

西秦岭天水地区志留纪利桥花岗岩的岩石成因

——来自地球化学和锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素的约束

李国倩¹, 周开¹, 李云帅^{1,2}, 张建新², 武亚威², 郭祺², 毛小红²

(1. 天津大学 地球系统科学学院, 表层地球系统科学研究院, 天津 300072; 2. 自然资源部大陆动力学重点实验室, 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘要: 花岗岩在探讨大陆地壳生长与演化、造山带的形成及地球动力学演化等方面具有重要的意义。西秦岭天水地区利桥花岗岩主要由斜长石、石英、钾长石和黑云母等矿物组成, 锆石 U-Pb 年代学表明岩体结晶年龄为 439 ± 3 Ma。利桥花岗岩具有高硅、富碱的特征, 其铝饱和指数 A/CNK 值介于 1.01~1.16 之间, 属于弱过铝质高钾钙碱性-钙碱性花岗岩。利桥花岗岩富集 K、Ba 等大离子亲石元素和 La、Ce 等轻稀土元素, 亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素, 显示具有俯冲带岛弧岩浆岩的地球化学特征。利桥花岗岩具有较低的 $Mg^\#$ 值 (25~41), 且 La/Yb-La、La/Sm-La 图解显示该花岗岩在形成明显与部分熔融作用相关, 此外岩体中的镁铁质微粒包体和正的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值, 表明这些花岗岩在形成过程中有幔源物质的贡献。结合区域地质背景, 我们认为利桥花岗岩是弧-陆碰撞前俯冲洋壳中先存的基性岩或新生地壳发生部分熔融所致, 当然也不排除其为大陆边缘弧增厚下地壳部分熔融的产物。

关键词: 锆石 U-Pb 年代学; Hf 同位素; 全岩地球化学; 花岗岩; 西秦岭

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)02-0330-14

Petrogenesis of the Silurian Liqiao granites in the Tianshui area, West Qinling: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotope

LI Guo-qian¹, ZHOU Kai¹, LI Yun-shuai^{1,2}, ZHANG Jian-xin², WU Ya-wei², GUO Qi² and MAO Xiao-hong²

(1. School of Earth System Science, Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Granite plays an important role in exploring the growth and evolution of continental crust as well as the geodynamics of orogenic belts. The Liqiao granite in the Tianshui area, West Qinling Orogen, is mainly composed of plagioclase, quartz, K-feldspar, and biotite. Zircon U-Pb dating shows that the crystallization age of the granite is 439 ± 3 Ma. Geochemistry suggests that the granite contains high silicon and alkali, and it belongs to the peraluminous to high potassium calc-alkaline series. The granite is rich in large ion lithophilic elements (e. g. K and Ba), light rare earth elements (e. g. La and Ce), and depleted in high field strength elements such as Nb, Ta, and Ti, which shows the geochemical characteristics of island arc magmatic rocks. Furthermore, the granite in the Liqiao area shows low $Mg^\#$ values (25~41), and the La/Yb-La and La/Sm-La diagrams show that the formation of

收稿日期: 2023-12-17; 接受日期: 2024-01-30; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221649); 国家自然科学基金项目 (42072237)

作者简介: 李国倩 (2003-), 本科生, 地理科学专业; 通讯作者: 李云帅 (1986-), 副教授, 主要从事地理科学与地质学相关的教学与科研, E-mail: liyunshuai@tju.edu.cn.

the granite is related to partial melting. In addition, the existence of microgranular enclaves in the host rock mass and the positive $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values of zircons indicate that the formation of these granites is influenced by mantle-derived materials. Combined with the regional geological background and the results in this study, we believe that the Liqiao granite was formed by partial melting of the juvenile basaltic lower crust before the arc-continental collision. Certainly, it cannot be ruled out that it was the product of partial melting of the thickened of the continental marginal arc.

Key words: zircon U-Pb geochronology; Hf isotope; geochemistry; granite; West Qinling

Fund support: China Geological Survey Project (DD20221649); National Natural Science Foundation of China (42072237)

作为大陆地壳的重要组成部分,花岗岩是探讨大陆地壳生长与演化的重要探针。大量研究表明,花岗岩的成因分类、岩浆物质来源及其形成的构造环境研究,可为深入解译造山带的形成及地球动力学演化过程提供重要信息(Harris *et al.*, 1986; Schermaier *et al.*, 1997; 张旗等, 2007)。

秦岭造山带是华北板块、扬子板块及夹于两者之间的微板块经历了多期的碰撞拼合而形成的复合型造山带(张国伟等, 1995, 2001, 2004; Dong *et al.*, 2011)。以宝成铁路为界,将秦岭造山带划分为东秦岭和西秦岭。近年来的区域地质调查和研究工作显示,西秦岭弧变质-岩浆杂岩带中发育志留纪不同类型的侵入岩,但是它们的岩石成因仍存在一定的争议,如:党川花岗岩(岩浆结晶年龄为 438 ± 3 Ma)的地球化学特征表明其可能产生于增厚下地壳的部分熔融(C型埃达克岩,王婧等, 2008),而百花基性岩浆杂岩(辉长岩的年龄为 435 ± 2 Ma)的地球化学特征则显示其形成于弧构造环境(裴先治等, 2007a)。因而,这些志留纪岩浆岩的岩石成因及形成构造背景仍需进一步探究。

本文通过对天水地区利桥花岗岩的锆石 U-Pb 年代学、锆石 Hf 同位素以及全岩主微量地球化学,探讨利桥花岗岩的岩浆结晶时代与岩石成因,并结合秦岭造山带的构造演化历史,探讨该岩体形成的构造环境和动力学演化过程,从而为西秦岭的构造岩浆作用提供重要的约束信息。

1 区域地质背景

秦岭造山带被认为是一个典型的复合型造山带,它东接桐柏-大别-苏鲁造山带,西接祁连-昆仑造山带,是中国中央造山带的重要组成部分(张建新等, 2011; 毛小红等, 2017; Wang *et al.*, 2019)。秦岭造山带内分布多条大的断裂和 2 条主要缝合带。

两条主要缝合带分别为早古生代商丹缝合带和中生代勉略缝合带。以主要断裂带和缝合带为界,总体上将秦岭造山带划分为 4 个地质单元(张国伟等, 1995; Meng and Zhang, 2000; Dong *et al.*, 2011),从北到南分别是华北克拉通南缘、北秦岭、南秦岭和扬子克拉通北缘。华北克拉通南缘主要指灵宝-鲁山-舞阳断裂和洛南-栾川断裂所围限的区域;北秦岭构造带位于商丹缝合带和洛南-栾川断裂带之间,由北向南包括宽坪群、二郎坪群和秦岭群(秦岭杂岩);南秦岭构造带主要指商丹缝合带和勉略缝合带之间的区域;扬子克拉通北缘主要指勉略-巴山-襄樊-广济断裂以南与南秦岭构造带相邻的区域。以宝成铁路为界,将秦岭造山带划分为东秦岭和西秦岭。

西秦岭造山带北部出露有前寒武系基底(原“秦岭岩群”,我们称之为秦岭杂岩)、早古生代蛇绿岩(关子镇-武山蛇绿岩)、早古生代火山沉积岩(李子园群、草滩沟群)以及大量早古生代(加里东期)和三叠纪(印支期)花岗岩体。根据前人资料,结合我们的研究,把西秦岭北部划分为以下 3 个构造单元:李子园俯冲杂岩带(商丹缝合带)、秦岭弧变质-岩浆杂岩带和清水-张家川弧后杂岩带(毛小红等, 2017, 2018)(图 1)。

(1) 李子园俯冲杂岩带(商丹缝合带),主要出露于党川以南花庙河-姚家坝一带,主要为一套变沉积-火山岩系,主要由绿色片岩、粉砂质板岩、绢云石英片岩夹斜长角闪片岩、长石砂岩、安山玢岩和少量透镜状磁铁矿石片岩。丁仁平等(2004)从早古生代李子园群中解体出一套变质基性火山岩,其地球化学特征表明其属 N-MORB 型玄武岩,是洋脊蛇绿岩的重要组成部分。这套岩石向东与东秦岭的丹凤群相当,为商丹缝合带的标志,与北部深变质的秦岭杂岩呈韧性剪切带接触,剪切带的运动学显示具左旋特征(Mao *et al.*, 2020)(图 1)。

(2) 秦岭弧变质-岩浆杂岩带以深变质的“秦岭

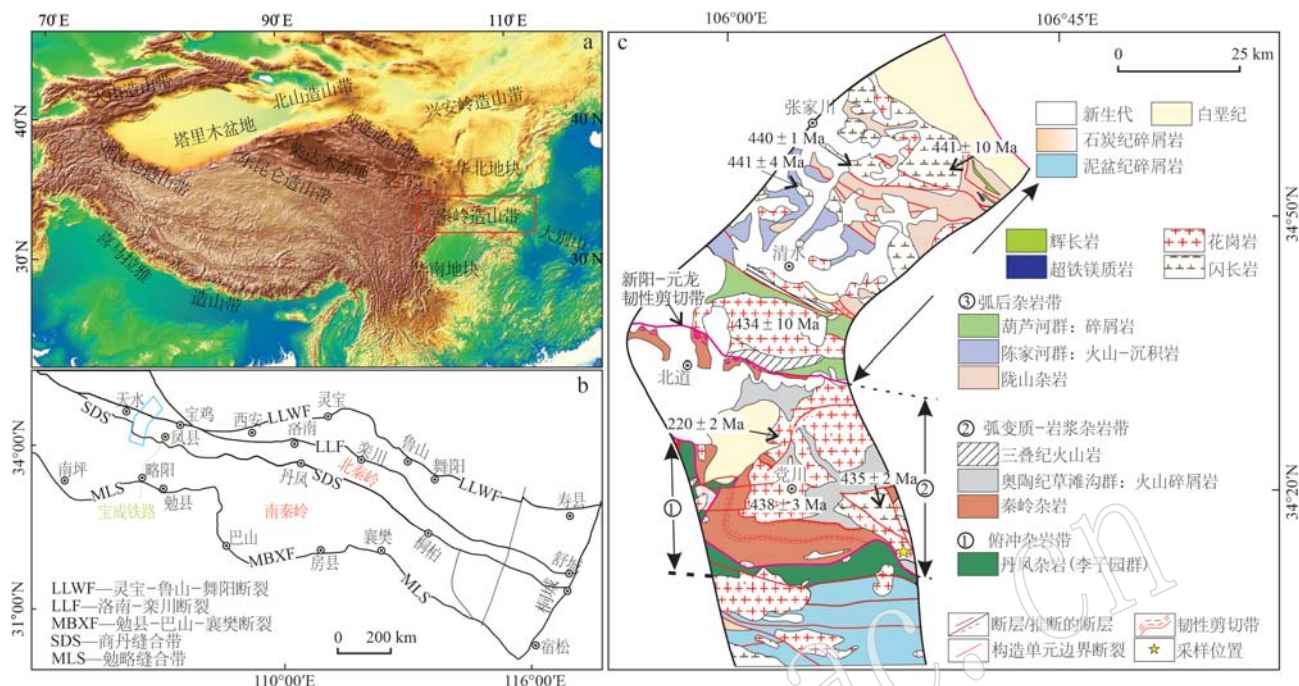


图1 秦岭造山带地质简图[改自毛小红等(2017)]

Fig. 1 Simplified Geological map of the Qinling Orogen (modified after Mao Xiaohong *et al.*, 2017)

群”(秦岭杂岩)为特征,主要出露在天水以北的新阳-北道-元龙及天水以南的花庙地区,以深变质的花岗质片麻岩(正片麻岩)和副变质表壳岩为特征。副变质岩包括含石榴子石夕线黑云母斜长片麻岩、石榴黑云变粒岩(片岩),并夹有大理岩、钙硅酸盐岩、石英岩及少量斜长角闪岩(局部含角闪二辉麻粒岩),部分发生强烈的混合岩化。锆石和独居石 U-Pb 定年显示秦岭杂岩经历了早泥盆世-晚志留世(433~411 Ma)高角闪岩相-麻粒岩相变质作用和深熔作用(毛小红等, 2017, 2018; 郭祺等, 2022; Guo *et al.*, 2023),正片麻岩以花岗质成分为特征,发育明显的片麻理,原岩年龄为新元古代(主要集中于 950~850 Ma)(陆松年等, 2005; 裴先治等, 2007b; 毛小红等, 2018),但与副变质岩的关系仍不清楚。秦岭杂岩与南侧的李子园俯冲杂岩带和其北侧的草滩沟群以及党川岩体均呈韧性剪切带接触关系(图1)(Mao *et al.*, 2020)。草滩沟群主要以火山碎屑岩和火山熔岩为主,其中两当张家庄地区的草滩沟群火山岩的形成被认为与俯冲作用有关,且形成于岛弧环境(闫全人等, 2007)。前人对该群中的变质中基性火山岩进行了锆石 U-Pb 定年,得出其形成于晚

奥陶世(王洪亮等, 2007)。后期侵入的花岗岩和闪长岩主要包括 438±3 Ma 的党川岩体(王婧等, 2008)、435±2 Ma(裴先治等, 2007a)的百花基性岩浆杂岩和 220±2 Ma 的石门花岗岩(王婧等, 2008)。

(3) 清水-张家川弧后杂岩带主要由葫芦河群和陈家河群组成(图1)。陈家河群为低绿片岩相变质的基性火山岩、中酸性火山岩和陆源碎屑岩组合。基性火山岩分布在水东部的秦安县北杨家寺—清水县红土堡—南头河一带,因其在清水红土堡一带出露面积较多,在 1:25 万天水市幅区域地质图中将其称为红土堡变基性岩。主要为一套低绿片岩相变质岩系,岩石学和地球化学研究红土堡基性火山岩为拉斑系列和钙碱性系列,既有岛弧火山岩的特征,又有洋脊玄武岩的特征,解释其形成于弧后盆地环境,其时代为晚奥陶世(徐学义等, 2008)。酸性火山岩以变质流纹岩、英安岩、斑状流纹岩为主,夹英安质、流纹质熔结角砾岩、集块岩及凝灰岩,局部夹灰绿色变质玄武岩、玄武安山岩。酸性火山岩的地球化学特征表明其形成于岛弧环境。葫芦河群主要由浅变质碎屑岩(砂岩、杂砂岩、泥质砂岩等)组成,碎屑锆石定年确定其沉积时代为志留纪(裴先治等, 2012)。

2 岩相学特征

利桥花岗岩岩体分布在李子园俯冲杂岩带北侧,并与后者为剪切带(断层)接触,采样位置(经纬度)为 $106^{\circ}24'49.77''$, $34^{\circ}11'41.75''$ 。

利桥花岗岩呈块状构造,中粒似斑状花岗结构,并具有弱的片麻状构造(图 2a),同时可见少量的闪长岩暗色微粒包体(图 2b)。岩石主要由斜长石、石英、钾长石和黑云母等矿物组成(图 2c、2d),暗色微粒包体则主要由斜长石、角闪石和黑云母等矿物组成(图 2e、2f)。

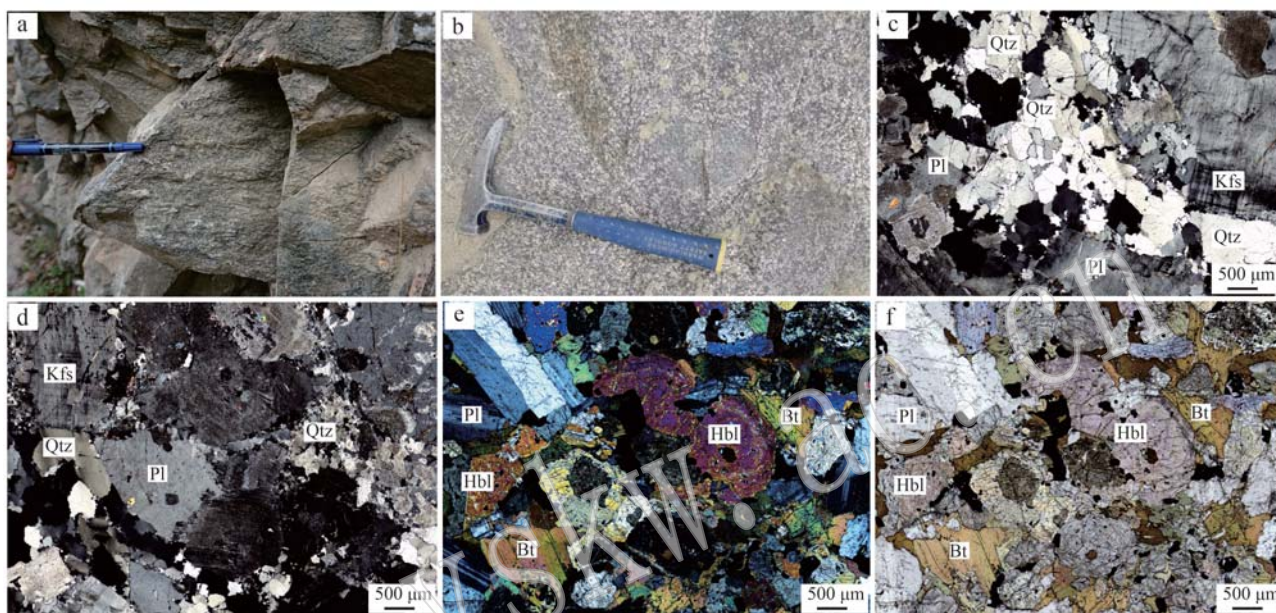


图 2 西秦岭利桥花岗岩野外(a,b)及显微照片(c~e 为正交偏光照片,f 为单偏光照片)

Fig. 2 Field photos (a and b) and microphotographs (c~e: crossed polars; f: plane polarized) of the Liqiao granite, West Qinling

Qtz—石英; Pl—斜长石; Hbl—角闪石; Bt—黑云母; Kfs—钾长石

Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Hbl—hornblende; Bt—biotite; Kfs—K-feldspar

3 测试方法

3.1 锆石 U-Pb 定年

锆石 U-Pb 同位素定年分析在北京锆年领航科技有限公司运用 LA-ICP-MS 完成。锆石 U-Pb 定年分析所用仪器为 Agilent 7900 型 ICP-MS 及 NWR193UC 型激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为 $30\ \mu\text{m}$, 频率为 6 Hz, 能量密度约为 $5\ \text{J}/\text{cm}^2$ 。激光剥蚀过程采用氦气为载体, 氩气作为补偿气, 二者在进入 ICP 前通过 T 型接头混合。U-Pb 同位素定年分析采用锆石 GJ-1 作为校正标样, 91500 作为监测标样, 同时采用 NIST610 作为外标进行微量元素分馏校正。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号。数据分析处理采用 Iolite 程序(Paton *et al.*, 2010)完成, 锆石的 U-Pb 年

龄谐和图与加权平均年龄的计算均采用 Isoplot/Ex_ver3(Ludwig, 2003)完成。

3.2 锆石 Lu-Hf 同位素

锆石 Lu-Hf 同位素测试在北京锆年领航科技有限公司使用 LA-MC-ICP-MS 分析完成。Lu-Hf 同位素分析测试使用的仪器为 NEPTUNE plus 型 MC-ICP-MS 和 Resolution SE 激光剥蚀系统, 同时配备了信号平滑装置以提高信号稳定性和同位素比值测试精密度。实验过程中采用纯 He 作为剥蚀物质载气, 采用单点剥蚀模式, 剥蚀所用斑束直径为 $45\ \mu\text{m}$, 频率为 10 Hz, 能量输出密度约为 $7\sim 8\ \text{J}/\text{cm}^2$ 。测试时采用 Plešovice、91500 和 GJ-1 国际锆石标准作为参考, 测试值与推荐值在误差范围内一致。

3.3 全岩主、微量地球化学

全岩主、微量元素的分析在武汉上谱分析科技有限公司进行。主量元素使用日本理学生产的 ZSX

Primus II 型波长色散 X 射线荧光光谱仪 (XRF) 测试, 主量元素分析谱线均为 $K\alpha$, 标准曲线采用 GBW07101-14 建立, 测试相对标准偏差 $<2\%$ 。LOI 检测使用减重法。微量元素测试使用 Agilent 7700e ICP-MS 完成。用于 ICP-MS 分析的样品处理如下: 将烘干后的 200 目样品 50 mg 置于 Teflon 溶样弹中, 先后依次缓慢加入 1 mL 高纯 HNO_3 和 1 mL 高纯 HF 后置于 $190^\circ C$ 烘箱中加热 24 h 以上, 待溶样弹冷却, 开盖后置于 $140^\circ C$ 电热板上蒸干, 然后加入 1 mL HNO_3 并再次蒸干, 之后加入 1 mL 高纯 HNO_3 、1 mL MQ 水和 1 mL 浓度为 1×10^{-6} 的内标 In, 再次将 Teflon 溶样弹置于 $190^\circ C$ 烘箱中加热 12 h 以上, 最后将溶液

转入聚乙烯料瓶中, 并用 2% HNO_3 稀释至 100 g 以备 ICP-MS 测试。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素

花岗岩样品 (QL22-13-4.1) 锆石阴极发光图像见图 3。锆石呈短柱-长柱状, 长宽比为 2:1~3:1, 阴极发光图像显示锆石具典型的岩浆震荡环带, 部分锆石内部发育弱发光的继承核 (图 3)。

样品 QL22-13-4.1 的 30 个测点中有效分析点为 22 个, 具体分析结果见表 1。其 ^{232}Th 含量为 $87.0 \times$

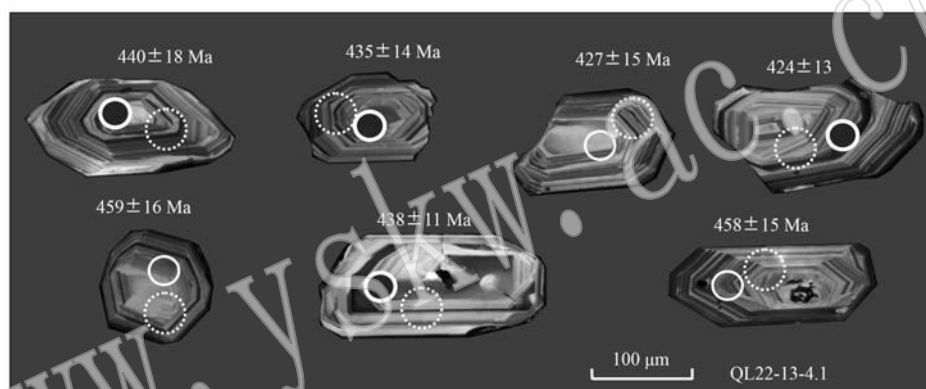


图 3 西秦岭利桥花岗岩锆石 CL 照片

Fig. 3 Zircon CL images of the Liqiao granite, West Qinling

实线圈是 U-Pb 测点, 虚线圈为 Hf 同位素测点

circles show U-Pb dating sites and dotted circles show Hf analysis sites

$10^{-6} \sim 403 \times 10^{-6}$, ^{238}U 含量为 $155 \times 10^{-6} \sim 588 \times 10^{-6}$, Pb 含量为 $28.5 \times 10^{-6} \sim 119 \times 10^{-6}$, Th/U 值变化于 0.49~1.04 之间。其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄范围为 456~425 Ma, 加权平均年龄为 438.9 ± 2.5 Ma (MSWD = 2.0) (图 4a、4b)。相应的锆石稀土元素测试结果见表 2, 锆石稀土元素配分模式图显示所有锆石富集重稀土元素, 具有明显的 Eu 负异常和 Ce 正异常 (图 4c)。

4.2 锆石 Hf 同位素

对做过 U-Pb 定年的锆石颗粒进行了 Hf 同位素分析, 测点紧邻锆石年龄分析点, 从而保证获得锆石的 U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素基本对应, 避免不同分析位置的差异造成年龄和 Lu-Hf 同位素的不一致性。锆石 Lu-Hf 同位素分析结果详见表 3。样品 QL22-13-4.1 的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值介于 0.282 529~0.282 685 之间, 相应的 $\epsilon Hf(t)$ 变化于 +6.76~+11.36 之间, 一阶

段模式年龄为 0.84~0.62 Ga, 二阶段模式年龄为 0.99~0.71 Ga (图 4d)。

4.3 全岩主微量地球化学

利桥花岗岩的主量、稀土和微量元素的地球化学特征见表 4。花岗岩的 SiO_2 含量为 69.73%~72.73%, Al_2O_3 含量为 13.93%~15.05%, Na_2O+K_2O 含量为 6.99%~8.93%, MgO 含量为 0.38%~1.01%, TiO_2 含量为 0.26%~0.59%, CaO 含量为 0.97%~1.93%。其中 SiO_2 与 MgO、CaO、 P_2O_5 含量呈现明显的负相关 (图 5)。

地球化学分析结果表明, 利桥花岗岩呈现出富硅、铝, 高碱和贫镁、钙与钛的特征。此外, 利桥花岗岩的 K_2O/Na_2O 值介于 0.38~1.20 之间, A/NK 值介于 1.17~1.46 之间, 铝饱和指数 A/CNK 介于 1.01~1.16 之间。在 $K_2O+Na_2O-SiO_2$ 图解上, 利桥

表 1 西秦岭天水地区利桥花岗岩 (QL22-13-4.1) 锆石 U-Pb 年代分析结果
Table 1 Zircon U-Pb analyzed data for the Liqiao granite (QL22-13-4.1) in the Tianshui area, West Qinling

样号	$w_B/10^{-6}$			同位素比值						同位素年龄/Ma					
	Pb	^{232}Th	^{238}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
1	46.0	151	232	0.057 2	0.002 6	0.533 2	0.023 1	0.068 8	0.001 1	498	100	434	15	429	7
2	51.0	152	272	0.056 4	0.002 5	0.554 9	0.026 1	0.071 0	0.001 0	478	98	448	17	442	6
3	119	403	588	0.054 4	0.001 7	0.516 8	0.016 1	0.069 2	0.001 0	387	70	423	11	431	6
4	66.3	242	233	0.061 2	0.002 8	0.572 0	0.025 2	0.068 2	0.000 9	656	98	459	16	425	6
5	48.7	162	232	0.054 2	0.003 4	0.515 8	0.033 0	0.069 4	0.001 2	389	147	422	22	432	7
6	72.8	246	386	0.056 5	0.001 9	0.539 4	0.017 5	0.069 6	0.001 0	472	72	438	12	433	6
7	67.1	217	342	0.053 3	0.002 1	0.518 5	0.020 1	0.070 8	0.000 9	343	88	424	13	441	5
8	116	393	492	0.054 5	0.001 7	0.539 4	0.017 2	0.071 9	0.001 0	394	69	438	11	447	6
9	28.5	87.0	176	0.060 1	0.002 5	0.570 4	0.023 0	0.069 8	0.001 0	609	90	458	15	435	6
10	46.0	148	251	0.057 3	0.002 0	0.560 3	0.019 2	0.071 3	0.000 9	502	71	452	13	444	6
11	43.9	136	258	0.056 5	0.002 1	0.561 8	0.022 5	0.072 1	0.001 0	472	85	453	15	449	6
12	45.7	155	200	0.054 1	0.002 3	0.521 1	0.020 2	0.070 9	0.001 0	372	94	426	13	442	6
13	56.5	194	248	0.057 3	0.002 7	0.551 0	0.023 4	0.071 4	0.001 3	506	106	446	15	445	8
14	29.7	96.4	155	0.057 4	0.002 7	0.554 3	0.026 2	0.070 4	0.001 0	506	106	448	17	439	6
15	57.9	200	282	0.057 8	0.002 2	0.553 7	0.021 0	0.069 7	0.001 0	520	88	447	14	434	6
16	41.6	135	222	0.058 1	0.003 2	0.539 5	0.028 5	0.068 7	0.001 2	600	120	438	19	428	7
17	102	346	353	0.052 7	0.002 0	0.534 8	0.021 2	0.073 2	0.001 0	317	119	435	14	456	6
18	49.8	158	223	0.054 4	0.003 2	0.520 9	0.028 9	0.071 4	0.001 4	391	131	426	19	444	8
19	56.5	205	238	0.057 8	0.002 9	0.542 1	0.027 0	0.068 6	0.001 0	524	111	440	18	428	6
20	55.3	192	208	0.054 8	0.002 2	0.552 8	0.023 0	0.072 7	0.001 2	406	89	447	15	452	7
21	63.5	212	298	0.055 8	0.001 8	0.561 5	0.018 9	0.072 5	0.000 9	443	75	453	12	451	5
22	58.3	193	287	0.056 1	0.002 0	0.538 1	0.019 3	0.069 3	0.000 8	457	112	437	13	432	5

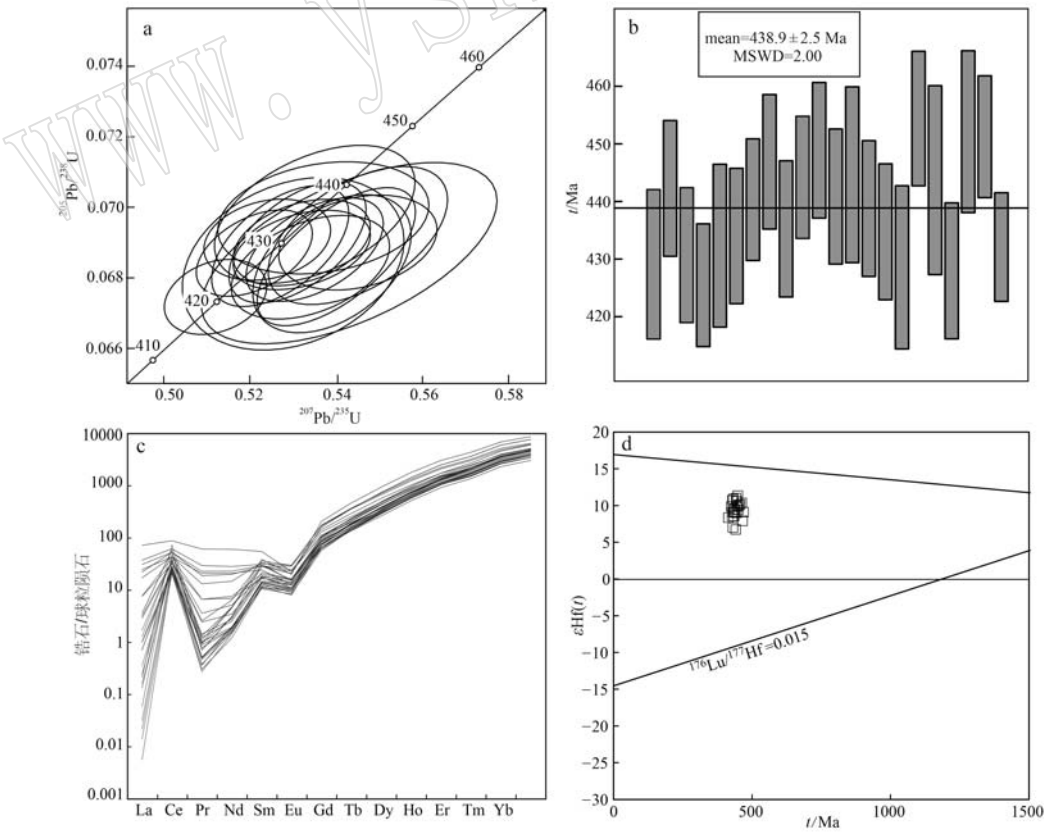


图 4 西秦岭利桥花岗岩锆石 U-Pb 定年结果(a,b)、稀土元素配分模式图(c)和 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ -年龄图(d)
Fig. 4 U-Pb dating results (a, b), chondrite-normalized REE pattern (c) and $\varepsilon\text{Hf}(t)$ - t diagram (d) for zircons from the Liqiao granite, West Qinling

表 2 西秦岭天水地区利桥花岗岩锆石稀土元素分析结果

$w_B/10^{-6}$

Table 2 Zircon REE analysis results of the Liqiao granite in the Tianshui area, West Qinling

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	7.01	43.89	2.35	12.24	5.74	1.74	29.35	11.23	154.74	65.99	341.11	80.93	863.36	176.77
2	0.00	24.13	0.06	1.02	2.76	0.83	22.58	9.07	128.68	56.67	297.22	73.00	772.32	168.21
3	0.07	60.45	0.14	2.83	7.77	1.51	55.11	22.81	309.89	132.45	660.79	145.66	1487.35	299.46
4	0.04	27.74	0.16	2.86	5.67	2.17	38.38	14.30	188.41	76.07	375.88	83.18	844.57	173.66
5	0.11	23.75	0.10	1.09	2.97	0.99	22.13	8.87	124.52	54.12	279.79	64.91	697.88	145.89
6	1.16	36.58	0.43	2.84	3.95	0.95	29.21	12.21	177.55	78.38	420.56	99.90	1098.81	234.17
7	0.40	32.13	0.18	1.68	3.75	1.05	27.07	11.56	162.59	71.74	376.90	90.40	983.72	207.57
8	1.13	48.67	0.09	1.89	5.70	1.56	42.88	17.67	245.06	105.92	540.26	121.93	1291.30	263.25
9	0.00	17.04	0.04	0.73	2.19	0.76	16.32	6.74	95.42	42.74	233.11	55.95	618.25	133.96
10	0.05	23.02	0.06	1.15	2.76	0.82	20.51	8.81	124.40	56.10	298.44	69.92	771.20	167.85
11	0.32	21.73	0.13	1.19	2.63	0.67	19.33	7.97	115.22	51.73	282.98	68.00	769.04	168.72
12	0.23	19.66	0.12	1.80	4.37	1.22	28.33	11.13	145.02	60.90	314.15	69.79	745.38	154.99
13	1.00	29.40	0.45	3.16	3.58	1.18	24.56	10.16	142.39	62.29	317.19	73.78	786.26	162.60
14	7.83	35.73	2.60	12.87	4.89	0.95	17.83	6.64	87.17	38.24	199.40	45.78	498.89	104.53
15	0.08	23.61	0.06	1.19	2.75	0.78	19.85	8.07	109.03	47.62	248.04	57.68	624.51	132.10
16	0.00	19.87	0.05	0.93	2.28	0.71	16.95	7.16	98.33	42.27	224.35	51.85	566.20	117.49
17	0.02	41.38	0.12	2.77	6.39	2.25	46.81	18.08	236.26	97.66	481.25	107.51	1119.20	223.11
18	0.01	20.85	0.06	0.98	2.46	0.77	17.82	7.22	101.14	43.17	227.28	50.39	561.46	118.46
19	0.22	23.55	0.15	1.54	3.34	1.08	22.57	9.28	125.95	54.50	280.03	64.75	704.98	145.29
20	5.43	35.70	1.64	9.03	6.72	1.82	34.47	12.43	161.07	67.61	329.23	73.50	780.45	155.37
21	0.90	27.42	0.30	2.13	3.49	0.83	22.60	9.16	129.08	56.18	293.91	69.46	743.43	156.09
22	2.42	34.25	0.83	4.64	4.03	1.21	26.39	10.44	143.06	61.08	319.29	74.79	805.60	166.78

表 3 西秦岭天水地区利桥花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Hf isotope analysis results of the Liqiao granite in the Tianshui area, West Qinling

样号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM}/Ma	$t_{\text{DM}}^c/\text{Ma}$
1	0.066 429	0.000 551	0.002 341	0.000 011	0.282 826	0.000 020	10.7	626	732
2	0.066 448	0.000 632	0.002 330	0.000 012	0.282 827	0.000 017	11.0	624	723
3	0.092 960	0.000 720	0.002 910	0.000 052	0.282 725	0.000 021	7.0	786	970
4	0.058 190	0.002 831	0.002 069	0.000 117	0.282 803	0.000 020	9.9	655	782
5	0.060 325	0.000 643	0.002 104	0.000 016	0.282 828	0.000 017	10.9	619	722
6	0.080 023	0.001 388	0.002 770	0.000 038	0.282 780	0.000 018	9.1	701	841
7	0.092 625	0.001 031	0.003 097	0.000 018	0.282 713	0.000 019	6.7	808	994
8	0.079 843	0.001 370	0.002 826	0.000 043	0.282 796	0.000 019	9.9	679	799
9	0.132 207	0.006 938	0.004 348	0.000 281	0.282 779	0.000 020	8.6	736	873
10	0.074 344	0.001 237	0.002 472	0.000 035	0.282 798	0.000 018	10.4	669	780
11	0.064 777	0.000 716	0.002 300	0.000 014	0.282 769	0.000 020	9.0	708	852
12	0.076 992	0.001 054	0.002 808	0.000 059	0.282 837	0.000 020	11.4	618	706
13	0.073 322	0.000 842	0.002 589	0.000 007	0.282 798	0.000 017	9.9	672	793
14	0.069 761	0.001 238	0.002 401	0.000 021	0.282 778	0.000 018	9.2	698	838
15	0.105 974	0.001 812	0.003 701	0.000 102	0.282 773	0.000 020	8.5	731	875
16	0.088 895	0.001 626	0.003 156	0.000 018	0.282 765	0.000 019	9.1	732	865
17	0.054 249	0.002 123	0.001 911	0.000 044	0.282 763	0.000 017	8.6	710	868
18	0.078 158	0.001 740	0.002 710	0.000 072	0.282 780	0.000 019	9.1	701	841
19	0.093 983	0.001 077	0.003 164	0.000 030	0.282 801	0.000 019	10.1	678	790
20	0.112 922	0.001 493	0.003 831	0.000 077	0.282 780	0.000 021	8.4	723	870
21	0.064 655	0.001 383	0.002 314	0.000 016	0.282 788	0.000 017	9.5	681	814
22	0.050 202	0.001 163	0.001 820	0.000 023	0.282 810	0.000 019	10.6	640	750
23	0.268 077	0.007 381	0.008 788	0.000 231	0.282 783	0.000 026	7.9	839	938
24	0.115 972	0.004 271	0.003 988	0.000 191	0.282 797	0.000 026	9.2	701	829
25	0.052 869	0.003 160	0.001 813	0.000 079	0.282 791	0.000 018	10.1	668	790
26	0.108 526	0.001 554	0.003 762	0.000 083	0.282 790	0.000 021	9.4	707	830
27	0.087 557	0.001 666	0.003 085	0.000 011	0.282 787	0.000 017	9.2	697	832

表4 西秦岭天水地区利桥花岗岩全岩主量($w_B/\%$)
和微量($w_B/10^{-6}$)元素分析结果

Table 4 Whole-rock($w_B/\%$) major and trace element
($w_B/10^{-6}$) analysis results for the Liqiao granite

	QL22- 13-4.1	QL22- 13-5.1	L2213 0401	L2213 0403	L2213 0501	L2213 0502
SiO ₂	70.58	72.73	70.93	70.52	71.78	69.73
TiO ₂	0.59	0.26	0.48	0.41	0.29	0.42
Al ₂ O ₃	14.02	13.93	14.27	14.12	15.05	14.91
FeO	1.42	0.56	0.34	0.52	0.31	0.27
Fe ₂ O ₃	3.04	1.63	2.61	2.38	1.96	2.65
MnO	0.07	0.04	0.05	0.05	0.03	0.05
MgO	0.79	0.38	0.72	0.73	0.68	1.01
CaO	1.93	0.97	1.73	1.53	1.45	1.72
Na ₂ O	5.08	4.06	4.68	4.3	4	4.16
K ₂ O	1.91	4.87	2.88	3.49	3.54	3.74
P ₂ O ₅	0.13	0.1	0.13	0.13	0.14	0.17
LOI	1.64	0.68	1.33	1.12	0.82	1.16
Total	99.78	99.63	99.81	98.78	99.74	99.72
Li	6.24	4.76	6.4	8.38	7.86	9.61
Be	1.95	4.38	2.1	3.83	3.49	2.59
Sc	7.79	1.9	—	—	—	—
V	35.89	16.32	—	—	—	—
Cr	14.64	13.99	13.43	15.64	13.17	13.47
Co	3.52	1.83	—	—	—	—
Ni	1.49	2.21	2.77	4.77	3.91	5.52
Cu	4.44	3.55	—	—	—	—
Zn	31.97	33.2	31.69	32.93	31.66	30.74
Ga	15.53	18.27	13.57	18.89	18.55	16.14
Rb	47.56	173.12	77.3	155.09	132.87	107.77
Sr	289.13	318.34	238.87	306.37	282.8	303.24
Y	32.26	18.21	21.28	17.35	21.8	17.08
Zr	139.61	199.43	151.04	226.82	209.31	205.7
Nb	6.29	37.28	13.9	28.46	24.08	16.58
Sn	1.72	2.23	—	—	—	—
Cs	1.48	1.44	1.13	1.6	1.61	1.38
Ba	532.88	817.39	729.9	691.25	562.38	703.85
La	26.15	73.54	34.64	49.91	50.85	50.4
Ce	53.73	139.31	67.34	130.22	114.79	93.56
Pr	6.5	15.09	7.66	14.1	12.61	10.27
Nd	24.15	43.85	25.28	42.66	39.2	32.91
Sm	5.21	6.58	4.68	6.7	6.51	5.62
Eu	1.3	1.04	1.02	1.35	1.35	1.32
Gd	5.16	3.84	3.87	4.21	4.56	4.05
Tb	0.85	0.54	0.6	0.58	0.66	0.57
Dy	5.21	3.02	3.52	3.07	3.72	3.06
Ho	1.12	0.55	0.73	0.56	0.72	0.59
Er	3.2	1.59	2.07	1.57	2.04	1.64
Tm	0.48	0.23	0.3	0.22	0.29	0.23
Yb	3.51	1.74	2.2	1.58	2.14	1.6
Lu	0.56	0.26	0.34	0.24	0.33	0.24
Hf	3.91	5.75	4.11	5.99	5.61	5.18
Ta	0.52	2.64	1	1.99	1.71	1.15
Tl	0.25	1.06	0.46	0.96	0.81	0.67
Pb	11.71	51.72	20.63	44.29	37.6	28.66
Th	6.87	64.52	20.35	50.28	41.36	27.89
U	1.09	5.92	2.11	4.53	3.85	2.56

花岗岩落在亚碱性花岗岩区域(图5g),在K₂O-SiO₂图解上,本区花岗岩落在钙碱性-高钾钙碱性系列,在A/NK-A/CNK图解上,本区花岗岩均落在过铝质系列区域内(图5h、5i)。

该区花岗岩的稀土元素总量介于 $137\times 10^{-6}\sim 291\times 10^{-6}$ 之间,平均值为 214×10^{-6} ,LREE/HREE值介于 $5.83\times 10^{-6}\sim 23.74\times 10^{-6}$ 之间。稀土元素球粒陨石标准化图(图6a)显示强烈分馏的稀土元素分配模式,其(La/Yb)_N值介于5.34~30.31之间,即轻稀土元素明显富集,重稀土元素强烈亏损,分配曲线呈明显的右倾型,但从Ho到Lu的重稀土元素分布样式平坦,(Ho/Yb)_N=0.95~1.11。此外,利桥花岗岩表现出较为明显的Eu负异常($\delta Eu=0.58\sim 0.81$)(图6a)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中,利桥花岗岩表现出明显的Th、K、Nd正异常和Ba、Nb、Ta、P、Sm、Ti的负异常(图6b)。

利桥花岗岩中的Sr含量介于 $238.87\times 10^{-6}\sim 318.84\times 10^{-6}$ 之间,Nb含量介于 $6.29\times 10^{-6}\sim 37.28\times 10^{-6}$ 之间,Ta含量介于 $0.52\times 10^{-6}\sim 2.64\times 10^{-6}$ 之间,Y含量介于 $17.08\times 10^{-6}\sim 32.26\times 10^{-6}$ 之间,Sr/Y值变化于8.96~17.75之间。在Nb-Y、Rb-(Y+Nb)和Rb-(Y+Ta)图解上,大部分利桥花岗岩样品落在火山弧-同碰撞花岗岩范围内(图7a、7b、7c)。在Sr/Y-Y图解上,利桥花岗岩样品落在岛弧岩石区域(图7d)。此外,La/Yb-La、La/Sm-La图解显示,利桥花岗岩样品为部分熔融的产物(图7e、7f)。

5 讨论

5.1 岩体形成时代

西秦岭利桥花岗岩中锆石的CL图像显示锆石的自形程度较好,呈明显的柱状或板状特征,具明显的震荡环带,而且锆石稀土元素配分模式图显示花岗岩中的锆石明显富集重稀土元素并具有明显负的Eu异常,这些特点符合典型岩浆锆石的特征(Belousova *et al.*, 2002)。因此,锆石所获得的²⁰⁶Pb/²³⁸U谐和年龄值(438.9 ± 2.5 Ma)应该为花岗岩的结晶时代,该年龄与邻区的百花基性杂岩(435 ± 2 Ma, 裴先治等, 2007a)和党川花岗岩(438 ± 3 Ma, 王婧等, 2008)的岩浆活动时限在误差范围内基本一致。

5.2 岩石成因

地球化学特征表明,利桥花岗岩总体呈现高硅(SiO₂含量为69.73%~72.73%),富碱(Na₂O+K₂O为

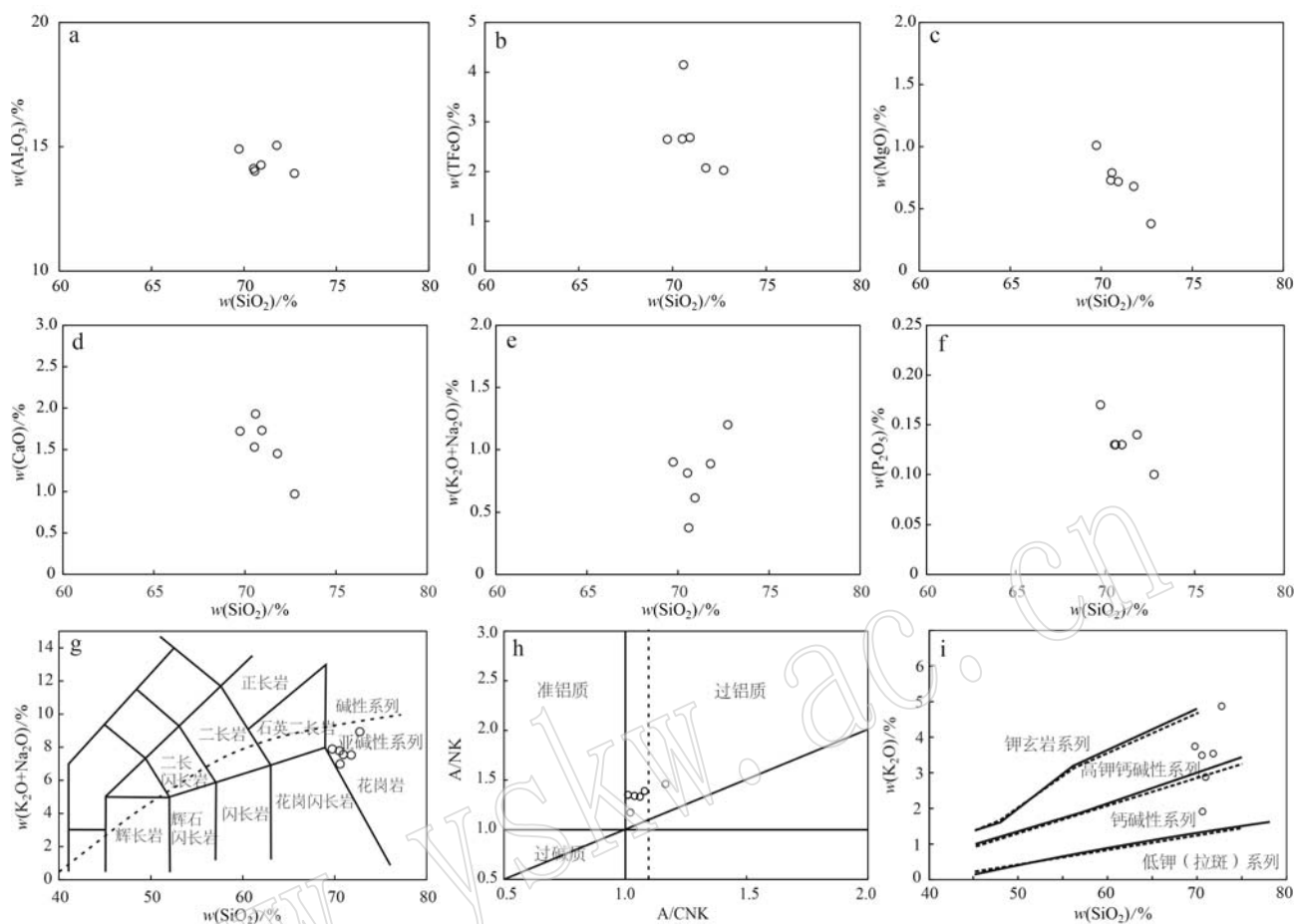


图 5 西秦岭利桥花岗岩主要元素哈克图解(a~f)、 $K_2O+Na_2O-SiO_2(g)$ 、 $A/NK-A/CNK$ (h) 和 $K_2O-SiO_2(i)$ 图解 (Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 5 The Hacker diagrams of the major elements (a~f), $K_2O+Na_2O-SiO_2(g)$, $A/NK-A/CNK$ (h) and $K_2O-SiO_2(i)$ diagrams for the Liqiao granite, West Qinling (Pearce *et al.*, 1984)

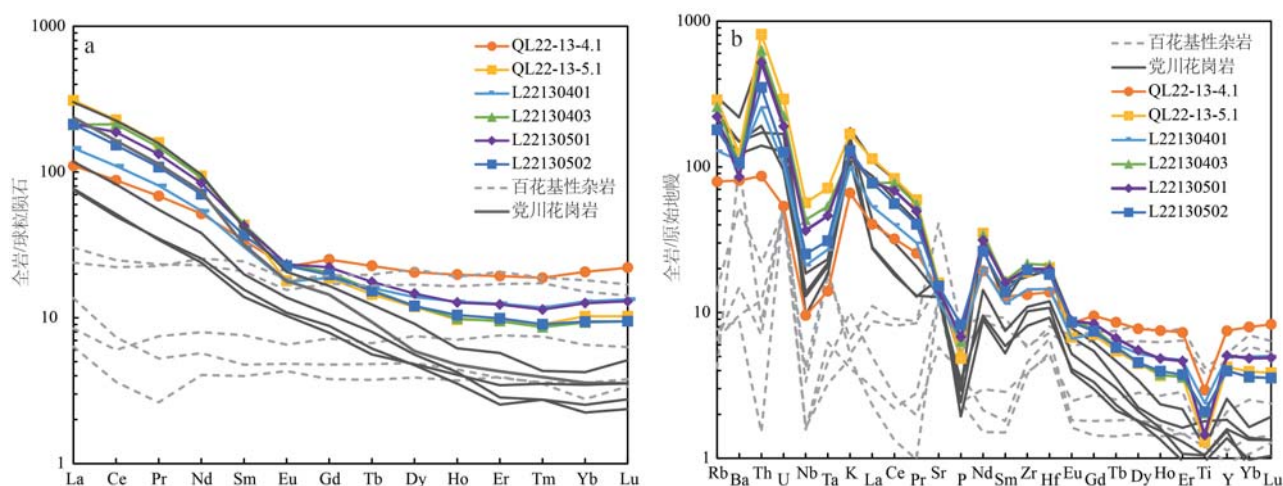


图 6 西秦岭利桥花岗岩的球粒陨石标准化稀土元素配分图解(a)和原始地幔标准化蛛网图(b) [标准化值引自 McDonough and Sun (1995), 百花基性杂岩引自裴先治等(2007a), 党川花岗岩引自王婧等(2008)]

Fig. 6 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element distribution curve (b) for the Liqiao granite, West Qinling (the normal data are from McDonough and Sun, 1995; the data of the Baihua mafic magmatic complex is after Pei Xianzhi *et al.*, 2007a, and the data of the Dangchuan granite is after Wang Jing *et al.*, 2008)

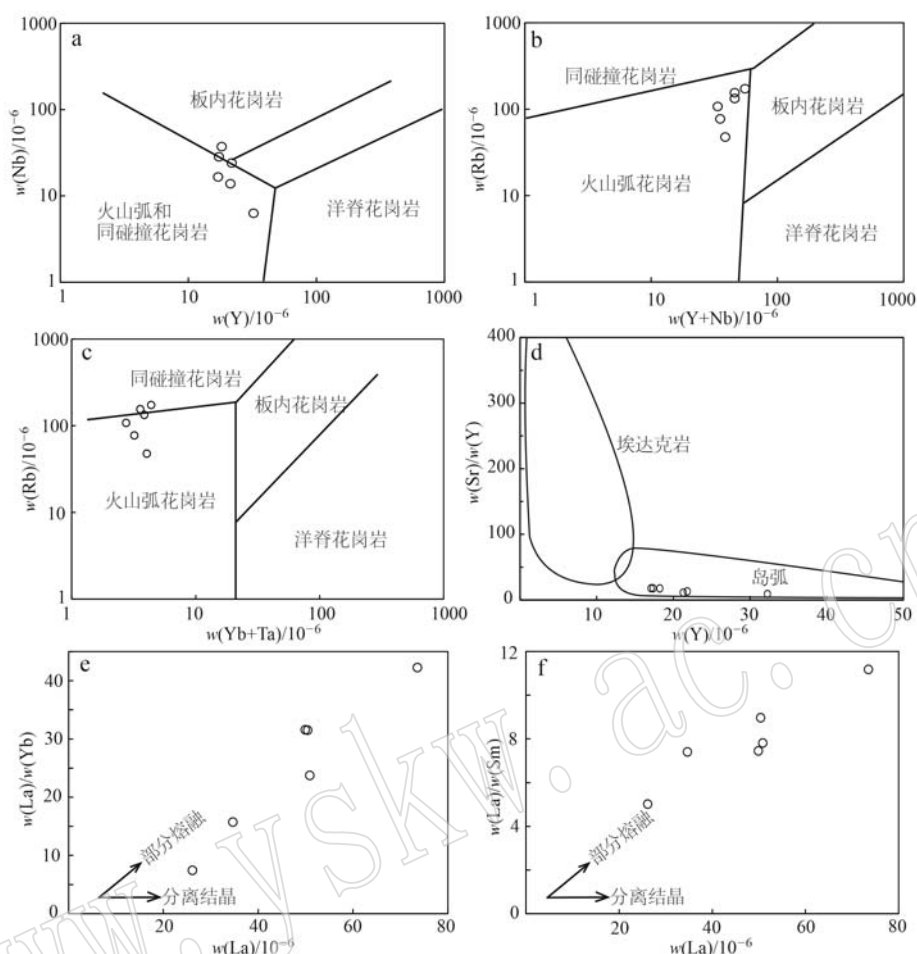


图7 西秦岭利桥花岗岩 Nb-Y(a)、Rb-(Y+Nb)(b)、Rb-(Yb+Ta)(c)、Sr/Y-Y(d)、La/Yb-La(e)和 La/Sm-La(f)图解(Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 7 Nb-Y(a)、Rb-(Y+Nb)(b)、Rb-(Yb+Ta)(c)、Sr/Y-Y(d)、La/Yb-La(e) and La/Sm-La(f) diagrams for the Liqiao granite, West Qinling (Pearce *et al.*, 1984)

6.99%~8.93%)的特征,其铝饱和指数 A/CNK 介于 1.01~1.16 之间,属于过铝质高钾钙碱性-钙碱性花岗岩。利桥花岗岩的 P_2O_5 的含量相对较低(0.10%~0.17%),且随 SiO_2 含量增加而降低(图 5f),这些特征表明利桥花岗岩属于 I 型花岗岩。利桥花岗岩的 $Mg^\#$ 值变化于 25~41 之间,富集 K、Ba 等大离子亲石元素和 La、Ce 等轻稀土元素,亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素,显示了俯冲带岛弧岩浆岩的地球化学特征(Pearce *et al.*, 1984; Crawford *et al.*, 1987)。此外, Sr/Y-Y、Rb-(Y+Nb) 等图解(图 7)也显示出利桥花岗岩与俯冲环境有关弧岩浆岩的亲缘性。

锆石 Hf 同位素分析结果表明,利桥花岗岩锆石具有较正的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值(+6.76~+11.36),显示其形成可能有幔源岩浆物质的贡献,这一点也得到了全岩 Nd 同位素分析结果的支持[$\varepsilon_{Nd}(t) = +2.31$, $t = 439$

Ma,未发表数据,目前仅测试了 1 个样品 QL22-13-4.1,后续测试结果待出]。此外,岩体存在暗色微粒包体(图 2b),也表明这些花岗岩的形成过程中有幔源物质的贡献。锆石 Hf 同位素所对应的二阶段模式年龄为 0.99~0.71 Ga,明显高于锆石的结晶年龄(438.9 ± 2.5 Ma),则表明其岩浆源区有新生地壳物质的加入或受到过地壳物质的混染(吴福元等, 2007)。

前人研究表明,幔源岩浆经分离结晶作用可以形成花岗质岩浆(张旗等, 2008; Dessimoz, 2011)。尽管邻区有同期的岛弧构造环境的百花基性杂岩(辉长岩结晶年龄为 435 ± 2 Ma,裴先治等, 2007a),然而岩石地球化学分析结果表明,利桥花岗岩的 Ba 含量为 $532 \times 10^{-6} \sim 817 \times 10^{-6}$, Sr 含量为 $239 \times 10^{-6} \sim 318 \times 10^{-6}$ 。较高的 Ba、Sr 含量、明显 Eu 的负异常

(图6a)以及显著低于原始地幔的Cr($13.17 \times 10^{-6} \sim 14.64 \times 10^{-6}$)、Co($1.83 \times 10^{-6} \sim 3.52 \times 10^{-6}$)及Ni($1.049 \times 10^{-6} \sim 5.52 \times 10^{-6}$)含量,说明利桥花岗岩可能不是幔源岩浆直接结晶分异的产物。当然,这需要进一步的研究支持。需要说明的是,La/Yb-La、La/Sm-La图解(6e、6f)显示,利桥花岗岩的形成明显与部分熔融作用相关,此外,利桥花岗岩具有较低的 $Mg^\#$ 值(25~41),明显低于地幔直接熔融所形成岩石的 $Mg^\#$ 值(>45),而接近下地壳部分熔融产物的特征(Rapp and Watson, 1995)。因此,利桥花岗岩的岩浆源区应该以地幔物质加入的新生下地壳(或先前存在的基性岩)部分熔融为主。

5.3 地质意义

近年来的区域地质调查和研究工作显示,西秦岭北部的秦岭群(秦岭杂岩)及相关的岩石具有与东秦岭的秦岭群相似的物质组成、岩浆活动及构造热事件(裴先治等, 2007b)。大量研究结果表明,在东秦岭-桐柏地区北秦岭造山带广泛发育450~420 Ma的弧岩浆活动(Wang *et al.*, 2013),并伴有新生地壳的生长和再造(向华等, 2014)。在西秦岭地区,形成于早古生代的关子镇蛇绿岩中变基性火山岩显示出N-MORB的地化特征(裴先治等, 2004, 2007b),并被认为是商丹缝合带的西延(裴先治等, 2004, 2007c; 张国伟等, 2004; 张宏飞等, 2005, 2006)。后期侵入的党川花岗岩(438±3 Ma)具备C型埃达克岩的特征,并被解释为华北陆块与扬子陆块碰撞作用所引起的增厚下地壳部分熔融的产物(王婧等, 2008),同期伴生的百花基性杂岩(辉长岩的结晶年龄为435±2 Ma)则显示出明显的岛弧岩浆活动的产物(裴先治等, 2007a)。锆石U-Pb年代学研究结果表明,利桥花岗岩的结晶时代为438.9±2.5 Ma,该年龄与党川花岗岩的结晶年龄(438±3 Ma, 王婧等, 2008)在误差范围内一致。结合前人对秦岭造山带古生代的构造演化研究成果(陈丹玲等, 2011; Dong *et al.*, 2011; Xiang *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2016; Dong and Santosh, 2016)和我们最新的研究资料(毛小红等, 2017, 2018; 郭祺等, 2022; Guo *et al.*, 2023),西秦岭造山带可能经历了以下构造演化过程:商丹洋在奥陶纪到早志留世向北俯冲于北秦岭之下,北秦岭经历了450 Ma左右的变质作用,并形成了大量450 Ma左右的与俯冲相关的侵入岩,这个阶段葫芦河弧后盆地向北俯冲于华

北板块之下,在陇山杂岩中形成了450 Ma与俯冲有关的侵入岩,晚志留世到早泥盆世期间商丹洋闭合,华南板块与北秦岭发生了弧-陆碰撞作用(430 Ma左右),北秦岭经历了中压麻粒岩相变质作用(花庙和党川地区),并形成了与碰撞有关的侵入岩。锆石U-Pb年代学表明,利桥花岗岩的结晶时代为438.9±2.5 Ma,表明该岩体形成于弧-陆碰撞作用之前。

需要说明的是,利桥花岗岩与党川花岗岩(王婧等, 2008)的稀土、微量元素配分图(图7)也具有一定的相似性,表明利桥花岗岩与党川花岗岩可能为同期构造背景下岩浆活动的产物。然而,利桥花岗岩较低的Sr、Sr/Y和La/Yb值以及相对较高的Y和Yb含量并不符合埃达克质岩石的范畴,而且岩石地球化学特征显示,利桥花岗岩是与板块俯冲环境有关的岛弧岩浆岩,且与地幔物质加入的下地壳部分熔融有关。一种解释为弧-陆碰撞前俯冲洋壳中先存的基性岩或新生地壳发生部分熔融所致。另一种解释可能是利桥花岗岩与党川花岗岩同为大陆边缘弧增厚下地壳部分熔融的产物,只是形成深度不同,因而利桥花岗岩不具备埃达克质岩石的性质。当然这需要进行进一步的研究来证明。

6 结论

(1) 西秦岭天水地区利桥花岗岩的锆石U-Pb年龄为438.9±2.5 Ma,表明该岩体的形成时代为志留纪。

(2) 西秦岭利桥花岗岩显示高硅、富碱的特征,其铝饱和指数A/CNK值介于1.01~1.16之间,属于过铝质高钾钙碱性-钙碱性花岗岩。利桥花岗岩富集K、Ba等大离子亲石元素和La、Ce等轻稀土元素,亏损Nb、Ta和Ti等高场强元素,这些岩石地球化学特征和正的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值,表明利桥花岗岩是板块俯冲环境有关的岛弧岩浆岩,且与地幔物质加入的下地壳部分熔融有关。

(3) 结合区域地质背景,认为利桥花岗岩是弧-陆碰撞前俯冲洋壳中先存的基性岩或新生地壳发生部分熔融所致,当然也不排除其为大陆边缘弧增厚下地壳部分熔融的产物。

致谢 感谢长安大学的王盟博士和中国地质科学院王楠博士提出的建设性修改意见。

References

- Belousova E A, Griffin W L, Suzanne Y, *et al.* 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143: 602~622.
- Chen Danling and Liu Liang. 2011. New data on the chronology of eclogite and associated rock from Guanpo area, North Qinling orogeny and its constraint on nature of North Qinling HP-UHP eclogite terrane [J]. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 158~169 (in Chinese with English abstract).
- Crawford A J, Falloon T J and Eggins S. 1987. The origin of island arc high-alumina basalts [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97: 417~430.
- Dessimoz M. 2011. A case for hornblende dominated fractionation of arc magmas: The Chelan Complex (Washington Cascades) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163(4): 567~589.
- Ding S P, Pei X Z, Li Y, *et al.* 2004. Analysis of the disintegration and tectonic setting of the "Liziyuan Group" in the Tianshui area, western Qinling [J]. *Geological Bulletin of China*, 23(12): 1 209~1 214.
- Dong Y P and Santosh M. 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China [J]. *Gondwana Research*, 29(1): 1~40.
- Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, *et al.* 2011. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 213~237.
- Guo Qi, Mao Xiaohong, Zhang Jianxin, *et al.* 2022. Granulite-facies metamorphism in the northern part of West Qinling: Constraints from phase equilibrium modeling and in-situ U-Pb dating of monazite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(11): 3 259~3 280 (in Chinese with English abstract).
- Guo Q, Mao X H, Zhang J X, *et al.* 2023. Paleozoic tectonothermal evolution in the West Qinling orogen, Central China: Petrological and chronological evidence from garnet amphibolites [J]. *Minerals*, 13: 1 183.
- Harris N B W, Pearce J A and Tindle A G. 1986. Geochemical characteristic of collision zone magmatism [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 19: 67~81.
- Liu L, Liao X Y, Wang Y W, *et al.* 2016. Early Paleozoic tectonic evolution of the North Qinling Orogenic Belt in Central China: Insights on continental deep subduction and multiphase exhumation [J]. *Earth-Science Reviews*, 159: 58~81.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [C]//Berkeley, California, Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 4: 74.
- Lu Songnian, Chen Zhihong, Li Huaikun, *et al.* 2005. Two magmatic belts of the Neoproterozoic in the Qinling Orogenic Belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 165~173 (in Chinese with English abstract).
- Mao X H, Zhang J X, Yu S Y, *et al.* 2017. Early Paleozoic granulite-facies metamorphism and anatexis in the northern West Qinling orogen: Monazite and zircon U-Pb geochronological constraints [J]. *Science China Earth Sciences*, 60(5): 943~957.
- Mao Xiaohong, Zhang Jianxin, Yu Shengyao, *et al.* 2018. Metamorphism of Qinling complex in Northern West Qinling Orogen: Petrology, phase equilibria modelling of paragneiss and their geological implication [J]. *Earth Science*, 43(1): 278~295 (in Chinese with English abstract).
- Mao X H, Zhang J X, Lu Z L, *et al.* 2020. Structural style and geochronology of ductile/shear zones in the western North Qinling orogenic belt, Central China: Implications for Paleozoic orogeny in the Central China orogeny [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 201: 104498.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 120(3~4): 223~253.
- Meng Q and Zhang G. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China [J]. *Tectonophysics*, 323(3): 183~196.
- Paton C, Woodhead J D, Hellstrom J C, *et al.* 2010. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 11: Q0AA06.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Pei Xianzhi, Ding Saping, Hu Bo, *et al.* 2004. Definition of the Guanzhen ophiolite in Tianshui area, western Qinling, and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 23(12): 1 202~1 208 (in Chinese with English abstract).
- Pei X Z, Ding S P, Zhang G W, *et al.* 2007a. The LA-ICP-MS zircons U-Pb ages and geochemistry of the Baihua basic igneous complexes in Tianshui area of West Qinling [J]. *Science in China (Series D)*, 50 (Suppl. 2): 264~276.
- Pei Xianzhi, Ding Saping, Zhang Guowei, *et al.* 2007b. Zircons LA-ICP-MS U-Pb dating of Neoproterozoic granite gneisses in the north margin of West Qinling and geological implication [J]. *Acta Geologica*

- Sinica, 81(6): 772~786(in Chinese with English abstract).
- Pei Xianzhi, Li Zuochen, Li Ruibao, *et al.* 2012. LA-ICP-MS U-Pb ages of detrital zircons from the meta-detrital rocks of the Early Palaeozoic Huluhe Group in eastern part of Qilian orogenic belt: Constraints of material source and sedimentary age[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(5): 205~224(in Chinese with English abstract).
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of meta basalt at 8~32 kbar: Implications for continental growth and crust mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36(4): 891~931.
- Schermaier A, Haunschmid B and Finger F. 1997. Distribution of Variscan I- and S-type granites in the Eastern Alps: A possible clue to unravel pre-Alpine basement structures[J]. *Tectonophysics*, 272(2~4): 315~333.
- Wang H, Wu Y, Gao S, *et al.* 2013. Continental origin of eclogites in the North Qinling terrane and its tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 230: 13~30.
- Wang H L, Chen L, Sun Y, *et al.* 2007. 4.1 Ga of xenolith has been found in the Ordovician volcanic rocks in the western part of the North Qinling[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(14): 1 685~1 693.
- Wang Jing, Zhang Hongfei, Xu Wangchun, *et al.* 2008. Petrogenesis of granites from Dangchuan area in West Qinling Orogenic belt and its tectonic implication[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 33(4): 474~486(in Chinese with English abstract).
- Wang M, Pei X Z, Li R B, *et al.* 2019. Early Indosinian high-Mg[#] and high-Sr/Y ratio granodiorites in the Xiahe area, West Qinling, Central China: Petrogenesis and geodynamic implications[J]. *Lithos*, 332~333: 162~174.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 217~1 238(in Chinese with English abstract).
- Xiang H, Zhang L, Zhong Z, *et al.* 2012. Ultrahigh-temperature metamorphism and anticlockwise *P-T-t* path of Paleozoic granulites from north Qinling-Tongbai orogen, Central China[J]. *Gondwana Research*, 21(2~3): 559~576.
- Xiang Hua, Zhong Zengqiu, Li Ye, *et al.* 2014. Early Paleozoic poly-metamorphism and anatexis in the North Qinling orogen: Evidence from U-Pb zircon geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2 421~2 434(in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, He Shiping, Wang Hongliang, *et al.* 2008. Tectonic framework of North Qinling Mountain and North Qilian Mountain conjunction area in Early Paleozoic: A study of the evidences from strata and tectonic-magmatic events[J]. *Northwestern Geology*, 41(1): 1~21(in Chinese with English abstract).
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Chen Junlu, *et al.* 2007. Tectonic setting and SHRIMP age of volcanic rocks in the Xieyuguan and Caotangou groups: Implications for the North Qinling Orogenic Belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(4): 488~500(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Guo Anlin and Yao Anping. 2004. Western Qinling-Songpan continental tectonic node in China's continental tectonics[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 23~32(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, *et al.* 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 1~855(in Chinese).
- Zhang Guowei, Zhang Zongqing and Dong Yunpeng. 1995. Nature of main tectono-lithostratigraphic units of the Qinling Orogen: Implications for the tectonic evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 101~114(in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Jin L L, Zhang L, *et al.* 2005. Geochemistry and Pb-Sr-Nd isotopic composition of granite on basement properties and tectonic properties in the West Qinling[J]. *Science China Earth Sciences*, 35(10): 914~926.
- Zhang Hongfei, Jin Lanlan, Zhang Li, *et al.* 2006. Pb and Nd isotopic compositions of basement and granite in the Qilianshan: Constraints on tectonic affinity[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 31(1): 57~65(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Yu Shengyao and Meng Fancong. 2011. Ployphase Early Paleozoic metamorphism in the northern Qinling orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1 179~1 190(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Pan Guoqiang and Li Chengdong. 2007. Are discrimination diagrams always indicative of correct tectonic settings of granites? Some crucial questions on granite study(3)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2 683~2 698(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Pan Guoqiang, *et al.* 2008. Sources of granites: Some crucial questions on granite study(4)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1 193~1 204(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈丹玲, 刘 良. 2011. 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*, 18(2): 158~169.
- 丁仁平, 裴先治, 李 勇, 等. 2004. 西秦岭天水地区“李子园群”的

- 解体及其构造环境浅析[J]. 地质通报, 23(12): 1 209~1 214.
- 郭 祺, 毛小红, 张建新, 等. 2022. 西秦岭北缘秦岭杂岩麻粒岩相变质作用——来自相平衡模拟和独居石原位 U-Pb 定年的制约[J]. 岩石学报, 38(11): 3 259~3 280.
- 陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 等. 2005. 秦岭造山带中两条新元古代岩浆岩带[J]. 地质学报, 79(2): 165~173.
- 毛小红, 张建新, 于胜尧, 等. 2017. 西秦岭造山带北部早古生代麻粒岩相变质作用及深熔作用: 锆石和独居石 U-Pb 年代学的制约[J]. 中国科学: 地球科学, 47(5): 601~616.
- 毛小红, 张建新, 于胜尧, 等. 2018. 西秦岭北缘秦岭杂岩变质作用: 副片麻岩岩石学 相平衡模拟及其地质意义[J]. 地球科学, 43(1): 278~295.
- 裴先治, 丁仁平, 胡波等. 2004. 西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩的厘定及其地质意义[J]. 地质通报, (12): 1 202~1 208.
- 裴先治, 丁仁平, 张国伟, 等. 2007a. 西秦岭天水地区百花基性岩杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), (S1): 224~234.
- 裴先治, 丁仁平, 张国伟, 等. 2007b. 西秦岭北缘新元古代花岗质片麻岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 81(6): 772~786.
- 裴先治, 丁仁平, 李佐臣, 等. 2007c. 西秦岭北缘关子镇蛇绿岩的形成时代——来自辉长岩中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 地质学报, 81(11): 1 550~1 561.
- 裴先治, 李佐臣, 李瑞保, 等. 2012. 祁连造山带东段早古生代葫芦河群变质碎屑岩中碎屑锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年龄: 源区特征和沉积时代的限定[J]. 地学前缘, 19(5): 205~224.
- 王洪亮, 陈 亮, 孙 勇, 等. 2007. 北秦岭西段奥陶纪火山岩中发见近 4.1 Ga 的捕虏锆石[J]. 科学通报, 52(14): 1 685~1 693.
- 王 婧, 张宏飞, 徐旺春等. 2008. 西秦岭党川地区花岗岩的成因及其构造意义[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 33(4): 474~486.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1 217~1 238.
- 向 华, 钟增球, 李 晔, 等. 2014. 北秦岭造山带早古生代多期变质与深熔作用: 锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 岩石学报, 30(8): 2 421~2 434.
- 徐学义, 何世平, 王洪亮, 等. 2008. 早古生代北秦岭-北祁连结合部构造格局的地层及构造岩浆事件约束[J]. 西北地质, 41(1): 1~21.
- 闫全人, 王宗起, 陈隽璐, 等. 2007. 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, 81(4): 488~500.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭-松潘大陆构造结[J]. 地学前缘, 11(3): 23~32.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社.
- 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 1995. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义[J]. 岩石学报, (2): 101~114.
- 张宏飞, 靳兰兰, 张 利, 等. 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[J]. 中国科学: 地球科学, 35(10): 914~926.
- 张宏飞, 靳兰兰, 张 利, 等. 2006. 基底岩系和花岗岩类 Pb-Nd 同位素组成限制祁连山带的构造属性[J]. 地球科学, 31(1): 57~65.
- 张建新, 于胜尧, 孟繁聪. 2011. 北秦岭造山带的早古生代多期变质作用[J]. 岩石学报, 27(4): 1 179~1 190.
- 张 旗, 潘国强, 李承东, 等. 2007. 花岗岩构造环境问题: 关于花岗岩研究的思考之三 [J]. 岩石学报, 23(11): 2 683~2 698.
- 张 旗, 王 焰, 潘国强, 等. 2008. 花岗岩原岩问题——关于花岗岩研究的思考之四[J]. 岩石学报, 24(6): 1 193~1 204.