

豫西西峡地区青岗坪花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年、Hf 同位素组成及其地质意义

王 锦, 第五春荣, 孙 勇, 刘 晔, 王 维

WANG Jin, DIWU Chun-rong, SUN Yong, LIU Ye, WANG Wei

大陆动力学国家重点实验室/西北大学地质学系, 陕西 西安 710069

State Key Laboratory of Continental Dynamics/Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China

摘要: 豫西地区发育大量加里东期的花岗岩, 研究这些花岗岩对于了解二郎坪岩群和北秦岭的构造演化具有重要的意义。通过对豫西青岗坪地区侵入二郎坪岩群的花岗闪长岩进行全岩地球化学、锆石 U-Pb 测年和 Hf 同位素的综合分析, 取得以下初步认识: 豫西青岗坪地区花岗闪长岩的形成年龄为 $475.2\text{Ma} \pm 2.7\text{Ma}$, 此年龄限定了二郎坪岩群构造侵位的上限。豫西青岗坪花岗闪长岩具有较低的 MgO 、 Fe_2O_3 、Cr、Ni 含量和相对较低的 $\text{Mg}^\#$ 值, 这些地球化学特征表明豫西青岗坪花岗闪长岩应为加厚下地壳部分熔融的产物。结合已有的资料, 认为在古生代早期 (520~480Ma) 北秦岭地区发生了较大规模的陆壳汇聚碰撞, 导致下地壳的缩短、叠置, 豫西青岗坪花岗闪长岩便是这一俯冲叠置下地壳部分熔融的产物。

关键词: 秦岭造山带; 二郎坪岩群; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; Lu-Hf 同位素

中图分类号: P588.12⁺2; P597⁺.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2012)06-0884-12

Wang J, Diwu C R, Sun Y, Liu Y, Wang W. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and Hf isotope analysis of the Qinggangping granodiorite in Xixia area of western Henan Province and their geological significance. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(6):884-895

Abstract: Caledonian granitoids are well developed in western Henan Province. The study of these granites is of great significance for understanding the Erlangping Rock Group and the orogenic process of the North Qinling orogen. This paper presents zircon geochronologic data, zircon Hf isotopic and related whole-rock geochemical analyses of a typical granitoid pluton in Qinggangping area of western Henan Province, and gives the following results and understanding: The Qinggangping granitoid pluton in western Henan Province has a crystallization age of 475.2 ± 2.7 Ma. This age can be used to constrain the emplacement time of Erlangping ophiolite. The Qinggangping granitoids have relatively low MgO , Fe_2O_3 , Cr and Ni content and Mg number. These geochemical characteristics show that the granitoid should be the product of a thickened lower crust by partial melting. It can also be concluded that convergence-collision probably occurred in North Qinling in Early Paleoproterozoic period.

Key words: Qinling orogenic belt; Erlangping Rock Group; LA-ICP-MS zircon U-Pb age; Lu-Hf isotope

秦岭造山带位于华北地块和华南地块两大地块之间, 也是中国大陆中央造山带(系)的主要组成部分。该造山带经历了新元古代、古生代和中生代构造岩浆等主要热事件^[1]。在早古生代, 秦岭造山带的造山作用形成大量的古生代花岗岩, 其中在北秦岭造

山带尤为发育^[2]。

北秦岭构造带是指商丹断裂带与铁炉子-栾川断裂带之间的秦岭北部区域(图 1-a), 主要岩石地层单元自北而南依次为宽坪岩群、二郎坪岩群、秦岭岩群和丹凤岩群(图 1-b), 它们之间均以大型剪切

收稿日期: 2011-10-30; 修订日期: 2011-12-08

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目《陆壳超深俯冲和折返的岩石学记录》(编号: 2009CB825003)

作者简介: 王锦(1989-), 女, 在读硕士, 矿产普查与勘探专业。E-mail: wangjin_wang@yeah.net

通信作者: 第五春荣(1977-), 男, 讲师, 从事前寒武纪地质学和同位素年代学研究。E-mail: diwuchunrong@163.com

带和断裂构造带为界,相互逆冲叠置,并沿北西西方向平行展布,构成了北秦岭构造带的主体,以发育向北逆冲推覆的厚皮叠瓦状逆冲推覆构造为特征^[1]。

在豫西青岗坪地区大量发育加里东期的花岗岩,研究这些花岗岩对于了解二郎坪岩群和北秦岭的构造演化具有重要的意义。因此,本文以豫西青岗坪花岗闪长岩为研究对象,通过详细的岩石学、地球化学、年代学及锆石 Hf 同位素研究,探讨该花岗闪长岩的成因和形成机制,为进一步深入探讨二郎坪岩群,乃至北秦岭地区早古生代构造格局和演化提供重要约束。

1 地质背景和样品描述

二郎坪岩群主要出露在豫西西峡—南召一带,呈近东西向展布。南北分别与秦岭杂岩和宽坪岩群相邻。1973 年,河南省区调队在西峡地区进行地质填图时将二郎坪岩群从宽坪岩群中解体出来,并将其划分上、中、下 3 个统^①。1976 年金守文将下统于西峡县二郎坪一带创建命名为二郎坪岩群^[3]。1981 年,河南区调队在新编 1:50 万区域地质图时,将中统和上统并入二郎坪群,其构造单元自下而上分为大庙组、火神庙组和小寨组^②。1989 年河南省区域地质志保持了该划分方案,将其时代归为新元古代^[4]。其中,大庙组主要由一套碎屑岩和少量碳酸盐岩组成,变质程度为绿片岩相到低角闪岩相,南界以断层和火神庙组接触。火神庙组以巨厚的基性火山熔岩为主,岩石仍然保留原生的枕状、气孔或者杏仁等原生构造,前人曾将其作为蛇绿岩对待^[5],岩石遭受强烈的绿帘石—绿泥石蚀变作用,其变质程度较浅,其中夹含放射虫硅质岩。火神庙组分别与大庙组、小寨组

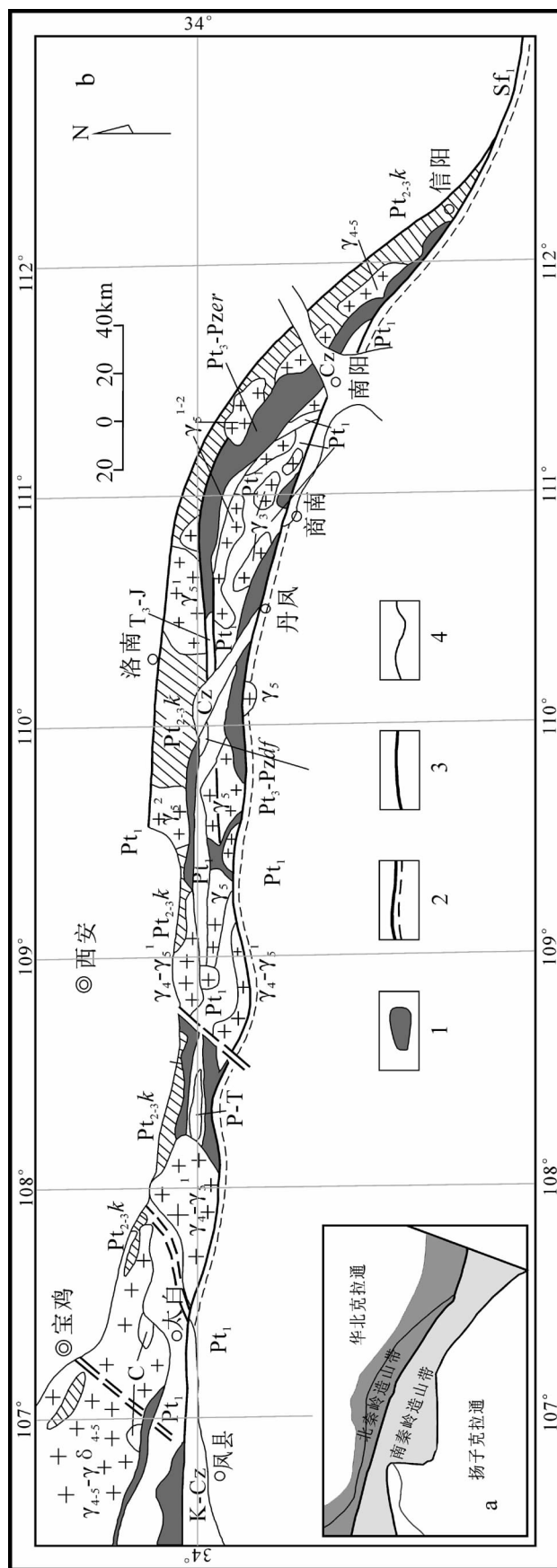


图 1 北秦岭地质简图(引自参考文献[1],略有修改)

Fig. 1 Geological sketch map of the North Qinling orogenic belt

Cz—新生界;K—白垩系;T₃—上三叠统;J—侏罗系;C—石炭系;P—二叠系;Pt₁—三叠系;Pt₂—二叠系;Pt₃—一叠系;Pt₄—二叠系;Pt₅—二叠系;Pt₆—二叠系;Pt₇—二叠系;Pt₈—二叠系;Pt₉—二叠系;Pt₁₀—二叠系;Pt₁₁—二叠系;Pt₁₂—二叠系;Pt₁₃—二叠系;Pt₁₄—二叠系;Pt₁₅—二叠系;Pt₁₆—二叠系;Pt₁₇—二叠系;Pt₁₈—二叠系;Pt₁₉—二叠系;Pt₂₀—二叠系;Pt₂₁—二叠系;Pt₂₂—二叠系;Pt₂₃—二叠系;Pt₂₄—二叠系;Pt₂₅—二叠系;Pt₂₆—二叠系;Pt₂₇—二叠系;Pt₂₈—二叠系;Pt₂₉—二叠系;Pt₃₀—二叠系;Pt₃₁—二叠系;Pt₃₂—二叠系;Pt₃₃—二叠系;Pt₃₄—二叠系;Pt₃₅—二叠系;Pt₃₆—二叠系;Pt₃₇—二叠系;Pt₃₈—二叠系;Pt₃₉—二叠系;Pt₄₀—二叠系;Pt₄₁—二叠系;Pt₄₂—二叠系;Pt₄₃—二叠系;Pt₄₄—二叠系;Pt₄₅—二叠系;Pt₄₆—二叠系;Pt₄₇—二叠系;Pt₄₈—二叠系;Pt₄₉—二叠系;Pt₅₀—二叠系;Pt₅₁—二叠系;Pt₅₂—二叠系;Pt₅₃—二叠系;Pt₅₄—二叠系;Pt₅₅—二叠系;Pt₅₆—二叠系;Pt₅₇—二叠系;Pt₅₈—二叠系;Pt₅₉—二叠系;Pt₆₀—二叠系;Pt₆₁—二叠系;Pt₆₂—二叠系;Pt₆₃—二叠系;Pt₆₄—二叠系;Pt₆₅—二叠系;Pt₆₆—二叠系;Pt₆₇—二叠系;Pt₆₈—二叠系;Pt₆₉—二叠系;Pt₇₀—二叠系;Pt₇₁—二叠系;Pt₇₂—二叠系;Pt₇₃—二叠系;Pt₇₄—二叠系;Pt₇₅—二叠系;Pt₇₆—二叠系;Pt₇₇—二叠系;Pt₇₈—二叠系;Pt₇₉—二叠系;Pt₈₀—二叠系;Pt₈₁—二叠系;Pt₈₂—二叠系;Pt₈₃—二叠系;Pt₈₄—二叠系;Pt₈₅—二叠系;Pt₈₆—二叠系;Pt₈₇—二叠系;Pt₈₈—二叠系;Pt₈₉—二叠系;Pt₉₀—二叠系;Pt₉₁—二叠系;Pt₉₂—二叠系;Pt₉₃—二叠系;Pt₉₄—二叠系;Pt₉₅—二叠系;Pt₉₆—二叠系;Pt₉₇—二叠系;Pt₉₈—二叠系;Pt₉₉—二叠系;Pt₁₀₀—二叠系

Pt₁—秦岭南带;Pt₂—秦岭南带;Pt₃—秦岭南带;Pt₄—秦岭南带;Pt₅—秦岭南带;Pt₆—秦岭南带;Pt₇—秦岭南带;Pt₈—秦岭南带;Pt₉—秦岭南带;Pt₁₀—秦岭南带;Pt₁₁—秦岭南带;Pt₁₂—秦岭南带;Pt₁₃—秦岭南带;Pt₁₄—秦岭南带;Pt₁₅—秦岭南带;Pt₁₆—秦岭南带;Pt₁₇—秦岭南带;Pt₁₈—秦岭南带;Pt₁₉—秦岭南带;Pt₂₀—秦岭南带;Pt₂₁—秦岭南带;Pt₂₂—秦岭南带;Pt₂₃—秦岭南带;Pt₂₄—秦岭南带;Pt₂₅—秦岭南带;Pt₂₆—秦岭南带;Pt₂₇—秦岭南带;Pt₂₈—秦岭南带;Pt₂₉—秦岭南带;Pt₃₀—秦岭南带;Pt₃₁—秦岭南带;Pt₃₂—秦岭南带;Pt₃₃—秦岭南带;Pt₃₄—秦岭南带;Pt₃₅—秦岭南带;Pt₃₆—秦岭南带;Pt₃₇—秦岭南带;Pt₃₈—秦岭南带;Pt₃₉—秦岭南带;Pt₄₀—秦岭南带;Pt₄₁—秦岭南带;Pt₄₂—秦岭南带;Pt₄₃—秦岭南带;Pt₄₄—秦岭南带;Pt₄₅—秦岭南带;Pt₄₆—秦岭南带;Pt₄₇—秦岭南带;Pt₄₈—秦岭南带;Pt₄₉—秦岭南带;Pt₅₀—秦岭南带;Pt₅₁—秦岭南带;Pt₅₂—秦岭南带;Pt₅₃—秦岭南带;Pt₅₄—秦岭南带;Pt₅₅—秦岭南带;Pt₅₆—秦岭南带;Pt₅₇—秦岭南带;Pt₅₈—秦岭南带;Pt₅₉—秦岭南带;Pt₆₀—秦岭南带;Pt₆₁—秦岭南带;Pt₆₂—秦岭南带;Pt₆₃—秦岭南带;Pt₆₄—秦岭南带;Pt₆₅—秦岭南带;Pt₆₆—秦岭南带;Pt₆₇—秦岭南带;Pt₆₈—秦岭南带;Pt₆₉—秦岭南带;Pt₇₀—秦岭南带;Pt₇₁—秦岭南带;Pt₇₂—秦岭南带;Pt₇₃—秦岭南带;Pt₇₄—秦岭南带;Pt₇₅—秦岭南带;Pt₇₆—秦岭南带;Pt₇₇—秦岭南带;Pt₇₈—秦岭南带;Pt₇₉—秦岭南带;Pt₈₀—秦岭南带;Pt₈₁—秦岭南带;Pt₈₂—秦岭南带;Pt₈₃—秦岭南带;Pt₈₄—秦岭南带;Pt₈₅—秦岭南带;Pt₈₆—秦岭南带;Pt₈₇—秦岭南带;Pt₈₈—秦岭南带;Pt₈₉—秦岭南带;Pt₉₀—秦岭南带;Pt₉₁—秦岭南带;Pt₉₂—秦岭南带;Pt₉₃—秦岭南带;Pt₉₄—秦岭南带;Pt₉₅—秦岭南带;Pt₉₆—秦岭南带;Pt₉₇—秦岭南带;Pt₉₈—秦岭南带;Pt₉₉—秦岭南带;Pt₁₀₀—秦岭南带

呈断层接触。小寨组以泥质碎屑岩为主,夹含基性火山岩(或岩脉),变质程度达高角闪岩相,岩石透入性面理发育。

本文研究的花岗闪长岩分布于西峡县二郎坪镇西北的青岗坪地区(图2)。岩体由北西向东呈带状分布,长约20km。岩石呈灰绿色,块状构造,中粒花岗结构,主要矿物为石英(20%~25%)、斜长石(40%~50%)、碱性长石(3%~5%)、角闪石(10%~15%)和黑云母(2%~5%)。斜长石发育有钠长石双晶,碱性长石主要为微斜长石,发育格子状双晶;副矿物为锆石、黄铁矿等(图3)。

2 样品制备和分析方法

2.1 样品制备

挑选新鲜的样品,去除混染、污染、蚀变、风化的岩石部分,同时剔除岩石含有的包体及后期贯

入较细的脉体。由于该花岗质岩石的矿物颗粒较粗大,所以保证样品至少有3~5kg。先采用刚玉鄂板破碎机将样品粗碎至直径为5~8mm的颗粒。为保证样品的均匀性,细碎前将样品缩分,然后用碳化钨钵(WC)体碎样机将样品细碎至200目(75 μ m)以下。

2.2 锆石主量、微量和稀土元素分析

主量元素分析采用X射线荧光(Rigaku RIX 2100)玻璃熔饼法完成。试样用无水四硼酸锂熔融,以硝酸氨为氧化剂,加氟化锂和少量溴化锂作助熔剂和脱膜剂。微量元素采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)仪进行分析,所用的仪器是Hewlett Packard公司生产的Agilent 7500a。

2.3 锆石 U-Pb 同位素分析

将人工重砂分离出的锆石颗粒制成以环氧树脂为基础的样品靶,然后对其进行抛光,抛光后对待测

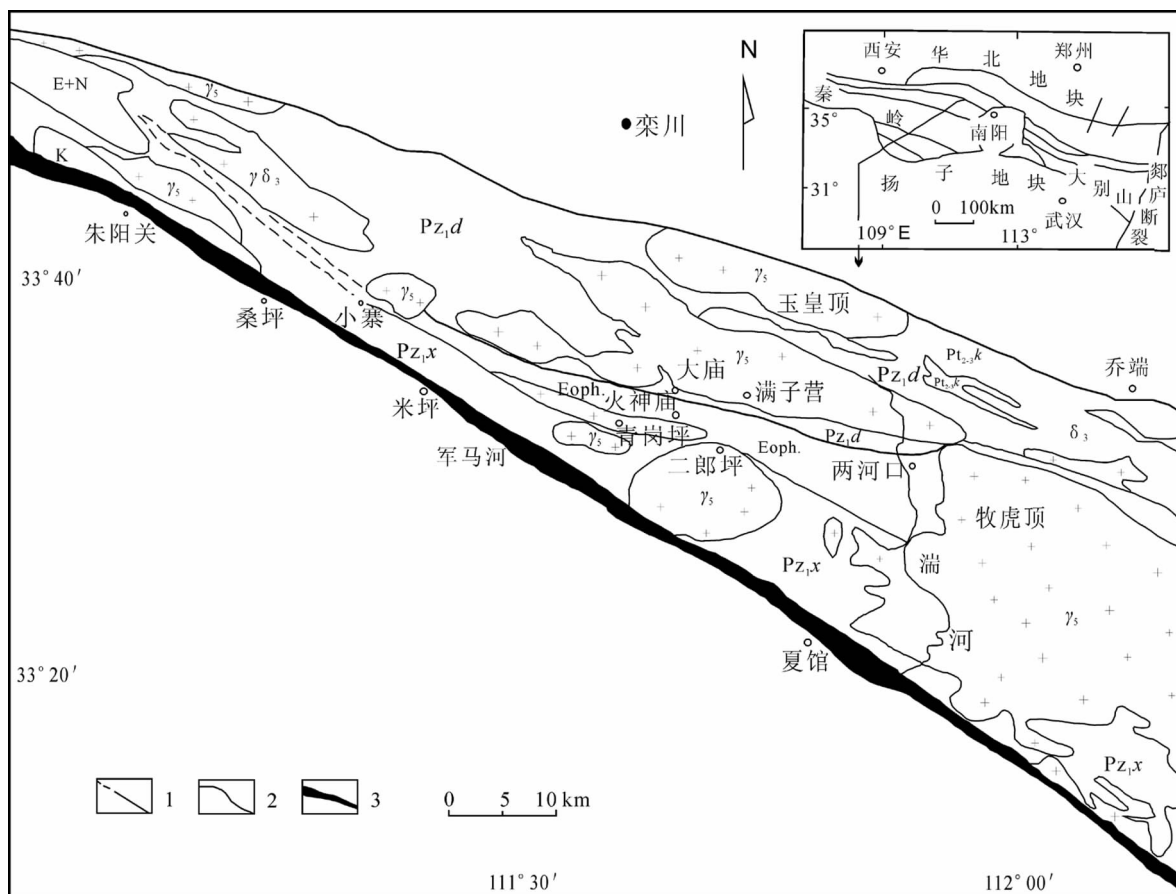


图2 北秦岭二郎坪地区地质分布简图^[5]

Fig. 2 Simplified map showing distribution of Erlangping complex in Erlangping area, North Qinling orogenic belt
E—古近系;N—新近系;K—白垩系;Pz_{1x}—小寨岩片;Pz_{1d}—大庙岩片;Pt_{2-3k}—宽坪岩群;Eoph—二郎坪蛇绿岩片;
̳_s—燕山期花岗岩;̳̳_s—加里东期花岗闪长岩;̳_s—加里东期石英闪长岩;1—断层;2—地质界线;3—韧性剪切带

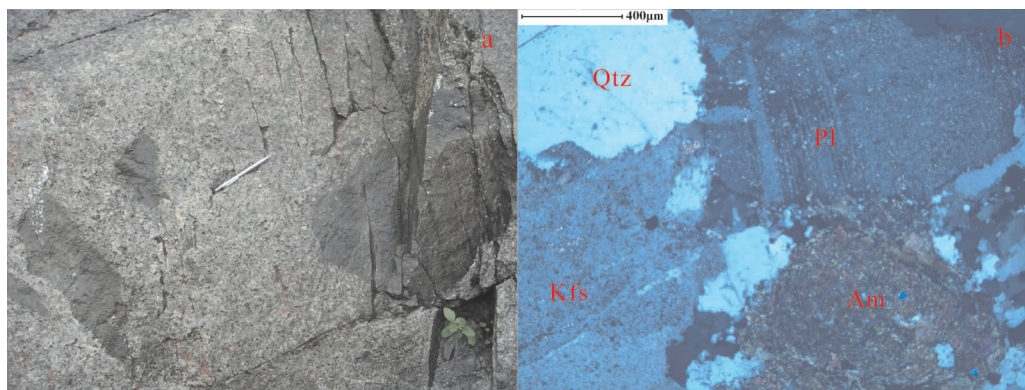


图 3 青岗坪花岗闪长岩野外和显微镜下照片

Fig. 3 Field photograph and microphotograph of Qinggangping granodiorite, western Henan

Qtz—石英;Pl—斜长石;Kfs—钾长石;Am—角闪石

锆石进行透射光、反射光和阴极发光(CL)照相,以便在进行锆石的 U-Pb 同位素测定时作为分析部位选取和测定完成后进行数据解释的依据。将 Geo-Las200M 型 193nm ArF 准分子激光器与 ICP-MS 仪器连接。ICP-MS 为美国 Agilent 公司生产的 Agilent7500a。锆石 U-Pb 同位素测定采用标准锆石 91500 作为外标标准物质,外标校正方法为每隔 5 个分析样品测一次标准,保证标准和样品的仪器条件完全一致。

激光采样方式为单点剥蚀。每个分析点的气体背景采集时间为 20s,信号采集时间为 40s。数据处理采用 GLITTER(ver 4.0)程序,年龄计算以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值分馏校正。样品的谐和图、年龄加权平均值计算及图的绘制均采用 Isoplot(ver 2.49)^[6]。元素浓度计算采用 NIST610 为外标,Si 为内标。在样品分析过程中,获得标样 91500 和 GJ-1 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分析结果为 $(1064.1 \pm 3.2)\text{Ma}$ ($n=16, 2\sigma$)、 $(603.1 \pm 3.0)\text{Ma}$ ($n=14, 2\sigma$),与对应的年龄推荐值在误差范围内完全一致^[7]。

2.4 锆石 Hf 同位素分析

锆石原位 Hf 同位素测定在配备 Geolas-193 型紫外激光剥蚀系统(LA)的 Nu Plasma HR(Wrexham, UK)多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS)仪上完成。激光剥蚀的脉冲频率为 10Hz,激光束直径为 $32\mu\text{m}$,激光束的能量密度为 $10\text{J}/\text{cm}^2$ 。 ^{176}Lu 和 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的同质异位素干扰通过监测 ^{175}Lu 和 ^{172}Yb 信号强度,采用 $^{175}\text{Lu}/^{176}\text{Lu}=0.02655$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=0.5886$ ^[8]进行校正。用标准锆石 91500、GJ-1 与

锆石样品交叉分析对仪器漂移进行外部监控。在本研究分析过程中,获得标准锆石样品 91500 和 GJ-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.282295 ± 0.000027 ($n=14, 2\sigma$), $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282734 \pm 0.000015$ ($n=16, 2\sigma$),在误差范围内与参考文献[9]的结果一致。计算 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值时,球粒陨石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282772, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.0332^[10]。单阶段 Hf 模式年龄(T_{DM1})计算时,亏损地幔的值采用 Vervoort 等^[11]的结果;两阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})计算时,下地壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.022^[12]。

3 分析结果

3.1 主量、微量和稀土元素

对研究区花岗闪长岩样品的主量、微量和稀土元素的分析结果见表 1,其中编号为 09Q 的样品的数据引自参考文献[13-14]。

花岗闪长岩的 SiO_2 含量较高($66.84\% \sim 71.57\%$), $\text{TiO}_2=0.16\% \sim 0.29\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=14.10\% \sim 16.80\%$, 铝饱和指数 $A/\text{CNK}=0.80 \sim 1.08$, 属于弱过铝质—过铝质岩。岩石的 $\text{CaO}=2.33\% \sim 4.51\%$, $\text{Na}_2\text{O}=3.38\% \sim 4.78\%$, $\text{K}_2\text{O}=1.99\% \sim 3.40\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值介于 1.10~2.40 之间。岩石具有相对低的 TFe_2O_3 值($2.50\% \sim 3.60\%$)和 MgO 值($0.82\% \sim 1.17\%$), $\text{Mg}^\#$ 值介于 42.4~46.3 之间,平均为 44。

该花岗闪长岩稀土元素总量为 $86 \times 10^{-6} \sim 197 \times 10^{-6}$ 。在球粒陨石标准化稀土元素配分图解(图 4-a)上,岩石轻重稀土元素分异明显($(\text{La}/\text{Yb})_N=12.4 \sim 23.3$),富集轻稀土元素,而重稀土元素相对平坦

表 1 豫西青岗坪花岗闪长岩主量、微量和稀土元素组成

Table 1 Major elements, trace elements and REE compositions of Qinggangping granodiorite from western Henan Province

样号	09Q-1	09Q-2	09Q-3	09Q-4	09Q-5	09Q-6	09Q-7	09Q-8	09Q-9	09Q-10	09Q-11	09Q-12	09Q-13	09RLP-3	09RLP-3R
SiO ₂	68.28	69.15	66.97	66.84	71.37	71.57	67.38	70.15	68.96	68.76	68.65	69.53	66.87	67.44	67.48
TiO ₂	0.29	0.27	0.23	0.23	0.26	0.24	0.25	0.22	0.16	0.25	0.26	0.21	0.24	0.24	0.23
Al ₂ O ₃	15.80	14.70	16.10	14.10	14.10	14.10	16.80	15.40	16.10	15.60	15.60	15.00	16.70	14.80	14.90
TF ₂ O ₃	2.90	2.70	3.00	2.70	2.80	2.50	2.80	2.60	2.50	3.60	3.60	2.60	3.30	2.70	2.70
MnO	0.10	0.10	0.08	0.16	0.10	0.07	0.09	0.09	0.08	0.11	0.11	0.09	0.11	0.13	0.13
MgO	0.97	1.00	0.96	0.98	0.94	0.90	0.88	0.94	0.82	1.17	1.16	0.82	1.05	0.95	0.96
CaO	3.27	2.96	2.95	4.51	2.90	2.33	3.31	2.78	2.94	2.95	2.94	3.01	3.48	4.14	4.13
Na ₂ O	4.78	3.79	3.62	4.08	3.45	4.23	4.36	4.58	4.31	4.12	4.15	3.38	4.13	3.77	3.68
K ₂ O	1.99	2.74	3.40	2.45	2.63	2.28	3.05	2.03	2.89	2.34	2.35	3.04	2.71	2.73	2.72
P ₂ O ₅	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09	0.08	0.08	0.12	0.12	0.09	0.11	0.09	0.10
LOI	1.41	2.08	2.08	3.52	1.06	1.69	1.22	1.50	1.39	0.62	0.62	1.81	0.93	2.61	2.61
TOTAL	99.90	99.60	99.50	99.60	99.80	100.00	100.20	100.40	100.20	99.70	99.60	99.60	99.60	99.60	99.60
A/CNK	0.99	1.01	1.08	0.80	1.02	1.03	1.02	1.04	1.06	1.05	1.04	1.04	0.95	0.89	0.90
Na/K	2.4	1.4	1.1	1.7	1.3	1.9	1.4	2.3	1.5	1.8	1.8	1.1	1.5	1.4	1.4
δ	1.81	1.63	2.06	1.79	1.31	1.48	2.25	1.60	1.99	1.62	1.64	1.55	1.96	1.72	1.67
Mg [#]	43.2	46.1	42.7	46.3	43.6	45.3	42.6	46.0	43.7	43.0	42.8	42.4	42.7	45.1	45.4
δ Eu	1.1	1.1	1.2	1.2	1.1	1.3	1.1	1.3	1.1	1.0	1.0	1.2	1.0	1.0	1.2
Ba	1363	1460	1954	2211	1509	2132	1791	1288	1703	1503	1533	1575	1527	2344	2343
Rb	70.2	87.7	111.6	75.6	76.9	76.0	90.0	69.7	81.6	68.5	69.8	78.5	73.2	89.6	89.0
Sr	562	374	349	423	508	457	613	468	527	420	428	327	419	449	452
Y	15.2	14.3	14.4	13.0	13.9	13.1	17.2	12.3	14.9	15.2	15.7	12.3	15.1	15.6	15.0
Cr	3.78	9.39	25.94	9.55	2.55	1.71	8.53	4.04	2.16	2.06	2.07	1.85	1.98	2.10	5.19
Zr	107.9	116.8	120.3	110.4	111.6	105.4	125.9	101.6	103.8	153.1	153.4	109.2	132.6	102.0	97.5
Ni	1.9	2.6	5.2	3.6	1.5	1.4	2.5	1.8	1.3	1.8	1.8	1.7	1.8	1.6	3.1
Nb	5.36	4.48	4.56	4.25	4.57	4.23	5.95	3.83	4.73	4.43	4.60	4.52	4.81	5.08	4.98
Th	18.78	15.80	19.09	13.98	21.07	16.39	21.30	11.57	14.65	22.79	21.61	22.55	30.98	20.70	21.40
Hf	2.67	2.87	2.87	2.84	2.71	2.51	3.14	2.36	2.55	3.92	4.01	2.78	3.45	2.62	2.53
Ta	0.61	0.56	0.44	0.46	0.59	0.52	0.76	0.46	0.50	0.45	0.55	0.50	0.60	0.54	0.51
U	2.60	2.45	2.88	2.56	3.18	2.12	3.96	1.57	2.93	4.04	3.84	3.21	3.98	3.82	3.82
La	38.2	35.8	42.9	33.6	43.8	36.5	40.7	23.5	34.3	38.9	40.3	49.5	58.2	43.9	43.9
Ce	60.2	57.0	67.5	52.0	68.3	57.4	63.9	37.2	53.0	62.1	64.6	76.9	89.2	65.5	65.4
Pr	5.99	5.67	6.68	5.15	6.66	5.63	6.36	3.76	5.20	5.93	6.10	6.98	8.06	6.43	6.36
Nd	18.91	17.84	20.77	16.36	20.39	17.51	19.86	12.21	17.17	20.90	21.18	23.22	26.68	20.90	20.50
Sm	2.95	2.76	3.07	2.49	2.92	2.54	3.00	2.02	2.76	3.37	3.44	3.31	3.72	3.30	3.19
Eu	1.06	1.00	1.21	0.96	1.01	1.09	1.12	0.90	0.97	1.00	1.03	1.10	1.03	1.04	1.05
Gd	2.90	2.80	3.02	2.46	2.96	2.52	3.05	2.07	2.56	2.74	2.79	2.45	2.81	2.92	2.92
Tb	0.36	0.35	0.35	0.30	0.34	0.30	0.37	0.27	0.34	0.41	0.41	0.35	0.40	0.37	0.36
Dy	2.32	2.15	2.21	1.84	2.10	1.85	2.36	1.71	2.17	2.37	2.42	1.97	2.44	2.35	2.27
Ho	0.49	0.46	0.47	0.39	0.43	0.40	0.53	0.37	0.49	0.53	0.54	0.42	0.51	0.53	0.50
Er	1.44	1.35	1.35	1.17	1.29	1.17	1.60	1.08	1.44	1.59	1.62	1.27	1.57	1.54	1.49
Tm	0.24	0.22	0.22	0.19	0.21	0.20	0.27	0.18	0.24	0.25	0.26	0.20	0.25	0.25	0.25
Yb	1.81	1.68	1.63	1.50	1.59	1.50	2.10	1.36	1.75	1.88	1.96	1.52	1.94	1.88	1.82
Lu	0.29	0.27	0.27	0.26	0.26	0.24	0.35	0.23	0.29	0.31	0.32	0.25	0.32	0.32	0.30
Σ REE	137	129	151	118	152	128	145	86	122	142	147	169	197	151	150
Sr/Y	37.1	26.2	24.2	32.6	36.7	34.8	35.8	38.1	35.3	27.7	27.3	26.6	27.8	28.8	30.1
Nb/Ta	8.8	8.0	10.4	9.2	7.7	8.1	7.8	8.3	9.5	9.8	8.4	9.0	8.0	9.4	9.8
Cr/Ni	2.0	3.6	5.0	2.7	1.7	1.2	3.4	2.2	1.6	1.1	1.1	1.1	1.1	1.3	1.7
Rb/Sr	100.9	98.6	92.2	124.5	97.8	97.1	98.2	96.5	94.6	94.9	95.7	95.7	104.9	111.9	110.7
La/Yb	21.1	21.3	26.3	22.4	27.5	24.4	19.4	17.2	19.6	20.7	20.6	32.5	30.0	23.3	24.1
Yb/Lu	6.2	6.2	6.0	5.8	6.1	6.3	6.0	5.9	6.0	6.1	6.1	6.1	6.1	5.9	6.0
(Gd/Yb) _N	1.9	2.0	2.2	2.0	2.3	2.0	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.9	1.8	1.9	1.9
(La/Yb) _N	15.1	15.3	18.9	16.1	19.7	17.5	13.9	12.4	14.1	14.8	14.8	23.3	21.5	16.8	17.3

注:编号为 09Q 的样品测试数据均引自参考文献[13-14];氧化物含量单位为%,微量和稀土元素为 10⁻⁶

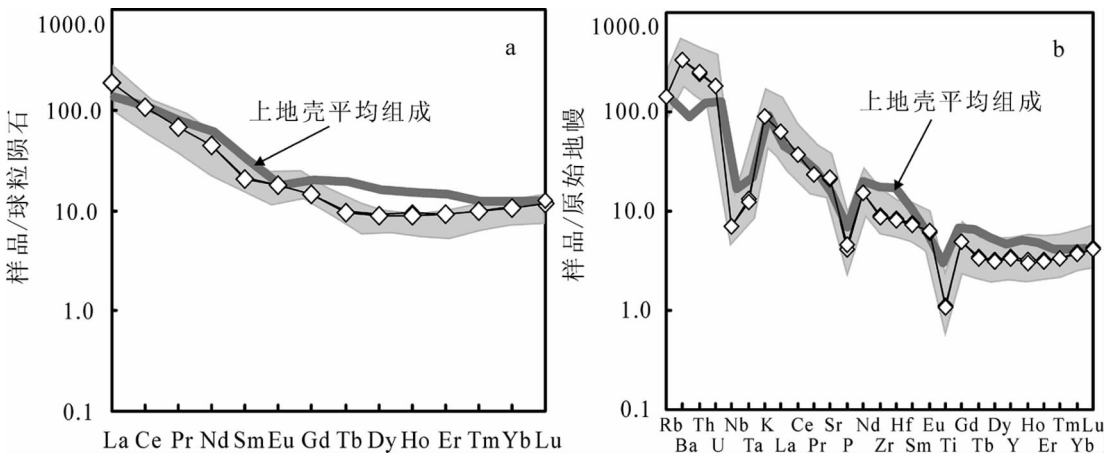


图 4 豫西青岗坪花岗闪长岩体球粒陨石标准化稀土元素配分图解(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)
(其中阴影部分的数据引自参考文献[13];球粒陨石和原始地幔标准化数据引自参考文献[16])
Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized trace element diagrams
of Qinggangping granodiorite in western Henan Province

((Gd/Yb)_N=1.7~2.3),且含量相对偏低。岩石具有弱的 Eu 负异常或正异常,Eu/Eu* 比值介于 0.97~1.34 之间。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 4-b)上,该花岗闪长岩明显富集 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素;岩石具有高的 Rb($68.5\times10^{-6}\sim111.6\times10^{-6}$)、Sr($327\times10^{-6}\sim613\times10^{-6}$)、Ba($1288\times10^{-6}\sim2344\times10^{-6}$)含量,而具有较低的 Y($12.3\times10^{-6}\sim17.2\times10^{-6}$)、Yb($1.4\times10^{-6}\sim2.1\times10^{-6}$)含量,这表明其源区残留有一定比例的角闪石和石榴子石。同时岩石具有较高的 Sr/Y 比值,为 24~38。上述地球化学特征与显生宙的埃达克岩类似。此外,岩石具有较低的 Cr、Ni 含量,分别为 $Cr=1.7\times10^{-6}\sim9.6\times10^{-6}$, $Ni=1.3\times10^{-6}\sim5.2\times10^{-6}$,Cr/Ni 比值为 1.1~5.0;Nb 含量为 $3.83\times10^{-6}\sim5.95\times10^{-6}$,Nb/Ta 比值为 7.7~10.4。这些地球化学特征与大陆上地壳非常接近^[15]。

3.2 锆石 U-Pb 同位素测定

花岗闪长岩中的锆石自形程度较好,晶体柱面和锥面都很发育,呈无色透明状,在透射光下可见锆石中包裹少量磷灰石等矿物。锆石粒径一般在 100~200 μm 之间,长宽比为 3:1~2:1,在阴极发光图像中可以见到清晰的成分环带,核部环带较宽,为典型偏中性花岗质岩石中岩浆锆石的特征(图 5)。

对样品 RLP-3 中的 23 颗锆石进行了 U-Pb 同位素测试,测试结果见表 2。在 U-Pb 谐和图(图

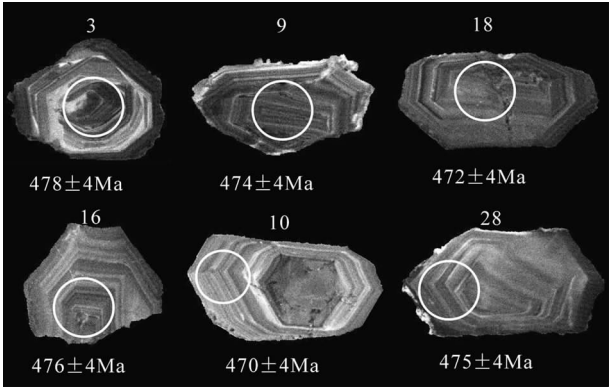


图 5 豫西青岗坪花岗闪长岩中锆石 CL 图像
(白色圈为激光剥蚀位置,其直径为 32 μm)
Fig. 5 Cathodoluminescence images of zircons
from Qinggangping granodiorite
in western Henan Province

6)上,所有的分析点均分布在谐和线附近,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $475.2\text{Ma}\pm2.7\text{Ma}$ (MSWD=0.50)。锆石的 Th、U 含量较高,Th、U 含量分别为 $141\times10^{-6}\sim851\times10^{-6}$, $275\times10^{-6}\sim1052\times10^{-6}$;Th/U 比值也较高,为 0.5~1.1,表明其为岩浆成因的锆石。因此,锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值 $475.2\text{Ma}\pm2.7\text{Ma}$ 应代表此花岗闪长岩的形成年龄。

3.3 锆石 Hf 同位素组成

对 19 粒锆石的 Hf 同位素分析结果见表 3。锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围为 0.282575~0.282662,每

表 2 豫西青岗坪花岗闪长岩样品 09RLP-03 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析数据

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of Qinggangping granodiorite (09RLP-03) from western Henan Province

编号	元素含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		Th/U	同 位 素 比 值				年 龄 /Ma							
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
2	540	830	0.7	0.05722	0.00104	0.60769	0.01009	0.07702	0.00064	504	28	475	4	469	4
3	810	751	1.1	0.05661	0.00103	0.59141	0.00983	0.07576	0.00063	470	30	477	4	478	4
5	141	275	0.5	0.05639	0.00091	0.59437	0.00855	0.07646	0.00061	523	51	489	9	482	4
6	338	557	0.6	0.05591	0.00095	0.71098	0.01098	0.09223	0.00076	527	31	481	5	471	4
7	346	610	0.6	0.05661	0.00082	0.60031	0.00769	0.07691	0.00061	512	30	481	5	474	4
8	216	440	0.5	0.07035	0.00105	0.74700	0.00988	0.07700	0.00063	492	36	479	6	476	4
9	418	623	0.7	0.05695	0.00093	0.59735	0.00882	0.07607	0.00062	478	31	475	5	474	4
10	298	511	0.6	0.05648	0.00076	0.59893	0.00702	0.07691	0.00061	508	32	477	5	470	4
11	326	480	0.7	0.06026	0.00084	0.58807	0.00711	0.07077	0.00056	446	48	491	8	500	4
12	489	737	0.7	0.05782	0.00136	0.61883	0.01374	0.07761	0.00072	495	30	477	4	472	4
13	357	441	0.8	0.05792	0.00081	0.60588	0.00737	0.07585	0.00060	500	39	482	6	478	4
14	301	424	0.7	0.05753	0.00080	0.60578	0.00741	0.07635	0.00061	552	33	486	5	472	4
15	814	987	0.8	0.05703	0.00094	0.60211	0.00900	0.07656	0.00063	465	32	470	5	471	4
16	449	649	0.7	0.05666	0.00079	0.59667	0.00723	0.07635	0.00061	515	38	483	6	476	4
17	350	520	0.7	0.05744	0.00085	0.59971	0.00791	0.07570	0.00061	495	33	474	5	470	4
18	308	556	0.6	0.05585	0.00124	0.62229	0.01296	0.08078	0.00073	507	31	478	5	472	4
20	590	541	1.1	0.05859	0.00091	0.61347	0.00853	0.07591	0.00062	547	38	479	6	265	4
21	354	621	0.6	0.05633	0.00081	0.58843	0.00755	0.07573	0.00061	508	32	482	5	476	4
23	404	453	0.9	0.05712	0.00085	0.59533	0.00793	0.07556	0.00062	394	40	484	6	503	4
24	494	621	0.8	0.05741	0.00083	0.60130	0.00780	0.07593	0.00062	476	40	472	6	471	4
27	851	1052	0.8	0.05742	0.00084	0.60708	0.00790	0.07663	0.00063	491	27	449	4	440	3
28	339	521	0.7	0.05726	0.00080	0.64801	0.00800	0.08203	0.00067	467	36	474	5	475	4
30	476	619	0.8	0.05692	0.00083	0.63052	0.00830	0.08028	0.00067	476	32	477	5	478	4

表 3 豫西青岗坪花岗闪长岩样品 09RLP-03 锆石 Lu-Hf 同位素组成

Table 3 Zircon Lu-Hf isotope compositions of Qinggangping granodiorite (09RLP-03) from western Henan Province												
样品号	年龄/Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	2σ	T _{DM1} /Ma	T _{DM2} /Ma	f _{Lu/Hf}	
1	473	0.065081	0.002847	0.282580	0.000068	-6.8	2.7	2.4	1001	1608	-0.91	
2	473	0.067781	0.002984	0.282584	0.000032	-6.6	2.8	1.1	999	1599	-0.91	
3	473	0.150130	0.006394	0.282632	0.000060	-5.0	3.5	2.1	1025	1542	-0.81	
4	473	0.139950	0.005981	0.282587	0.000068	-6.5	2.0	2.4	1086	1348	-0.82	
7	473	0.056330	0.002533	0.282616	0.000034	-5.5	4.1	1.2	940	1484	-0.92	
9	473	0.059465	0.002690	0.282662	0.000030	-3.9	5.7	1.1	876	1342	-0.92	
10	473	0.045636	0.002095	0.282610	0.000038	-5.7	4.0	1.3	937	1491	-0.94	
13	473	0.032885	0.001501	0.282634	0.000032	-4.9	5.1	1.1	888	1398	-0.95	
14	473	0.038602	0.001796	0.282637	0.000026	-4.8	5.1	0.9	891	1396	-0.95	
15	473	0.042404	0.001923	0.282646	0.000038	-4.5	5.4	1.3	881	1371	-0.94	
16	473	0.053847	0.002434	0.282613	0.000026	-5.6	4.0	0.9	941	1491	-0.93	
17	473	0.037675	0.001760	0.282650	0.000026	-4.3	5.5	0.9	871	1354	-0.95	
19	473	0.041950	0.001939	0.282638	0.000026	-4.7	5.1	0.9	893	1397	-0.94	
20	473	0.042612	0.001932	0.282617	0.000028	-5.5	4.3	1.0	923	1464	-0.94	
21	473	0.043528	0.001976	0.282623	0.000048	-5.3	4.5	1.7	915	1446	-0.94	
22	473	0.045668	0.002103	0.282575	0.000028	-7.0	2.8	1.0	988	1602	-0.94	
23	473	0.056060	0.002678	0.282576	0.000056	-6.9	2.6	2.0	1002	1616	-0.92	
24	473	0.057319	0.002617	0.282575	0.000032	-7.0	2.6	1.1	1002	1617	-0.92	
27	473	0.035017	0.001653	0.282620	0.000032	-5.4	4.5	1.1	911	1447	-0.95	

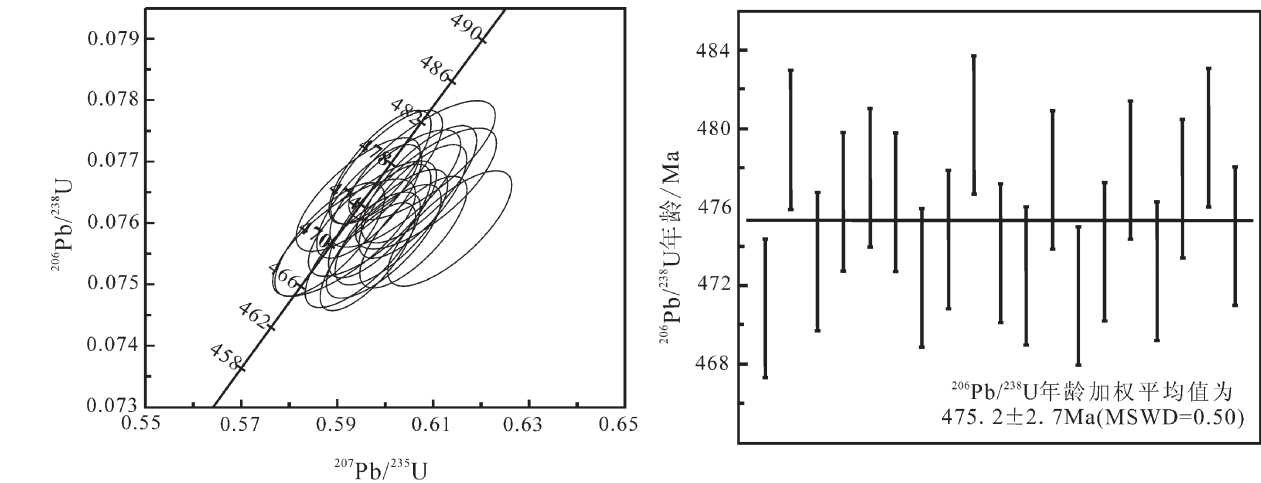


图 6 豫西青岗坪花岗闪长岩锆石 U-Pb 谐和图与 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄图
Fig. 6 Concordia diagram of LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope and age diagram of ²⁰⁶Pb/²³⁸U for Qinggangping granodiorite from western Henan Province

个分析锆石的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄计算对应的 ε_{Hf}(t)值的变化均为正值,范围为 2.0~5.7。由于该花岗闪长岩为酸性侵入岩,因此应采用二阶段模式年龄来反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间。由表3 可见,豫西青岗坪花岗闪长岩中锆石的两阶段 Hf 模式年

龄为 1342~1617Ma。
4 讨论与结论
4.1 对二郎坪岩群形成年龄的限定
为了确定二郎坪岩群的形成时间,最早王学仁

表 4 二郎坪岩群及其中侵入体年龄的限定
Table 4 Constraints on isotopic ages of Erlangping Rock Group

类型	地区	岩性	分析方法	年龄/Ma	年龄意义	来源
二郎坪蛇绿岩年龄	清水	英安岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	447±8	形成年龄	[21]
		英安岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	448±8	形成年龄	[21]
		枕状熔岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	443±2	形成年龄	[21]
	眉县	玄武岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	472±11	形成年龄	[20]
	西峡	枕状熔岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	403~467±7	形成年龄	[19]
		枕状熔岩	Rb-Sr 全岩等时线	402±22	变质年龄	[22]
		硅质岩	放射虫	寒武纪—奥陶纪	形成年龄	[17]
		硅质岩	放射虫	寒武纪—奥陶纪	形成年龄	[18]
		枕状熔岩	Sm-Nd 全岩等时线	943±74	形成年龄	[23]
侵入体	西河庄	斜长花岗岩	单颗锆石蒸发法	480±7	形成年龄	[5]
		花岗闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	461±1	形成年龄	[13]
	青岗坪	花岗闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	475±3	形成年龄	本文

等^[17]和裴放等^[18]在玄武岩顶部的硅质岩中发现了早中奥陶世牙形石、放射虫,认为其形成时代为早古生代。由于含放射虫硅质岩略晚于洋壳的形成时间,陆松年等^[19]、闫全人^[20]等尝试利用 SHRIMP 或 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法来确定二郎坪蛇绿岩的形成年龄,获得的年龄变化范围较大,为 443~472Ma(表 4)。此外,孙勇等^[5]利用侵入二郎坪火山岩的斜长花岗岩年龄来限定二郎坪岩群构造侵位的最小年龄,测得该斜长花岗岩的单颗粒锆石蒸发年龄为 480 Ma± 7Ma。本文选取侵入二郎坪蛇绿岩的一个花岗闪长岩岩体,利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 方法测得该岩石的侵位年龄为 475.2Ma±2.7Ma。

可是,对比已有的二郎坪岩群及侵入其中的花岗质岩体的同位素年龄数据不难发现(表 4),这些花岗质侵入体的年龄明显大于其围岩二郎坪岩群火山岩的形成年龄。虽然张宗清等^[23]利用 Sm-Nd 等时线法获得二郎坪枕状熔岩的年龄为 943Ma±74 Ma,可是该年龄数据与利用锆石 U-Pb 法所获得的年龄数据差别太大,需要进一步验证其准确性。因此,到目前为止,仍然缺少直接同位素年龄数据来限定二郎坪岩群的形成年龄。

4.2 岩石成因和形成环境

如前所述,豫西青岗坪花岗闪长岩富集大离子亲石元素、亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素,这些特

征类似于大陆地壳或成熟岛弧地壳的岩石。此外,岩石具有高的 Sr、Ba 含量($Sr=327\times10^{-6}\sim613\times10^{-6}$, $Ba=1288\times10^{-6}\sim2344\times10^{-6}$),无明显的 Eu 异常($\delta Eu=0.97\sim1.34$),上述特征表明在该花岗闪长岩的形成过程中,斜长石已经发生部分熔融作用进入到岩浆中。岩石亏损重稀土元素和 Y,其 $Yb_N=4\sim7$,并且具有相对平坦的重稀土元素分配模式,表明岩浆源区的主要残留矿物为石榴子石和角闪石。故豫西青岗坪花岗闪长岩的地球化学特征类似于显生宙的埃达克质岩石和太古宙的 TTG 质岩石。其源区残留相中包含有石榴子石而无斜长石,根据实验资料,这种岩浆的产生深度大于 50km^[24]。

近年来,对于埃达克质岩石/埃达克岩成因的主流观点有:①俯冲洋壳板片的部分熔融^[25];②来自地幔楔的玄武质岩浆底侵导致下地壳增厚并发生熔融^[26];③拆沉下地壳^[27];④增厚下地壳^[28]的部分熔融。

豫西青岗坪花岗闪长岩具有比较低的 TFe_2O_3 (2.50%~3.60%)和 MgO (0.82%~1.17%)含量; $Mg^\#$ 值介于 42.4~46.3 之间,平均值为 44,也相对较低,类似于典型的大陆地壳部分熔融作用的花岗岩。实验岩石学表明,典型 MORB 的 $Mg^\#$ 为 60,而下地壳部分熔融产生的岩浆的 $Mg^\#$ 一般小于 45^[24]。如果该花岗闪长岩形成于岛弧环境,那么由于板片熔融形成的埃达克质熔体在上升过程中会受到上覆地幔楔

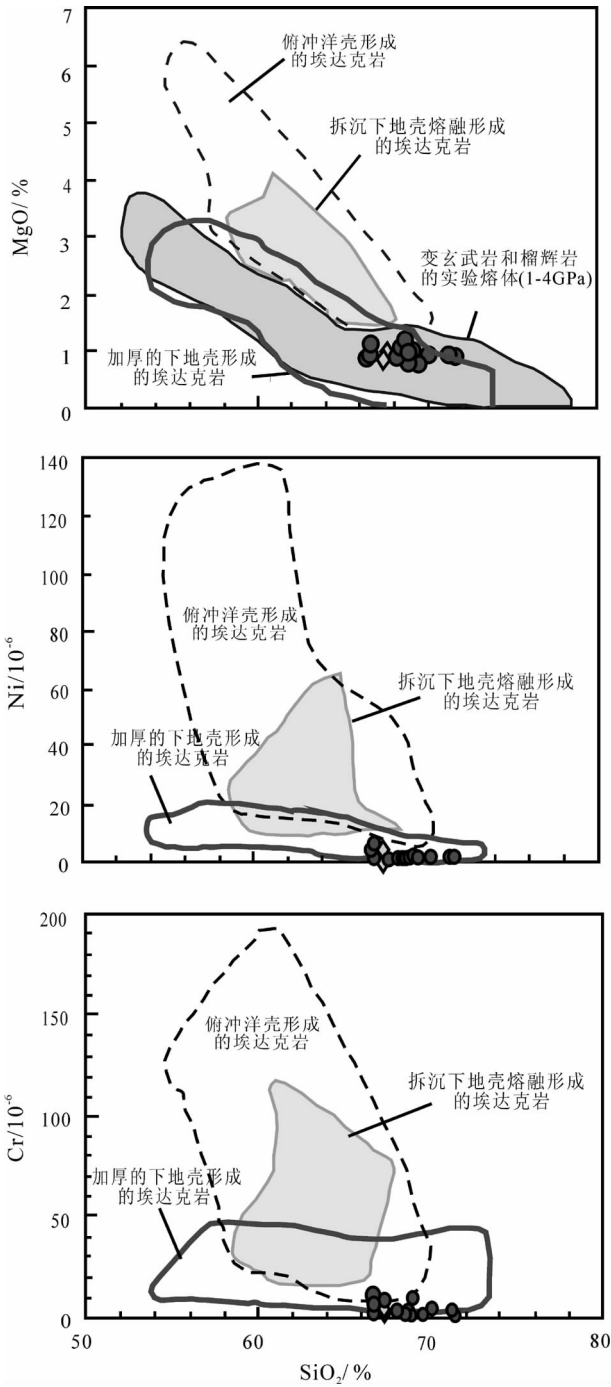


图 7 豫西青岗坪花岗闪长岩 MgO、Ni 和 Cr 对 SiO₂ 图

Fig. 7 Plots of MgO, Ni and Cr versus SiO₂ for Qinggangping granodiorite from western Henan Province

的交代混染^[29],岩石源区应该有明显的地幔物质参与。同样,如果该花岗闪长岩来自于拆沉下地壳的部分熔融作用,那么要求拆沉的下地壳进入软流圈地幔,拆沉下地壳发生部分熔融作用产生的埃达克质

熔体和周围的软流圈地幔发生交代混染作用,从而势必导致其 $Mg^\#$ 升高^[27]。此外,岩石具有较低的 Cr ($Cr=1.71\times10^{-6}\sim9.55\times10^{-6}$)、Ni ($Ni=1.3\times10^{-6}\sim5.2\times10^{-6}$) (图 7) 含量,也可以排除上述推论。因此认为,青岗坪花岗闪长岩应形成于加厚的下地壳物质的部分熔融。

由于在下地壳部分熔融过程中熔体的 La/Yb 比值会逐渐增大,而 Nb/La 比值会减小和 $Mg^\#$ 会逐渐降低。根据这一基本原理,可用 $Mg^\#$ 和 Nb/La 比值对 La/Yb 图解来判断这些花岗闪长岩是否由下地壳物质的部分熔融形成的。图 8 显示,岩石中的 $Mg^\#$ 和 Nb/La 比值随着 La/Yb 的增大而减小。其中 La/Yb 的增加可能是随着地壳熔融深度的增大,源区残留石榴子石含量增加的缘故。 $Mg^\#$ 的降低可归因于熔融过程中镁铁质矿物减少,而 Nb/La 随 La/Yb 的增大而减小很可能是残留金红石的存在和含量增加的结果^[30]。

一般而言,地壳增厚归因于大陆板块汇聚过程中的地壳缩短或大陆壳的俯冲叠置,现今的喜马拉雅造山带是最典型的实证。在北秦岭地区,尤其是西峡地区发现的大量具有陆壳性质的高压—超高压变质岩便是陆壳俯冲叠置最直接的证据^[31-32]。而豫西青岗坪花岗闪长岩是这一俯冲叠置下地壳部分熔融的产物。此外,此时期还形成诸如秦岭杂岩中淡色花岗岩脉体(500Ma)、漂池岩体南侧具有 S 型特点的变形花岗岩脉体(497Ma)等^[2]。

锆石的 U-Pb 年龄代表的是锆石结晶或变质作用的时间,锆石的 Hf 同位素模式年龄则代表岩石的原岩物质从亏损地幔提取的时间^[33]。由于豫西青岗坪花岗闪长岩为酸性侵入岩,因此应采用二阶段模式年龄来反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间。如图 9 所示,该花岗闪长岩中锆石的 Hf 两阶段模式年龄为 1342~1617Ma,远大于岩石的形成年龄(475Ma),表明该花岗岩原岩所代表的下地壳具有较长的滞留时间,滞留时间长达 900~1200Ma。

4.3 结 论

(1) 豫西青岗坪花岗闪长岩的形成年龄为 $475.2Ma\pm2.7Ma$ 。该年龄可用来限定二郎坪岩群构造侵位的最小年龄。

(2) 豫西青岗坪花岗闪长岩具有较低的 MgO、Fe₂O₃、Cr、Ni 含量和相对较低的 $Mg^\#$ 值。这些地球化学特征表明,豫西青岗坪花岗闪长岩应为加厚

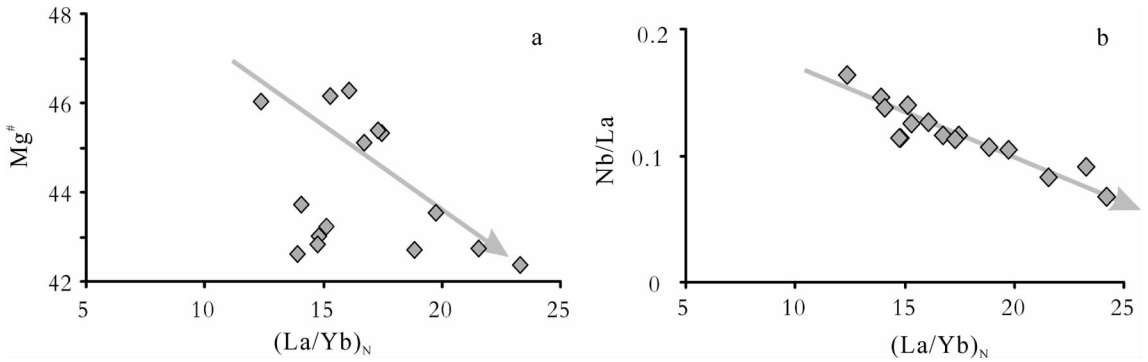


图 8 $Mg^\#$ 、Nb/La 对 La/Yb 图

Fig. 8 Plots of $Mg^\#$ and Nb/La versus La/Yb for Qinggangping granodiorite from western Henan Province

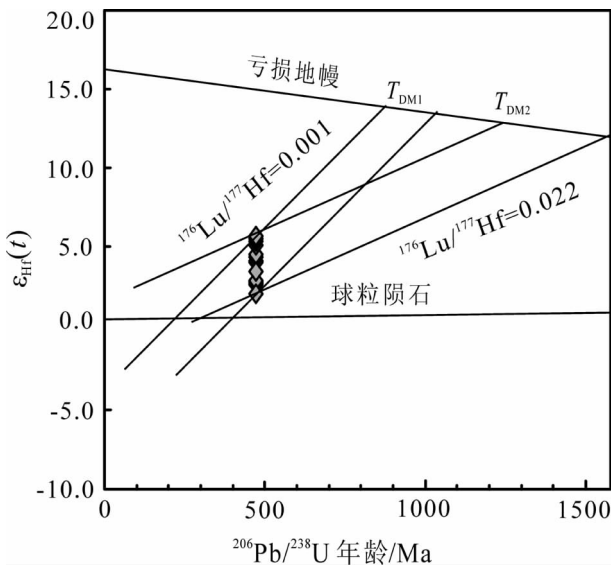


图 9 豫西青岗坪花岗闪长岩锆石 Hf 同位素组成

Fig. 9 Zircon Hf isotopes of Qinggangping granodiorite from western Henan Province

下地壳部分熔融的产物。结合已有的资料,在古生代早期(520~480Ma)北秦岭地区发生了较大规模的陆壳汇聚碰撞,导致下地壳的缩短、叠置。豫西青岗坪花岗闪长岩便是这一俯冲叠置下地壳部分熔融的产物。

致谢: 样品测试过程中得到西北大学大陆动力学国家重点实验室工作人员的帮助,评审专家对本文提出宝贵的修改意见,在此一并致谢。

参考文献

[1]张国伟,张本仁,袁学诚,等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 421-581.

[2]王涛,王晓霞,田伟,等. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示[J]. 中国科学(D 辑), 2009, 39(7): 949-971.

[3]金守文. 宽坪群和陶湾群的地层划分及时代问题[J]. 中南地质科技情报, 1976, (1): 1-10

[4]河南省地质矿产局. 河南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 104-111.

[5]孙勇, 卢欣祥, 韩松, 等. 北秦岭早古生代二郎坪蛇绿岩片的组成和地球化学[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26: 49-55.

[6]Ludwig K R. Isoplot 3.0—A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Spec. Pub., 2003, 4: 1-70.

[7]Wiedenbeck M, Alle P, Griffin W L, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. Geostand Newslett, 1995, 19: 1-23.

[8]Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, et al. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections[J]. J. Anal. Atom. Spectrom., 2002, 17: 1567-1574.

[9]Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology[J]. Chem. Geol., 2006, 234: 105-126.

[10]Blichert-Toft J, Albarede F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1997, 148: 243-258.

[11]Vervoort J D, Blichert-Toft J. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1999, 63: 533-556.

[12]Amelin Y, Lee D C, Halliday A N. Early-Middle Archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2000, 64: 4205-4225.

[13]郭彩莲. 东秦岭二郎坪地区西庄河花岗岩体的成因及形成机制[D]. 西北大学地质学系硕士学位论文, 2010.

[14]郭彩莲, 陈丹玲. 豫西二郎坪地区 O 型埃达克岩的厘定及其地质意义[J]. 地质学报, 2011, 85(10): 1-9.

[15]Rudnick R L, Gao S. 3.01-Composition of the Continental Crust

- [J]. Elsevier, 2003, 3: 1–64.
- [16] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins, Geol. Soc. Spic., 1989, 42: 313–345.
- [17] 王学仁, 华洪, 孙勇. 河南西峡湾潭地区二郎坪群微体化石研究[J]. 西北大学学报, 1995, 25(4): 353–358.
- [18] 裴放, 张元国, 刘长乐. 河南北秦岭晚古生代孢子化石的发现及其地质意义[J]. 中国区域地质, 1995, (2): 112–117.
- [19] 陆松年, 李怀昆, 陈志宏, 等. 秦岭中—新元古代地质演化及对 Rodinia 超级大陆事件的响应[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1–194.
- [20] 闫全人, 王宗起, 陈隽璐, 等. 北秦岭斜峪关群和草滩沟群火山岩成因的地球化学和同位素约束、SHRIMP 年代及其意义[J]. 地质学报, 2007, 81(4): 488–500.
- [21] Yunpeng Dong, Guowei Zhang, Franz Neubauer, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. J. Asian Earth Sci., 2011, 41: 213–237.
- [22] Sun W D, Li S G, Chen Y D, et al. Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, central China: constraints on the evolution of the Qinling–Dabie orogenic belt[J]. J. Geol., 2002, 110: 457–468.
- [23] 张宗清, 刘敦一, 付国民. 东秦岭北部变质地层同位素年代研究[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1–191.
- [24] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 Ga[J]. Chem. Geol., 1999, 160: 335–356.
- [25] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young Earth Planet[J]. Sci. Lett., 1994, 121: 227–244.
- [26] Peacock S M, Rushmer T, Thompson A B. Partial melting of subducting oceanic crust[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1994, 121: 227–244.
- [27] Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. Nature, 2004, 432: 92–897.
- [28] Wang Q, Frank McDermott, Xu J F, et al. Cenezoic K-rich adakitic volcanic rock in the Hohxil area, northern Tibet: Lower crustal melting in an intracontinental setting[J]. Geology, 2005, 33(6): 465–468.
- [29] Yagodinski G M, Kay R W, Volynets O N, et al. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: implications for slab melting and processes in the mantle wedge[J]. Geol Soc Am Bull, 1995, 107: 505–519.
- [30] 熊小林, 刘星成, 朱志敏, 等. 华北埃达克质岩与克拉通破坏: 实验岩石学和地球化学依据[J]. 中国科学(D 辑), 2011, 41(5): 654–667.
- [31] 刘良, 陈丹玲, 王超, 等. 阿尔金、柴北缘与北秦岭高压—超高压岩石年代学研究进展及其构造地质意义[J]. 西北大学学报, 2009, 39(3): 472–479.
- [32] 陈丹玲, 刘良. 北秦岭榴辉岩及相关岩石年代学的进一步确定及其对板片俯冲属性的约束[J]. 地学前缘, 2011, 18(2): 158–169.
- [33] 郑永飞, 陈仁旭, 张少兵, 等. 大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石 Lu–Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 317–330.
- ① 河南省区调队. 西峡北部地质图(1:5 万). 1973.
- ② 河南省区调队. 河南省地质图(1:50 万). 1981.