

doi: 10.12029/gc20170508

张昕, 吴才来, 陈红杰. 2017. 秦岭南召岩体中花岗岩脉的锆石 U-Pb 定年: 对燕山期构造环境的约束[J]. 中国地质, 44(5): 938-958.

Zhang Xin, Wu Cailai, Chen Hongjie. 2017. The U-Pb zircon dating of the granite dike in Nanzhao pluton and its constraints on tectonic setting in Yanshanian[J]. Geology in China, 44(5): 938-958(in Chinese with English abstract).

秦岭南召岩体中花岗岩脉的锆石 U-Pb 定年: 对燕山期构造环境的约束

张昕 吴才来 陈红杰

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 通常认为, 花岗岩体中的花岗岩脉与岩体是同一次岩浆活动的产物, 是深部演化的岩浆沿着岩体的裂缝侵入后冷凝形成的。南召岩体位于北秦岭东部, 近年来在岩体中发现一条宽约 5 m 的花岗岩脉。岩脉呈紫红色, 斑状结构, 斑晶为石英。LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年得出该岩脉的形成时间为 (119.6 ± 0.7) Ma, 与岩体的年龄 (452.3 ± 6.2) Ma 相差很大。锆石 Hf 同位素测试结果表明, 岩脉的源岩可能主要是新生地壳, 结合地球化学研究分析得出该岩脉呈现 I 型花岗岩的特性。该岩脉的年龄、Hf 同位素和地球化学特征同邻近的伏牛山岩体相近, 推测岩脉的源岩可能和伏牛山岩体的源岩相同。根据研究结果及区域地质构造分析, 认为燕山期由于太平洋板块的俯冲作用和陆内拉张作用, 导致扬子板块及华北板块沿秦岭造山带形成一系列断裂。岩浆沿着断裂上侵, 大部分形成了伏牛山岩体, 小部分沿着周围的裂隙侵入形成岩脉, 并在侵位的过程中与寄主岩发生物质交换。

关键词: 花岗岩脉, 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素分析; 岩石成因; 南召

中图分类号: P588.12; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2017)05-0938-21

The U-Pb zircon dating of the granite dike in Nanzhao pluton and its constraints on tectonic setting in Yanshanian

ZHANG Xin, WU Cailai, CHEN Hongjie

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: It is usually believed that plutons and dikes resulted from the same magmatic activity. Deeply evolved magma invaded into the pluton from cracks. Nanzhao pluton is located in the east of North Qinling Mountain, in which a 5m wide granite dike was discovered recently. The dike has purple, porphyritic texture and the phenocrysts are quartz. The U-Pb zircon LA-MC-ICP-MS dating shows the age of the dike is (119.1 ± 0.8) Ma, which is quite different from the age of the pluton (452.3 ± 6.2) Ma. The Hf isotope analysis shows that the source magma maybe a mixture of juvenile crust. This result and the geochemical study indicate that

收稿日期: 2017-03-23; 改回日期: 2017-08-25

基金项目: 国家深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe-05-05)、国家自然科学基金项目(41472063)和中国地质调查局项目(1212011120160、12120114079901)联合资助。

作者简介: 张昕, 男, 1987年生, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: standalong@hotmail.com。

通讯作者: 吴才来, 男, 1960年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩石学研究; E-mail: wucailai@126.com。

the granitic dike exhibits the characteristics of I-A type granite. The similar age data, Hf isotope analysis and geochemical characteristics suggest that the dike in Nanzhao pluton may have the same source magma as adjacent Funiu Mountain. According to the previous results and the analysis of regional geological background, the authors hold that the subduction of the Pacific plate occurred in the Yanshanian period, whereas the Yangtze plate and the North China plate experienced pull-apart along Qinling orogenic belt. A tectonic environment of the pull-apart was formed and, as a result, a series of faults were formed between the plate. After that, the granite magma invaded onto the surface along the faults. Most of the magma formed Funiu Mountain, while a little magma formed a dike in Nanzhao pluton, with the exchange of elements during the invasion. Therefore, the granite dike in Nanzhao pluton has tectonic implications.

Key words: granite dike; U-Pb zircon dating; zircon Hf isotope analysis; rock genesis; Nanzhao.

About the first author: ZHANG Xin, male, born in 1987, Ph.D candidate, majors in mineralogy, petrology and geology; E-mail: standalong@hotmail.com.

About the corresponding author: WU Cailai, male, born in 1960, senior researcher, mainly engages in the study of granites; E-mail: wucailai@126.com.

Fund support: Supported by Chinese Government's Executive Program for Exploring the Deep Interior Beneath the Chinese Continent (SinoProbe-05-05), Nation Natural Science Foundation of China (No. 41472063) and China Geological Survey Program (No. 1212011120160, 12120114079901).

1 引言

秦岭是中国南北地理分界线,是一条经历长期不同构造体制演化的复合型大陆碰撞造山带(张成立等, 2013; Kroner et al., 1993)。秦岭造山带位于华北板块与扬子板块之间,由2个主缝合带(商丹和勉略缝合带)和3个块体(北秦岭及华北板块南缘、扬子板块北缘及二者之间的秦岭板块)组成。该地区壳幔相互作用强烈,引发了大量的岩浆活动,发育有不同时期、不同类型、不同岩性的花岗岩岩体(Liu et al., 1999; Mattauer et al., 1985; Meng et al., 2000; 张国伟等, 1995, 2001; 裴先治等, 1997; 冯益民等, 2004)。

秦岭造山带主要经历了3个不同构造演化阶段(董云鹏等, 2003; 刘少峰等, 1999): (1)新太古代—古元古代造山带前寒武纪基底的形成阶段 3.0~1.6 Ga; (2)新元古代—中生代三叠纪,以现代板块构造体制为基本特征的构造演化阶段 0.8~0.2 Ga; (3)中生代陆内造山作用与构造演化阶段(Dilek et al., 2007; 张国伟等, 1996, 2006)。秦岭造山带是研究造山带地质演化的重点地区,同时也是中国的花岗岩研究的重要窗口(Lee et al., 1997; 索书田等, 1999; 张宏飞等, 1993)。前人已经对秦岭的花岗岩做了大量研究(孙卫东等, 2000; 秦江锋等, 2007; 朱

赖民等, 2008; 郭波等, 2009; 秦海鹏等, 2012)。主造山期,在北秦岭形成的花岗岩主要包括4类: (1)新元古代(晋宁期)花岗岩,出露于陡岭等地区,其中既有俯冲型花岗岩、碰撞型花岗岩,也有A型花岗岩,侵入到古、中元古代地层中; (2)早古生代(加里东期)花岗岩,这一时期是秦岭板块体制下主造山期的花岗质岩浆活动期,主要为岛弧型花岗岩和A型花岗岩; (3)三叠纪(印支期)花岗岩,形成于秦岭造山带板块构造最后全面碰撞造山阶段,岩浆活动强烈,形成大量的岩基; (4)中生代(燕山期)花岗岩,主要为多期次侵入形成的复式岩体,这一时期岩浆活动剧烈,发育了一条长约 400 km、宽约 100 km 的大陆内部挤压俯冲带,西起陕西华县,东至河南鲁山以东,南到商丹断裂,北至金堆城—雷门沟(胡志宏等, 1990)。岩浆很可能是来自俯冲至华北板块之下的扬子板块与华北板块下地壳的过渡区域(张国伟等, 2001)。北秦岭出露大量早古生代和中生代的花岗岩岩体,这些岩体具有面积分布广,岩性复杂等特点,表明这两个时期在该地区岩浆活动剧烈,持续时间长。

本文研究的南召地区位于北秦岭东部,周围出露有大面积的、不同时代的花岗岩体,如北边的伏牛山花岗岩体和南边的板山坪岩体、四棵树岩体等等。伏牛山岩体位于南召岩体以北 5 km,形成于燕

山期,年龄为89~160 Ma(王晓霞等,2015;王金贵等,1988)。该岩体巨大,岩性复杂,以中粗粒斑状花岗岩为主。板山坪岩体位于南召岩体以南10 km,是岛弧型花岗岩类,以石英闪长岩为主,年龄为(486.9±9.3)Ma~(496.0±8.1)Ma,形成于晚寒武世到早奥陶世期间(李名则等,2014)。近几年,笔者对这些岩体开展了野外及室内工作,得出南召岩体的年龄为(452.3±6.2)Ma,形成于晚奥陶世(李名则等,2014);最近又在南召岩体中新发现了花岗岩脉。该花岗岩脉形成于什么年代?它与寄主岩有何成因联系?它反映的构造意义又是什么?这些问题还没有人做过研究,本文将就上述问题予以讨论,旨在探讨岩脉的物质来源及其形成的地球动力学背景。

2 地质背景

秦岭造山带的构造演化受到华北板块和扬子板块的共同影响,以商县—丹凤断裂为界可以将秦岭造山带分为南秦岭和北秦岭两个部分(陈江峰等,1995;陈岳龙等,1995;杨坤光等,1999)。其中,北秦岭构造带主要由深变质古元古代秦岭群、中元古代宽坪群以及新元古代丹凤岩群和早古生代的二郎坪岩群构成,是一个经历了多期复杂构造演化的构造块体(张成立等,2004)。南召岩体侵入到宽坪群中,是北秦岭东部早古生代侵入岩体。宽坪群是一套以泥砂质沉积为主的浅变质地层,根据沉积建造与变质建造,可以分为三层(张维吉等,1987):下层是青灰色条带状绢英片岩夹少量大理岩;中层是绢英片岩夹薄层大理岩和少量石英岩,绢英片岩常见石墨化;上层是灰绿色条带状凝灰岩夹大理岩,顺走向由凝灰岩可变成基性熔岩(李靠社等,1994)。由于宽坪群分布广泛且组成十分复杂,因此对于其形成环境及物质来源有多种不同的认识(李靠社等,1995;刘国惠等,1993;许志琴等,1986)。张维吉等(1987)认为宽坪群是典型的早期地槽沉积,但是经历了多期变形、变质及岩浆活动,原始层序已被破坏,推定时限应大于1700 Ma。杨荣勇等(1993)认为宽坪群的形成时代为1850~1000 Ma,标志是洋壳俯冲杂岩的形成开始于1850 Ma前后,结束于1000 Ma左右,表明秦岭古陆与华北板块发生碰撞、北秦岭洋的消亡,以及华北板块南缘的

一次增生。李靠社等(2002)的研究认为宽坪群的原岩为基性火山岩,形成时间约为1827 Ma,并在418 Ma发生过变质作用。何世平等(2007)的研究结果同李靠社相似,推测宽坪群可能属于华北古老基底南缘的组成部分,年龄的上交点为1753 Ma,并且在415~383 Ma发生过变质作用。闫全人等(2008)则认为宽坪群中的变铁镁岩块/片形成于晚新元古代被动陆缘裂谷洋盆,是华北板块南缘大陆裂解作用的产物。高胜等(2015)对西秦岭宽坪群碎屑岩的研究认为西秦岭宽坪群碎屑岩形成于530 Ma,其主要物源来自南侧的北秦岭和扬子板块北缘。

3 岩体地质及岩石学特征

南召岩体位于南召县城内及周边,呈北西—东南向分布,为透镜状的小岩株(图1),长约为5 km,宽约为2 km。岩体中产出一条宽4~5 m的花岗岩脉,岩脉近乎垂直,产状是 $250^{\circ}\angle 80^{\circ}$ (图2,图3),脉体两侧与寄主岩之间发育冷凝边,宽30~50 cm,且接触带破碎。南召岩体主要为花岗闪长岩,岩体呈灰色—青灰色,中细粒结构,块状构造。主要矿物为斜长石、石英及黑云母(图4e)。显微镜下观察(图4f)主要组成矿物有斜长石(25%~45%)、钾长石(20%~25%)、石英(20%~25%)、角闪石(10%~15%)、黑云母(5%~10%),副矿物有榍石、磁铁矿等。岩脉为正长花岗岩,呈紫红色,斑状结构,斑晶为石英及斜长石,基质为微粒状结构(图4a);显微镜下观察呈球形雏晶结构(图4b),主要组成矿物有钾长石(40%~45%)、斜长石(30%~35%)、石英(20%~30%)及少量黑云母。石英呈熔蚀结构,有反应边结构。从岩体到脉体中间的冷凝边无斑晶,呈青灰色,为显微晶质结构(图4c)。镜下观察主要组成矿物有钾长石、斜长石、石英及暗色矿物(图4d)。共采集6个样品,采样位置见图3。

4 分析方法

4.1 锆石U—Pb定年

锆石的分选由河北廊坊区调院完成。样品破碎至80~120目,清洗粉尘后去除磁性矿物,通过重液选出锆石,最后在双目镜下人工挑选出锆石并黏在玻璃板上,由环氧树脂浇注,制成薄片,抛光,并拍摄透反射照片和阴极发光照片。锆石的U、Th、

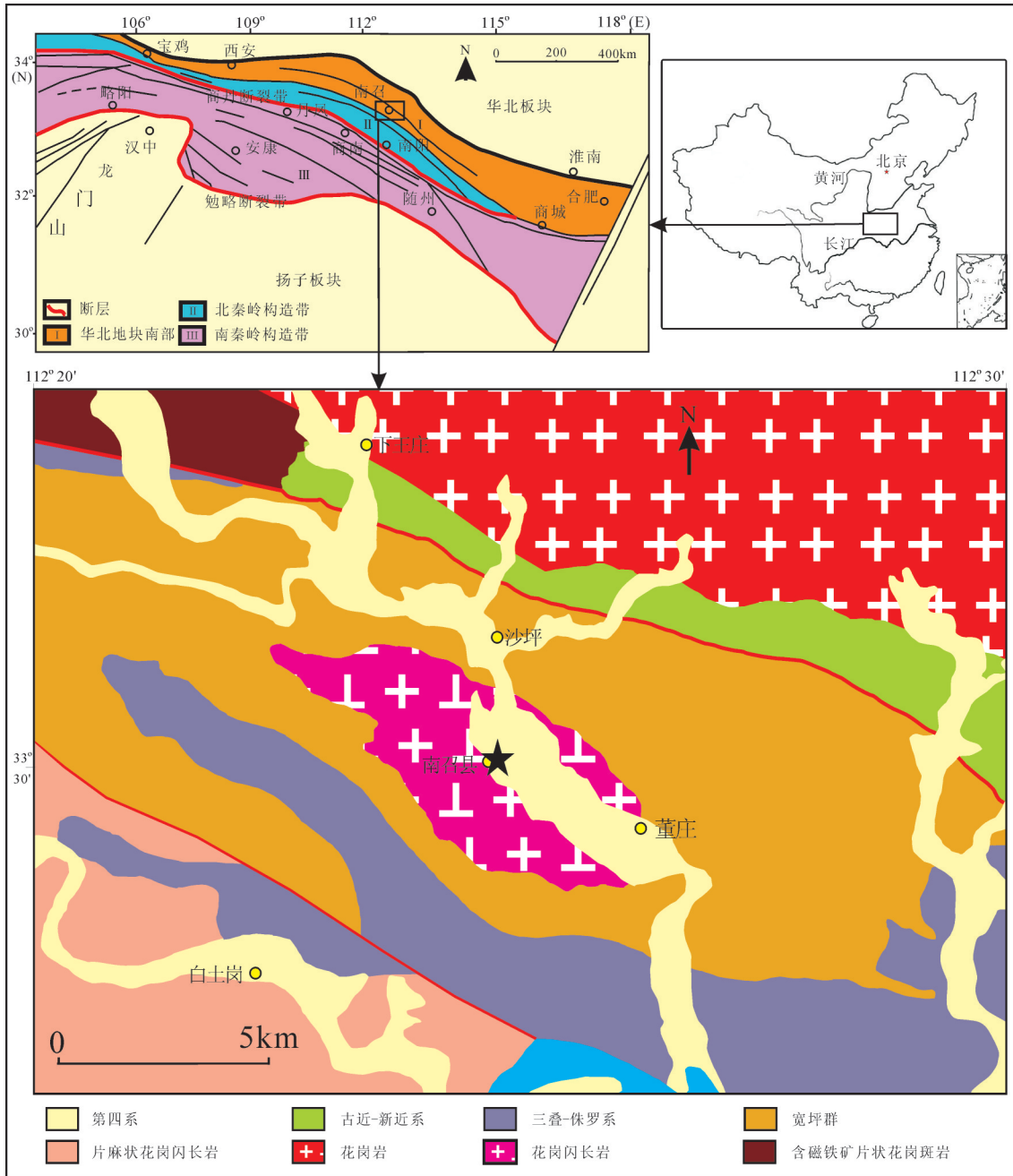


图1 南召岩体地质简图

Fig.1 Schematic geological map and sampling sites of Nanzhao pluton (note 1)

Pb同位素含量测定在中国地质科学院大陆动力学实验室激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪实验室(LA-MC-ICP-MS)进行。实验室选择的标样是91500,Pb/U年龄的加权平均值误差为 2σ 。实验所得数据使用中国地质大学(武汉)刘永胜开发的ICP-MS-DATA-CAL10(Liu et al., 2010)软件进行处理和校正,校正后的数据使用ISOPLOT4程序计

算年龄。

4.2 岩石化学全分析

岩石样品的破碎由河北廊坊区域地质调查院完成,化学全分析在河北廊坊物化探研究所(实验室)测试。氧化物用X荧光光谱仪3080E测试,执行标准分别为:Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, K₂O, CaO, TiO₂, MnO, Fe₂O₃和FeO,按GB/T14506.28-



图2 南召岩体野外照片
Fig.2 Field photo of Nanzhao pluton

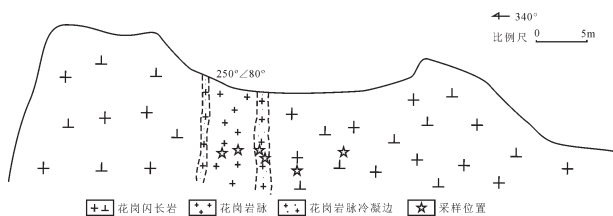


图3 南召岩体示意图及采样位置
Fig.3 Sketch map of sampling sites of Nanzhao pluton

1993 标准, H_2O^+ 按 GB/T14506.2-1993 标准, CO_2 按 GB9835-1998 标准, LOI 按 LY/T1253-1999 标准, 分析精度为 5%。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 用等离子质谱 Excell 测试, 执行 JY/T016-1996 标准。稀土元素和微量元素含量为 10×10^{-6} 的测试精度为 5%, 小于 10×10^{-6} 的精度为 10%, 个别元素含量低的测试误差大于 10%。

4.3 锆石 Hf 同位素分析

锆石 Hf 同位素测试在中国地质科学院地质研究所 LA-MC-ICP-MS 实验室完成。实验仪器是 Neptune Plus 多接收等离子质谱仪和 193 nm GeoLasPro 激光发射器。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气, 剥蚀激光直径 44 μm , 测试位置采用 U-Pb 定年分析点原点测试。实验选用的锆石标样 GJ-1 作为参考物质, 测试中锆石标准 GJ-1 的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 加权平均值为 0.282008 ± 20 。相关仪器运行条件及分析流程详见侯可军等(2007)。Hf 同位素计算公式参考吴福元等(2007)。

5 结 果

5.1 锆石 U-Pb 定年

采集了 3 个花岗岩脉样品 09CL223-3、12CL211-7、12CL211-4, 其中样品 12CL211-4 是花岗岩脉的冷凝边样品。对采集的样品进行 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年测试, 结果见表 1。具体的锆石样品特征分析如下:

(1) 中心相样品 12CL211-7(图 5): 大多数锆石样品晶形完好, 呈短柱状, 长宽比为 2:1~3:1, 透明度较好。样品粒度较大, 晶棱和晶面清晰, 发育特征的岩浆振荡生长环带。锆石的 Th 含量为 18×10^{-6} ~ 247×10^{-6} , U 含量为 20×10^{-6} ~ 196×10^{-6} , Th/U 比值为 0.36~1.27, 平均值是 0.65, 大于 0.3, 样品锆石是岩浆结晶锆石。样品锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄变化于 99~130 Ma, 其年龄加权平均值为 $(118.0 \pm 1.0)Ma$ (MSWD=1.5, $n=25$), 可解释为花岗岩的结晶年龄(图 6a)。所有样品点都分布在谐和线上(图 6b), 得出谐和线交点年龄为 $(118.3 \pm 1.3)Ma$ (MSWD=1.6), 与平均年龄一致。

(2) 中心相样品 09CL223-3(图 5): 锆石的晶形完好, 样品粒度较大, 呈长柱状, 长宽比约为 3:1。CL 图像显示锆石有振荡环带结构, 是岩浆结晶锆石。锆石的 Th 含量为 1.8×10^{-6} ~ 31.4×10^{-6} , U 含量为 1.9×10^{-6} ~ 24.0×10^{-6} , Th/U 比值为 0.74~1.31, 平均值 1.02。测得的锆石平均年龄为 $(113.6 \pm 6.7)Ma$ (MSWD=6.0, $n=8$)(图 6c), 该样品的锆石较少, 年龄存在较大的误差。

3) 冷凝边样品 12CL211-4(图 5): 大多数锆石样品晶形完好, 呈柱状, 长宽比为 2:1~3:1, 锆石粒度较大, 晶棱和晶面清晰, 发育特征的岩浆振荡生长环带。锆石的 Th 含量为 9×10^{-6} ~ 79×10^{-6} , U 含量为 31×10^{-6} ~ 250×10^{-6} , Th/U 比值为 0.30~0.79, 平均值 0.46, 大于 0.3, 是岩浆结晶锆石。锆石的年龄变化于 120~130 Ma, 平均年龄为 $(121.4 \pm 1.1)Ma$ (MSWD=0.59, $n=27$), 可解释为岩脉的结晶年龄(图 6e)。岩脉岩浆在侵位的过程中可能边部受寄主岩的影响, 冷却速度加快, 结晶时间提前, 导致年龄变大。

5.2 岩脉地球化学特征

南召花岗岩脉中心相样品 09CL223-3、

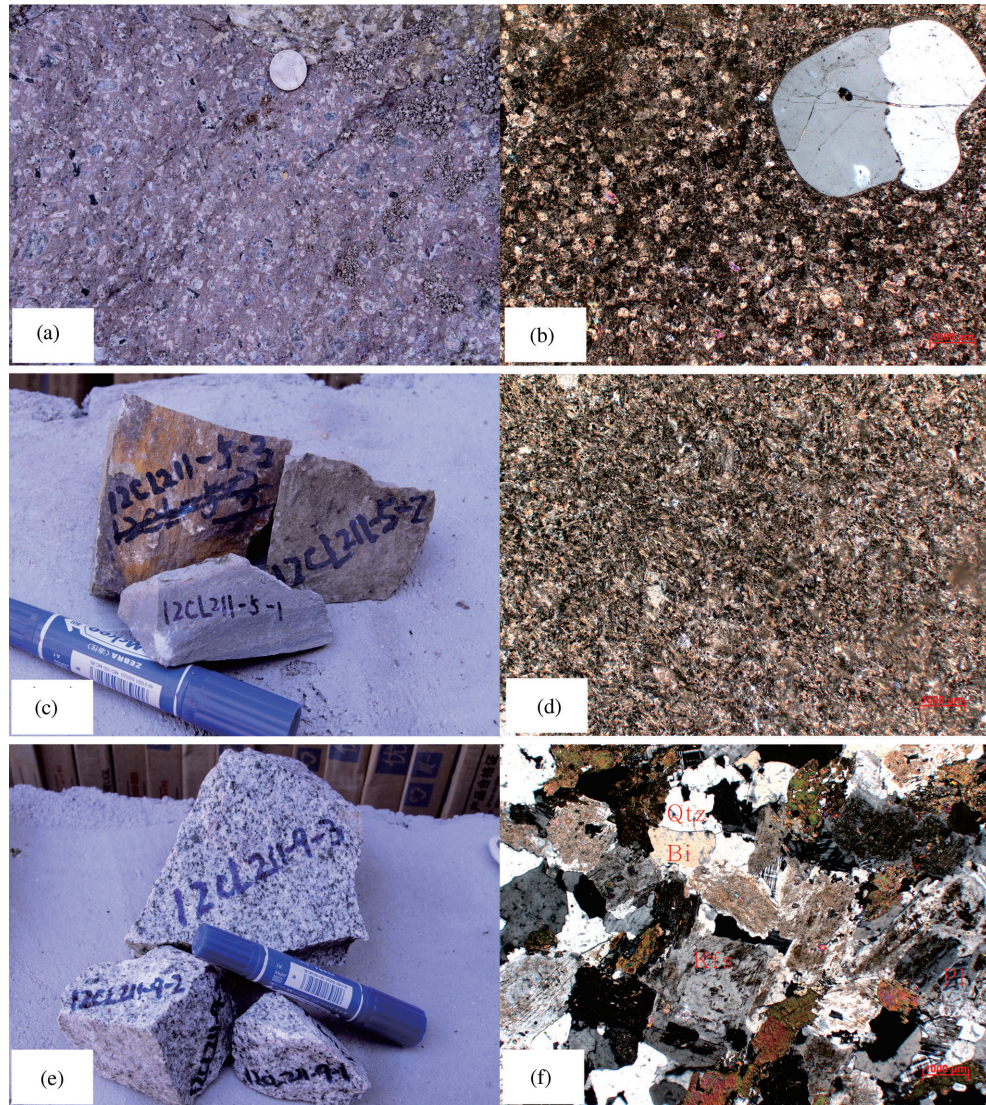


图4 南召岩体样品采样及镜下照片

a—岩脉样品野外照片;b—岩脉样品显微照片;c—冷凝边采样照片;d—冷凝边显微照片;e—南召岩体采样照片;f—南召岩体显微照片

Fig. 4 Field photographs and microphotographs of the Nanzhao pluton

a—Field photograph of dike; b—Microphotograph of dike; c—Photograph of condensation side samples; d—Microphotograph of condensation side samples; e—Photograph of Nanzhao pluton samples; f—Microphotograph of Nanzhao pluton samples

12CL211-7、冷凝边样品 12CL211-4、13CL201-3 和寄主岩样品 12CL210-2、09CL222-3 的主量元素及微量元素的分析结果见表2。

岩脉中心相样品 09CL223-3、12CL211-7 的岩性为花岗岩(图7)。SiO₂ 含量 68.96%~69.48%，全碱含量 6.38%~7.22%，Na₂O/K₂O 比值为 0.68~0.78，Al₂O₃ 含量 13.99%~14.36%，MgO 含量 0.57%~1.14%，CaO 含量 2.03%~2.72%，A/CNK 值 1.03~1.27。在 SiO₂-K₂O 图解上落在高钾钙碱性系列的区域内(图8)。在 A/NK-A/CNK 图解上落在过铝

质区域内,靠近准铝质的边界(图9)。按 Frost 的分类(Frost et al., 2001, 2008), 样品属于 Mg 质类型(图 10a), 属钙碱性系列, 偏向碱钙性系列(图 10b)。CIPW 标准矿物计算中刚玉含量为 1.60~4.18。

岩脉冷凝边样品 12CL211-4、13CL201-2 的岩性为花岗岩。SiO₂ 含量 67.68%~67.93%，全碱含量 6.85%~7.04%，Na₂O/K₂O 比值为 0.48~0.59，Al₂O₃ 含量 13.56%~14.34%，MgO 含量 0.57%~0.60%，CaO 含量 2.08%~2.72，A/CNK 值 0.98~1.13。在 SiO₂-K₂O 图解上落在钾玄岩系列的区域和高钾钙碱性系列

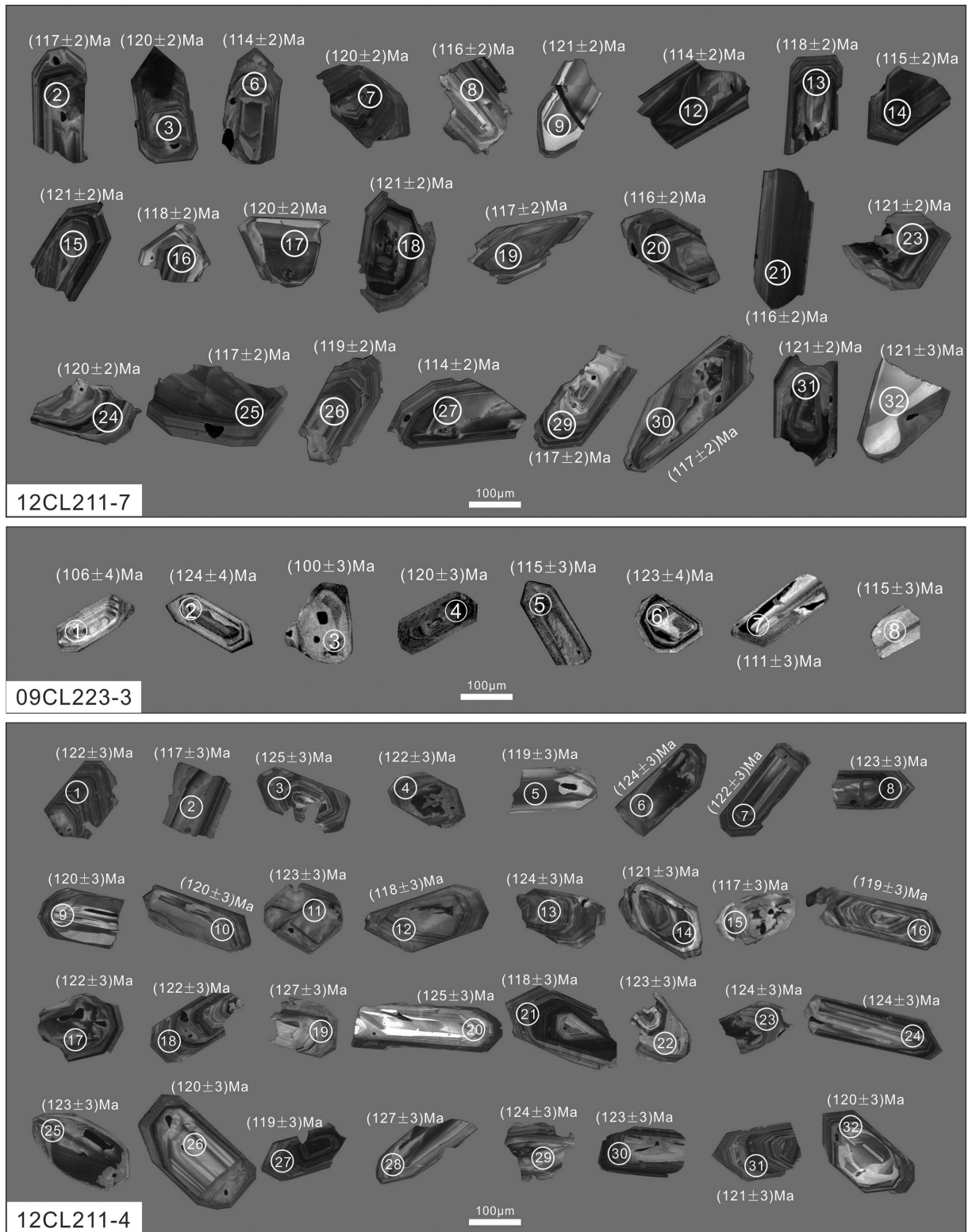


图5 南召花岗岩脉样品、冷凝边样品阴极发光图像
 Fig.5 Cathodoluminescence images of zircons from granites in Nanzhao pluton

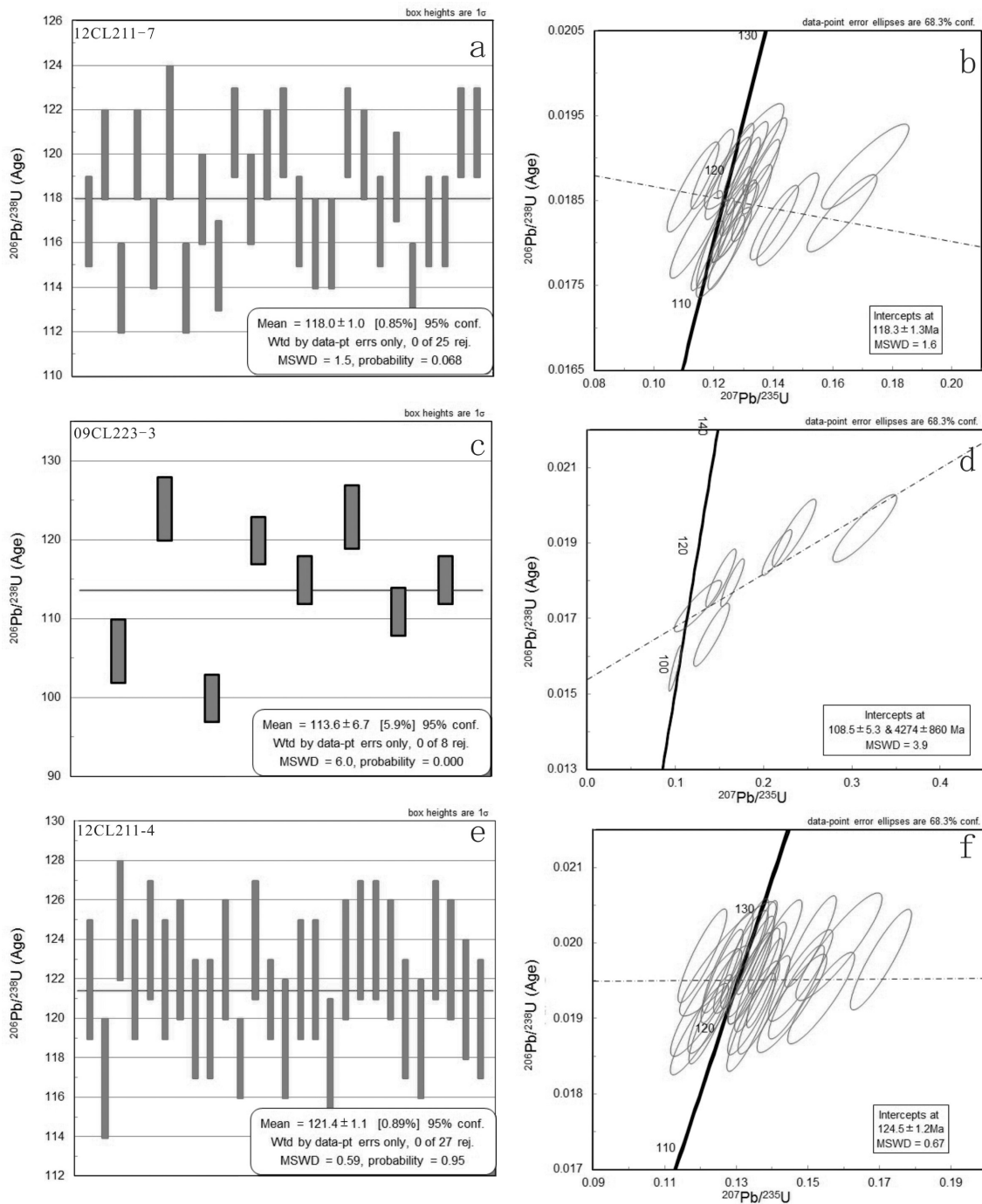


图6 南召花岗岩脉样品加权平均年龄及谐和曲线
 Fig.6 Weighted average and concordia diagrams of granite from Nanzhao pluton

的边界上,可能是受到水热蚀变(图8)。在A/NK-A/CNK图解上落在准铝质和过铝质区域内(图9)。按Frost的分类(Frost et al., 2001, 2008),样品属Mg质类型(图10a),属钙碱性系列(图10b)。CIPW标准矿物计算中刚玉含量为0.77~2.68。

寄主岩样品09CL222-3、12CL210-2的岩性为花岗闪长岩(图7)。SiO₂含量64.47%~68.58%,全碱含量6.63%~6.70%,Na₂O/K₂O比值为1.40~1.65,Al₂O₃含量15.64%~15.76%,MgO含量1.47%~2.33%,CaO含量3.43%~4.62%,A/CNK值0.88~

表 1 南召花岗岩脉样品锆石 U-Pb 定年数据
Table 1 Zircon U-Pb dating data of the granite dike in Nanzhao pluton

样品号及分析点号	含量/ 10^{-6}		U	Th/U	同位素比值		年龄/Ma		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ						
	Pb	Th			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ								
花岗岩脉冷凝固样品 (12CL211-4)																
12CL211-4-1	2.14	52.84	101.17	0.52	0.05009	0.00159	0.13378	0.00400	0.01953	0.00040	199	35	127	4	122	3
12CL211-4-2	0.70	12.54	36.49	0.34	0.04606	0.00207	0.11967	0.00536	0.01886	0.00040	1	55	115	5	117	3
12CL211-4-3	1.25	30.08	57.98	0.52	0.05432	0.00174	0.15071	0.00477	0.02002	0.00040	384	37	143	4	125	3
12CL211-4-4	1.21	25.35	58.44	0.43	0.05474	0.00220	0.14795	0.00593	0.01957	0.00040	402	54	140	5	122	3
12CL211-4-6	1.81	46.83	80.34	0.58	0.05140	0.00185	0.14082	0.00498	0.01995	0.00041	259	45	134	4	124	3
12CL211-4-7	2.11	49.46	102.62	0.48	0.04676	0.00143	0.12597	0.00388	0.01956	0.00041	37	35	120	4	122	3
12CL211-4-8	2.39	40.34	113.00	0.36	0.06182	0.00191	0.17039	0.00564	0.01978	0.00044	668	36	160	5	123	3
12CL211-4-9	0.75	17.24	35.96	0.48	0.05516	0.00251	0.14551	0.00644	0.01920	0.00043	419	60	138	6	120	3
12CL211-4-10	1.09	21.19	52.57	0.40	0.05854	0.00227	0.15368	0.00618	0.01927	0.00040	550	52	145	5	120	3
12CL211-4-11	0.91	14.15	46.90	0.30	0.04835	0.00193	0.12759	0.00467	0.01974	0.00044	117	46	122	4	123	3
12CL211-4-12	1.35	28.15	69.15	0.41	0.04715	0.00158	0.12281	0.00401	0.01899	0.00039	57	40	118	4	118	2
12CL211-4-13	2.11	41.56	101.37	0.41	0.04994	0.00145	0.13570	0.00377	0.01994	0.00041	192	31	129	3	124	3
12CL211-4-14	4.94	79.73	250.75	0.32	0.05142	0.00124	0.13788	0.00331	0.01947	0.00039	260	25	131	3	121	2
12CL211-4-15	0.96	20.91	46.67	0.45	0.06610	0.00311	0.17229	0.00805	0.01881	0.00043	810	60	161	7	117	3
12CL211-4-16	1.23	26.59	61.60	0.43	0.05228	0.00199	0.13482	0.00480	0.01914	0.00041	298	44	128	4	119	3
12CL211-4-17	1.21	20.09	60.48	0.33	0.04999	0.00179	0.13486	0.00482	0.01956	0.00042	194	45	128	4	122	3
12CL211-4-18	1.81	35.55	87.64	0.41	0.05116	0.00178	0.13672	0.00478	0.01955	0.00048	248	40	130	4	122	3
12CL211-4-19	1.44	28.31	53.84	0.53	0.12078	0.00786	0.33831	0.02263	0.02034	0.00052	1968	83	296	17	127	3
12CL211-4-20	0.38	9.14	16.62	0.55	0.06923	0.00500	0.18399	0.01254	0.02010	0.00059	906	92	171	11	125	4
12CL211-4-21	2.63	60.82	130.23	0.47	0.05133	0.00169	0.13414	0.00448	0.01895	0.00043	256	38	128	4	118	3
12CL211-4-22	0.58	12.52	27.50	0.46	0.04544	0.00314	0.12763	0.00890	0.01979	0.00050	32	104	122	8	123	3
12CL211-4-23	1.44	26.60	70.58	0.38	0.04498	0.00175	0.12054	0.00451	0.01983	0.00041	20	40	116	4	124	3
12CL211-4-24	2.33	51.31	111.09	0.46	0.04849	0.00150	0.13234	0.00442	0.01986	0.00048	123	38	126	4	124	3
12CL211-4-25	1.88	61.27	80.83	0.76	0.04869	0.00189	0.13129	0.00504	0.01975	0.00045	133	49	125	5	123	3
12CL211-4-26	0.81	27.71	35.01	0.79	0.04663	0.00267	0.12160	0.00658	0.01921	0.00047	30	72	117	6	120	3
12CL211-4-27	1.76	35.16	86.04	0.41	0.05287	0.00193	0.13773	0.00480	0.01918	0.00043	323	41	131	4	119	3
12CL211-4-28	1.03	19.50	45.27	0.43	0.07070	0.00377	0.19641	0.01006	0.02037	0.00045	949	69	182	9	127	3
12CL211-4-29	0.70	17.79	31.06	0.57	0.05851	0.00286	0.15866	0.00795	0.01995	0.00047	549	69	150	7	124	3
12CL211-4-30	2.38	52.16	113.39	0.46	0.04967	0.00159	0.13399	0.00439	0.01969	0.00044	179	38	128	4	123	3
12CL211-4-31	1.72	31.77	85.33	0.37	0.05532	0.00194	0.14678	0.00515	0.01935	0.00041	425	42	139	5	121	3
12CL211-4-32	1.13	25.23	55.31	0.46	0.04766	0.00219	0.12500	0.00563	0.01925	0.00047	83	59	120	5	120	3
花岗岩脉中心相样品 (12CL211-7)																
12CL211-7-1	0.61	12.64	39.45	0.32	0.04292	0.00301	0.09968	0.00688	0.01680	0.00041	128	107	96	6	107	3
12CL211-7-2	1.32	52.92	64.86	0.82	0.05419	0.00209	0.14036	0.00534	0.01824	0.00029	379	57	133	5	117	2
12CL211-7-3	0.89	25.96	47.87	0.54	0.04795	0.00206	0.12478	0.00508	0.01876	0.00032	97	63	119	5	120	2

续表1

样品号及分析点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值			年龄/Ma								
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ						
12CL211-7-4	0.79	24.03	32.20	0.75	0.04605	0.00200	0.09842	0.00366	0.01550	0.00035	93	95	3	99	2	
12CL211-7-5	7.35	164.59	277.18	0.59	0.12806	0.00597	0.37545	0.01962	0.02035	0.00035	68	324	14	130	2	
12CL211-7-6	0.96	35.84	50.33	0.71	0.04987	0.00266	0.12338	0.00612	0.01789	0.00035	189	118	6	114	2	
12CL211-7-7	1.19	28.83	66.13	0.44	0.04603	0.00201	0.11955	0.00475	0.01887	0.00031	1	53	4	120	2	
12CL211-7-8	0.55	20.24	29.19	0.69	0.04588	0.00249	0.11416	0.00583	0.01810	0.00034	8	73	110	5	116	2
12CL211-7-9	0.46	22.29	20.25	1.10	0.05021	0.00351	0.13022	0.00881	0.01902	0.00041	205	114	124	8	121	3
12CL211-7-10	2.17	42.31	114.55	0.37	0.05393	0.00180	0.14676	0.00452	0.01973	0.00034	368	39	139	4	126	2
12CL211-7-12	2.14	60.66	120.39	0.50	0.05054	0.00182	0.12425	0.00409	0.01789	0.00029	220	47	119	4	114	2
12CL211-7-13	2.71	82.79	144.76	0.57	0.04970	0.00155	0.12742	0.00343	0.01849	0.00027	181	36	122	3	118	2
12CL211-7-14	4.39	246.75	195.60	1.26	0.04850	0.00174	0.12059	0.00421	0.01800	0.00035	124	47	116	4	115	2
12CL211-7-15	1.25	35.88	65.52	0.55	0.04993	0.00211	0.13071	0.00497	0.01896	0.00031	192	58	125	4	121	2
12CL211-7-16	1.48	35.86	82.30	0.44	0.05180	0.00188	0.13278	0.00445	0.01847	0.00030	277	48	127	4	118	2
12CL211-7-17	2.93	112.91	139.61	0.81	0.05202	0.00171	0.13585	0.00417	0.01878	0.00029	286	42	129	4	120	2
12CL211-7-18	1.66	37.27	91.71	0.41	0.04872	0.00170	0.12736	0.00405	0.01897	0.00029	134	46	122	4	121	2
12CL211-7-19	0.91	20.63	52.97	0.39	0.05149	0.00230	0.12702	0.00529	0.01824	0.00031	263	65	121	5	117	2
12CL211-7-20	1.13	29.90	56.19	0.53	0.09152	0.00443	0.22877	0.01065	0.01818	0.00033	1457	61	209	9	116	2
12CL211-7-21	3.25	159.54	152.33	1.05	0.04971	0.00172	0.12549	0.00400	0.01823	0.00030	182	44	120	4	116	2
12CL211-7-22	0.78	20.22	31.27	0.65	0.10346	0.00675	0.29502	0.02171	0.02006	0.00043	1687	105	263	17	128	3
12CL211-7-23	1.90	53.08	99.22	0.53	0.05274	0.00207	0.13716	0.00488	0.01902	0.00030	318	52	131	4	121	2
12CL211-7-24	2.20	53.85	121.93	0.44	0.05047	0.00165	0.12994	0.00377	0.01879	0.00030	217	38	124	3	120	2
12CL211-7-25	1.64	34.91	94.63	0.37	0.05081	0.00188	0.12794	0.00427	0.01829	0.00030	232	47	122	4	117	2
12CL211-7-26	0.78	22.09	43.00	0.51	0.04438	0.00237	0.11305	0.00575	0.01866	0.00035	51	73	109	5	119	2
12CL211-7-27	2.20	48.13	131.84	0.37	0.04772	0.00171	0.11789	0.00361	0.01785	0.00027	85	44	113	3	114	2
12CL211-7-28	1.06	27.56	44.91	0.61	0.09425	0.00388	0.26909	0.01129	0.02048	0.00037	1513	52	242	9	131	2
12CL211-7-29	1.00	28.18	52.55	0.54	0.06370	0.00295	0.16308	0.00776	0.01835	0.00030	732	73	153	7	117	2
12CL211-7-30	0.78	17.70	44.30	0.40	0.05792	0.00298	0.14484	0.00688	0.01828	0.00036	527	69	137	6	117	2
12CL211-7-31	3.99	204.40	160.64	1.27	0.07528	0.00267	0.19682	0.00684	0.01898	0.00033	1076	43	182	6	121	2
12CL211-7-32	1.10	47.20	47.90	0.99	0.06658	0.00371	0.17084	0.00969	0.01890	0.00033	825	89	160	8	121	2
花岗岩脉中心相样品 (09CL223-3)																
09CL223-3-1	1.14	29.27	23.09	1.27	0.06231	0.00567	0.14088	0.01337	0.01657	0.00055	685	146	134	12	106	4
09CL223-3-2	1.34	31.43	24.04	1.31	0.11889	0.00779	0.31452	0.02394	0.01939	0.00059	1940	92	278	18	124	4
09CL223-3-3	0.10	1.83	1.93	0.95	0.04605	0.00244	0.09953	0.00464	0.01568	0.00040	115	96	4	100	3	
09CL223-3-4	0.29	5.77	7.82	0.74	0.08236	0.00335	0.21494	0.01119	0.01875	0.00040	1254	69	198	9	120	3
09CL223-3-5	0.14	3.38	2.60	1.30	0.05909	0.00393	0.15150	0.01134	0.01807	0.00051	570	114	143	10	115	3
09CL223-3-6	0.34	7.74	9.39	0.82	0.08776	0.00578	0.23451	0.01637	0.01927	0.00059	1377	87	214	13	123	4
09CL223-3-7	0.26	5.75	6.10	0.94	0.05115	0.00680	0.12537	0.01769	0.01733	0.00045	248	267	120	16	111	3
09CL223-3-8	0.73	15.55	18.20	0.85	0.06567	0.00298	0.16460	0.00877	0.01795	0.00042	796	72	155	8	115	3

表2 南召岩脉中心相、冷凝边和寄主岩样品全岩化学分析结果
Table 2 Chemical composition of the granite dike and its host pluton from Nanzhao

样品编号	岩脉中心相		岩脉冷凝边		寄主岩	
	118 Ma	68.96	121 Ma	67.68	452.3 Ma	68.58
09CL223-3						
12CL211-7						
13CL201-2						
12CL210-2						
09CL222-3						
SiO ₂	69.48	68.96	67.93	67.68	65.47	68.58
TiO ₂	0.54	0.58	0.50	0.53	0.45	0.34
Al ₂ O ₃	14.36	13.99	13.56	14.34	15.64	15.76
Fe ₂ O ₃	1.65	1.77	1.23	2.09	0.45	0.38
FeO	1.32	0.69	1.46	0.93	2.04	2.21
MnO	0.03	0.04	0.05	0.05	0.08	0.04
MgO	1.14	0.57	0.61	0.57	2.33	1.47
CaO	2.03	2.72	2.72	2.08	4.62	3.43
Na ₂ O	2.48	2.96	2.12	2.40	3.82	4.13
K ₂ O	3.66	3.78	4.45	4.10	2.73	2.50
P ₂ O ₅	0.21	0.22	0.18	0.18	0.16	0.11
烧失量	2.92	3.60	4.53	4.27	1.62	0.86
总和	99.82	99.88	99.34	99.22	99.41	99.81
Alk	6.38	7.22	7.04	6.85	6.63	6.70
Na/K	0.68	0.78	0.48	0.59	1.40	1.65
A/NK	1.84	1.56	1.52	1.62	1.67	1.64
A/CNK	1.27	1.03	0.98	1.13	0.88	0.99
Fe*	0.54	0.55	0.71	0.62	0.47	0.60
MAFI	4.35	4.50	4.32	4.77	2.01	3.27
C(刚玉)	4.18	1.60	0.77	2.68	0	0.30
La	41.79	43.64	52.72	49.55	34.59	28.53
Ce	79.36	84.02	99.69	98.46	67.58	56.00
Pr	8.82	9.57	11.08	11.07	8.05	6.47
Nd	31.67	33.44	37.51	38.33	29.07	22.82
Sm	4.88	5.72	6.50	6.42	4.76	3.34
Eu	1.03	1.16	1.14	1.17	1.32	0.87
Gd	4.35	4.95	5.45	5.71	3.64	2.43
Tb	0.62	0.73	0.88	0.92	0.48	0.30
Dy	3.41	3.96	5.30	4.97	2.38	1.36
Ho	0.65	0.73	1.03	0.93	0.43	0.24
Er	1.94	2.31	2.83	2.94	1.18	0.67
Tm	0.32	0.36	0.52	0.49	0.19	0.10
Yb	2.09	2.44	3.05	3.36	1.10	0.65
Lu	0.32	0.61	0.56	0.56	0.18	0.09
ΣREE	181.24	193.64	228.25	224.88	154.94	123.87
LREE	167.55	177.55	208.63	205.01	145.37	118.04
HREE	13.69	16.09	19.62	19.88	9.57	5.83
LREE/HREE	12.24	11.03	10.63	10.31	15.19	20.25
La _N /Yb _N	14.33	12.82	12.38	10.57	22.52	31.29
δ Eu	0.67	0.65	0.57	0.58	0.93	0.89
δ Ce	0.96	0.96	0.96	0.99	0.96	0.97
Li	20.6	16.2	40.1	18.0	22.4	17.9
Be	2.90	2.64	3.15	2.82	3.63	1.66
Sc	6.59	7.36	9.14	7.03	6.29	4.99
Cr	2.3	16.4	109.7	16.0	15.9	33.1
Co	8.72	5.95	13.67	5.69	5.47	8.02
Ni	4.93	4.18	55.36	2.61	4.72	11.95
Cu	19.7	28.1	26.3	8.8	12.5	4.8
Zn	48.7	50.3	55.8	56.6	49.7	48.2
Ga	20.1	20.7	19.1	19.3	18.2	20.1
Rb	157.4	173.1	87.9	179.0	166.7	65.8
Sr	78.7	149.9	809.0	136.2	168.9	104.1
Y	19.9	20.2	27.6	25.6	11.2	7.1
Nb	16.1	17.6	16.4	12.4	16.3	6.0
Mo	2.13	0.79	0.32	1.45	1.72	0.22
Cs	15.71	14.24	4.91	7.33	10.60	2.74
Ba	201	260	1255	650	906	1239
Hf	5.39	4.81	8.76	7.37	8.10	5.41
Ta	1.52	1.44	1.43	1.08	3.63	0.48
W	1.59	1.29	1.49	1.12	1.36	0.28
Pb	19.2	17.3	30.6	16.6	17.2	12.3
Bi	0.92	0.18	0.25	0.16	0.24	0.07
Th	19.7	21.7	10.8	22.8	21.6	9.8
U	6.79	5.42	2.06	4.99	8.54	1.98
Sr/Y	3.95	7.42	29.31	5.31	15.00	146.62

单位: 主量元素为%; 微量元素为10⁻⁶。

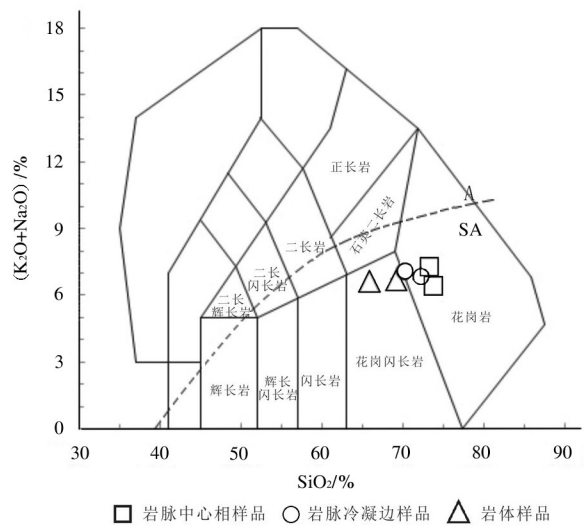


图7 南召岩脉 SiO₂-(Na₂O+K₂O)图(据 Middlemost et al., 1994);

Fig.7 Classification of the dike in Nanzhao pluton;

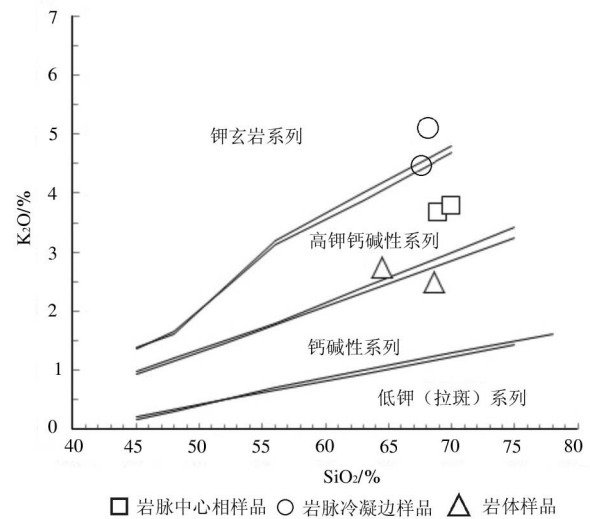


图8 南召岩脉 SiO₂-K₂O图(据 Peccerillo et al., 1976);

Fig.8 SiO₂-K₂O plot of the dike in Nanzhao pluton;

0.99,落在准铝质区域内(图9)。在 SiO₂-K₂O 图解上落在钙碱性系列的区域内,和高钾钙碱性系列的边界上(图8)。按 Frost et al., (2001, 2008)分类,样品属 Mg 质类型(图 10a),属钙碱性系列、偏向钙性系列(图 10b)。

岩脉的稀土总量 ΣREE=181.24×10⁻⁶~228.25×10⁻⁶,轻重稀土比值 LREE/HREE 为 10.31~12.24, La_N/Yb_N=10.57~14.33,稀土元素球粒陨石标准化配

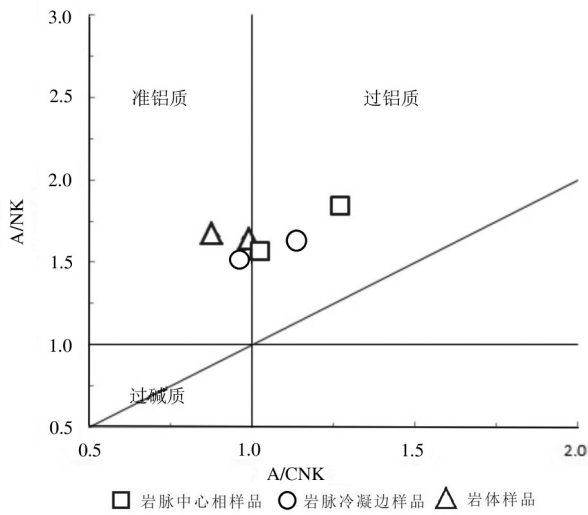


图9 南召岩脉 A/NK-A/CNK 图(据 Chappell et al., 1992)
Fig.9 A/NK-A/CNK plot of the dike in Nanzhao pluton

分模式图显示为右倾型曲线(图 11),轻稀土元素富集,轻重稀土分馏明显。 δEu 值为 0.57~0.67, Eu 呈负异常,说明可能在源区形成斜长石的残留相,或者可能在岩浆演化过程中发生斜长石的分异结晶作用。轻稀土富集,轻、重稀土分异明显。微量元素以富集大离子亲石元素、亏损高场强元素为特征。在原始地幔标准化蛛网图解中(图 12),Ba、Sr、Ta、Nb、Ti、P 等元素呈强烈的负异常。但是冷凝边样品 12CL211-4、13CL201-2 的微量元素蛛网图与岩脉中心相样品的略不同,其中样品 13CL201-2 的 Ba 仅呈现弱的负异常,类似于寄主岩样品,样品 12CL211-4 的 Ba、U、K、Ce 元素呈无异常,表现不同于岩脉中心相样品,而是更接近寄主岩样品。

寄主岩稀土总量 $\Sigma REE=123.87 \times 10^{-6} \sim 154.94 \times 10^{-6}$, 稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图 11)显示为右倾型曲线,轻重稀土比值 LREE/HREE 为 15.19~20.25, $La_N/Yb_N=22.52 \sim 31.29$, 轻稀土元素富集,且轻重稀土较岩脉样品相比分馏更加明显。岩石无明显的 Eu 正负异常, δEu 值为 0.89~0.93,与岩脉的特征稍有不同。微量元素原始地幔标准化蛛网图解中(图 12),寄主岩富集大离子亲石元素、亏损部分高场强元素。其中高场强元素 Ta、Nb、P、Ti、Y、Yb、Lu 等亏损明显,与岩脉相比,说明岩浆冷却速度可能较慢。样品 12CL210-2 的 U、K 含量与样品 09CL222-3 的不同,呈现正异常,接近岩脉的含量值。

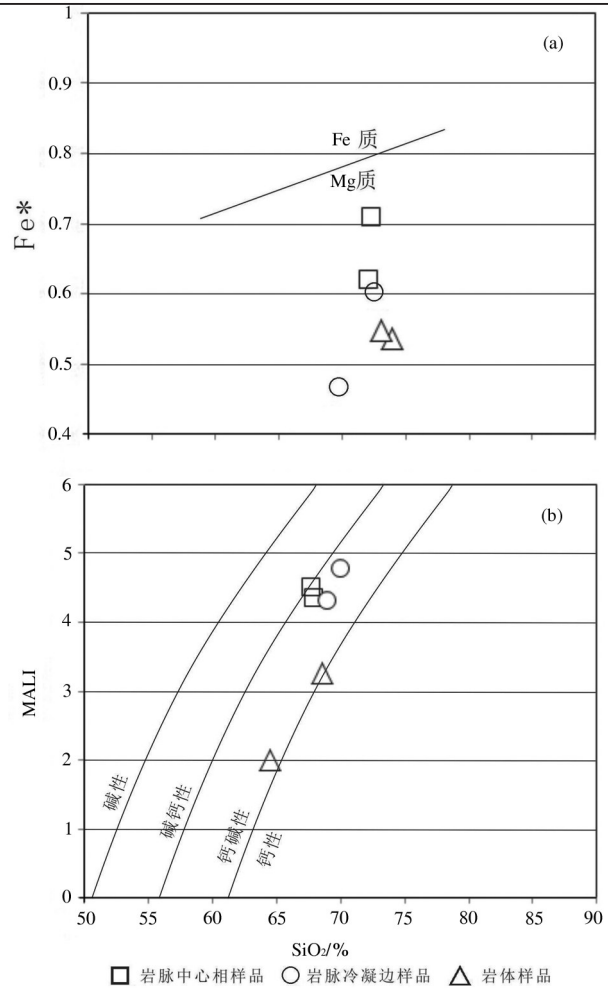


图 10 南召岩脉 SiO_2-Fe^* 和 MALI 图解(据 Frost et al., 2001, 2008)
Fig.10 Diagram of SiO_2-Fe^* and MALI for samples from Nanzhao pluton(after Frost et al., 2001, 2008)

5.3 锆石 Hf 同位素分析

选择定年岩脉样品 12CL211-7、12CL211-4 进行锆石 Lu-Hf 同位素分析(表 3),模式年龄直方图如图(图 13)。

岩脉中心相样品 12CL211-7 的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 的值为 0.00061~0.00300,平均值为 0.00136, $^{176}Hf/^{177}Hf$ 的值为 0.282711~0.282810,平均值为 0.282748。 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 -2.16~+1.35,平均值为 -0.83。二阶段模式年龄 T_{DM2} 在 932~1154 Ma,平均为 1070 Ma。

岩脉冷凝边锆石样品 12CL211-4 的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 的值为 0.00066~0.00512,平均 0.00175, $^{176}Hf/^{177}Hf$ 的值为 0.282716~0.282826,平均值为 0.282757。 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 -1.98~+1.92,平均 -0.54。二阶段模式年龄 T_{DM2}

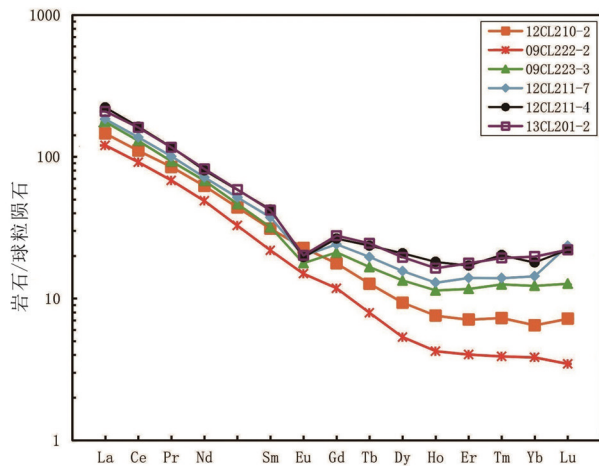


图 11 南召岩脉和寄主岩稀土配分模式图(据 Taylor et al., 1985)
Fig. 11 REE patterns of dike and Nanzhao pluton(after Taylor et al., 1985)

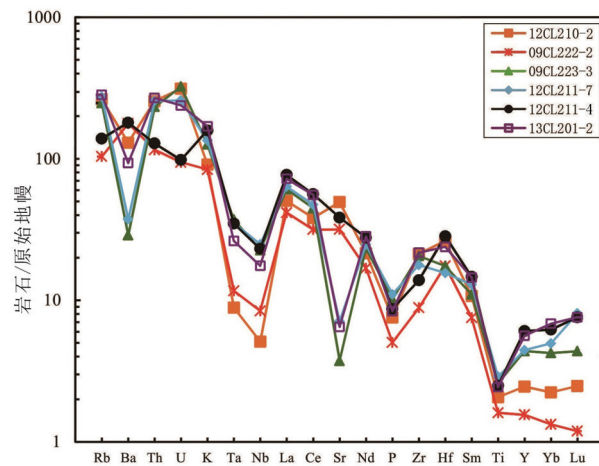


图 12 南召岩脉和寄主岩微量元素蛛网(据 McDonough et al., 1995)
Fig.12 Trace element spider diagrams of dike and Nanzhao pluton (after McDonough et al., 1995)

在 907~1142 Ma, 平均为 1053 Ma。

6 讨论

6.1 岩脉的侵位时代

南召花岗岩脉的锆石具有完好的晶形、长宽比大,发育振荡环带等岩浆结晶的特征,结合 3 个样品(09CL223-3、12CL211-7、12CL211-4)的实验数据,计算加权平均年龄,得出该岩脉的平均年龄为(119.6±0.7)Ma(MSWD=1.14, n=57),可解释为花岗

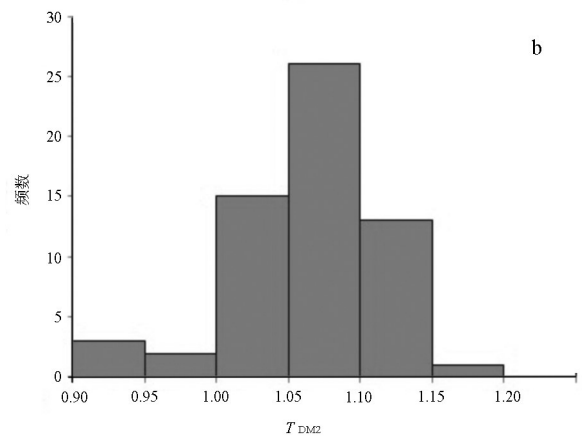
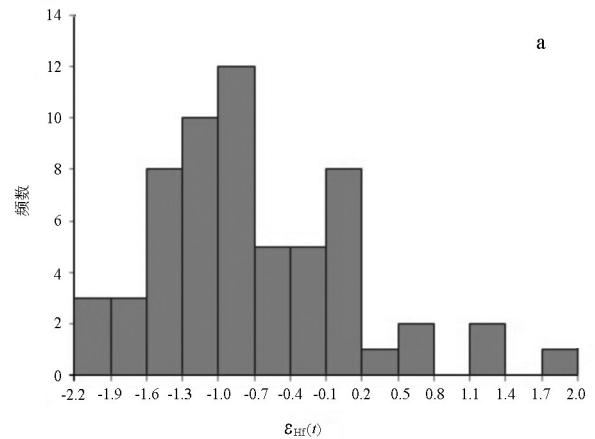


图 13 锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ (a)及 T_{DM2} (b)统计直方图;
Fig.13 a-Plot of frequency- $\epsilon_{Hf}(t)$; b-Frequency- T_{DM2} histogram of zircon from dike samples

岩脉的结晶年龄(图 14)。而寄主岩的年龄约为 452.3 Ma,为晚奥陶世(李名则等,2014),两者的年龄差距较大。其中岩脉冷凝边测得的年龄(121.4±1.1)Ma 略大于中心相的年龄(118.0±1.0)Ma,这可能是岩脉在侵位的过程中,边部受寄主岩的影响,冷却速度加快,固结的时间早,导致年龄变大。

不仅岩脉的年代学受到寄主岩的影响,而且岩脉的地球化学成分也部分受到寄主岩的影响。岩脉在侵位后与寄主岩发生了部分熔融反应形成冷凝边,同时发生了不同元素的交换,致使两者的地球化学成分都发生了不同程度的改变。由微量元素原始地幔标准化蛛网(图 12)可以看出,冷凝边样品 12CL211-4 和 13CL201-2 的 Rb、Ba、Th、U、Sr 元素含量有较大不同,其中样品 12CL211-4 的 Ba、Th、U、Sr 含量同寄主岩样品的含量相近,而样品 13CL201-2 这几种元素的含量同岩脉中心相的含

表3 南召花岗岩脉锆石Lu-Hf同位素数据
Table 3 Zircon Hf isotope analyses of the dike in Nanzhao pluton

Sample	t/Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf(t)}	T _{DM} /Ma	T _{DM2} /Ma	f _{LuHf(S)}
南召岩体花岗岩样品 (12CL211-4)											
12CL211-4-01	122	0.024593	0.000183	0.00091	0.00001	0.282756	0.000011	-0.58	702	1052	-0.97
12CL211-4-02	117	0.022575	0.000069	0.00081	0.00000	0.282737	0.000011	-1.22	725	1093	-0.98
12CL211-4-03	125	0.031188	0.000232	0.00110	0.00000	0.282716	0.000012	-1.98	761	1142	-0.97
12CL211-4-04	122	0.028544	0.000361	0.00102	0.00001	0.282750	0.000012	-0.78	712	1065	-0.97
12CL211-4-06	124	0.065701	0.001300	0.00229	0.00003	0.282791	0.000016	0.66	677	979	-0.93
12CL211-4-07	122	0.092979	0.003112	0.00317	0.00011	0.282772	0.000014	0.01	721	1025	-0.90
12CL211-4-08	123	0.092553	0.003261	0.00312	0.00010	0.282775	0.000015	0.09	717	1020	-0.91
12CL211-4-09	120	0.048901	0.000237	0.00170	0.00001	0.282750	0.000011	-0.76	724	1068	-0.95
12CL211-4-10	120	0.071091	0.001489	0.00249	0.00004	0.282770	0.000014	-0.08	712	1028	-0.92
12CL211-4-11	123	0.021480	0.000212	0.00079	0.00001	0.282748	0.000010	-0.86	710	1069	-0.98
12CL211-4-12	118	0.019470	0.000346	0.00072	0.00001	0.282773	0.000010	0.02	674	1013	-0.98
12CL211-4-13	124	0.025038	0.000099	0.00090	0.00000	0.282740	0.000011	-1.13	723	1087	-0.97
12CL211-4-14	121	0.033031	0.000033	0.00119	0.00000	0.282728	0.000011	-1.54	745	1115	-0.96
12CL211-4-15	117	0.037390	0.000269	0.00131	0.00001	0.282745	0.000011	-0.95	724	1078	-0.96
12CL211-4-16	119	0.034609	0.000206	0.00121	0.00001	0.282736	0.000010	-1.28	736	1098	-0.96
12CL211-4-17	122	0.018444	0.000392	0.00066	0.00001	0.282757	0.000011	-0.53	695	1047	-0.98
12CL211-4-18	122	0.062573	0.002985	0.00216	0.00010	0.282769	0.000012	-0.10	706	1027	-0.93
12CL211-4-19	127	0.027585	0.000887	0.00099	0.00003	0.282765	0.000012	-0.25	690	1031	-0.97
12CL211-4-20	125	0.039339	0.000526	0.00140	0.00002	0.282811	0.000013	1.39	631	929	-0.96
12CL211-4-21	118	0.052534	0.001653	0.00194	0.00006	0.282774	0.000013	0.07	695	1016	-0.94
12CL211-4-22	123	0.040382	0.000151	0.00139	0.00001	0.282741	0.000013	-1.10	732	1088	-0.96
12CL211-4-23	124	0.070856	0.001754	0.00241	0.00005	0.282744	0.000013	-1.00	748	1086	-0.93
12CL211-4-24	124	0.107184	0.002996	0.00357	0.00009	0.282745	0.000018	-0.96	771	1089	-0.89
12CL211-4-25	123	0.028083	0.000939	0.00098	0.00003	0.282753	0.000012	-0.67	707	1058	-0.97
12CL211-4-26	120	0.159236	0.001947	0.00512	0.00007	0.282751	0.000021	-0.73	797	1083	-0.85
12CL211-4-28	127	0.035337	0.000486	0.00120	0.00001	0.282724	0.000011	-1.69	752	1124	-0.96
12CL211-4-29	124	0.124054	0.001156	0.00403	0.00003	0.282826	0.000018	1.92	656	907	-0.88
12CL211-4-30	123	0.034618	0.001136	0.00114	0.00003	0.282776	0.000012	0.16	676	1006	-0.97
12CL211-4-31	121	0.048614	0.001135	0.00163	0.00004	0.282751	0.000013	-0.73	721	1065	-0.95
南召岩体花岗岩脉样品 (12CL211-7)											
12CL211-7-01	107	0.017901	0.000535	0.000604	0.000014	0.282791	0.000012	0.66	647	971	-0.98
12CL211-7-02	117	0.042108	0.000404	0.000664	0.000011	0.282757	0.000010	-0.54	709	1051	-0.96
12CL211-7-03	120	0.035128	0.000232	0.000918	0.000011	0.282742	0.000015	-1.07	726	1084	-0.96
12CL211-7-04	99	0.036393	0.000141	0.000968	0.000005	0.282734	0.000012	-1.33	738	1102	-0.96
12CL211-7-05	130	0.027336	0.000106	0.001018	0.000004	0.282725	0.000013	-1.66	745	1121	-0.97
12CL211-7-06	114	0.030237	0.000208	0.001029	0.000007	0.282751	0.000012	-0.74	710	1063	-0.97
12CL211-7-07	120	0.034563	0.000162	0.001056	0.000002	0.282764	0.000011	-0.28	694	1034	-0.97
12CL211-7-08	116	0.049682	0.000487	0.001057	0.000011	0.282810	0.000015	1.35	637	932	-0.95
12CL211-7-09	121	0.043042	0.000539	0.001107	0.000014	0.282751	0.000011	-0.73	717	1064	-0.96
12CL211-7-10	126	0.035376	0.000206	0.001119	0.000008	0.282711	0.000012	-2.16	770	1154	-0.96
12CL211-7-12	114	0.055828	0.002704	0.001130	0.000096	0.282768	0.000012	-0.14	702	1028	-0.94
12CL211-7-13	118	0.032363	0.000509	0.001131	0.000013	0.282757	0.000013	-0.54	703	1050	-0.97
12CL211-7-14	115	0.067170	0.002889	0.001154	0.000088	0.282735	0.000013	-1.31	756	1105	-0.93
12CL211-7-15	121	0.037741	0.000245	0.001180	0.000004	0.282727	0.000012	-1.58	748	1118	-0.96
12CL211-7-16	118	0.094515	0.007000	0.001188	0.000210	0.282766	0.000019	-0.21	727	1039	-0.91
12CL211-7-17	120	0.045932	0.000607	0.001195	0.000020	0.282731	0.000011	-1.44	753	1111	-0.95
12CL211-7-18	121	0.042636	0.000422	0.001222	0.000015	0.282741	0.000010	-1.09	733	1087	-0.95
12CL211-7-19	117	0.019485	0.001201	0.001244	0.000043	0.282748	0.000011	-0.85	708	1068	-0.98
12CL211-7-20	116	0.033833	0.000440	0.001332	0.000018	0.282773	0.000013	0.03	681	1014	-0.97
12CL211-7-21	116	0.034384	0.000214	0.001366	0.000004	0.282739	0.000014	-1.18	730	1092	-0.97
12CL211-7-22	128	0.086571	0.002238	0.001412	0.000064	0.282763	0.000018	-0.31	726	1044	-0.92
12CL211-7-24	120	0.038164	0.001118	0.001517	0.000043	0.282725	0.000015	-1.66	753	1123	-0.96
12CL211-7-25	117	0.030763	0.000366	0.001612	0.000008	0.282743	0.000012	-1.01	721	1080	-0.97
12CL211-7-26	119	0.033216	0.002173	0.001619	0.000065	0.282778	0.000013	0.22	673	1002	-0.97
12CL211-7-27	114	0.047662	0.003938	0.001756	0.000119	0.282752	0.000013	-0.70	718	1063	-0.95
12CL211-7-28	131	0.033690	0.000063	0.001896	0.000002	0.282747	0.000013	-0.88	718	1072	-0.97
12CL211-7-29	117	0.047370	0.001298	0.002171	0.000047	0.282734	0.000014	-1.36	747	1105	-0.95
12CL211-7-30	117	0.028722	0.000621	0.002721	0.000019	0.282734	0.000011	-1.34	733	1101	-0.97
12CL211-7-31	121	0.032669	0.000245	0.002996	0.000008	0.282738	0.000013	-1.21	730	1093	-0.97

量相近。另外, 寄主岩样品 12CL210-2 的 Rb、Ba、Th、U、Y、Yb、Lu 等元素的含量不同于另一个寄主岩样品 09CL222-2 的含量, 而是同岩脉中心相的含

量相近。

6.2 岩石成因

通常, 将花岗岩类的 Na₂O、K₂O 值, ASI 值和刚

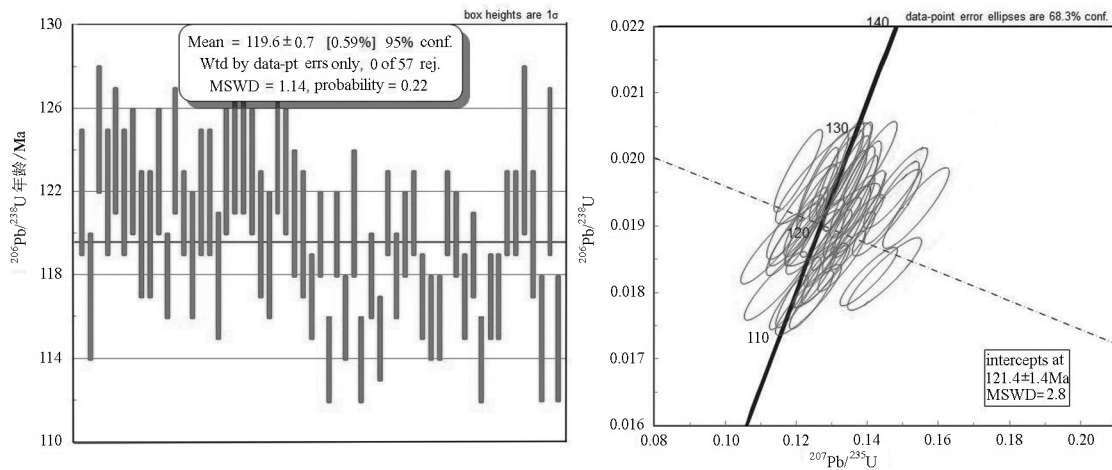


图 14 南召花岗岩脉加权平均年龄及谐和曲线
Fig. 14 Weighted average and concordia diagrams of the dike in Nanzhao pluton

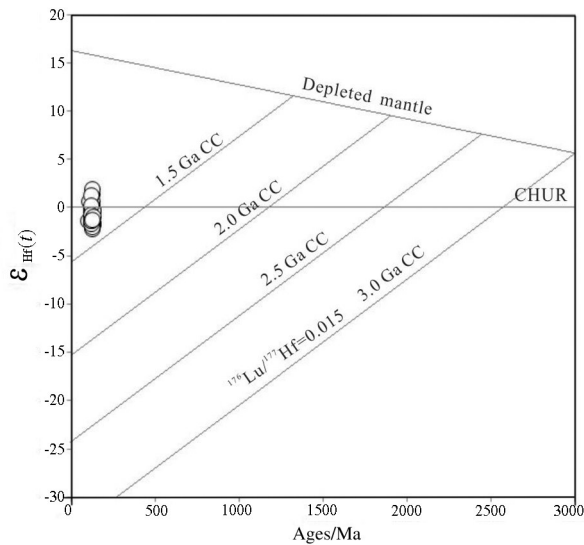


图 15 花岗岩脉锆石 Hf 同位素演化图
Fig. 15 Zircon $\epsilon_{Hf}(t)$ values versus age (Ma) diagram of the granites from the Nanzhao pluton dike

玉值作为区分 I 型和 S 型花岗岩的重要指标 (Pitcher et al., 1983; Chappell et al., 1999; 吴元保等, 2004)。研究发现, 秦岭晚中生代花岗质岩浆作用也非常发育, 主要分布在东秦岭, 广泛出露在华北板块南缘和北秦岭, 形成大岩基和小岩株两类岩体。秦岭晚中生代花岗质岩浆作用可以划分为 160~130 Ma 和 120~100 Ma 两个阶段 (Wang et al., 2015; 王晓霞等, 2011)。120~100 Ma 阶段的花岗质岩石在华北板块南缘以 I-A 过渡型和 I 型花岗岩为

主, 可见 A 型花岗岩 (王晓霞等, 2015)。锆石 Lu-Hf 同位素分析结果表明, 花岗岩脉的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 都落入亏损地幔线以下, 且分布于 0 值上下 (图 15), 表明岩脉的源岩以新生地壳为主 (吴福元等, 2007)。结合前述该岩脉的地球化学特征, 样品的 Na_2O 含量为 2.48%~2.96%, K_2O 含量为 3.66%~4.45%, K_2O 含量均高于 Na_2O , 属于高钾钙碱性系列; ASI 值为 0.98~1.27; 岩石以富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素为特征, 稀土元素以富集轻稀土、且轻重稀土分异明显, 具有 Eu 负异常, 可见南召花岗岩脉具有 I 型花岗岩的特征。

北秦岭晚奥陶世形成的大量 I 型花岗岩体, 主要侵入于秦岭群、二郎坪群和丹凤群。早期 (455~450 Ma) 形成的岩体规模较小, 晚期 (450~422 Ma) 形成的岩体规模大, 形态多为椭圆状或不规则状 (王涛等, 2009)。南召岩体正是形成于这一时期, 岩性为花岗闪长岩, 样品 09CL222-3、12CL210-2 的 Na_2O 含量为 3.82%~4.13%, K_2O 含量为 2.50%~2.73%, K_2O 含量均低于 Na_2O ; ASI 值为 0.88~0.99, 以准铝质为主, 刚玉值为 0~0.30, 具有 I 型花岗岩的特征 (李名则等, 2014)。

岩脉冷凝边样品 12CL211-4、13CL201-2 的地球化学特征呈现过渡状态。其中 Na_2O 含量为 2.12%~2.40%, K_2O 含量为 4.10%~4.45%, K_2O 含量高于 Na_2O 。此外, ASI 值为 0.98~1.13, 介于准铝质和过铝质之间, 刚玉值 0.77~2.68。冷凝边样品的 ASI 值和刚玉值介于岩脉中心相和寄主岩之间, 即

由岩脉中心相→岩脉冷凝边→寄主岩,ASI和刚玉由大变小。2个冷凝边样品的微量元素也由于离中心相和寄主岩距离的不同而呈现不同的特征,其中样品12CL211-4的Ba、Th、U、Sr元素含量接近于寄主岩样品,而K、Ta、Nb元素含量更接近于花岗岩脉;样品13CL201-2的Ba元素含量接近于寄主岩样品,而Th、U、Sr、Ta、Nb元素含量接近于花岗岩脉。由此可见,花岗岩脉岩浆在侵位过程中遇到寄主岩后,与寄主岩发生了物质交换,岩脉冷凝边的地球化学成分介于寄主岩和岩脉中心相之间。

南召岩体的北面约5 km是伏牛山岩体。伏牛山岩体长轴呈NW走向,长约120 km,宽约35 km,面积约占4200 km²。该岩体是由多期侵位的花岗岩组成的复式岩体,最后一次大规模侵位发生在110~120 Ma,同南召岩脉侵位的时代相同。此外,伏牛山岩体的地球化学特征也表现出高硅,钾含量高于钠含量,ASI值略大于1.0,刚玉值较高的特点,与岩脉的地球化学特征相似。此外,伏牛山岩体与南召岩脉的锆石Hf同位素特征也相似,其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在0附近,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf的平均值约为0.282756,说明南召岩脉的岩浆源区可能与伏牛山岩体岩浆的源区相同。

6.3 花岗岩脉形成的构造环境

侏罗纪时,古太平洋板块向中国大陆板块俯冲(Smith et al., 2007; 张旗等, 2013;)。俯冲的角度很小且速率较快,最后达到410~660 km的深度(包汉勇等, 2013)。在这一深度的地幔楔经历了熔融过程,产生了底辟橄榄岩和上涌的基性岩浆(李武显等, 2000; 肖庆辉等, 2010),后者底垫于下地壳(Cull et al., 1991; 李武显等, 2000; 杨海斌等, 2016),为大量准铝质花岗岩浆的生成提供了主要热源(吴利仁等, 1985; 肖庆辉等, 2009)。从早白垩世开始,古太平洋板块的俯冲速度减慢,俯冲角变大,基性岩浆底侵活动更加强烈,诱发了更强烈的地壳部分熔融,产生了更多的准铝质花岗岩浆,基性岩浆与花岗质岩浆的混合现象也更加明显(李武显等, 1999)。至新生代时期,随古太平洋板块对中国东南大陆消减的基本终止和印度板块对欧亚板块的碰撞、挤入的开始,大陆岩石圈高速伸展、减薄,发生减压熔融,仅诱发少量板内玄武岩熔融(李武显等, 2000)。由于缺乏大量基性岩浆及其提供的热量,所以这一时期花岗质岩浆活动几乎停止。

一般认为,扬子板块与华北板块最终碰撞闭合于早中生代,此后秦岭造山带进入陆内造山阶段(赵越等, 2017)。后碰撞阶段早期发生陆内俯冲(石铨曾等, 2004),岩石圈进一步缩短增厚(任纪舜等, 1992),至晚侏罗世—早白垩世,造山带侧向挤压厚度达到最大(毛景文等, 2003)。之后秦岭造山带趋于减薄,发生了以下地壳基底拆沉、岩石圈下地幔上涌为动力学特征的演化阶段。此时,发现的大量呈现从I型向I-A过渡型再向A型演变特征的花岗质岩石,证明了构造环境由挤压转变为伸展(倪师军等, 1994; 崔建军等, 2013; 王晓霞等, 2015)。秦岭—大别山造山带、中国东部乃至整个东北亚可能处于陆内拉张环境中(叶会寿等, 2006; 谢桂青等, 2007),其构造岩浆的演化是中国东部构造岩浆演化的一部分,是环太平洋巨型岩浆带的一部分(马昌前等, 2003; 董树文等, 2000, 2007; 王涛等, 2009)。

对南召岩脉的测试结果表明该岩脉形成于拉张的构造环境,与伏牛山复式岩体的地球化学性质和同位素性质相近,并且形成的时间与伏牛山岩体最后一次大规模侵位(110~120 Ma)发生的时间相同,由此可以推断南召岩脉和伏牛山复式岩体是同一次岩浆活动的产物。这一时期,在古太平洋板块的NW向俯冲及拉张环境的作用下,扬子板块和华北板块沿秦岭造山带形成了一系列断裂,深部幔源物质发生部分熔融形成岩浆,为地壳部分熔融形成花岗岩浆提供大量的热量。花岗质岩浆沿着拉张作用形成的裂隙上侵至地壳浅部,形成了伏牛山岩体。同时,部分岩浆沿伏牛山岩体周围的裂隙上侵,形成花岗岩脉,如伏牛山岩体以南5 km的南召岩脉。岩脉在侵位时同寄主岩发生同化混染,使两者的地球化学特征均发生了不同程度的改变。可见,南召岩脉是伏牛山岩体岩浆的一个分支。

7 结 论

南召花岗岩脉形成于燕山期,锆石U-Pb年龄是(119.1±0.8) Ma。地球化学数据显示,花岗岩脉的K₂O含量均高于Na₂O;轻稀土元素富集,轻重稀土分异明显,富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,具有I型花岗岩的地球化学属性。锆石Hf同位素反映出它们的源岩以新生地壳为主,其源岩可能和伏

牛山岩体的源岩相同。岩脉冷凝边的地球化学成分介于岩脉中心相和寄主岩的成分之间,反映岩脉在侵位过程中与寄主岩发生了物质交换。

在燕山期,由于太平洋板块的俯冲作用和陆内拉张作用,扬子板块及华北板块沿秦岭造山带发生拉分作用,形成了一系列断裂。深部幔源物质发生部分熔融形成的岩浆,为地壳部分熔融提供了大量的热量,同时部分与壳源岩浆混合。地壳部分熔融形成的岩浆沿着拉张作用形成的裂隙上侵至地壳浅处形成伏牛山岩体,小部分岩浆沿着伏牛山岩体周围的裂隙侵位,形成花岗岩脉,如南召岩体的花岗岩脉。可见,侏罗纪—白垩纪时期的构造环境是拉张的构造环境,南召岩脉和伏牛山岩体可能是同一次岩浆活动的产物。

注释

①河南省地质矿产局区域地质调查队. 1989. 1:5万南召幅区域地质调查报告.

References

- Bao Hanyong, Guo Zhanfeng, Zhang Luolei. 2013. Tectonic dynamics of eastern China since the formation of the Pacific plate[J]. *Advances in Earth Science*, 28(3): 337–346 (in Chinese with English abstract).
- Chappell B W. 1999. Aluminum saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46(3): 535–551.
- Chen Jiangfeng, Xie Zhi, Liu Shunsheng. 1995. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ and fission track dating of cooling ages in the Dabie orogenic belt[J]. *Science in China (Series D)*, 25(12): 1086–1092 (in Chinese).
- Chen Yuelong, Zhang Benren. 1995. Geochemical characteristics of Pb, Sr, and Nd isotopes on Early palaeozoic granites in the Danfeng region, Northern Qinling Belt[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 30(3): 247–257 (in Chinese with English abstract).
- Cui Jianjun, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Jahn Borming, Xu Xianbing, Ma Licheng, Li Jianhua, Su Jinbao, Li Yong. 2013. Late Mesozoic orogenesis along the coast of Southeast China and its geological significance[J]. *Geology in China*, 40(1): 86–105 (in Chinese with English abstract).
- Cull J P, O'Reilly S Y, Griffin W L. 1991. Xenolith geotherms and crust models in Eastern Australia[J]. *Tectonophysics*, 192: 359–366.
- Dilek Y, Ahunkaynak S. 2007. Cenozoic crust evolution and mantle dynamics of post-collisional magmatism in Western Anatolia[J]. *International Geology Review*, 49: 431–453.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Zhu Bingquan. 2003. Proterozoic Tectonics and Evolutionary History of the North Qinling Terrane[J]. *Acta Geosciencia Sinica*, 24(1): 3–10 (in Chinese with English abstract).
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxiang, Yang Zhenyu, Ji Qiang, Wang Tao, Hu Jianmin, Chen Xuanhua. 2007. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1449–1461 (in Chinese with English abstract).
- Dong Shuwen, Wu Xihao, Wu Zhenhan, Deng Jinfu, Gao Rui, Wang Chengshan. 2000. On tectonic seesawing of the East Asia continent—Global implication of the Yanshanian movement[J]. *Geological Review*, 46(1): 8–13 (in Chinese with English abstract).
- Feng Yimin, Cao Xuanduo, Zhang Erpeng. 2004. Discussion on the tectonic features of the Mianxian—Lueyang Zone[J]. *Geological Review*, 50(3): 295–303 (in Chinese with English abstract).
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, Arculus R J, Ellis D J, Frost C D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42: 2033–2048.
- Gao Sheng, Chen Danling, Gong Xiangkuan, Ren Yunfei, Li Haiping. 2015. Zircon U–Pb dating of clastic rocks and granites of Kuanping Group in Dongcha areas of Tianshui, and its geological implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(4): 255–264 (in Chinese with English abstract).
- Guo Bo, Zhu Laimin, Li Ben, bow tiger army, Wang Jianqi. 2009. Zircon U–Pb age and Hf isotope composition of the Huashan and Heyu granite plutons at the southern margin of North China Craton: Implications for geodynamic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 265–281 (in Chinese with English abstract).
- He Shiping, Wang Hongliang, Chen Junlu, Xu Xueyi, Zhang Hongfei, Ren Guang Ming, Yu Jiyuan. 2007. Zircon U–Pb chronology of Kuanping Rock Group by LA–ICP–MS and its Geological Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(1): 79–87 (in Chinese with English abstract).
- Hildreth W. 1981. Gradients in silicic magma chamber: Implications for lithospheric magmatism[J]. *Geophy. Res.*, 86: 10153–10192.
- Hu Zhihong, Hu Shouxi. 1990. The yenshanian intracontinental compression–subduction in the northern part of the east–Qinling Area: its tectonic model and evidences[J]. *Journal of Nanjing University*, 26(3): 489–498 (in Chinese).
- Huppert H E, Sparks R S J. 1988. The generation of granitic magma by intrusion of basalt into continental Crust[J]. *J. Petrol.*, 29: 599–624.
- Kroner A, Zhang G W, Sun Y. 1993. Granites in the Tongbai area, Qinling belt, China: Geochemistry, petrology, single zircon geochronology and implications for the tectonic evolution of Eastern Asia[J]. *Tectonics*, 12(1): 245–255.
- Lee Y S, Nishimura S, Min K D. 1997. Paleomagne totectonics of East Asia in the Proto–Tethys Ocean[J]. *Tectonophysics*, 270: 57–166.
- Li Kaoshe, Bai Shengli, Cai Zhenlong. 1994. New speculation on the

- relationships among the Danfeng Group, Qinling Group and Kuanping Group in the eastern Qinling Mountains[J]. *Regional Geology of China*, (3): 215–222 (in Chinese).
- Li Kaoshe, Bai Shengli, Li Wansheng. 1995. Stratigraphic redivision of Kuanping Group and Qinling Group in the middle segment of the eastern Qinling Mountains[J]. *Jour. Geol. & Min. Res. North China*, 10 (1): 93–98 (in Chinese).
- Li Kaoshe. 2002. Zircon U–Pb age of meta–basic lava from the Kuanping Rock Group, Shaanxi Province[J]. *Geology of Shaanxi*, 20(1): 72–78 (in Chinese with English abstract).
- Li Mingze, Wu Cailai, Lei Min, Qin Haipeng, Liu Chunhua. 2014. Petrological characteristics and LA–ICP–MS zircon U–Pb Ages of Granitoid in Nanzhao area, Eastern Qinling Mountains[J]. *Geological Review*, 60(2): 166–182 (in Chinese with English abstract).
- Li Rongxi, An Sanyuan, hu Nenggao, Ye Jian. 1994. The metamorphic petrology and metamorphic evolution of Erlangping Group in Xixia County, Henan Province[J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 16(3): 71–77 (in Chinese with English abstract).
- Li Wuxian, Zhou Xinmin. 1999. Late Mesozoic subduction zone of southeastern China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 5 (2): 164–169 (in Chinese).
- Li Wuxian, Zhou Xinmin. 1999. Geochemical Constraints on petrogenesis of Late Mesozoic igneous rocks along the Zhejiang Fujian coast[J]. *Progress in Natural Science*, 10(7): 630–641(in Chinese with English abstract).
- Liu Guohui, Zhang Shouguang, Yu Zhendong. 1993. The Main Metamorphic Rocks and Metamorphic Evolution of the Qinling Mountains Orogenic Belt Group[M]. Beijing: Geological Publishing House, 87–104 (in Chinese).
- Liu Shaofeng, Zhang Guowei, Cheng Shun, Yao Anping. 1999. Evolution of flexural basins and process of collision orogeny in east Qinling–Dabieshan and its adjacent regions[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 34(3):336–346 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q and Wang D B. 2010. Continental and oceanic crust recycling–induced melt–peridotite interactions in the Trans–north China Orogen: U–Pb dating, Hf isotopes and trace elements in Zircons from mantle xenoliths[J]. *Petrology*, 51(1,2): 537–573.
- Ma Changqian, Yang Kunguang, Ming Houli, Lin Guangchun. 2003. The time when the earth's crust changed from compression to extension in Mesozoic in Dabie Mountain: The proof of granites[J]. *Science in China (series D)*, 33: 817–827 (in Chinese).
- Manier P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *GSA. Bull.*, 101: 635–643.
- Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Yu Jinjie, Wang Yitian, Niu Baogui. 2003. Geodynamic background of Mesozoic large–scale mineralization in North China and its adjacent areas: implications obtained from dating of metal deposits[J]. *Science in China (series D)*, 33(4): 289–299 (in Chinese with English abstract).
- Mattauer M, Maatte P, Malavelle J. 1985. Tectonics of Qinling Belt: Build–Up and evolution of Western Asia[J]. *Nature*, 317: 484–495.
- Meng Q R, Zhang G W. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling Orogen, Central China[J]. *Tectonophysics*, 323:183–196.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rocks system[J]. *Earth–Science Reviews*, 37(3–4): 215–224.
- Ni Shijun, Li Chaoyang, Zhang Cheng, Gao Rongde, Liu Chunfu. 1994. Contribution of mafic dikes to gold mineralization–the example of gold deposit in Qinling[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2(3): 70–78 (in Chinese with English abstract).
- Pitcher W S. 1983. Granite Type and Tectonic Environment[C]/K F Hsu (editor). *Mountain Building Processes*. London: Academic Press, 1–176.
- Peccerillo R, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc–alkaline volcanic rocks from the Kastamone area, Northern Turkey[J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 58: 63–81.
- Pei Xianzhi. 1997. Composition and Tectonic Evolution of the Shangdan Ectonic Belt in East Qinling Mountains[M]. Xi'an: Xi'an Mapping Press, 233–251 (in Chinese).
- Pei Xianzhi, Li Houmin, Li Guoguang. 2001. A study of formation epoch and tectonic attribute of the Danfeng Group complex in East Qinling Mountains[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(2): 180–188 (in Chinese with English abstract).
- Petford N, Cruden A R, McCaffrey K J W, et al. 2000. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth crust[J]. *Nature*, 408: 669–673.
- Qin Haipeng, Wu Cailai, Wu Xiuping, Lei Min, Hou Zhenhui. 2012. LA–ICP–MS Zircon U–Pb ages and Implications for tectonic setting of the Mangling Granitoid Plutons in Qinling Orogen Belt[J]. *Geological Review*, 58(4): 142–152 (in Chinese with English abstract).
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Li Yongfei. 2007. Genesis of the Indosinian Guangtoushan adakitic biotite plagiogranite in the Mianxian–Lueyang (Mianlue) suture, South Qinling, China, and its tectonic implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(4): 466–471 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun, Chen Tingyu, Niu Baogui, Liu Zhigang, Liu Fengren. 1992. Tectonic evolution and mineralization of the continental lithosphere in eastern China and its adjacent areas[M]. Beijing: Science Press, 1–203 (in Chinese).
- Shi Quanzeng, Wei Xiangdong, Li Mingli, Pang Jiqun. 2004. Nappe structures and extensional detachment structures on the northern margin of the eastern Qinling Mountains mountain range in Henan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–109(in Chinese).

- Smith A D. 2007. A plate model for Jurassic to Recent intraplate volcanism in the Pacific Ocean Basin[J]. Geological Society of America Special Papers, 430: 471–495.
- Song Ziji, Zhou Qingshan. 1988. The characteristics of regional metamorphism of the Kuanping Group[J]. Geology of Shaanxi, 6 (2): 21–32 (in Chinese).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J(eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Boulder: Geol. Soc. Spec. Publ., 42: 313–345.
- Sun Weidong, Li Shuguang, Yadong Chen, Li Yujing. 2000. Zircon U–Pb dating of granitoids from South Qinling, Central China and their geological significance[J]. Geochimica, 29(3): 209–216 (in Chinese with English abstract).
- Suo Shutian. 1999. Study on tectonic deformation of UHP metamorphic province in Dabie Massif, China[J]. Earth Science Frontiers, 6(4): 255–262 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jingui, Lu Xinxiang. 1988. Granite petrology of Funiu Mountain[J]. Henan Geology, 6(3): 35–40 (in Chinese).
- Wang Tao, Wang Xiaoxia, Tian Wei, Zhang Chengli, Li Wuping, Li Shan. 2009. North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time: Implications for orogenic processes in the orogens of central China[J]. Sci. China: Ser D–Earth Sci., 39 (7): 949–971 (in Chinese).
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Qi Xian, Li Shan. 2011. Temporal–spatial variations, origin and their tectonic significance of the Late Mesozoic granites in the Qinling, Central China[J]. Acta Petrologica Sinica, 27: 1573–1593 (in Chinese with English abstract).
- Wang X X, Wang T, Zhang C L. 2013. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling Orogen, China: Constraints on orogenic process[J]. Asian Earth Sci., 72: 129–151.
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Zhang Chengli. 2015. Granitoid magmatism in the Qinling orogen, central China and its bearing on orogenic evolution[J]. Science China: Earth Sciences, 58: 1497–1512 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007. Lu–Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- Wu Liren. 1985. Mesozoic Granitoids of eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 1(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genetic mineralogy of zircon and its constraints on the interpretation of U–Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1589–1604 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Qiu Ruizhao. 2009. A preliminary study of the relationship between granitoids and the growth of continental crust: a case study of the formation of key orogen granitoids in China[J]. Geology in China, 36(3): 594–622 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Liu Yong, Feng Yanfang, Qiu Ruizhao, Zhang Yu. 2010. A preliminary study of the relationship between Mesozoic lithosphere evolution in eastern China and the subduction of the Pacific plate[J]. Geology in China, 37(4): 1092–1101 (in Chinese with English abstract).
- Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Ruiling, Ye Huishou, Zhang Yixing, Wan Yusheng, Li Houmin, Gao Jianjing, Zheng Rongfen. 2007. SHRIMP zircon U–Pb dating for volcanic rocks of the Daying Formation from Baofeng basin in eastern Qinling, China and its implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2387–2396 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Lu Yilun, Tang Yaoqing. 1986. Deformation characteristics and tectonic evolution of the eastern Qinling Orogenic Belt[J]. Acta Geologica Sinica, 3: 237–247 (in Chinese).
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Yan Zhen, Wang Tao, Chen Junlu, Xiang Zhongjin, Zhang Zongqing, Jiang Chunfa. 2008. Origin, age and tectonic implications of metamafic rocks in the Kuanping Group of the Qinling orogenic belt, China[J]. Geological Bulletin of China, 27(9): 1475–1492 (in Chinese with English abstract).
- Yang Haibin, Tian Xiaobo, Bai Zhiming, Zhang Zhongjie. 2016. Discussion on the relationship between Pan Pacific Plate Movement and Mesozoic geological evolution of Eastern Chinese Continent[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 46 (3): 781–797 (in Chinese with English abstract).
- Yang Rongyong, Ren Qijiang, Hu Shouxi. 1993. The age and significance of Kuanping Group in East Qinling Mountains[J]. Journal of Stratigraphy, 17(4): 272–276 (in Chinese).
- Yang Kunguang, Ma Changqian, Xu Changhai, Yang Weiran. 1999. Differential uplift of the North Huaiyang tectonic belt and the Dabie orogenic belt[J]. Science in China (Series D), 29(2): 97–103 (in Chinese).
- Ye Huishou, Mao Jingwen, Li Yongfeng, Yan Changhai, Guo Baojian, Zhao Caisheng, He Chunfen, Chen Rongli, Chen Li. 2006. Characteristics and metallogenic mechanism of Mo–W and Pb–Zn–Ag deposits in Nanihui Ore Field, West Henan Province[J]. Geoscience, 20(1): 165–174 (in Chinese with English abstract).
- Yu Zhendong. 1987. Petrographic characteristics and early crustal evolution of metamorphic rocks of Qinling Mountains group in western Henan[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 12(3): 321–328 (in Chinese).
- Zhang Hongfei, Zhang Benren, Luo Tingchuan. 1993. Geochemical study of genesis and tectonic setting for Late Proterozoic granitoids, North Qinling, China[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 18(2): 194–202 (in Chinese).
- Zhang Guowei, Meng Qingren, Lai Shaocong. 1995. The structure of the Qinling Mountains Orogenic Belt[J]. Science in China (series B), 25(9): 994–1003 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Guowei, Meng Qingren, Yu Zaiping, Sun Yong, Zhou Dingwu, Guo Anlin. 1996. The orogenic process and its dynamics of the Qinling Mountains orogenic belt[J]. *Science in China (series D)*, 26(3): 193-200 (in Chinese).
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng. 2001. Qinling Mountains orogenic belt and its continental dynamics[M]. Beijing: Science Press, 207-236 (in Chinese).
- Zhang Chengli, Liu Liang, Zhang Guowei. 2004. Determination of Neoproterozoic post-collisional granites in the north Qinling Mountains and its tectonic significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 33-42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Liu Liang, Wang Tao, Wang Xiaoxia, Li Lei, Gong Qifu, Li Xiaofei. 2013. Granitic magmatism related to Early Paleozoic continental collision in the North Qinling belt[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 58(23): 2323-2329 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 2013. Is the Mesozoic magmatism in eastern China related to the westward subduction of the Pacific plate[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(1): 113-128 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Weiji. 1987. The subdivision of the Kuanping Group and its geological date[J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 1(9): 15-29 (in Chinese).
- Zhu Laimin, Zhang Guowei, Guo Bo, Li Ben. 2008. U-Pb (LA-ICP-MS) zircon dating for the Large Jinduicheng porphyry Mo deposit in the East Qinling, China, and its metallogenetic geodynamical setting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(2): 204-220 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yue, Zhai Mingguo, Chen Hong, Zhang Shuanhong. 2017. Paleozoic-early Jurassic tectonic evolution of North China Craton and its adjacent orogenic belts[J]. *Geology in China*, 44(1): 44-60 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinmin, Li Wuxian. 2000. Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: model of lithospheric subduction combined with underplating of basalt[J]. *Progress in Natural Science*, 10(3): 240-247 (in Chinese with English abstract).
- 包汉勇, 郭战峰, 张罗磊, 黄亚平. 2013. 太平洋板块形成以来的中国东部构造动力学背景[J]. *地球科学进展*, 28(3): 337-346.
- 陈江峰, 谢智, 刘顺生. 1995. 大别造山带冷却年龄: ^{40}Ar - ^{39}Ar 裂变径迹年龄测定[J]. *中国科学(B辑)*, 25(12): 1086-1092.
- 陈岳龙, 张本仁. 1995. 北秦岭丹凤地区早古生代花岗岩的 Pb、Sr、Nd 同位素地球化学特征[J]. *地质科学*, 30(3): 247-257.
- 崔建军, 张岳桥, 董树文, 江博明, 徐先兵, 马立成, 李建华, 苏金宝, 李勇. 2013. 华南陆缘晚中生代造山及其地质意义[J]. *中国地质*, 40(1): 86-105.
- 董云鹏, 张国伟, 朱炳泉. 2003. 北秦岭构造属性与元古代构造演化[J]. *地球学报*, 24(1): 3-10.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 王涛, 胡建民, 陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. *地质学报*, 81(11): 1449-1461.
- 董树文, 吴锡浩, 吴珍汉, 邓晋福, 高锐, 王成善. 2000. 论东亚大陆的构造翘变——燕山运动的全球意义[J]. *地质评论*, 46(1): 8-13.
- 冯益民, 曹宣铎, 张二册. 2004. 勉县—略阳带大地构造属性之探讨[J]. *地质评论*, 50(3): 295-303.
- 高胜, 陈丹玲, 宫相宽, 任云飞, 李海平. 2015. 天水东岔地区宽坪岩群碎屑岩和花岗岩中的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地学前缘*, 22(4): 255-264.
- 郭波, 朱赖民, 李森, 弓虎军, 王建其. 2009. 华北陆块南缘华山合峪花岗岩岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成与成岩动力学背景[J]. *岩石学报*, 25(2): 265-281.
- 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 徐学义, 张宏飞, 任光明, 余吉远. 2007. 北秦岭西段宽坪岩群斜长角闪岩锆石 LA-ICP-MS 测年及其地质意义[J]. *地质学报*, 81(1): 79-87.
- 胡志宏, 胡受奚. 1990. 东秦岭燕山期大陆内部挤压俯冲的构造模式及其证据[J]. *南京大学学报*, 26(3): 489-498.
- 李靠社, 白胜型, 蔡振龙. 1994. 东秦岭丹凤群秦岭群宽坪群关系新探[J]. *中国区域地质*, (3): 215-222.
- 李靠社, 白胜利, 李万生. 1995. 东秦岭中段宽坪群秦岭群地层厘定[J]. *华北地质矿产杂志*, 10(1): 93-98.
- 李靠社. 2002. 陕西宽坪岩群变基性熔岩锆石 U-Pb 年龄[J]. *陕西地质*, 20(1): 72-78.
- 李名则, 吴才来, 雷敏, 秦海鹏, 刘春花. 2014. 东秦岭南召地区花岗岩岩石地球化学特征及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄[J]. *地质评论*, 60(2): 166-182.
- 李荣西, 安三元. 1994. 河南西峡二郎坪群变质岩岩石学及变质作用演化特征研究[J]. *西安地质学院院报*, 16(3): 71-77.
- 李武显, 周新民. 1999. 中国东南部晚中生代俯冲带探索[J]. *高校地质学报*, 5(2): 164-169.
- 李武显, 周新民. 2000. 浙闽沿海晚中生代火成岩成因的地球化学制约[J]. *自然科学进展*, 10(7): 630-641.
- 刘国惠, 张寿广, 游振东. 1993. 秦岭造山带主要变质岩群及其变质演化[M]. 北京: 地质出版社, 87-104.
- 刘少峰, 张国伟, 程顺有, 姚安平. 1999. 东秦岭—大别山及邻区挠曲类盆地演化与碰撞造山过程[J]. *地质科学*, 34(3): 336-346.
- 马昌前, 杨坤光, 明厚利, 林广春. 2003. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间: 花岗岩的证据[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 33: 817-827.
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示[J]. *中国科学(D辑)*: 33(4): 289-299.
- 倪师军, 李朝阳, 张诚, 高荣德, 刘春富. 1994. 中基性脉岩对金矿成矿的贡献——以小秦岭金矿区为例[J]. *成都理工学院学报*, 2(3): 70-78.
- 裴先治. 1997. 东秦岭商丹构造带的组成与构造演化[M]. 西安: 西安地图出版社, 233-251.
- 裴先治, 李厚民, 李国光. 2001. 东秦岭丹凤岩群的形成时代和构造属性[J]. *岩石矿物学杂志*, 20(2): 180-188.
- 秦海鹏, 吴才来, 武秀萍, 雷敏, 侯振辉. 2012. 秦岭造山带蟒岭花岗岩

- 岩锆石 LA-MC-ICP-MSU-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质评论, 58(4): 142-152.
- 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岩质花岗岩的成因及其地质意义[J]. 地质通报, 26(4): 466-471.
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚, 刘凤仁. 1992. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1-203
- 石铨曾, 尉向东, 李明立, 庞继群. 2004. 河南省东秦岭山脉北缘的推覆构造及伸展拆离构造[M]. 北京: 地质出版社, 1-109.
- 宋子季, 周青山. 1988. 宽坪群区域变质作用特征[J]. 陕西地质, 6(2): 21-32.
- 孙卫东, 李曙光, Yadong Chen, 李育敬. 2000. 南秦岭花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地球化学, 29(3): 209-216.
- 索书田. 1999. 大别地块超高压变质省的构造变形研究[J]. 地学前缘, 6(4): 255-262.
- 王金贵, 卢新祥. 1988. 伏牛山花岗岩体的岩石学特征[J]. 河南地质, 6(3): 35-40.
- 王涛, 王晓霞, 田伟, 张成立, 李伍平, 李舫. 2009. 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), 39(7): 949-971.
- 王晓霞, 王涛, 齐秋菊, 李舫. 2011. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义[J]. 岩石学报, 27: 1573-1593.
- 王晓霞, 王涛, 张成立. 2015. 秦岭造山带花岗质岩浆作用与造山带演化[J]. 中国科学: 地球科学, 58: 1497-1512.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185-220.
- 吴利仁. 1985. 中国东部中生代花岗岩类[J]. 岩石学报, 1(1): 1-10.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1589-1604.
- 肖庆辉, 邓晋福, 邱瑞照. 2009. 花岗岩类与大陆地壳生长初探—以中国典型造山带花岗岩类岩石的形成为例[J]. 中国地质, 36(3): 594-622.
- 肖庆辉, 刘勇, 冯艳芳, 邱瑞照, 张昱. 2010. 中国东部中生代岩石圈演化与太平洋板块俯冲消减关系的讨论[J]. 中国地质, 37(4): 1092-1101.
- 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 叶会寿, 张毅星, 万渝生, 李厚民, 高建京, 郑榕芬. 2007. 东秦岭宝丰盆地大营组火山岩 SHRIMP 定年及其意义[J]. 岩石学报, 23(10): 2387-2398.
- 许志琴, 卢一伦, 汤耀庆. 1986. 东秦岭造山带的变形特征及构造演化[J]. 地质学报, 3: 237-247.
- 闫全人, 王宗起, 闫臻, 王涛, 陈隽璐, 向忠金, 张宗清, 姜春发. 2008. 秦岭造山带宽坪群中的变铁镁质岩的成因、时代及其构造意义[J]. 地质通报, 27(9): 1475-1492.
- 杨海斌, 田小波, 白志明, 张中杰. 2016. 浅谈中国大陆东缘中生代地质演化与泛太平洋板块活动的关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 46(3): 781-797.
- 杨荣勇, 任启江, 胡受奚. 1993. 东秦岭地区宽坪群的时代及其意义[J]. 地层学杂志, 17(4): 272-276.
- 杨坤光, 马昌前, 许长海, 杨巍然. 1999. 北淮阳构造带与大别造山带的差异性隆升[J]. 中国科学(D辑), 29(2): 97-103.
- 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 燕长海, 郭保健, 赵财胜, 何春芬, 郑榕芬, 陈莉. 2006. 豫西南泥湖矿田钨及铅锌银矿床地质特征及其成矿机理探讨[J]. 现代地质, 20(1): 165-174.
- 游振东. 1987. 豫西秦岭群变质岩岩相学特征及早期地壳演化[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 12(3): 321-328.
- 张成立, 刘良, 张国伟. 2004. 北秦岭新元古代后碰撞花岗岩的确定及其构造意义[J]. 地学前缘, 11(3): 33-42.
- 张成立, 刘良, 王涛, 王晓霞, 李雷, 龚齐福, 李小平. 2013. 北秦岭早古生代大陆碰撞过程中的花岗岩浆作用[J]. 科学通报, 58(23): 2323-2329.
- 张宏飞, 张本仁, 骆庭川. 1993. 北秦岭新元古代花岗岩类成因与构造环境的地球化学研究[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 18(2): 194-202.
- 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 1995. 秦岭造山带的结构构造[J]. 中国科学(B辑), 25(9): 994-1003.
- 张国伟, 孟庆任, 于在平, 孙勇, 周鼎武, 郭安林. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. 中国科学(D辑), 26(3): 193-200.
- 张国伟, 张本仁, 袁学成. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 207-236.
- 张旗. 2013. 中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块向西俯冲有关吗? [J]. 岩石矿物学杂志, 32(1): 113-128.
- 张维吉. 1987. 宽坪群的层序划分及时代归属[J]. 西安地质学院学报, 1(9): 15-29.
- 赵越, 翟明国, 陈虹, 张拴宏. 2017. 华北克拉通及相邻造山带古生代—侏罗纪早期大地构造演化[J]. 中国地质, 44(1): 44-60.
- 周新民, 李武显. 2000. 中国东南部晚中生代火成岩成因: 岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式[J]. 自然科学进展, 10(3): 240-247.
- 朱赖民, 张国伟, 郭波, 李彝. 2008. 东秦岭金堆城大型斑岩钨矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿动力学背景[J]. 地质学报, 82(2): 204-220.