doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.06.012

# 西秦岭早三叠世陆缘弧环境岩浆作用:来自那扎 岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征的证据

曾俊杰<sup>1,2</sup>,蒲万峰<sup>1,2\*</sup>,刘斌<sup>1,2</sup>,袁臻<sup>1,2</sup>,杨壮<sup>1,2</sup> ZENG Junjie<sup>1,2</sup>, PU Wanfeng<sup>1,2\*</sup>, LIU Bin<sup>1,2</sup>, YUAN Zhen<sup>1,2</sup>, YANG Zhuang<sup>1,2</sup>

1.甘肃省地质矿产勘查开发局第三地质矿产勘查院,甘肃兰州730050;

2.甘肃鑫源地拓矿业有限责任公司,甘肃兰州 730050

Third Geological and Mineral Exploration Institute of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Eesources, Lanzhou 730050, Gansu, China;
Gansu Xinyuan Dituo Mining Co., Ltd., Lanzhou 730050, Gansu, China

摘要:甘肃合作那扎岩体岩性为花岗斑岩。对岩体地质学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征进行研究,探讨 岩体的成因机制及构造意义,为该地区印支期的构造演化提供新证据。岩石地球化学分析表明,SiO<sub>2</sub> 含量为 69.50% ~ 73.48%,TiO<sub>2</sub> 含量为 0.008% ~ 0.084%,CaO 含量为 0.22% ~ 2.07%,Na<sub>2</sub>O 含量为 2.96% ~ 3.40%,K<sub>2</sub>O 含量为 4.38% ~ 4.84%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 14.74% ~ 16.19%,铝饱和指数 A/CNK 值为 1.49~1.91,>1.1,里特曼指数 σ 为 1.88~2.27,属高钾钙碱性过铝质 S 型花岗岩。稀土元素总量为 42.82×10<sup>-6</sup> ~ 62.85×10<sup>-6</sup>,LREE/HREE 值为 16.55~24.19,轻稀土元素含量相对富集,δEu 值为 0.79~1.41;高场强元素 P、Ti 相对亏损,Nb、Ta 略有亏损,大离子亲石元素和轻稀土元素 Th、Rb、K 相对富集。岩石地球化学特 征显示,那扎岩体起源于地壳变质砂岩和变质泥岩等物质部分熔融,Mg<sup>#</sup>值高(67~77),稀土元素总量低,成岩过程中有幔源组分 的加入。花岗斑岩中获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 249.7±1.8 Ma,形成于早印支期。结合区域地质背景,认为研究区所在 的西秦岭夏河—合作一带,在早印支期处于地壳和岩石圈加厚的陆缘弧环境,那扎岩体就是该阶段岩浆作用的产物。 关键词:锆石 U-Pb 年龄;花岗斑岩;平印支期;那扎岩体;地质调查工程;西秦岭 中图分类号;P534.51;P588.11;P597<sup>+</sup>.3 **文献标志码;**A **文章编号;**1671-2552(2023)06-1001-12

# Zeng J J, Pu W F, Liu B, Yuan Z, Yang Z. Magmatism in the Early Triassic continental margin arc environment in the West Qinling mountains: Evidence from zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Nazha pluton. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(6):1001–1012

**Abstract:** The lithology of Nazha pluton in Hezuo, Gansu Province is granite porphyry. Through the study of rock geology, LA–ICP– MS zircon U–Pb age, and rock geochemistry, the genetic mechanism and tectonic significance of the Nazha pluton are explored, providing new evidences for the tectonic evolution of the Indosinian period in this region. The rock geochemical analysis of granite porphyry shows that the content of SiO<sub>2</sub> is  $69.50\% \sim 73.48\%$ , the content of TiO<sub>2</sub> is  $0.008\% \sim 0.084\%$ , the content of CaO is  $0.22\% \sim$ 2.07%, the content of Na<sub>2</sub>O is  $2.96\% \sim 3.40\%$ , the content of K<sub>2</sub>O is  $4.38\% \sim 4.84\%$ , the content of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is  $14.74\% \sim 16.19\%$ , the aluminum saturation index A/CNK value is  $1.49 \sim 1.91(>1.1)$ , and the Rittman index  $\sigma$  is  $1.88 \sim 2.27$ . The result indicates the granite belonging to high potassium calc alkaline peraluminous S–type granite. Total rare earth element( $\Sigma$ REE) content is  $42.82 \times 10^{-6} \sim$  $62.85 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE value is  $16.55 \sim 24.19$ , light rare earth element is relatively enriched, and the  $\delta$ Eu value is  $0.79 \sim 1.41$ . High field strength elements P and Ti are relatively deficient, the Nb and Ta are slightly deficient, and large ion lithophile elements and

收稿日期:2021-11-17;修订日期:2022-04-20

**资助项目:**中国地质调查局项目《甘肃省合作矿集区深部找矿预测》(编号:DD2019057010)和《甘肃省合作矿集区深部找矿预测(早子沟 一带)》(编号:中地调研合同[2020]第 211 号)

作者简介:曾俊杰(1970-),男,硕士,高级工程师,从事地质矿产调查和技术管理工作。E-mail:436044828 @qq.com

<sup>\*</sup>通信作者:蒲万峰(1984-),男,硕士,高级工程师,从事区域地质矿产调查工作。E-mail:395911917@qq.com

light rare earth elements Th, Rb and K are relatively enriched. The geochemical characteristics of rocks show that the Nazha pluton originated from the partial melting of metamorphic sandstones and mudstones, with the high  $Mg^{\#}$  value (67~77), and the low total rare earth element content, with some. The mantle-derived components added during diagenesis. LA-ICP-MS zircon U-Pb age (250.4± 1.0 Ma) was obtained from granite porphyry and formed in Early Indosinian period. Combined with the regional geological background, the author believes that the Xiahe-Hezuo area in West Qinling region was in the continental margin arc environment of crustal and lithosphere thickening during the Early Indosinian period, and the Nazha pluton is the product of the magnatism in this stage.

Key words: zircon U-Pb age; granite porphyry; Early Indosinian period; Nazha pluton; geological survey engineering; West Qinling

西秦岭处于古亚洲构造域、特提斯-喜马拉雅 构造域和滨太平洋构造域交汇的特殊地区(李春昱 等,1980;任纪舜等,1980),其岩浆-构造事件记录 了华北板块和扬子板块聚敛、碰撞及特提斯域的构 造演化过程(张国伟等 2001:闫臻, 2002:冯益民等, 2003;张国伟等, 2004; Qiu et al., 2018)。甘肃夏 河--合作地区,广泛发育印支期中酸性岩浆岩及同 期的热液矿床(毛景文等,2001;张国伟等 2001; Mao et al., 2002;贾儒雅等, 2019)。夏河-合作断裂 为区域的主要断裂,是区内印支期中酸性侵入岩及 热液矿床的主要运输通道,断裂以北主要发育铜、 金、钨、钼等矿产,断裂以南主要发育金、汞、锑等矿 产。该地区发育的印支期中酸性岩浆岩及断裂两 侧分布的热液矿床,均是印支期板块俯冲消减的构 造岩浆活动形成的产物(金维浚,2005; Jiang et al., 2010;贾儒雅等,2019;李康宁等,2020)。许多学者 对该地区的侵入岩进行了大量研究,夏河-合作断 裂以北主要有德乌鲁岩体(靳晓野等,2013;张德贤 等,2015;陈明辉等,2016;Qiu et al., 2017;Sui et al., 2017;贾儒雅等,2019;冯小明等,2021)、美武岩体 (骆必继等,2012;Luo et al., 2015;何彤彤等,2020) 等,断裂以南主要围绕早子沟等金矿区岩脉进行研 究(代文军等, 2012; Yu et al., 2019; 耿建珍等, 2019:龚全胜等,2019)。那扎岩体距离夏河-合作 断裂较近,对研究该地区断裂两侧岩浆作用与成矿 作用具有衔接对比意义,为区域上金、汞、锑、铜、 钨、钼等矿床成因、分带研究和成矿潜力评价提供 思路。本文通过那扎岩体地质学、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及岩石地球化学研究,对岩体的成因 机制及构造意义进行探讨,为该地区印支期的构造 演化提供新的依据。

1 地质概况

甘肃合作那扎岩体在区域上位于西秦岭造山 带中西段,属于华北板块南缘祁连-北秦岭早古生 代构造带和扬子板块北缘晚古生代构造带的拼接 部位(任纪舜等,1991;闫臻,2002;张国伟等,2004; 耿建珍等,2019),是诸多地块和造山带汇聚交接的 地带(闫臻,2002;张国伟等,2004)(图1-a)。

夏河一合作一带,力士山复式背斜控制了该区 的地层构造格架,研究区位于力士山背斜南西翼, 夏河一合作断裂为南西翼的主要区域大断裂。以断 裂为界,以北分布有石炭系、二叠系,为滨浅海相陆 源碎屑岩夹碳酸盐岩建造,合作那扎岩体侵入二叠 系;以南分布有三叠系,为一套半深海斜坡相细碎 屑岩复理石建造。夏河一合作断裂为二叠系与三叠 系的分界线,也是主要的区域控岩控矿构造,德乌 鲁、美武、夏河、玛久勒等主要岩体及早子沟、加甘 滩、以地南等大型矿床均分布在该断裂附近。岩浆 岩总体受北西向构造影响,呈北西向展布,以花岗 闪长岩、石英闪长玢岩为主,也有花岗斑岩、英云闪 长岩分布,一般呈岩株、岩脉状(图1-b),为多期岩 浆脉动的产物,侵入岩时代集中在 210~250 Ma(刘 伯崇等,2018)。

那扎岩体位于合作市东侧约4km处(图1-b), 出露面积2.87km<sup>2</sup>,呈不规则形,近南北向展布(图 1-c)。那扎岩体与围岩呈侵入接触(图2-a),围岩 为二叠系灰色细砂岩、粉砂质板岩,外接触带广泛 发育角岩化带。岩体边部见细粒边,局部有强褐铁 矿化。本次用于 U-Pb 同位素测年和岩石地球化学 分析的样品采样位置远离蚀变带,成分新鲜,结构 均匀(图2-b)。具体采样位置见图1-c。

那扎花岗斑岩呈灰白色,半自形—他形粒状结构,斑状结构,致密块状构造。斑晶由斜长石 (5%)、钾长石(3%)、石英(2%)和微量黑云母组成,粒度为0.2~1 mm,大小连续。斜长石呈板状、 宽板状,具聚片双晶(图2-c)。钾长石呈柱状,零星 呈粘土化。黑云母呈鳞片状,具红褐色—浅褐多色 性。石英呈粒状,边缘圆化并具熔蚀状(图2-d),晶 面亮净,具波状消光。基质主要包括斜长石



CBS—柴北缘古缝合带;SDS—商丹古缝合带;KIS—东昆仑古缝合带;AMS—阿尼玛卿古缝合带;NQL—北祁连缝合带;MIS— 勉略古缝合带;GL—甘孜-理塘缝合带;1—第四系;2—新近系;3—三叠系;4—二叠系;5—石炭系;6—白垩纪玄武岩;7—三叠 纪火山岩;8—印支期花岗岩;9—中酸性脉岩;10—断裂;11—角度不整合界线;12—产状;13—角岩化带;14—矿产地;15—全 岩主量、稀土、微量元素测试样品采样点位置及编号;16—U-Pb 同位素年龄样品采样点及编号

(63%)、石英(17%)、钾长石(6%)、黑云母(3%)和 副矿物磷灰石、电气石、金属矿物等,粒度在0.01~ 0.2 mm之间,长石以柱板状为主,部分为不规则他 形粒状,具有同斑晶矿物相同的光性特征。石英呈 他形粒状,晶面亮净,具波状消光。黑云母性质同 斑晶性质,副矿物磷灰石、锆石等多与其伴生。电 气石具蓝色—浅蓝色反吸收性。

## 2 分析方法

本次在合作市那扎岩体采集测年样品 1 件(2019 ⅢTW-1),岩石地球化学样品 13 件(其中 2 件 Na<sub>2</sub>O 分析结果为 0,故剔除该 2 件不合格样品)。

锆石分选、制靶、阴极发光(CL)拍摄及锆石

U-Pb同位素年龄测定均由北京锆年领航科技有限 公司完成。首先使用常规的重液浮选和电磁分离 方法挑选出锆石,在双目镜下优选出具代表性的锆 石颗粒进行制靶。然后在镜下对锆石样品进行反 射光与透射光照相,用阴极发光(CL)扫描电镜进行 锆石显微图像分析。选择形态保存完好、具明显振 荡环带、内部无裂隙和包裹体的锆石进行测试。分 析测试在激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪 (LA-ICP-MS)上进行,激光剥蚀采用 NWR193UC 型 193 nm 深紫外激光剥蚀进样系统(Elemental Scientific Lasers LLC,美国),配备 S155 型双体积样 品池。质谱仪采用美国 Agilent 7900 型电感耦合等 离子体质谱仪。激光束直径为 30 μm,频率 6 Hz,



图 2 那扎岩体野外(a、b)和镜下(c、d)照片 Fig. 2 Field photographs (a,b) and micrographs (c,d) of Nazha pluton a-那扎岩体侵入二叠系;b-花岗斑岩宏观露头特征;c、d-花岗斑岩薄片显微特征; Bit-黑云母; Pl-斜长石;Q-石英

能量密度 5 J/cm<sup>2</sup>。年龄测定采用国际标准锆石 91500 和 GJ-1 作外标,元素含量采用 NIST 610 作 外标,<sup>91</sup>Zr 作内标。同位素比值和元素采用 Glitter (Ver4.0)计算,年龄计算及谐和图采用 Isoplot(Ver. 2.49)程序完成(Liu et al., 2010)。

岩石地球化学分析在国土资源部兰州矿产资源检测中心(甘肃省中心实验室)完成。用于分析测试的岩石地球化学样品经过室内镜下观察,选择较为新鲜的岩石样品进行主量、微量及稀土元素分析,主量元素测试在 X 射线荧光光谱仪(型号 ZSX Primus Ⅱ)上完成,分析精度及准确度优于 5%。稀土、微量元素采用等离子体质谱法(ICP-MS),仪器为 Agilent 公司电感耦合等离子体串联质谱仪(型号 Agilent 8900),分析精度及准确度优于 5%。

- 3 分析结果
- 3.1 锆石 U-Pb 年龄

选取的锆石呈粉色,略带浅黄色,自形-半自

形粒状,少数呈次浑圆状。晶体长 0.03~0.12 mm, 伸长系数为 1.1~2.3。CL 图像(图 3)显示典型的岩 浆韵律环带和明暗相间的条带构造等,核幔结构较 清晰;核部 CL 图像颜色较暗,幔部有较清晰的振荡 环带,属于岩浆结晶的产物。部分锆石晶形不完 整,棱角显钝,少数晶棱、晶面模糊不清,表明锆石 在后期可能遭受了热液溶蚀作用。CL 图像上测点 多位于明显的岩浆环带上,测年结果代表了岩浆锆 石的年龄。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄样品测试数据 见表 1。14 个测点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 表面年龄变化范围 在 244.9±2.6~253.8±4.8 Ma 之间,在锆石 U-Pb 谐和图 中数据点均位于一致曲线上或其附近 (图 4-a),年龄为 249.7±2.3 Ma,年龄加权平均值 为 249.7±1.8 Ma(n=14, MSWD=0.57)(图 4b),该年龄代表了那扎岩体花岗斑岩的形成年龄。 据此判断成岩时代为早三叠世,是早印支期岩浆活 动的产物。



图 3 那扎岩体花岗斑岩锆石阴极发光(CL)图像、分析点及年龄





图 4 那扎岩体锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)及年龄分布图(b)

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia age (a) and age frequency (b) diagrams of Nazha pluton

#### 表1 那扎岩体花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 年龄测试结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb age of granite porphyry in Nazha pluton

	元素含量/10-6				同位素比值							同位素年龄/Ma					
测点号	Pb		U	Th/U	<sup>207</sup> Pb/		<sup>207</sup> Pb/	$2\sigma$	<sup>206</sup> Pb/		<sup>207</sup> Pb/	2	$^{207}\mathrm{Pb}/$	2	<sup>206</sup> Pb/	$2\sigma$	
		Th			$^{206}\mathrm{Pb}$	20	<sup>235</sup> U		<sup>238</sup> U	$2\sigma$	$^{206}\mathrm{Pb}$	$2\sigma$	<sup>235</sup> U	$2\sigma$	<sup>238</sup> U		
2019 <b>Ⅲ</b> TW-1-4	11.1	90.8	244.0	0.37	0.0596	0.0034	0.3280	0.0190	0.0402	0.0008	500.0	130.0	286.0	14.0	253.8	4.8	
2019 <b>Ⅲ</b> TW-1-5	6.0	35.3	143.0	0.25	0.0530	0.0053	0.2830	0.0260	0.0394	0.0009	190.0	190.0	249.0	20.0	248.9	5.4	
2019 <b>Ⅲ</b> TW-1-6	43.7	204.2	1021.0	0.20	0.0518	0.0018	0.2824	0.0092	0.0396	0.0005	250.0	76.0	252.0	7.3	250.4	2.8	
2019 <b>Ⅲ</b> TW-1-8	56.8	282.6	1312.0	0.22	0.0519	0.0017	0.2835	0.0097	0.0394	0.0006	255.0	73.0	252.9	7.6	249.2	3.6	
2019 <b>Ⅲ</b> TW-1-10	63.7	235.0	1425.0	0.16	0.0539	0.0022	0.3000	0.0130	0.0398	0.0008	344.0	90.0	265.8	10.0	251.9	5.0	
2019 <b>Ⅲ</b> TW-1-11	34.9	272.0	783.0	0.35	0.0502	0.0019	0.2776	0.0100	0.0398	0.0005	212.0	80.0	248.7	7.9	251.3	3.2	
2019 <b>Ⅲ</b> TW-1-14	58.2	262.7	1277.0	0.21	0.0549	0.0018	0.3079	0.0099	0.0401	0.0005	385.0	71.0	272.1	7.7	253.5	3.3	
2019 <b>Ⅲ</b> TW-1-16	46.8	206.3	1116.0	0.18	0.0616	0.0022	0.3290	0.0110	0.0392	0.0004	641.0	75.0	289.3	9.0	247.6	2.8	
2019 <b>Ⅲ</b> TW-1-18	28.7	109.5	681.0	0.16	0.0510	0.0025	0.2770	0.0130	0.0394	0.0005	205.0	100.0	247.3	11.0	249.3	2.9	
2019 <b>Ⅲ</b> TW-1-20	29.0	119.2	722.0	0.17	0.0497	0.0022	0.2710	0.0120	0.0400	0.0007	156.0	95.0	243.0	9.6	252.8	4.1	
2019 <b>Ⅲ</b> TW-1-23	24.1	179.3	520.0	0.34	0.0547	0.0029	0.2990	0.0160	0.0393	0.0007	340.0	110.0	264.0	12.0	248.7	4.2	
2019 <b>Ⅲ</b> TW-1-25	78.7	339.9	1733.0	0.20	0.0533	0.0019	0.2973	0.0110	0.0397	0.0006	322.0	80.0	263.9	8.3	251.0	3.4	
2019 <b>Ⅲ</b> TW-1-31	57.1	251.9	1291.0	0.20	0.0515	0.0011	0.2835	0.0061	0.0396	0.0005	255.0	48.0	253.1	4.8	250.2	3.3	
2019 <b>Ⅲ</b> TW-1-32	66.2	298.3	1456.0	0.20	0.0527	0.0010	0.2817	0.0059	0.0387	0.0004	297.0	44.0	251.6	4.7	244.9	2.6	

注:样品测试由北京锆年领航科技有限公司完成(2019年)

#### 3.2 岩石地球化学特征

3.2.1 主量元素

由表 2 可知,那扎岩体花岗斑岩的 SiO<sub>2</sub> 含量为 69.50% ~ 73.48%,平均为 72.21%,TiO<sub>2</sub> 含量为 0.008% ~ 0.084%,平均为 0.044%,CaO 含量为 0.22% ~ 2.07%,平均为 1.00%,Na<sub>2</sub>O 含量为 2.96% ~ 3.40%,平均为 3.17%,K<sub>2</sub>O 含量为 4.38% ~ 4.84%, 平均为 4.64%,显示富碱(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O=7.49% ~ 8.18%,平均为 7.81%)特征。TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 0.56% ~ 0.98%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 14.74% ~ 16.19%,铝 饱和指数 A/CNK 值为 1.49~1.91,大于 1.1,属过铝 质岩石。MgO 含量为 0.94% ~ 1.07%, Mg<sup>#</sup>值为 67~77。里特曼指数σ值为1.88~2.27,属钙碱性岩 类。在TAS图解(图5-a)中,所有岩石样品点均落 入花岗岩区域,在*R*<sub>1</sub>-*R*<sub>2</sub>分类命名图解(图5-b) 中,大多数样品点落入花岗岩区域;在SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O图 解(图5-c)中,样品点全部落入高钾钙碱性系列区 域;在A/CNK-ANK判别图解(图5-d)中,样品点 全部落入过铝质岩石区域。综上所述,那扎岩体花 岗斑岩显示高硅、高铝、富碱性质,属高钾钙碱性系 列过铝质岩石,显示壳源S型花岗岩特征。

3.2.2 稀土元素特征

那扎岩体花岗斑岩稀土元素总量(**Σ**REE)为 42.82×10<sup>-6</sup>~62.85×10<sup>-6</sup>,平均为54.36×10<sup>-6</sup>。LREE=



图 5 岩石地球化学分类图解



a—TAS 分类图(底图据 Middlemost et al., 1994): Ir—Irvine 分界线,上方为碱性,下方为亚碱性。1—橄榄辉长岩;2a—碱性辉长岩;2b— 亚碱性辉长岩;3—辉长闪长岩;4—闪长岩;5—花岗闪长岩;6—花岗岩;7—硅英岩;8—二长辉长岩;9—二长闪长岩;10—二长岩;11—石 英二长岩;12—正长岩;13—副长石辉长岩;14—副长石二长闪长岩;15—副长石二长正长岩;16—副长正长岩;17—副长深成岩;18—霓 方钠岩等;b—R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub> 分类命名图解(底图据 De et al., 1980):R<sub>1</sub>=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti);R<sub>2</sub>=6Ca+2Mg+Al;c—SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解 (底图实线据 Peccerillo et al., 1976; 虚线据 Middlemost et al., 1985);d—A/CNK-A/NK 图解(底图据 Maniar et al., 1989)

							-	-			-
元素	GS01	GS02	GS03	GS05	GS06	GS07	GS08	<b>GS</b> 10	GS11	GS12	GS13
SiO <sub>2</sub>	72.41	72.07	72.27	73.48	72.17	72.51	72.89	69.5	72.67	71.66	72.68
${\rm TiO}_2$	0.035	0.009	0.017	0.084	0.077	0.048	0.054	0.008	0.062	0.045	0.047
$Al_2O_3$	16.19	15.18	14.95	15.08	15.48	15.01	15.46	14.74	15.00	15.08	15.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.648	0.517	0.516	0.646	0.537	0.824	0.595	0.386	0.464	0.487	0.560
FeO	0.27	0.16	0.20	0.18	0.25	0.10	0.30	0.16	0.10	0.44	0.16
MnO	0.024	0.026	0.024	0.021	0.022	0.023	0.019	0.023	0.023	0.024	0.026
MgO	0.971	0.942	0.945	0.999	1.070	0.984	1.030	0.967	0.990	1.020	0.979
CaO	0.294	1.100	0.998	0.751	1.06	0.912	0.221	2.070	1.230	1.420	0.978
Na <sub>2</sub> O	3.40	3.34	3.20	2.96	3.01	3.21	3.26	3.35	3.11	3.06	3.00
$K_2O$	4.78	4.59	4.67	4.67	4.73	4.42	4.84	4.44	4.38	4.70	4.77
$P_2O_5$	0.017	0.016	0.017	0.012	0.017	0.009	0.012	0.016	0.009	0.009	0.005
烧失量	1.38	2.03	1.76	1.69	1.92	1.98	1.38	4.54	2.20	2.20	2.00
总计	101.64	101.99	101.62	102.70	102.57	102.38	101.69	104.85	102.52	102.64	102.49
$Mg^{\#}$	66.99	72.87	71.72	70.05	72.23	67.58	68.73	77.26	77.32	67.43	72.44
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	8.18	7.93	7.87	7.63	7.74	7.63	8.10	7.79	7.49	7.76	7.77
$Na_2O/K_2O$	0.71	0.73	0.69	0.63	0.64	0.73	0.67	0.75	0.71	0.65	0.63
σ	2.27	2.15	2.10	1.91	2.05	1.96	2.18	2.24	1.88	2.09	2.03
A/CNK	1.91	1.68	1.69	1.80	1.76	1.76	1.86	1.49	1.72	1.64	1.72
A/NK	1.50	1.56	1.45	1.55	1.54	1.49	1.48	1.43	1.58	1.52	1.56
$Na_2O/(Na_2O+CaO)$	0.92	0.75	0.76	0.80	0.74	0.78	0.94	0.62	0.72	0.68	0.75
MgO/(MgO+TFeO)	0.53	0.60	0.59	0.57	0.59	0.54	0.55	0.66	0.66	0.54	0.60
Li	51.3	26.3	45.6	26.4	44.8	16.9	33.0	51.0	21.5	19.0	9.8
Be	6.17	4.59	4.69	3.20	3.57	3.43	2.80	4.45	2.87	3.30	2.74
Cr	3.80	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70
Со	9.80	9.10	12.50	8.70	7.70	8.30	8.10	6.40	7.90	9.10	8.70
Ni	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70
Ga	21.9	22.7	21.6	21.5	21.6	22.4	22.1	24.4	21.5	22.0	21.4
Ge	0.35	0.47	0.72	0.78	0.65	0.96	0.79	1.18	1.00	0.48	0.88
Rb	210	204	206	164	167	159	174	140	151	166	164
Sr	193	130	183	199	208	134	188	54	130	249	130
Y	2.00	1.06	0.79	0.94	2.31	1.60	1.37	1.14	2.38	0.37	1.51
Zr	71.4	64.8	69.8	83.7	83.3	70.8	70.8	58.7	78.1	80.2	70.0
Nb	37.6	35.6	30.1	21.1	22.3	24.1	22.0	34.0	22.7	22.6	20.7
Cs	7.32	6.10	7.66	4.77	6.00	3.81	4.97	6.10	2.68	4.28	2.81
Ba	531	396	503	953	987	804	875	236	948	797	916
Hf	4.50	3.30	4.30	3.50	3.20	3.50	3.80	4.20	3.20	3.40	3.40
Та	2.55	2.54	2.04	1.30	1.34	1.51	1.45	2.82	1.49	1.49	1.32
Th	6.86	5.73	5.18	5.64	5.75	4.88	4.69	6.42	5.60	4.31	4.21
F	900	800	840	900	800	700	870	820	780	940	670
Те	0.028	0.019	0.022	0.018	0.025	0.025	0.026	0.026	0.021	0.019	0.028
La	13.90	13.10	13.60	14.10	13.90	11.10	9.70	14.70	13.60	10.00	9.88
Ce	25.50	23.80	24.70	25.90	25.40	20.10	17.80	26.60	24.90	18.50	18.50
Pr	3.06	2.83	3.00	3.08	3.04	2.43	2.14	3.17	2.92	2.21	2.20

表 2 那扎岩体花岗斑岩主量、微量及稀土元素测试结果

Table 2 The analytical results of major, trace and rare earth elements of granite porphyry in Nazha pluton

4t +t -

元素	GS01	GS02	GS03	GS05	GS06	GS07	GS08	GS10	GS11	GS12	GS13	
Nd	11.40	10.80	11.30	11.60	11.60	9.48	8.21	12.00	11.10	8.56	8.42	
Sm	2.60	2.65	2.66	2.49	2.51	2.26	1.92	2.78	2.43	2.06	1.97	
Eu	0.62	0.56	0.60	0.89	0.92	0.81	0.70	0.60	0.91	0.78	0.73	
Gd	1.77	1.76	1.70	1.54	1.67	1.56	1.30	1.96	1.63	1.38	1.39	
Tb	0.17	0.15	0.15	0.12	0.16	0.14	0.13	0.17	0.16	0.12	0.14	
Dy	0.62	0.45	0.41	0.39	0.63	0.49	0.45	0.50	0.67	0.30	0.51	
Но	0.09	0.05	0.04	0.05	0.10	0.07	0.07	0.05	0.10	0.03	0.08	
Er	0.24	0.12	0.11	0.14	0.31	0.21	0.19	0.16	0.32	0.08	0.21	
Tm	0.03	0.01	0.01	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	0.04	0.01	0.02	
Yb	0.20	0.09	0.07	0.12	0.27	0.18	0.17	0.12	0.26	0.05	0.15	
Lu	0.03	0.01	0.01	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	0.04	0.01	0.02	
Σree	60.23	56.38	58.36	60.46	60.59	48.89	42.82	62.85	59.08	44.09	44.22	
LREE	57.08	53.74	55.86	58.06	57.37	46.18	40.47	59.85	55.86	42.11	41.70	
HREE	3.15	2.64	2.50	2.40	3.22	2.71	2.35	3.00	3.22	1.98	2.52	
LREE/HREE	18.12	20.36	22.34	24.19	17.82	17.04	17.22	19.98	17.35	21.27	16.55	
$(La/Yb)_N$	49.85	104.41	139.36	84.28	36.93	44.23	40.93	87.87	37.52	143.46	47.25	
$(La/Sm)_N$	3.36	3.11	3.22	3.56	3.49	3.09	3.18	3.33	3.52	3.05	3.16	
$(Gd/Yb)_N$	7.14	15.77	19.59	10.35	4.99	6.99	6.17	13.17	5.06	22.26	7.47	
$\delta \mathrm{Eu}$	0.88	0.79	0.86	1.39	1.37	1.32	1.35	0.79	1.40	1.41	1.35	

注:主量元素含量单位为%,微量与稀土元素含量单位为10<sup>-6</sup>。A/CNK(摩尔比)=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O);A/NK (摩尔比)=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O);δEu=[Eu<sub>N</sub>/(Sm+Gd)<sub>N</sub>]<sup>1/2</sup>;测试单位:自然资源部兰州矿产资源检测中心,2019年





Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b) for Nazha pluton

40.47×10<sup>-6</sup>~59.85×10<sup>-6</sup>,平均为51.66×10<sup>-6</sup>,HREE = 1.98×10<sup>-6</sup>~3.22×10<sup>-6</sup>,平均为2.70×10<sup>-6</sup>,LREE/HREE = 16.55~24.19,平均为19.29。(La/Yb)<sub>N</sub> = 36.93~143.46,(La/Sm)<sub>N</sub> = 3.05~3.56,(Gd/Yb)<sub>N</sub> =

4.99~22.26(表 2)。在稀土元素球粒陨石标准化配 分模式图上,配分曲线显示明显的右倾型(图 6-a), 表明岩石轻稀土元素富集,重稀土元素亏损,轻、重 稀土元素分馏明显。δEu=0.79~1.41,Eu 正负异常 均有。

3.2.3 微量元素特征

微量元素原始地幔标准化蛛网图显示(图 6-b),花岗斑岩中 P、Ti 等高场强元素明显亏损,Nb、Ta 略亏损,Nb/Ta=12.06~16.64;Th、Rb、K 等大离子亲石元素和轻稀土元素相对富集。

4 讨 论

#### 4.1 岩浆作用时代

那扎岩体侵入于上二叠统石关组三段( $P_3 sh^3$ ), 说明其侵入时代晚于晚二叠世。本次研究获得该 岩体的 LA-ICP-MS 锆石<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 年龄为 249.7± 1.8 Ma(n=14,MSWD=0.57)。东北部的德乌鲁岩 体 LA-ICP-MS 锆石<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 年龄为 238.6~ 250 Ma(靳晓野等 2013;张德贤等,2015;陈明辉等, 2016;贾儒雅等,2019),美武岩体 LA-ICP-MS 锆 石<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 年龄为 237.6~245 Ma(骆必继等, 2012;何彤彤等,2020),西南部早子沟金矿区一带 发育的中酸性岩脉 LA-ICP-MS 锆石<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 年 龄为 215.5~240 Ma(耿建珍等,2019;龚全胜等, 2019)。因此,那扎岩体的年龄与夏河-合作断裂周 边分布的主要岩体(脉)成岩年龄相当,成岩时代为 早三叠世晚期,是早印支期岩浆活动的产物。

#### 4.2 岩石成因

那扎岩体属于高钾、过铝质、钙碱性系列的壳 源 S型花岗岩。在 C/MF-A/MF 图解(图 7-a)中, 大部分样品点落人 B 区(变质砂岩部分熔融),少部

分落入 A 区(变质泥岩部分熔融),可能为变质砂岩 占主导地位,变质泥岩参与部分熔融的产物。P、Ti 等高场强元素亏损明显,指示岩浆起源于地壳岩 石,Nb、Ta 略亏损,Nb/Ta=12.06~16.64,略低于原 始地幔 Nb/Ta 值(17.5)(Rapp et al., 1999), 与地 壳 Nb/Ta 接近(Taylor et al., 1995),显示其成因可 能与地壳部分熔融有关。在 Q-Ab-Or-H<sub>2</sub>O 相图 (图 7-b)上,那扎岩体中的花岗闪长斑岩成岩温度 为 700~750℃,其低温共熔线 P(H<sub>2</sub>O)=2000 bar, 这与火山弧地区泥质岩、砂岩熔融温度基本相当 (路凤香等,2002)。Mg<sup>#</sup>值为67~77,明显高于玄武 质下地壳部分熔融产生的熔体(Mg<sup>#</sup>小于 45)(Rapp et al., 1999),稀土元素总量 ΣREE = 42.82×10<sup>-6</sup>~ 62.85×10<sup>-6</sup>,平均为 54.36×10<sup>-6</sup>,低于下地壳稀土元 素总量 74×10<sup>-6</sup>(肖庆辉等,2002),表明有地幔物质 的加入。(La/Yb)<sub>N</sub>=36.93~143.46,(La/Sm)<sub>N</sub>= 3.05~3.56,(Gd/Yb)<sub>N</sub>=4.99~22.26,反映轻稀土元 素相对富集,重稀土元素亏损,轻、重稀土元素分馏 明显,Yb/Lu = 5.00~8.50,表明源区可能有角闪石 残余,该岩体 Sr 含量为 130×10<sup>-6</sup>~62.85×10<sup>-6</sup>, Y 含 量为 0.94×10<sup>-6</sup>~2.38×10<sup>-6</sup>, Sr/Y 值为 47~122,指 示其源区可能为含石榴子石的角闪岩相岩石(韦萍 等,2013)。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6b)呈尖峰形,反映与俯冲消减带有关的岩石特征。 Th、Rb、K 等大离子亲石元素和轻稀土元素相对富 集,反映为岛弧火山岩和与消减作用有关的花岗质 岩石。因此,那扎岩体起源于地壳变质砂岩和变质



图 7 那扎岩体 C/MF-A/MF 图解(a,底图据 Alther et al., 2000)和 Q-Ab-Or-H<sub>2</sub>O 系相图(b,底图据 Tuttle et al., 1958) Fig. 7 Diagrams of C/MF-A/MF (a) and Q-Ab-Or-H<sub>2</sub>O system phase (b) for Nazha pluton

泥岩部分熔融,但在成岩过程中有幔源组分的加入。 4.3 构造意义

夏河—合作一带的冶力关岩体(250.4±6.0 Ma) (金维浚等,2005)、美武岩体(244.3±2.4 Ma)(Luo et al.,2015)、德乌鲁岩体(250~248 Ma)(贾儒雅 等,2019)、夏河岩体(248~244 Ma)(韦萍等,2013) 及早子沟金矿区的中酸性岩脉(242.6~233.4 Ma) (第鹏飞,2018)与那扎岩体年龄相近,在空间上沿 夏河-合作深大断裂两侧呈北西—南东向带状分 布,其中夏河岩体侵入夏河-合作断裂,岩体出露长 轴方向总体与断裂延伸方向一致,岩石组合为一套 花岗闪长岩-石英闪长岩-二长花岗岩为主的高钾 钙碱性花岗质岩石,是三叠纪大规模岩浆作用的产 物,其组合是典型的俯冲带岛弧岩浆岩(贾儒雅等, 2019)。

金维浚等(2005)认为,治力关岩体与活动大陆 边缘环境下加厚地壳的部分熔融有关;贾儒雅等 (2019)认为,德乌鲁岩体形成于壳源岩浆与幔源岩 浆的混合作用,夏河一合作一带印支早期的岩浆作 用与特提斯洋俯冲作用有关;韦萍等(2013)认为, 夏河岩体形成于阿尼玛卿-勉略洋俯冲导致的大陆 边缘弧环境;第鹏飞等(2018)通过对早子沟金矿区 花岗闪长斑岩脉岩浆的研究,认为该区岩浆起源于 同碰撞过程导致壳下岩石圈地幔断裂拆沉,继而引 起伸展拉张、地幔上隆,形成了早子沟三叠世花岗 闪长斑岩脉岩。

在花岗岩构造环境主量元素 R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub> 判别图解

(图 8-a)中,那扎岩体样品点主要落在同碰撞(S型)花岗岩区;在花岗岩构造环境微量元素判别图解(图 8-b)中,那扎岩体样品点主要落在火山弧-同碰撞区域。说明那扎岩体产于火山弧-同碰撞构造背景,与上述区域上主要岩体的形成背景--致。

在早一中三叠世,西秦岭造山带西段的夏河— 合作及领区一带处于陆缘弧环境(Jiang et al., 2010),阿尼玛卿洋向北俯冲直至闭合,在碰撞过程 中造山带的地壳和岩石圈厚度增加,软流圈物质上 涌,引发富钾地壳的变质砂岩、变质泥岩等物质部 分熔融,同时遭受地幔物质的混染,最终形成低稀 土元素、贫 P、贫 Ti、富 K 的钙碱性过铝质花岗斑 岩。因此,笔者结合区域地质背景认为,在早印支 期,西秦岭夏河—合作一带处于地壳和岩石圈加厚 的陆缘弧环境,研究区那扎岩体就是该阶段岩浆作 用的产物。

# 5 结 论

(1) 西秦岭那扎岩体形成于早印支期, 锆石 U-Pb 测年结果显示, 侵位年龄约为 249.7±1.8 Ma。

(2)那扎岩体为富 K,贫 P、Ti,低稀土元素含 量,高 Mg<sup>#</sup>值的钙碱性过铝质花岗斑岩。岩浆起源 于地壳变质砂岩和变质泥岩的部分熔融,但在成岩 过程中有幔源组分的加入。

(3) 西秦岭夏河—合作一带, 在早印支期处于 地壳和岩石圈加厚的陆缘弧环境, 那扎岩体是该阶



图 8 那扎岩体花岗岩 R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>(a,底图据 Batchelor et al., 1985)与 Y-Nb 构造环境判别图解(b,底图据 Pearce et al., 1984) Fig. 8 Tectonic differentiation diagrams of R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>(a) and Y-Nb (b) for Nazha pluton

#### 段岩浆作用的产物。

**致谢**:研究过程中得到中国地质调查局发展研 究中心底振山、程志中、薛建玲、贾儒雅、隗含涛等 及甘肃省地质矿产勘查开发局第三地质矿产勘查 院李鸿睿、陈耀宇、柳生祥、梁志录等正高级工程师 的深入指导;甘肃省地质矿产勘查开发局第三地质 矿产勘查院严镜、张建鹏在写作过程中给予了帮助 和建议;审稿专家对本文提出宝贵意见,在此一并 表示感谢。

### 参考文献

- Ather R, Holl A, Hegner E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[J].Lithos, 2000, 50: 51–73.
- Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. Chemical Geology, 1985, (48): 43–55.
- De La Roche H, Leterrier J, Grandclaude P, et al. A classification of volcanic and plutonic rocks using  $R_1 R_2$  diagram and major-element analyses—Its relationships with current nomenclature [J]. Chemical Geology, 1980, 29: 183–210.
- Jiang Y H,Jin G D,Liao S Y, et al. Geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic constraints on the origin of Late Triassic granitoids from the Qinling orogen, central China: Implications for a continental arc to continent– continent collision[J]. Lithos, 2010, 117: 183–197.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisement and Refinement of zircon U–Pb isotope and trace element analyses by LA–ICP–MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15): 1535–1546.
- Luo B J, Zhang H F, Xun W C, et al. The Middle Triassic Meiwu Batholith, West Qinling, Central China: Implications for the Evolution of Compositional Diversity in a Composite Batholith [J]. Journal of Petrology, 2015, 56(6): 1139–1172.
- Maniar Pd, Piccoli Pm. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635–643.
- Mao J W, Qiu Y M, Goldfarb R J, et al. Geology, distribution and classification of gold deposits in the Western Qinling belt, Central China[J]. Mineralium Deposita, 2002, 37(3/4): 352–377.
- Middlemost A K. Magmas and magmatic rocks[M]. London: Longman, 1985: 1-266.
- Middlemost A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth Science Reviews, 1994, 37(3/4): 215-224.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956–983.
- Peccerillo R, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. Contrib. Mineral Petrol, 1976, 58: 63–81.
- Qiu K F, Deng J. Petrogenesis of granitoids in the Dewulu skarn copper

deposit: implications for the evolution of the Paleotethys ocean and mineralization in Western Qinling, China[J]. Ore Geology Reviews, 2017,90: 1078–1098.

- Qiu K F, Yu H C. Nature and origin of Triassic igneous activity in the Western Qinling Orogen: the Wenquan composite pluton example[J]. International Geology Review, 2018, 60(2): 242–266.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D. et al. Reaction Between Slab derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa[J]. Chemical Geology, 1999, 160(4): 335–356.
- Sui J X, Li J W, We G, et al. The Dewulu reduced Au-Cu skarn deposit in the Xiahe-Hezuo district, West Qinling orogen, China: Implications for an intrusion-related gold system[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 80: 1230–1244.
- Sun S, Mcdonough W. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313–345.
- Taylor S R, Mclennan S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. Review in Geophysics, 1995, 33: 241–265.
- Tuttle O F, Bowen N L. Origin of granite in the light of experimental studies in the system  $NaAlSi_3O_8 KAlSi_3O_8 SiO_2 H_2O$  [J]. Geological Society of America Memoirs, 1958, 74: 1–146.
- Yu H C , Guo C A , Qiu K F, et al. Geochronological and geochemical Constraints on the Formation of the Giant Zaozigou Au –Sb deposit, west Qinling, China[]]. Minerals, 2019, 9(1): DOI: 10.3390/min9010037.
- 陈明辉,郭素雄,徐军伟,等.德乌鲁岩体内外接触带金多金属成矿区 成岩成矿地质地球化学特征及成因探讨[J].矿产与地质,2016,30 (4):517-530.
- 代文军,陈耀宇.甘肃枣子沟金矿区中性岩脉与成矿关系[J].黄金, 2012,33(1):19-24.
- 第鹏飞西秦岭夏河-合作早子沟金矿床地球化学特征及成矿机制研 究[D].兰州大学博士学位论文,2018.
- 冯小明,李注苍,齐建宏.西秦岭德乌鲁岩体成因及地质意义——来自 岩石地球化学的证据[J].岩石矿物学杂志,2021,40(2):347-362.
- 冯益民,曹宣铎,张二朋,等西秦岭造山带的演化、构造格局和性质[J]. 西北地质,2003,(1):1-10.
- 耿建珍,黄雅琪,姜桂鹏,等.西秦岭早子沟金锑矿床含矿英安斑岩年 代学及其成因[J].地质调查与研究,2019,42(3):166-173.
- 龚全胜,代文军,武雪梅.西秦岭早子沟金矿含矿岩体地球化学特征及成因机制探讨[J].矿产勘查,2019,10(4):854-862.
- 何彤彤,华永成,逯文辉.西秦岭德乌鲁—美武地区中生代岩体年代 学、地球化学特征及与成矿关系研究[J].黄金,2020,41(7):17-25.
- 贾儒雅,王涛,李康宁,等.西秦岭德乌鲁含矿岩体及其包体的岩石学成因和构造意义[J].地学前缘,2019,26(5):290-303.
- 金维浚,张旗,何登发,等西秦岭埃达克岩的 SHRIMP 定年及其构造 意义[J].岩石学报,2005,21(3):959-966.
- 靳晓野,李建威,隋吉祥,等.西秦岭夏河—合作地区德乌鲁杂岩体的 侵位时代、岩石成因及构造意义[J].地球科学与环境学报,2013,35 (3):20-38.
- 刘伯崇,李康宁,史海龙,等.西秦岭甘青交界一带晚三叠世火山岩岩 石成因及构造指示意义[J].现代地质,2018,32(4):704-717.

- 骆必继,张宏飞,肖尊奇.西秦岭印支早期美武岩体的岩石成因及其构造意义[J].地学前缘,2012,19(3):199-213.
- 李春昱中国的板块构造轮廓[J].中国地质科学院院报,1980,2(1): 11-22.
- 路凤香,桑隆康,邬金华,等.岩石学[M].北京:地质出版社,2002.
- 李康宁,贾儒雅,李鸿睿,等.西秦岭甘肃夏河—合作地区与中酸性侵 入岩有关的金铜多金属成矿系统及找矿预测[J].地质通报,2020, 39(8):1191-1203.
- 毛景文.西秦岭地区造山型与卡林型金矿床[J].矿物岩石地球化学通报,2001,(1):11-13.
- 任纪舜,姜春发,张正坤,等.中国大地构造及其演化[M].北京:科学出版社,1980.
- 任纪舜,张正坤,牛宝贵,等.论秦岭造山带——中朝与扬子陆块的拼 合过程[C]//叶连俊,钱祥麟,张国伟、秦岭造山带学术讨论会论文 选集.西安:西北大学出版社,1991:99-110.

- 韦萍,莫宣学,喻学惠,等西秦岭夏河花岗岩的地球化学、年代学及地质意义[J].岩石学报,2013,29(11):3981-3992.
- 肖庆辉,邓晋福,马大铨,等.花岗岩研究思维与方法[M].北京:地质出版社,2002.
- 闫臻.西秦岭晚古生代弧前盆地沉积与成矿作用[D].中国科学院研 究生院(地质与地球物理研究所)博士学位论文,2002.
- 张德贤,束正祥,曹汇,等西秦岭造山带夏河—合作地区印支期岩浆 活动及成矿作用——以德乌鲁石英闪长岩和老豆石英闪长斑岩 为例[J].中国地质,2015,42(5):1257-1273.
- 张国伟,张宗清,董云鹏,等,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[]].岩石学报,1995,11(2):101−113.
- 张国伟,张本仁,袁学诚,等.秦岭造山带与大陆动力学[M].北京:科学 出版社,2001.
- 张国伟,郭安林,姚安平.中国大陆构造中的西秦岭一松潘大陆构造结[J]. 地学前缘,2004,11(3):23-32.