023	-16.14	-10.90	0.80	1301	1625	-0.99	
08-12TW-011	243	0.005740	0.000190	0.000243	0.000008	0.282003	0.000026	-27.21	-21.95	0.91	1725	2184	-0.99	
08-12TW-011	243	0.016900	0.000009	0.000686	0.000000	0.282200	0.000034	-20.24	-15.05	1.21	1473	1836	-0.98	
08-12TW-012	243	0.010961	0.000052	0.000439	0.000002	0.282225	0.000029	-19.36	-14.13	1.04	1429	1789	-0.99	
08-12TW-014	236	0.011980	0.000127	0.000475	0.000005	0.282146	0.000026	-22.15	-16.93	0.91	1539	1931	-0.99	
08-12TW-015	241.6	0.013288	0.000029	0.000525	0.000001	0.282189	0.000027	-20.63	-15.42	0.95	1482	1854	-0.98	
08-12TW-016	254	0.010731	0.000052	0.000415	0.000002	0.282262	0.000024	-18.05	-12.82	0.86	1377	1722	-0.99	
08-12TW-017	246	0.002541	0.000010	0.000087	0.000000	0.282438	0.000024	-11.82	-6.54	0.84	1125	1403	-1.00	
08-12TW-019	240	0.010132	0.000102	0.000405	0.000004	0.282291	0.000025	-17.02	-11.79	0.87	1337	1670	-0.99	
08-12TW-021	227	0.006661	0.000013	0.000263	0.000001	0.282173	0.000027	-21.19	-15.94	0.97	1494	1881	-0.99	
08-12TW-022	239	0.007930	0.000058	0.000322	0.000002	0.282453	0.000029	-11.29	-6.05	1.02	1111	1378	-0.99	
08-12TW-023	244	0.009098	0.000012	0.000361	0.000001	0.282265	0.000027	-17.94	-12.70	0.94	1371	1717	-0.99	
08-12TW-024	252	0.010732	0.000030	0.000423	0.000001	0.282189	0.000022	-20.63	-15.40	0.79	1478	1853	-0.99	
08-12TW-025	236	0.018119	0.000135	0.000704	0.000007	0.282101	0.000025	-23.74	-18.56	0.87	1610	2013	-0.98	
08-12TW-026	243	0.010817	0.000017	0.000431	0.000001	0.282211	0.000022	-19.85	-14.63	0.79	1448	1814	-0.99	

注:表中锆石 Hf 同位素成分的计算所用的参数: ^{176}Lu 衰变常数 $\lambda = 1.865 \times 10^{-11}$, 球粒陨石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282772$ (Blichert Toft and Albarade, 1997), 亏损地幔 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28325$ (Griffin *et al.*, 2000); 硅铝质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 为 0.72 (Vervoort *et al.*, 1996)

K_2O 、 Na_2O 含量分别为 3.04% ~ 4.04% 和 3.69% ~ 4.48%, FeO 含量变化于 0.82% ~ 1.52%, MgO 变化于 0.35% ~ 0.70%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.91 ~ 1.48, Fe^* 介于 0.72 ~ 0.77 (表 1)。里特曼指数介于 1.42 ~ 2.08, 反映其主体为钙碱性系列。在 TAS 图中, 投入花岗岩区 (图 2a); 在 $\text{MALI}-\text{SiO}_2$ 图解 (图 2b) 中为钙碱系列; 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解 (图 2c) 中为高钾钙碱系列。A/CNK = 1.05 ~ 1.1 (图 2d), 为弱过铝质花岗岩, 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解中 (图 2e) 属钾质花岗岩, 在 Fe^*-SiO_2 图解 (图 2f) 中为镁质花岗岩。花岗岩的地球化学特征显示其具有喜马拉雅型花岗岩的地球化学特点, 即低 Sr、高 Yb 特点 (图 2g)。

稀土总量变化较大 ($62 \times 10^{-6} \sim 170 \times 10^{-6}$), LREE/HREE = 6.3 ~ 16.2, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值变化于 4.9 ~ 17.4 之间, 反映了岩石具有较强烈的轻重稀土分馏和轻稀土富集特征 (图 3a)。各样品均具有明显负铈异常 ($\delta\text{Eu} = 0.38 \sim 0.66$), 反映出可能存在弱的斜长石的分离结晶作用或部分熔融过程中有斜长石的残留。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图 (图 3b) 中, 表现出富集大离子亲石元素 Ba、La、Ce、Sr 等, 并具有明显的 Sr、P 和 Ti 负异常, Nb、Ta 负异常不明显。在洋脊花岗岩标准化的微量元素蛛网图中 (图 3c), 表现为 K、Rb、Th 等大离子亲石元素富集, Ba 呈明显的负异常。

5.1.2 阿夷山岩体

花岗闪长岩和二长花岗岩 SiO_2 含量为 62.28% ~

65.68%, TiO_2 含量为 0.48% ~ 0.79%, Al_2O_3 含量变化于 15.80% ~ 16.76%, K_2O 、 Na_2O 含量分别为 2.76% ~ 3.74% 和 2.64% ~ 3.32%, FeO 含量变化于 2.33% ~ 4.52%, MgO 变化于 0.96% ~ 2.52%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 1.03 ~ 1.18, Fe 值介于 0.68 ~ 0.75 (表 1)。里特曼指数介于 1.43 ~ 1.85, 为钙碱性系列。在 TAS 图中, 主体位于花岗闪长岩和花岗岩区 (图 2a); 在 $\text{MALI}-\text{SiO}_2$ 图解中落入钙碱系列区 (图 2b); 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解 (图 2c) 中为高钾钙碱系列。A/CNK = 1.00 ~ 1.12, 为弱过铝质花岗岩 (图 2d), 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解 (图 2e) 中属钾质花岗岩, 在 Fe^*-SiO_2 图解 (图 2f) 中为镁质花岗岩。除一个样品具有喜马拉雅型花岗岩地球化学特点外, 其余均具有埃达克型花岗岩的地球化学特点 (图 2g)。

稀土总量高 ($159 \times 10^{-6} \sim 171 \times 10^{-6}$), LREE/HREE = 10.3 ~ 23.1, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值变化于 15.9 ~ 57.8 之间, 反映了岩石具有较强烈的轻重稀土分馏, 轻稀土富集。各样品均具有微弱负铈异常或无负铈异常 ($\delta\text{Eu} = 0.75 \sim 1.00$) (图 3d)。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图中, 表现出富集大离子亲石元素 Ba、La、Ce 和 Sr 等, 具有明显的 Nb、Ta、P 和 Ti 负异常 (图 3e)。同样在微量元素洋中脊花岗岩标准化图解中, 具有较明显的 Nb-Ta 和 Zr-Hf 低谷 (图 3f), 与活动大陆边缘花岗岩的分配型式近似 (Pearce *et al.*, 1984)。

5.1.3 德乌鲁岩体

该岩体中的花岗闪长岩 SiO_2 含量为 63.55% ~

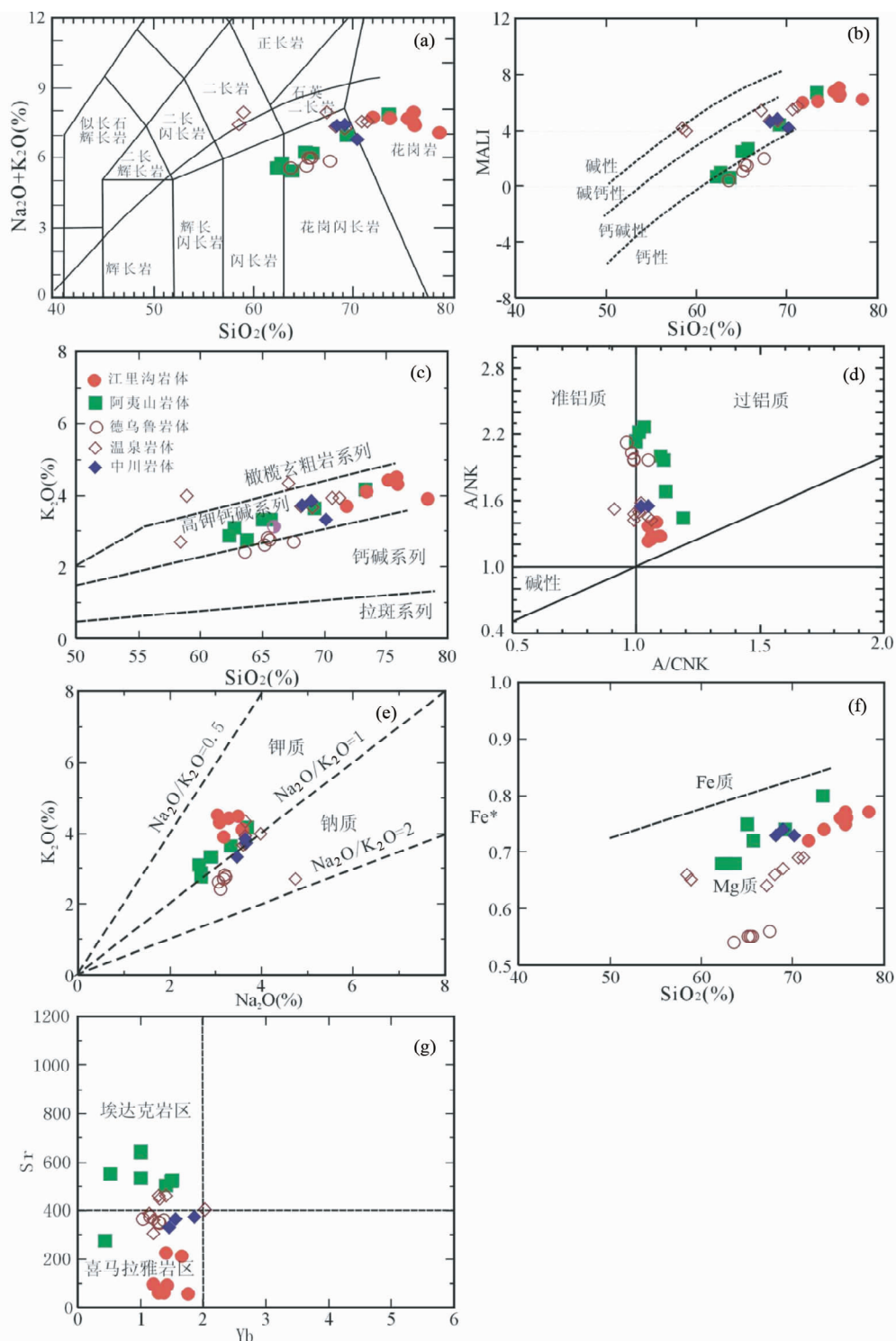


图2 西秦岭西段花岗岩地球化学图解

(a)- $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ vs. SiO_2 图解; (b)-MALI vs. SiO_2 图解; (c)- K_2O vs. SiO_2 图解; (d)- A/NK - A/CNK 图解; (e)- K_2O vs. Na_2O 图解; (f)- Fe^* vs. SiO_2 图解; (g)- Sr vs. Yb 图解

Fig.2 Geochemical diagrams of granites in the west segment of Western Qinling Orogenic Belt

67.51%, TiO_2 含量为 0.41% ~ 0.54%, Al_2O_3 含量变化于 15.88% ~ 16.40%, K_2O 、 Na_2O 含量分别为 2.42% ~ 2.80% 和 3.05% ~ 3.20%, FeO 含量变化于 2.40% ~ 3.20%, MgO

变化于 2.22% ~ 3.30%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.78 ~ 0.88, Fe 值稳定, 介于 0.54 ~ 0.56 (表 1)。里特曼指数介于 1.41 ~ 1.61, 为钙碱性系列。在 TAS 图中, 位于花岗闪长岩区 (图

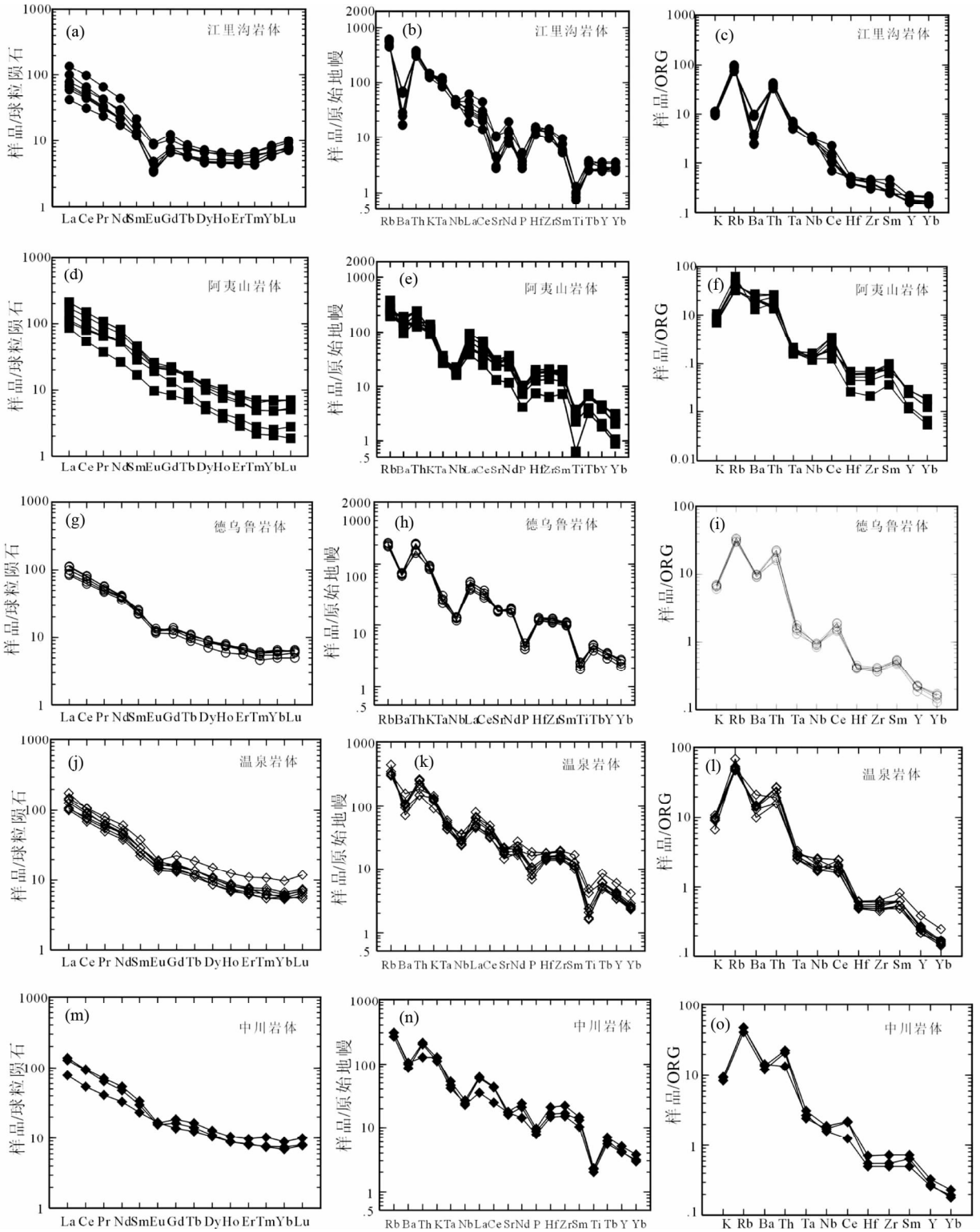


图3 西秦岭西段花岗岩稀土元素球粒陨石标准化分配型式(标准化值据 Bonyton *et al.*, 1984)及微量元素原始地幔标准化(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)、洋脊花岗岩标准化(标准化值据 Perace *et al.*, 1984)分配型式
 Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns (normalization values after Bonyton *et al.*, 1984) and primitive mantle-normalized (normalization values after Sun and McDonough, 1989), ocean mid-ridge granite-normalized (normalization values after Perace *et al.*, 1984) trace element patterns

2a);在MALI-SiO₂图解(图2b)中样品投于钙碱系列区;在K₂O-SiO₂图解(图2c)中样品落入钙碱和高钾钙碱系列过渡区。 $A/CNK = 0.96 \sim 1.05$,属准铝和弱过铝质花岗岩(图2d),在K₂O-Na₂O图解(图2e)中属钠质花岗岩,在Fe^{*}-SiO₂图解(图2f)中为镁质花岗岩。具有喜马拉雅型花岗岩的地球化学特点(图2g)。

稀土总量高($119 \times 10^{-6} \sim 148 \times 10^{-6}$), $LREE/HREE = 11 \sim 16$, $(La/Yb)_N$ 比值变化于13.5~22.8之间,反映了岩石具有较强烈的轻重稀土分馏(图3g)。具有微弱负铈异常($\delta Eu = 0.65 \sim 0.79$)。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图中,表现出富集大离子亲石元素Ba、La、Ce和Sr等、具有较明显的Nb、Ta、P和Ti负异常(图3h)。同样在微量元素洋中脊花岗岩标准化图解中,具有较明显的Nb-Ta和Zr-Hf低谷。

5.1.4 温泉岩体

岩石岩性主要为二长花岗岩和花岗闪长岩。SiO₂含量为58.87%~70.63%,TiO₂含量为0.35%~1.04%,Al₂O₃含量变化于14.59%~16.51%,K₂O、Na₂O含量分别为2.71%~3.99%和3.59%~3.97%,FeO含量变化于1.28%~3.66%,MgO变化于0.93%~1.72%,K₂O/Na₂O比值为0.57~1.19,Fe值介于0.64~0.69(表1)。里特曼指数介于2.02~3.99,反映其主体为钙碱性系列。在TAS图中,样品落入二长岩、花岗闪长岩和花岗岩区(图2a);在MALI-SiO₂图解(图2b)中主体为钙碱系列,有两个样品为碱钙系列;在K₂O-SiO₂图解(图2c)中主要为高钾钙碱系列,有二个样品投入橄辉玄粗岩系列区(碱性系列区)。 $A/CNK = 0.91 \sim 1.05$,为准铝质和弱过铝质花岗岩(图2d),在K₂O-Na₂O图解(图2e)中落入属钾质和钠质花岗岩过程区,在Fe^{*}-SiO₂图解(图2f)中亦为镁质花岗岩。具有埃达克型或喜马拉雅型花岗岩的地球化学特点(图2g)。

稀土含量为 $131 \times 10^{-6} \sim 199 \times 10^{-6}$, $LREE/HREE = 10.7 \sim 15.3$, $(La/Yb)_N$ 比值变化于15.7~28.8之间(表1)。各样品均具有弱负铈异常($\delta Eu = 0.79 \sim 0.85$)(图3j)。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图中,表现出富集大离子亲石元素Ba、La、Ce、Sr等,并具有明显的Nb、Ta、P和Ti负异常(图3k)。同样在微量元素洋中脊花岗岩标准化图解中,具有较明显的Nb-Ta和Zr-Hf低谷,同样类似于活动大陆边缘花岗岩的分配型式(图3l)。

5.1.5 中川岩体

主体岩性为二长花岗岩、花岗闪长岩,以二长花岗岩为主。SiO₂含量为68.16%~70.13%,TiO₂含量为0.44%~0.50%,Al₂O₃含量变化于14.40%~15.60%,K₂O、Na₂O含量分别为3.34%~3.83%和3.46%~3.66%,FeO含量变化于2.24%~2.48%,MgO变化于0.95%~1.20%,K₂O/Na₂O比值为0.97~1.06,Fe值介于0.73~0.74(表1)。里特曼指数介于1.70~2.17,属钙碱性系列。在TAS图中落入花岗闪长岩区(图2a);在MALI-SiO₂图解(图2b)中同样为钙碱系

列;在K₂O-SiO₂图解(图2c)中为高钾钙碱系列; $A/CNK = 1.02 \sim 1.05$,为过铝质花岗岩(图2d),在K₂O-Na₂O图解(图2e)中落入钾质和钠质花岗岩过渡区,在Fe^{*}-SiO₂图解(图2f)中为镁质花岗岩。具有喜马拉雅型花岗岩的地球化学特点(图2g)。

稀土总量为 $110 \times 10^{-6} \sim 184 \times 10^{-6}$, $LREE/HREE = 8.2 \sim 12.4$, $(La/Yb)_N$ 比值变化于10.6~15.5之间,轻稀土富集(表1)。各样品均具有微弱负铈异常($\delta Eu = 0.66 \sim 0.94$)(图3m)。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图中,表现出富集大离子亲石元素(LILE,如Ba、La、Ce、Sr等)、具有明显的Nb、Ta、P和Ti负异常(图3n)。同样在微量元素洋中脊花岗岩标准化图解中,具有较明显的Nb-Ta和Zr-Hf低谷,类似于活动大陆边缘花岗岩的特点(图3o)。

5.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

5.2.1 江里沟二长花岗岩(08-06)

该件样品产自江里沟岩体。样品中锆石绝大多数为半透明-透明的短柱状-柱状,长/宽比一般为2~2.5,阴极发光图像显示清晰的振荡环带(图4a)。锆石含有明显的核,阴极发光呈暗色或白色,但应该不是老的继承性锆石核,可能是岩浆早期结晶的锆石,由于岩浆的温度升高遭熔蚀,后又继续结晶,因为无论是核部还是幔部及边部,²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄变化不大。17颗锆石17个测点Th/U比值为0.08~1.05,除两个测点Th/U比值小于0.1外,其余均远大于0.1。锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄介于269~260Ma,加权平均年龄为 264 ± 1.4 Ma(MSWD=0.69)(图5a、b),该年龄为二长花岗岩形成年龄。

5.2.2 阿夷山花岗闪长岩(08-12)

该样品产自阿夷山岩体。样品中锆石绝大多数为半透明-透明的不规则短柱状,个别为细长柱状晶体,长/宽比大多为2~3。锆石可见较为清晰的核幔结构,核部CL强度较高,图像呈灰白色,幔部有较清晰的震荡环带(图4b),显示典型的岩浆锆石特征。19颗锆石19个测点的Th/U比值为0.11~0.53,²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄介于248~227Ma,加权平均年龄为 241.6 ± 4 Ma(图5c、d),代表该岩体形成年龄。

5.2.3 德乌鲁花岗闪长岩(08-22)

该样品产自德乌鲁岩体。锆石绝大多数为半透明-透明的短柱状,长/宽比多为2。锆石阴极发光图像显示清晰的振荡环带或具均一的阴极发光强度,显示典型岩浆锆石特征(图4c)。24颗锆石24个测点的Th/U比值为0.18~0.98,²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄为241~223Ma之间,在谐和线上位于较小的集中区域,其加权平均年龄为 233.5 ± 1.5 Ma(MSWD=1.4)(图5e、f),该年龄为岩体形成年龄。

5.2.4 温泉岩体花岗闪长岩(08-44)

该样品产自温泉岩体。锆石绝大多数为柱状晶体,长/宽一般为2~4。阴极发光图像显示清晰的振荡环带(图4d)。锆石发育较明显的核幔结构,核和幔均发育清晰的振

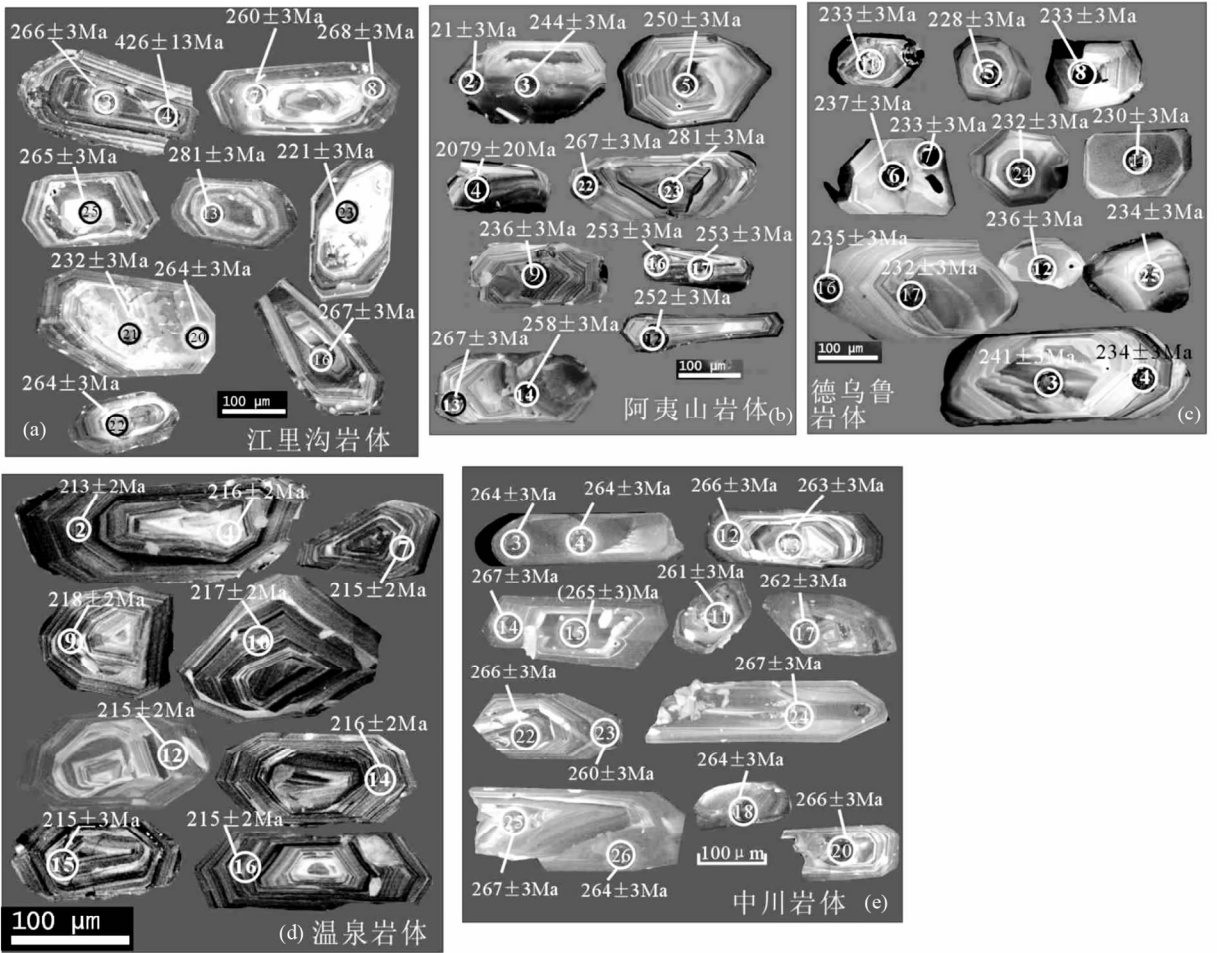


图4 西秦岭西段花岗岩锆石阴极发光图像

Fig. 4 Cathodoluminescence images of zircons of the granites in the west segment of Western Qinling Orogenic Belt

荡环带,从 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄基本一致的角度来看,锆石的核不是老的继承性锆石核,而是岩浆早期结晶的锆石,由于岩浆的温度升高遭熔蚀,后又继续结晶。15颗锆石15个测点的Th/U比值为0.46~1.28; $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为219~213Ma,其加权平均年龄为 $216.2 \pm 1.1\text{Ma}$ (MSWD = 0.64) (图5g, h),代表了花岗闪长岩形成年龄。

5.2.5 中川岩体二长花岗岩(08-49)

该样品采自中川岩体外带。锆石绝大多数为半透明-透明的柱状晶体,长/宽比大多为2~3,发育核幔结构,但具有相同的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄,阴极发光图像显示清晰的振荡环带或具均一的阴极发光强度,显示典型的岩浆锆石特征(图4e),为同一岩浆早晚期结晶的产物。Th/U比值为0.15~0.63,均远大于0.1。21颗锆石测年结果表明,锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为267~260Ma,在谐和线上分布于一个集中区域,加权平均年龄为 $264.4 \pm 1.3\text{Ma}$ (MSWD = 0.43) (图5i, j),该年龄应为二长花岗岩的形成年龄。

5.3 锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

对阿夷山岩体花岗闪长岩样品(08-12)进行了锆石原位

Lu-Hf 同位素分析,20颗锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为0.000087~0.000704, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为0.282003~0.282488,以岩体形成年龄 $t = 241.6\text{Ma}$ 进行回算的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值全部为负值,变化于-21.95~-6.05。一阶段模式年龄(t_{DM})变化于1725~1111Ma,二阶段模式年龄($t_{2\text{DM}}$)变化于2184~1378Ma,均远大于岩石的形成年龄(表7)。

6 问题讨论

6.1 花岗岩的源岩及岩石成因

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明,前述各岩体形成年龄变化于264~216Ma。张宏飞等(2005)获得武山温泉岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 $223 \pm 7\text{Ma}$;金维俊等(2005)测点冶力关和夏河岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 $238 \pm 4\text{Ma}$ 和 $245 \pm 4\text{Ma}$;Guo *et al.* (2012)测得岗察岩体中辉长闪长岩和矿化闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 $243.8 \pm 1.0\text{Ma}$ 和 $234 \pm 0.6\text{Ma}$ 。这些同位素年龄共同表明,西秦岭北缘花岗岩的主体形成时代为三叠纪,最早可能在中二叠世

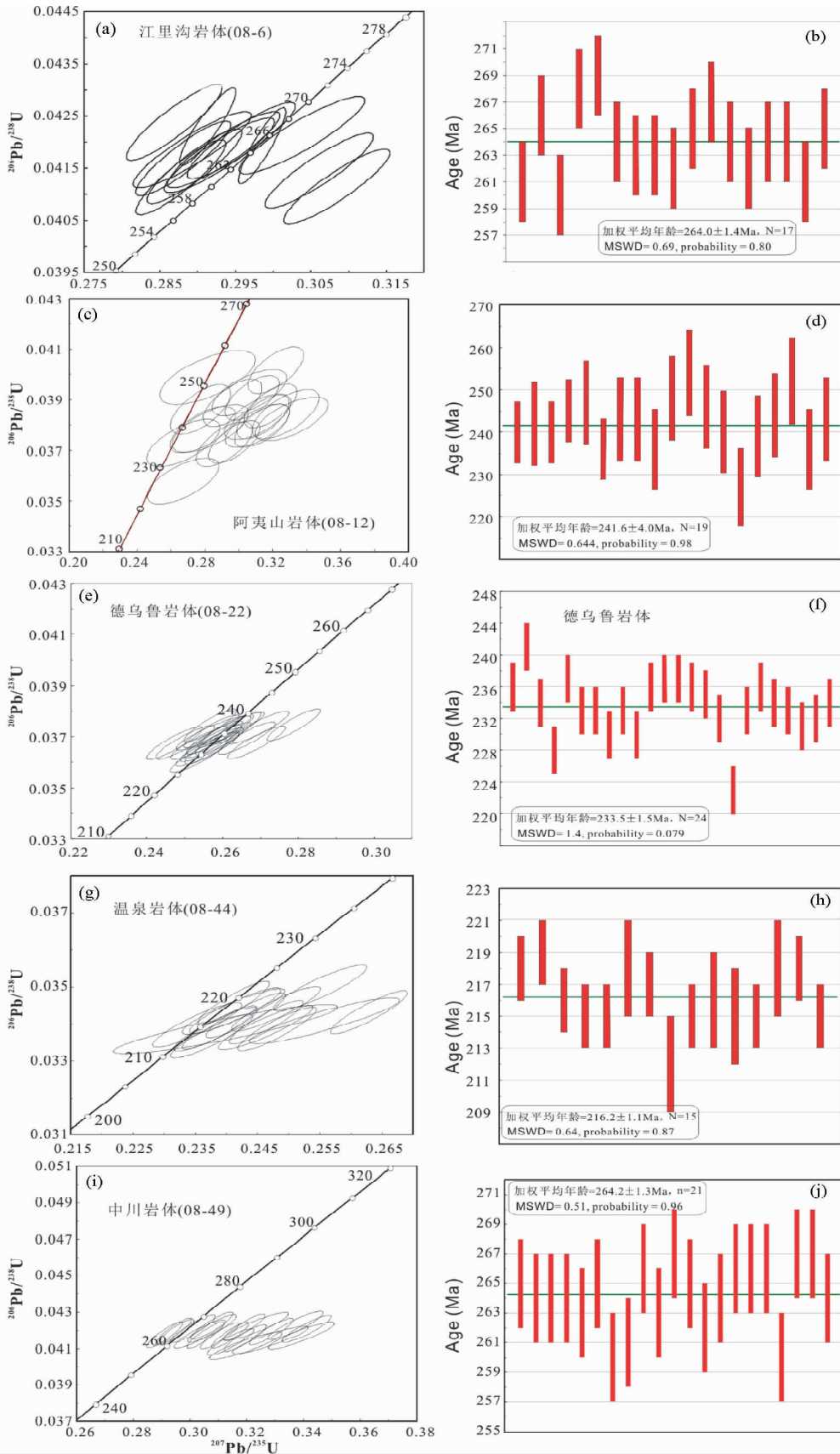


图5 西秦岭西段花岗岩锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和曲线年龄计算

Fig.5 Zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia diagram and averaged age of granitic rocks from the west segment of Western Qinling Orogenic Belt

晚期。

岩石地球化学研究表明,在非常宽的温度、压力条件下,地壳多种源岩的部分熔融均可以产生过铝质花岗质熔体(Rapp *et al.*, 1991; Rapp and Watson, 1995; Wolf and Wyllie, 1994; Beard *et al.*, 1994; Patino Douce and Beard, 1996; Pation Douce and McCarthy, 1998; Winther and Newton, 1996; Skjerlie and Johnston, 1996),熔体成分的变化取决于初始熔融物质的成分、熔融的温度和压力、初始物质的含水量(Jogvan *et al.*, 2002),如泥质沉积岩部分熔融可以产生强烈富铝和富钾的熔体,硬砂岩的部分熔融可以产生中等到强烈富铝的花岗闪长岩/花岗岩熔体,玄武质岩石的部分熔融可以产生云英质-奥长-花岗闪长质熔体(Rushmer, 1991; Rapp *et al.*, 1991; Rapp and Watson, 1995; Wolf and Wyllie, 1994; Sen and Dunn, 1994; Winther and Newton, 1996)。可见,只要源岩含水或存在含水相的矿物,部分熔融就可以产生花岗质熔体(Patino Douce and Beard, 1996; Pation Douce and McCarthy, 1998)。本文研究的5个花岗岩体岩性主体为花岗闪长岩-二长花岗岩,其中江里沟、阿夷山和中川岩体属弱过铝质花岗岩,温泉岩体和德乌鲁岩体的A/CNK介于0.95~1.05之间,属准铝和弱过铝质花岗岩,结合其多含有金铜成矿作用且金铜应属地幔来源的元素,因此最可能的地壳源区是玄武质岩石。从阿夷山花岗闪长岩的锆石 Hf 同位素分析结果讲, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值全部为负值,变化于-21.95~-6.05,二阶段模式年龄($t_{2\text{DM}}$)变化于2184~1378Ma,说明阿夷山花岗闪长岩的源区可能为中元古至古元古地壳,源岩最有可能为古老玄武质岩石。

依据花岗岩的地球化学数据,5个花岗质岩体具有埃达克岩($\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} < 2 \times 10^{-6}$)或喜马拉雅型花岗岩($\text{Sr} < 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} > 2 \times 10^{-6}$)的特征,或两者兼而有之。其中江里沟、德乌鲁和中川岩体为喜马拉雅型,阿夷山岩体为埃达克岩型,温泉岩体是二者兼而有之。结合前人在该地区发表的百余地球化学数据(张旗等,2009b),显示出同样的地球化学特点。关于埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩成因,一直是一个争论很大的问题,大量的区域地质调查成果和科学研究成果表明,研究区三叠纪已处于陆内造山期,存在一个陆壳加厚阶段(张国伟等,2001;冯益民等,2003;姚书振等,2006)。根据实验岩石学研究的成果,下地壳部分熔融形成埃达克岩浆需在石榴石稳定区,而在800~1000℃的范围内石榴石稳定的位置依据源岩成分的不同,其压力大约在0.9~1.4GPa之间(Beard and Lofgren, 1991; Rushmer, 1991; Winther and Newton, 1996; Sen and Dunn, 1994; Wolf and Wyllie, 1994; Rapp and Watson, 1995)。Xiong *et al.* (2005)的研究表明,下地壳熔融形成埃达克岩浆时需熔体-石榴石-辉石平衡共存,榴辉岩矿物组合中金红石是一个重要的成员,而金红石作为残留相出现的最低压力为1.5GPa。Xiao and Clemens (2007)对采自大别地区的钾玄质玄武岩的熔融实验得出其熔融形成埃达克岩浆所需的压力更大(一般>2GPa,至少>1.7GPa),对应的地壳厚度大约为56~66km。

对喜马拉雅型花岗岩的研究认为其来源并不浅,大约相当于1.0~1.5GPa(杨晓松等,2001;刘树文等,2005)。与埃达克岩的形成与石榴石+辉石平衡,形成很高压力不同的是,喜马拉雅型花岗岩浆与石榴石+斜长石平衡,在较高压力下形成,通常在33~50km左右。研究表明,花岗岩的 $\text{Mg}^{\#}$ 值是判断其是壳幔混源或是下地壳成因的重要依据,一般壳幔混源成因的埃达克岩或喜马拉雅型花岗岩的 $\text{Mg}^{\#}$ 大于0.5,而来自下地壳部分熔融的埃达克岩或喜马拉雅型花岗岩的一般小于0.5(Rapp and Watson, 1995)。本文研究的5个花岗岩体的均小于0.5,显然是下地壳部分熔融的产物。

由以上分析可知,本文研究的5个花岗岩体,应为下地壳部分熔融的产物,从其岩石类型和成矿特点讲,极有可能是早期玄武质岩石部分熔融的产物。其中江里沟、德乌鲁、中川岩体形成深度较低,大约为33~50km,花岗岩浆与石榴石+斜长石平衡;而阿夷山岩体形成深度大,约为60km左右,花岗岩浆与石榴石和辉石平衡;温泉岩体的形成深度相对变化较大,最有可能是50km左右,岩浆与石榴石、辉石及斜长石平衡,造成其既有埃达克岩和喜马拉雅型的双重地球化学特点。

6.2 花岗岩提供的构造演化信息

西秦岭北缘位于华北板块南缘祁连-北秦岭加里东构造带和扬子板块北缘海西构造带的拼结部位,是在华北与扬子板块拼接过程中形成的前陆盆地的滨-浅海沉积(任纪舜和张正坤,1991)。西秦岭的基底具有扬子板块的构造属性,因此,扬子板块的西北边界至少可推至到西秦岭的北部(张宏飞等,2005)。研究区中生代以来西秦岭北部可能受到环太平洋构造域、西部特提斯构造域的共同作用,构造演化极其复杂(殷勇和殷先明,2009)。

关于西秦岭构造带中生代构造过程一直是学术界关注的焦点之一。张国伟等(2001)认为,西秦岭勉略带发育的时代为 D_{2-3} - P_1 ,俯冲与碰撞造山为 P_2 - $\text{T}_{2,3}$ (345~200Ma), T_3 后转入后造山板内构造演化阶段,西秦岭为一近EW向延伸的印支期俯冲碰撞缝合线。冯益民等(2003)认为,西秦岭从中晚泥盆世开始一直到中二叠世为板内伸展阶段,已经不再是板块构造体制下的洋陆格局,中三叠世之后处于陆陆碰撞造山和陆内造山阶段。从本文研究的5个花岗质侵入体属埃达克岩或喜马拉雅型花岗岩的基本事实,结合前人有关埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩的报道(张旗等,2009b;殷勇和殷先明,2009),表明研究区在中二叠末-三叠纪发生过地壳加厚事件,这一事件可能是一复合构造事件,包括扬子板块与华北板块的碰撞作用,古特提斯洋盆北部的消减作用(闫臻等,2012;Guo *et al.*, 2012)及东西向环西太平洋的构造活动。扬子和华北板块的陆陆碰撞或陆陆俯冲导致的地壳加厚,加厚下地壳的部分熔融以及部分熔融发生在不同的深度,形成了本区特征的具有埃达克岩或喜马拉雅型地球化学特征的花岗岩体。在花岗岩的构造环境判别图解中,5个岩体投点

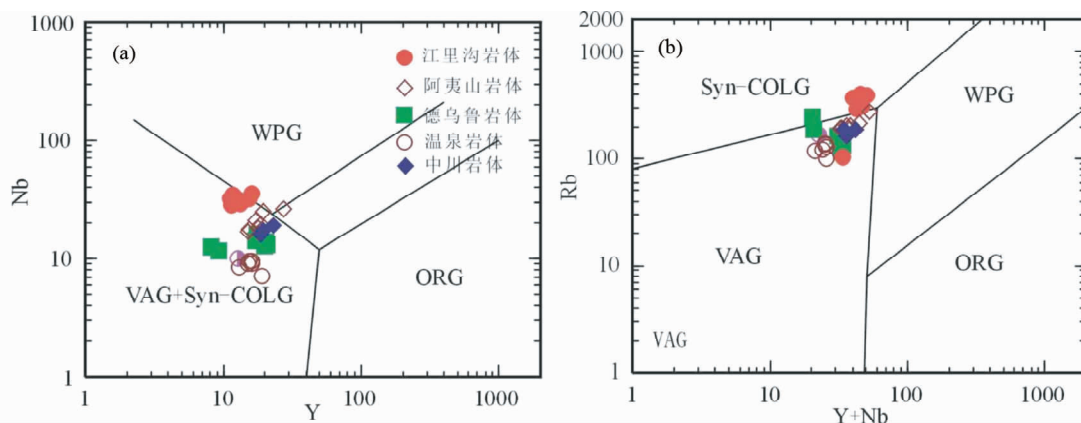


图6 西秦岭西段花岗岩构造环境判别图

(a)-Nb vs. Y图解(据 Pearce *et al.*, 1984);(b)-Rb vs. Y + Nb图解(据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig.6 Tectonic discrimination diagrams for granites in the west segment of western Qinling

均落于岛弧或同碰撞花岗岩区域,与中区中生代处于陆陆碰撞和陆陆俯冲环境一致(图6)。

6.3 对地质找矿的指示意义

经典的研究认为,埃达克岩是由俯冲的洋壳板片部分熔融形成的(Defant *et al.*, 2002),因此,位于板块俯冲带来源于洋壳玄武岩的部分熔融形成的埃达克岩必然是Cu、Au等元素最有利的成矿载体。这是因为洋壳玄武岩中具有高的Cu、Au丰度,同时亦有来自海水蚀变作用的H₂O和Cl,无疑均为成矿作用提供了前提。但是这种基于洋壳玄武岩部分熔融研究的成果,很难解释由下地壳深熔作用而形成的花岗岩及矿床(张旗等,2009a, b),因为下地壳熔融的埃达克岩与地幔很少有关联,我国大多数金铜矿床与C型埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩关系密切,说明金和铜主要来源于幔源玄武岩的源区(张旗等,2009b)。

国内外的研究表明,下地壳玄武岩熔融的埃达克岩与金铜成矿作用有明显的关系,这是因为埃达克岩不同于其它花岗岩的最大特征是其形成的深度大、温度高、氧逸度高和黏性低,而金铜可能只有在高氧逸度和很大压力下才能被流体萃取出来。喜马拉雅型花岗岩大多与金有关,铜较少,因为铜的萃取要求压力更高(一般大于1.0GPa),暗示铜比金萃取的条件更为苛刻(张旗等,2009b)。张旗等(2008)认为,在低压下(<1.0GPa或更低)和低氧逸度下,钨锡被激活,溶解于流体中汇聚成矿液,而金铜则可能由于压力不足而被锁住,未被激活。因此,钨锡与形成压力低于喜马拉雅型的南岭型花岗岩伴生;当压力增加(>1.0GPa),氧逸度增加,金被激活,钨锡被锁住,铜可能还未到被激活条件,因此,喜马拉雅型花岗岩主要与金矿床相伴生。

西秦岭埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩广泛发育,说明两个问题,一是在三叠纪时期地壳厚度大,可能属于扬子与华北对接的碰撞造山带;二是岩浆活动频繁说明碰撞时地幔处于高度活动状态,地幔活动有利于成矿,而地壳加厚有利于

形成金铜矿床(张旗等,2009b;殷勇和殷先明,2009)。因此,埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩的确定是金铜找矿的前提,在西秦岭北部开展地地找矿工作,最简便的方法是围绕埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩找矿。要将找矿范围扩大至由同时期埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩圈定的全部范围内,因为在这个范围内出现的金铜矿床,如果时代与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩大体相当,可能都来源于加厚的下地壳玄武岩的部分熔融(张旗等,2008)。因此在西秦岭北段,应重点围绕埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩开展地质找矿工作,前者注意金铜矿床的寻找,后者注意金矿床的寻找,当然同时注意岩浆上升过程中叠加的萃取地壳元素钨锡的成矿作用。在成矿类型注意斑岩型、矽卡岩型和浅成低温热液矿床的联合找矿。例如,在岩体内部可以找斑岩型矿床,在接触带找矽卡岩型矿床、蚀变岩型矿床,在远景接触带的地方可能有卡林型-类卡林型金矿床等。

致谢 花岗岩主量和微量元素分析得到中国地质调查局西安地质调查中心测试中心唐南安研究的协助;LA-ICPMS锆石U-Pb年龄测定和锆石CL照相得到西北大学大陆动力学实验室柳小明研究员、第五春荣博士协助;本文初稿承蒙王宗起研究员和闫臻研究员审阅并提出宝贵意见;在此一并表示感谢。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb. *Chem. Geol.*, 192(1-2): 59-79
- Beard JS and Lofgren GE. 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6, 9 kb. *J. Petrol.*, 32(2): 365-401
- Beard JS, Lofgren GE, Sinha FG *et al.* 1994. Partial melting of apatite-bearing charnockite, granulite, and diorite: Melt compositions, restite mineralogy, and petrologic implications. *Journal of Geophysical Research*, 99(B11): 21591-21603

- Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf geochemistry of the chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1-2): 243-258
- Defant MJ, Xu JF, Kepezhinskas P, Wang Q, Zhang Q and Xiao L. 2002. Adakites: Some variations on a theme. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 129-142 (in English with Chinese abstract)
- Feng YM, Cao XD, Zhang RP, Hu YX, Pan XP, Yang JL, Jia QZ and Li WM. 2003. Tectonic evolution framework and nature of the West Qinling orogenic belt. *Northwestern Geology*, 36(1): 1-10 (in Chinese with English abstract)
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, O'Reilly SY, van Acherberg E and Shee SR. 2000. The Hf-isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133-147
- Guo X, Yan Z, Wang Z, Wang T, Hou K, Fu C and Li J. 2012. Middle Triassic arc magmatism along the northeastern margin of the Tibet: U-Pb and Lu-Hf zircon characterization of the Gangcha complex in the West Qinling terrane, central China. *Journal of the Geological Society, London*, 169(3): 327-336
- Iizuka T and Hirata T. 2005. Improvements of precision and accuracy in in-situ Hf isotope microanalysis of zircon using the laser ablation-MC-ICPMS technique. *Chemical Geology*, 220(1-2): 121-137
- Jin WJ, Zhang Q, He DF and Jia XQ. 2005. SHRIMP dating of adakites in western Qinling and their implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 959-966 (in Chinese with English abstract)
- Jogvan H, Kjell PS, Rolf BP *et al.* 2002. Crustal melting in the lower parts of island arcs: An example from the Bremanger granitoid complex, West Norwegian Caledonides. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143(3): 316-335
- Li YJ, Liu SH, Li ZC and Li Y. 2003. The geochemical information of the magma mixing from the Wenquan Granite in the western Qinling. *Geology and Prospecting*, 39(6): 33-36 (in Chinese with English abstract)
- Liu HJ, Chen YJ, Mao SD, Zhao CH and Yang RS. 2008. Element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of granite-porphry dykes in the Yangshan gold belt, western Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 1101-1111 (in Chinese with English abstract)
- Liu SW, Zhang JJ, Su GW and Li QG. 2005. Mineral chemistry, *PT* paths and exhumation process of mafic granulite in Dingjie of South Tibet. *Sciences in China (Series D)*, 35(9): 810-820 (in Chinese)
- Patino DAE and Beard JS. 1996. Effects of *P*, *f*_{O₂} and Mg/Fe ratio on dehydration melting of model metagreywackes. *J. Petrol.*, 37(5): 999-1024
- Pation DAE and McCarthy TC. 1998. melting of crustal rocks during continental collision and subduction. In: Hacke BR and Liou JG (eds.). *When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks. Petrology and Structural Geology*, Vol. 10. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 27-55
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983
- Qi JZ, Li L and Yang GC. 2008. Genesis and metallogenic model of Yangshan gold deposit in Gansu Province. *Mineral Deposits*, 27(1): 81-87 (in Chinese with English abstract)
- Qin JF, Lai SC and Li YF. 2005. Petrogenesis and geological significance of Yangba granodiorites from Bikou area, northern margin of Yangtze Plate. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 697-710 (in Chinese with English abstract)
- Rapp RP, Watson EB and Miller CF. 1991. Partial melting of amphibolite eclogite and origin of Archean trondhjemites and tonalities. *Precamb. Res.*, 51(1-4): 1-25
- Rapp RP and Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *J. Petrol.*, 36: 891-931
- Ren JS and Zhang ZK. 1991. The discussion of Qinling Orogenic Belt: Based on the collisional processes between North China Plate and Yangtze Plate. *Proceedings of National Conference of Geology*. Xian: Northwestern University Publishing House, 99-110 (in Chinese)
- Rushmer T. 1991. Partial melting of two amphibolites: Contrasting experimental results under fluid-absent conditions. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 107(1): 41-59
- Scherer E, Munker C and Mezger K. 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium clock. *Science*, 293(5530): 683-687
- Sen C and Dunn T. 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 Ga: Implications for the origin of adakites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 117(4): 394-409
- Skjerlie KLP and Johnston AD. 1996. Vapour-absent melting from 10 to 20 kbar of crustal rocks that contain multiple hydrous phase: Implications for anatexis in the deep to very deep continental crust and active continental margins. *J. Petrol.*, 37(3): 661-691
- Song ZB, Feng YB, He SP, He F, Li ZQ and Zhao LL. 2004. Lithochemical characteristics of Chaijiazhuang and Jiuciliang granites in West Qinling and its relation to the mineralization. *Geological Survey and Research*, 27(2): 86-91 (in Chinese with English abstract)
- Winther KT and Newton RC. 1996. Experimental melting of hydrous low-K tholeiite: Evidence on the origin of Archean cratons. *Bull. Geol. Soc. Den.*, 39: 213-228
- Wolf MB and Wyllie JP. 1994. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: The effects of temperature and time. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 115(4): 369-383
- Xiao L and Clemens JD. 2007. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints. *Lithos*, 95(3-4): 399-414
- Xiong XL, Adam J and Green TH. 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
- Yan Z, Li JL, Wang ZQ, Xu ZQ and Deng JF. 2012. Tectonic attribute and accretionary orogen of the West Qinling Wedge, northeastern margin of the Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1808-1828 (in Chinese with English abstract)
- Yang RS, Chen YJ, Zhang FX, Li ZH, Mao SD, Liu HJ and Zhao CH. 2006. Chemical Th-U-Pb ages of monazite from the Yangshan gold deposit, Gansu Province and their geologic and metallogenic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2603-2610 (in Chinese with English abstract)
- Yang XS, Jin ZM, Huenges E, Schilling FR and Wunder B. 2001. Experimental study on dehydration melting of natural biotite-plagioclase gneiss from High Himalayas and implications for Himalayan crust anatexis. *Chinese Science Bulletin*, 46(10): 867-872
- Yao SZ, Zhou ZG, Lv XB, Cheng SY, Ding ZJ and Wang P. 2006. Mineralization characteristics and prospecting potential of West Qinling metallogenic belt. *Northwestern Geology*, 39(2): 156-178 (in Chinese with English abstract)
- Yin Y and Yin XM. 2009. Porphyry Cu-Mo-Au mineralization related to adakite and Himalayan type granite in the northern margin West Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1239-1252 (in Chinese with English abstract)
- Yuan HL, Gao S, Liu XM *et al.* 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353-370
- 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 GW, Zhang BR and Yuan XC. 2001. *Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics*. Beijing: Science Press, 1-855 (in Chinese)
- Zhang GW, Cheng SY and Guo AL. 2004. Mianlue Paleosuture on the southern margin of the Central Orogenic of the main part of the continent of China. *Geological Bulletin of China*, 23(9): 846-853

(in Chinese with English abstract)

- Zhang HF, Xiao L, Zhang L, Yuan HL and Jin LL. 2005. Geochemical and Pb-Sr-Nd isotopic compositions of Indosinian granitoids from the Bikou block, northwest of the Yangtze Plate: Constraints on petrogenesis, nature of deep crust and geodynamics. *Science in China (Series D)*, 50(7): 972–983
- Zhang HF, Jin LL, Zhang L, Harris N, Zhou L, Hu SH and Zhang RR. 2007. Geochemical and Pb-Sr-Nd isotopic compositions of granitoids from western Qinling belt: Constraints on basement nature and tectonic affinity. *Science in China (Series D)*, 50(2): 184–196
- Zhang Q, Wang Y, Xiong XL and Li CD. 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity. Beijing: China Land Press, 1–344 (in Chinese)
- Zhang Q, Jin WJ, Li CD and Wang YL. 2009a. Reason for gold and copper discovery in mountain with tungsten and tin discovery on plain. *Earth Science*, 34(4): 547–568 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Yin XM, Yin Y, Jin WJ, Wang YL and Zhao YQ. 2009b. Issues on metallogenesis and prospecting of gold and copper deposits related to adakite and Himalayan type granite in West Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3103–3122 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 胡云绪, 潘晓萍, 杨军录, 贾群子, 李文明. 2003. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质. *西北地质*, 36(1): 1–10
- 金维俊, 张旗, 何登发, 贾秀勤. 2005. 西秦岭埃达克岩的 SHRIMP 定年及其构造意义. *岩石学报*, 21(3): 959–966
- 李永军, 刘社华, 李注苍, 李英. 2003. 西秦岭温泉花岗岩体岩浆混合作用的地球化学信息. *地质与勘探*, 39(6): 33–36
- 刘红杰, 陈衍景, 毛世东, 赵成海, 杨荣生. 2008. 西秦岭阳山金矿带花岗岩元素及 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学. *岩石学报*, 24(5): 1101–1111
- 刘树文, 张进江, 舒桂明, 李秋根. 2005. 藏南定结铁镁质麻粒岩矿物化学、*PTt* 轨迹和折返过程. *中国科学(D辑)*, 35(9): 810–820
- 齐金忠, 李莉, 袁士松, 刘志杰, 刘敦一, 王颜斌, 李志宏. 2005. 甘肃省阳山金矿床石英脉中锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究. *矿床地质*, 27(1): 81–87
- 秦江峰, 赖绍聪, 李永飞. 2005. 扬子板块北缘碧口地区阳坝花岗闪长岩岩体成因研究及其地质意义. *岩石学报*, 21(3): 697–710
- 任纪舜, 张正坤. 1991. 论秦岭造山带——中朝及扬子陆块的拼合过

- 程. 秦岭造山带学术讨论文集. 西安: 西北大学出版社, 99–110
- 宋忠宝, 冯益民, 何世平, 何芳, 李增庆, 赵利利. 2004. 西秦岭柴家庄和酒刺梁花岗岩地球化学及与矿产的关系. *地质调查与研究*, 27(2): 86–91
- 闫臻, 李继亮, 王宗起, 许志琴, 邓晋福. 2012. 西秦岭楔的构造属性及其增生造山过程. *岩石学报*, 28(6): 1808–1828
- 杨荣生, 陈衍景, 张复新, 李志宏, 毛世东, 刘红杰, 赵成海. 2006. 甘肃阳山金矿独居石 Th-U-Pb 化学年龄及其地质和找矿意义. *岩石学报*, 22(10): 2603–2610
- 杨晓松, 金振民, Huenges E, Schilling FR, Wunder B. 2001. 高喜马拉雅黑云片麻岩脱水熔融实验: 对青藏高原地壳深熔的启示. *科学通报*, 46: 246–250
- 姚书振, 周宗桂, 吕新彪, 陈守余, 丁振举, 王革. 2006. 秦岭成矿带成矿特征和找矿方向. *西北地质*, 39(2): 156–178
- 殷勇, 殷先明. 2009. 西秦岭北带与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的斑岩型铜-钼-金成矿作用. *岩石学报*, 25(5): 1239–1252
- 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. *高校地持学报*, 14(3): 304–316
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1–855
- 张国伟, 程顺有, 郭安林. 2004. 秦岭大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识——兼论中国大陆主体的拼合. *地质通报*, 23(9): 846–853
- 张宏飞, 靳兰兰, 张利, Harris N, 周炼, 胡圣虹, 张本仁. 2005. 西秦岭花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成对基底性质及其构造属性的限制. *中国科学(D辑)*, 35: 914–926
- 张宏飞, 肖龙, 张利, 袁洪林, 靳兰兰. 2007. 扬子陆块西北缘碧口地体印支期花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成: 限制岩石成因及其动力学背景. *中国科学(D辑)*, 37(4): 460–470
- 张旗, 王焰, 熊小林, 李承东. 2008. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇. 北京: 中国大地出版社, 1–344
- 张旗, 金维俊, 李承东, 王元龙. 2009a. “上山”找金铜, “下山”找钨锡及其理由. *地球科学*, 34(4): 547–568
- 张旗, 殷先明, 殷勇, 金维俊, 王元庆, 赵彦庆. 2009b. 西秦岭与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的金铜成矿及找矿问题. *岩石学报*, 25(12): 3103–3122