

引用格式：崔加伟，李振宏，井向辉，等，2023. 汾渭地堑系开启时限：基于中条山奇峰花岗斑岩岩脉的年代学约束[J]. 地质力学学报，29(4)：485–496. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023039

Citation: CUI J W, LI Z H, JING X H, et al., 2023. The initial time of the Fen–Wei graben system: Constraints from geochronology of the Qifeng granite porphyry dikes in the Zhongtiaoshan Mountains[J]. Journal of Geomechanics, 29(4)：485–496. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023039

汾渭地堑系开启时限：基于中条山奇峰花岗斑岩岩脉的年代学约束

崔加伟^{1,2,3}，李振宏^{1,2,3}，井向辉^{4,5}，寇琳琳^{1,2,3}
CUI Jiawei^{1,2,3}，LI Zhenhong^{1,2,3}，JING Xianghui^{4,5}，KOU Linlin^{1,2,3}

1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室，北京 100081；
3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室，北京 100081；
4. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院，陕西 西安 710018；
5. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室，陕西 西安 710018

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
3. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
4. *Exploration and Development Institute of PetroChina Changqing Oil field Company, Xi'an 710018, Shanxi, China;*
5. *National Engineering Laboratory of Low Permeability Oil and Gas Field Exploration and Development, Xi'an 710018, Shanxi, China*

The initial time of the Fen–Wei graben system: Constraints from geochronology of the Qifeng granite porphyry dikes in the Zhongtiaoshan Mountains

Abstract: The Fen–Wei graben system is an essential Cenozoic extensional fault–depression belt in the central part of the North China craton. Previous research achievements mainly focused on its formation process and dynamic mechanism, but the initial time has been unresolved due to the lack of quantitative dating objects. This paper first reports the granite porphyry dikes in the andesite of the Majiahe formation in the Xionger group of the Zhongtiaoshan orogenic belt adjacent to the Fen–Wei graben system. The dating results of the granite porphyry dikes indicate that the age sequence concentrates mainly in two stages, 1769.8 ± 8.7 Ma and 69.14 ± 0.85 Ma. The former is consistent with the primary age of the volcanic rocks of the Xionger group, representing the characteristics of inherited zircons, and the latter represents the formation age of the granite porphyry dikes. The Ga/Al value ratios of granite porphyry dikes of the Qifeng samples are all greater than 2.6, characterized by enriched silicon, alkali, potassium, depleted calcium, and high magnesium. The rare earth elements are enriched in light and depleted in heavy rare earth elements. The Qifeng granite porphyrite dikes are I-type granites, indicating that the tectonic setting is extensional. The research provides new evidence for the initial time of the southern part of Fenwei graben in the Cenozoic.

Keywords: zircon U–Pb geochronology; geochemistry; granite porphyry dikes; Zhongtiaoshan Mountains; Fen–Wei graben system

摘要：汾渭地堑系是华北克拉通中部新生代一条重要的张性断陷带，以往研究成果主要集中在其形成过程及动力学机制方面，但对其开启时限的研究由于缺乏定量的测年对象，一直悬而未解。此次研究在汾渭地堑系相邻的中条山奇峰一带发现了一系列不规则状的花岗斑岩岩脉。对该套花岗斑岩岩脉的测年

基金项目：中国地质调查局地质调查项目（DD20221644，DD20190018）；国家自然科学基金项目（41702216，41972119）

This research is financially supported by the Geological Survey Projects of the China Geological Survey (Grants DD20221644 and DD20190018) and the National Natural Science Foundation of China (Grants NO. 41702216 and 41972119).

第一作者：崔加伟（1990—），男，副研究员，主要从事大地构造分析方面的研究工作。E-mail: 1cuijiawei@163.com

收稿日期：2023-03-27；修回日期：2023-06-28；责任编辑：范二平

结果表明,其年龄序列主要集中在 1769.8 ± 8.7 Ma 和 69.14 ± 0.85 Ma 两个阶段,前者与熊耳群火山岩的主体年龄一致,代表了继承性锆石的特点,后者代表了花岗斑岩岩脉的形成年龄。奇峰花岗斑岩岩脉样品的 Ga/Al 均大于 2.6,表现富硅、碱、钾,贫钙,高镁的特点,稀土元素中轻稀土富集、重稀土亏损,具有 A 型花岗岩的特点,形成于拉张的构造背景下。结合区域地质背景认为,该套花岗斑岩岩脉指示了汾渭地堑系南段开启的时限,研究成果为汾渭地堑系的开启时限提供了新的证据。

关键词: 锆石 U-Pb 年代学; 地球化学特征; 花岗斑岩岩脉; 中条山; 汾渭地堑系

中图分类号: P534.61 文献标识码: A 文章编号: 1006-6616 (2023) 04-0485-12

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023039

0 引言

汾渭地堑系地处华北克拉通中部,处于滨太平洋构造域与青藏高原构造域的过渡部位,是两大构造域相互作用的场所,该地堑系的开启、充填过程及地球动力学背景一直是地质学界关注的热点 (Bellier et al., 1988, 1991; Xu et al., 1993; Zhang et al., 1998; 邢作云等, 2005; Mercier et al., 2013; Shi et al., 2015, 2020; Chen et al., 2021; 梁光河, 2023)。关于汾渭地堑系形成的地球动力学背景目前研究的观点逐步趋于一致。古近纪时期,古太平洋板块向西俯冲的回撤作用从而引起北西—南东向的区域性拉张 (Zhu et al., 2017),太行山以东区域拉张应力很强,华北平原地区软流圈大范围、大幅度上涌,形成了大型裂陷盆地,而太行山以西的汾渭裂陷系区域拉张应力明显减弱,仅在运城盆地以南以及渭河盆地主体形成了初始裂陷,沉积了厚度较大的古近纪地层 (苏宗正, 1988; 万天丰, 2004; 邢作云等, 2005; Shi et al., 2015; 陈兴强, 2017; 秦帮策等, 2021)。中新世由于青藏高原向北方向的挤出作用引起鄂尔多斯盆地逆时针旋转,运城盆地的大部分地区、临汾盆地、晋中盆地、大同盆地等山西地堑系一系列近北东向的断陷盆地相继形成,盆地的底部年龄基本上都在 10~8 Ma 之间 (吴奇等, 2013; Shi et al., 2020; Chen et al., 2021)。自中新世以来,汾渭地堑系持续受到青藏高原隆升扩展推挤作用力的影响 (Shi et al., 2015)。数值模拟结果表明,现今汾渭地堑系的最大主压应力的优势方位为北东—北东东方向,主要受到青藏高原向北东方向不断推挤作用的控制,运动速率大小也有从鄂尔多斯盆地西南向北东方向逐渐递减的特征 (崔效锋等, 2010; 武敏捷等, 2011; 韩晓明等, 2015; 林向东等, 2017; 仲启蒙等, 2022)。关于汾渭地堑系的开启时限,由于在裂陷盆地发育的初始期,沉积建造为一套厚度较大的

砾岩,缺乏化石依据和定量测年方法,因此从盆地演化角度很难给出具体的年龄 (山西省地质矿产局, 1989; Xu et al., 1993; 刘护军和薛祥煦, 2004)。沉积盆地与相邻的造山带往往是相互依存、彼此共生的,山脉隆升与盆地沉降之间息息相关,相邻造山带岩浆活动时限及山体隆升剥蚀时限裂变径迹年代学是目前研究沉积盆地开启时限的一种新途径 (宋友桂等, 2013; 汪校锋等, 2015; 李斌, 2019)。汾渭地堑系相邻造山带华山、中条山裂变径迹年龄表明,在始新世时期存在一期明显的构造隆升事件,预示着汾渭地堑系的开始时限大约在古近纪时期 (Su et al., 2021)。但目前在汾渭地堑系相邻造山带尚未有新生代岩浆活动的报道。文章在中条山造山带奇峰地区熊耳群安山岩中发现了系列花岗斑岩岩脉,通过对花岗斑岩岩脉开展系统的锆石 U-Pb 年代学测试,结合岩石地球化学分析,从造山带岩浆活动方面为汾渭地堑系的开启时限提供新的证据。

1 区域地质概况

汾渭地堑系位于秦岭造山带北缘、鄂尔多斯盆地南缘及东缘、太行山西缘,又称汾渭裂谷系。西起宝鸡,向东沿渭河、汾河延伸,于运城、侯马向北转为北北东向,至大同、延庆段转变为北东向。该地堑系由大小不一的十个地堑型盆地组成,总体呈雁行排列的“S”形展布,长逾 1200 km,宽度一般在 10~50 km 之间 (图 1)。

汾渭地堑作为典型的新生代断陷盆地,由新生代沉积地层和前新生界基底构成。新生代地层在汾渭地堑系中广泛分布,主要分布在地堑系内几个大的断陷盆地内部,由南至北包括渭河盆地、三门峡盆地、运城盆地、临汾盆地、太原盆地、繁代盆地和大同盆地等。这些地层可划分为 3 个阶段:古近系—中新统局限在地堑系南北两端地层,中新统上

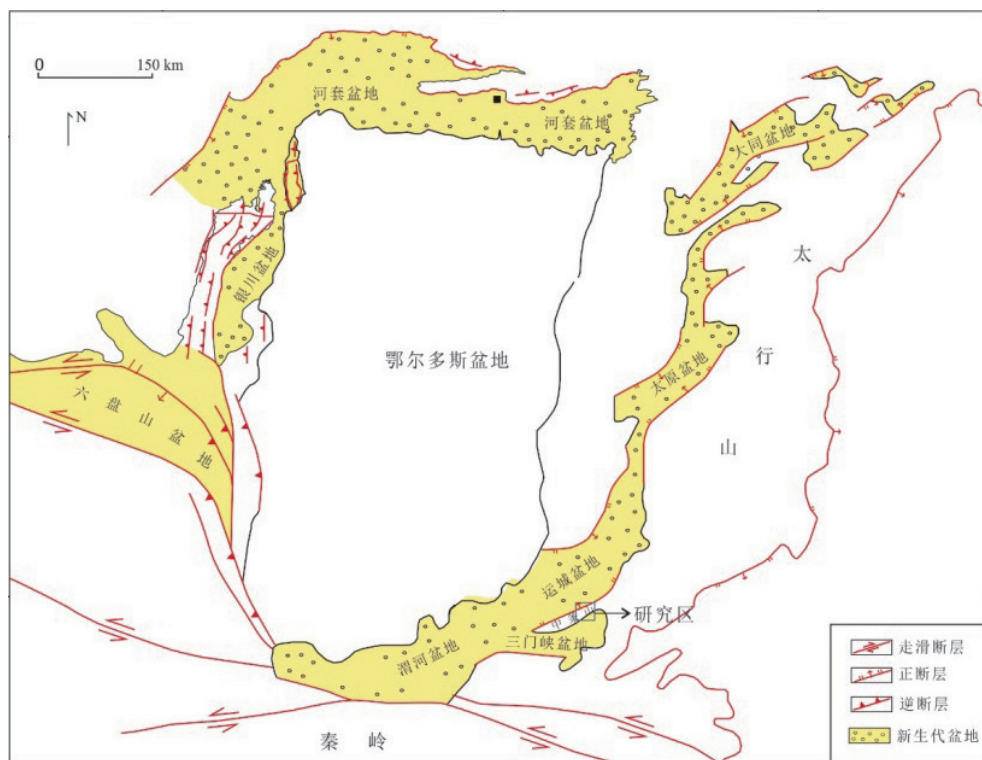


图1 研究区区域构造位置图

Fig. 1 Regional tectonic map of the study area

部一更新统在整个地堑系广泛发育,全新统以来以冲洪积相沉积为主。前两个阶段均伴随有火山岩的喷发,且集中在地堑系最北端。第三阶段地堑系内各盆地边缘地带发育有大量风成沉积物。根据盆地构造凹陷中的地层时代推测,山西地堑的主体形成于上新世,自上新世以来由于各断陷盆地活动强度或升降幅度不同,地层沉积厚度也不一样(邢作云等, 2005)。

中条山造山带位于汾渭地堑系南部,夹持在运城盆地与三门峡盆地之间。前寒武纪地层发育齐全,主要有新太古代西姚表壳岩、古元古代冷口变质火山岩、古元古代绛县群、古元古代中条群和担山石群,并伴有多期岩浆作用侵入;此外,中条山地区广泛发育一套中新元古界沉积,其下部为一套厚度巨大的以安山岩为主的火山喷发岩系——熊耳群。熊耳群为晚前寒武纪未变质地层最底部的一套中偏基性火山岩,并夹有少量酸性火山岩,火山喷发时限一般为17~18亿年(万渝生等, 2022)。中条山整体上大面积出露古元古代—太古代变质岩和寒武系灰岩。区域内发育北东—南西向和近东西的正断层,其中,北东—南西向断层切割了东西向断层,形成时代较新(图2)。

2 样品采集与分析

2.1 样品采集

中条山奇峰花岗斑岩岩脉侵入到中元古界熊耳群马家河组安山岩,夹持于北东向和近东西向两组正断层的交汇部位,岩脉走向主体受控于北东向的正断层。各条脉体宽度不等,介于3~5 cm之间,颜色为浅灰白色,局部可见肉红色(图3a)。镜下岩石斑晶含量为30%~35%,其中含有约10%的石英斑晶、20%~25%的长石斑晶和少量黑云母斑晶(5%)。斑晶大小不等,其中钾长石斑晶较粗大,粒径一般为5~10 mm,呈灰黄—浅肉红色,边缘具熔蚀现象,呈浑圆状,主要为条纹长石和微斜长石;斜长石多呈长柱状或不规则状,具有一定的绢云母化蚀变,大小为0.5~2 mm。石英斑晶呈自形粒状,粒径为2~3 mm,边缘被熔蚀成浑圆状。黑云母斑晶呈绿泥石化。基质一般为细粒—半自形粒状结构,主要由石英、长石和黑云母组成,其中石英含量约为20%,钾长石含量约为15%(图3 b)。此次分别在花岗斑岩岩脉中采集了1个锆石U-Pb年代学测试样品和5个地球化学分析样品(图2;采样位置110°33'N, 34°57'E)。

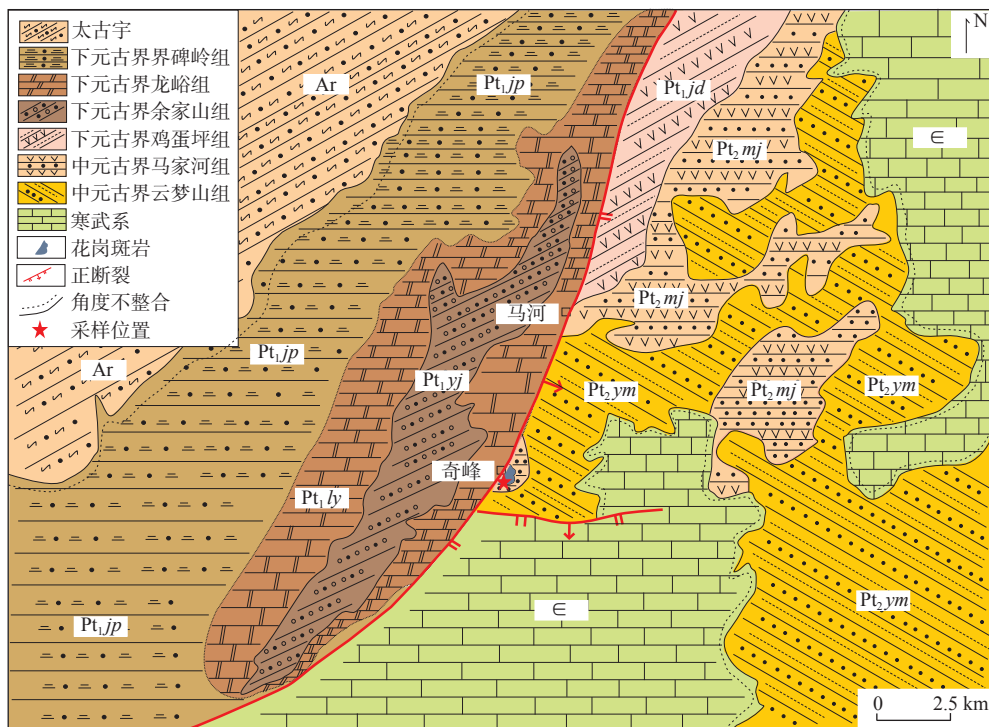
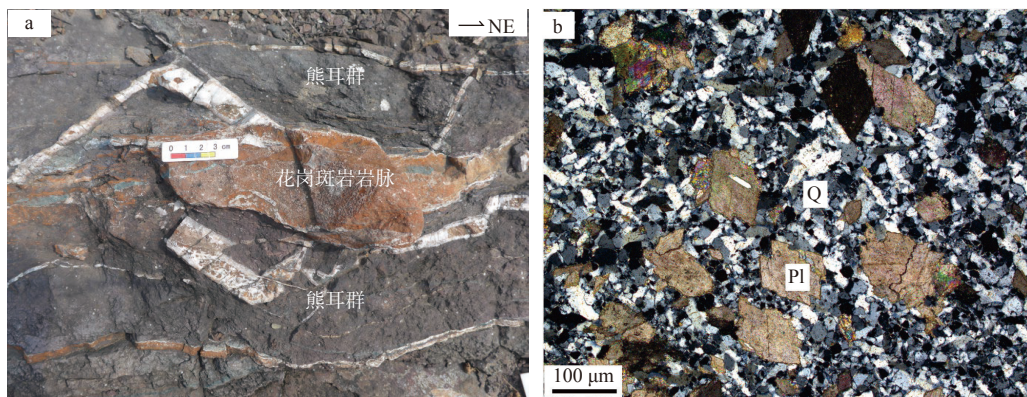


图2 奇峰花岗斑岩及邻区区域地质图

Fig. 2 Regional geologic map of the Qifeng granite porphyry and adjacent areas



Pl—斜长石; Q—石英

a—花岗斑岩岩脉野外照片; b—花岗斑岩岩脉镜下照片

图3 奇峰花岗斑岩岩脉露头及镜下典型照片

Fig. 3 Field and microscopic photographs of the Qifeng granite porphyry dikes

(a) Field photograph of granite porphyry dikes; (b) Microscopic photograph of granite porphyry dikes

Pl—plagioclase

2.2 样品分析

挑选新鲜的岩石样品进行锆石定年。锆石 U-Pb 同位素测年样品碎样及锆石挑选、制靶、阴极发光以及透射、反射照相工作均在河北省区域地质调查研究院测试分析实验室完成。锆石激光原位 U-Pb 同位素定年在北京燕都中实测试技术有限公司完成。锆石 U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 GJ-

1 作外标, 进行 U、Th、Pb 同位素分馏校正, 每分析 5~10 个样品点, 分析 2 次 GJ-1, 此次测试剥蚀光斑直径根据实际情况选择 30 μ m。数据处理采用中国地质大学刘勇胜研发的 ICP-MSDataCal 程序和 Ludwig 开发的 Isoplot 程序 (Andersen, 2002; Ludwig, 2003; Liu et al., 2010), 采用 NIST610 玻璃作为标样计算锆石中 U、Th、Pb 的含量 (王森等, 2022)。

地球化学样品全分析在北京燕都中实测试技术有限公司完成。将岩石粗碎至厘米级的块体, 选取无蚀变和脉体穿插的新鲜样品用纯化水冲洗干净, 烘干并粉碎至 0.2 cm 以备测试使用。测量主量元素时, 首先将粉末样品称量后加入 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 助熔剂混合, 并使用融样机加热至 1150℃ 使其在金铂坩埚中熔融成均一玻璃片体, 然后使用荧光光谱仪 (XRF) 进行测试, 测试结果保证数据误差小于 1%。测量微量元素时, 将 0.2 cm 粉末样品称量后置放入聚四氟乙烯溶样罐, 并加入 $\text{HF}+\text{HNO}_3$, 在干燥箱中将高压消解罐保持在 190℃ 温度下 72 小时后取出, 经过除酸后, 将溶液定容为稀溶液, 上机测试。测试使用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 完成, 所测数据根据监控标样 GSR-2 显示其误差小于 5%, 部分挥发性元素和极低含量元素的分析误差小于 10%。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 同位素测年

通过锆石阴极发光图像可以看出, 锆石粒径整体较小, 一般介于 50~100 μm , 形态各异, 呈现长柱状、椭圆状, 部分晶形不完整, 呈现碎片状。大部分锆石颜色较暗, 具有明显的岩浆锆石震荡环带 (图 4)。由于锆石粒径较小, 在实验过程中容易被击穿, 其

测试点所获得的锆石年龄数据谐和度较低, 不能满足精度的需要, 此次测试共获得了 22 个有效数据点 (表 1)。测得的年龄数据可划分为两个区间: 其中 10 个有效数据点获得的年龄介于 1709~1788 Ma, 谐和年龄为 1769.8 ± 8.7 Ma (图 5a); 12 个有效数据点获得的年龄介于 67~71 Ma, 谐和年龄为 69.14 ± 0.85 Ma (图 5b)。年龄较老的一组锆石的 Th/U 介于 0.18~1.16, 平均为 0.63; 年龄较新的一组锆石的 Th/U 介于 0.87~1.29, 平均为 1.12。

3.2 岩石地球化学

奇峰花岗斑岩岩脉的主、微量和稀土元素分析结果见表 2、表 3。样品中 SiO_2 含量介于 71.87%~72.80%; Na_2O 含量介于 2.38%~2.98%, K_2O 含量介于 3.31%~4.78%, 全碱 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 含量介于 6.23%~7.69%。TAS (全碱 vs. 硅) 图解显示, 所有样品点均投影到了花岗岩范围 (图 6; Middlemost, 1994)。在 SiO_2 - K_2O 的图解中, 样品点均投影到了钾玄岩系列范围 (图 7; Peccerillo and Taylor, 1976)。样品中 Al_2O_3 含量介于 8.06%~8.88%, CaO 含量介于 2.53%~3.88%, A/CNK 值 [$\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$] 为 1.02~1.08, A/NK 值 [$\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$] 为 2.43~3.20, A/NCK-A/NK 的图中显示其为弱过铝质岩石 (图 8)。样品中 MgO 含量较高, 介于 2.46%~2.51%, $\text{Mg}^\#$ 值为 0.44~0.71。 $^{\text{T}}\text{FeO}$ 的含量介于 3.16%~3.88%。

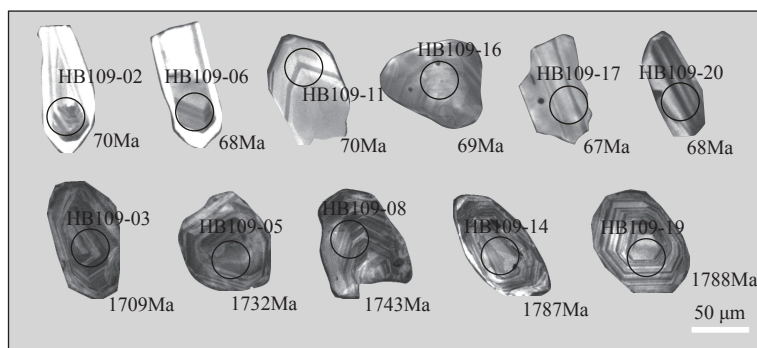


图 4 奇峰花岗斑岩岩脉典型阴极发光照片

Fig. 4 Typical cathodoluminescence photos of the Qifeng granite porphyry dikes

稀土元素总量 ($\sum\text{REE}$) 介于 53.24×10^{-6} ~ 79.04×10^{-6} , 轻稀土元素 (LREE) 含量变化范围为 33.73×10^{-6} ~ 54.83×10^{-6} , 重稀土 (HREE) 含量变化范围为 7.4×10^{-6} ~ 9.43×10^{-6} , LREE/HREE 一般为 4.13~5.63, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 一般为 2.99~5.09, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 1.64~2.62, 整体上表现为 LREE 富集, HREE 亏损, HREE 特征曲线分布比较平坦 (Sun and McDonough, 1989; 图 9a)。岩石 δ_{Eu} 值为 0.98~1.2, 显示弱的正 Eu 异常。在微量元素蛛网图上, Nb、Ta 等高场强元素 (HFSE) 亏损,

Rb、K 等大离子亲石元素 (LILE) 富集 (图 9b)。

4 讨论

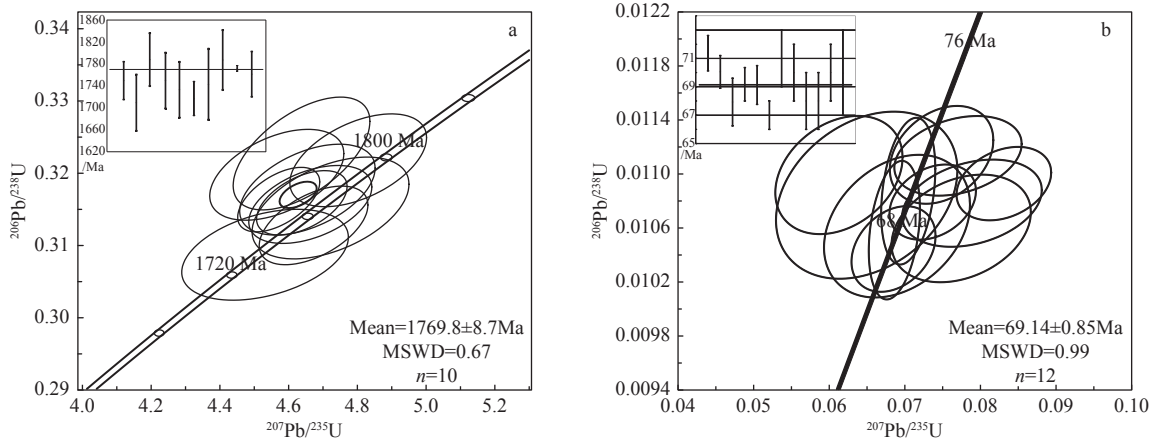
4.1 花岗斑岩岩脉形成的构造背景

古元古代末—中元古代早期 (1.85~1.70 Ga), 华北克拉通以伸展—裂解作用为主, 在其南部发育有熊耳—中条坳拉谷 (Hou et al., 2006)。在坳拉谷内, 主要发育一套中元古代长城纪熊耳群火山岩。

表 1 中条山奇峰花岗斑岩岩脉锆石 U-Pb 年龄统计表

Table 1 Zircon U-Pb ages of the Qifeng granite porphyry dikes in the Zhongtiaoshan Mountains

样点	元素含量与比值							年龄/Ma			
	Pb/ $\times 10^{-6}$	U/ $\times 10^{-6}$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
HB109-01	76	2175	0.80	0.0771	0.0056	0.0111	0.0002	75	5	71	1
HB109-02	109	3280	0.78	0.0831	0.0041	0.0109	0.0002	81	4	70	1
HB109-03	17	35	1.29	4.5705	0.1276	0.3197	0.0042	1744	23	1788	20
HB109-04	49	99	1.24	4.5763	0.0785	0.3163	0.0030	1745	14	1771	15
HB109-05	16	35	1.12	4.6420	0.1306	0.3227	0.0052	1757	24	1803	25
HB109-06	33	963	0.76	0.0775	0.0061	0.0106	0.0003	76	6	68	2
HB109-07	197	5478	0.90	0.0737	0.0038	0.0108	0.0002	72	4	69	1
HB109-08	50	110	0.98	4.6438	0.0862	0.3158	0.0030	1757	16	1769	15
HB109-09	17	38	0.87	4.6591	0.1295	0.3177	0.0042	1760	23	1778	20
HB109-10	18	37	1.27	4.6675	0.1179	0.3156	0.0036	1761	21	1768	18
HB109-11	3	19	1.16	0.0613	0.0056	0.0110	0.0003	60	5	70	2
HB109-12	33	69	1.19	4.6763	0.1037	0.3127	0.0036	1763	19	1754	18
HB109-13	17	35	1.20	4.7256	0.1494	0.3151	0.0047	1772	26	1766	23
HB109-14	16	34	1.05	4.8055	0.1302	0.3217	0.0042	1786	23	1798	21
HB109-15	7	509	0.84	0.0649	0.0079	0.0108	0.0004	64	8	70	3
HB109-16	140	4085	0.82	0.0789	0.0061	0.0108	0.0002	77	6	69	1
HB109-17	8	734	0.33	0.0685	0.0037	0.0104	0.0002	67	3	67	1
HB109-18	9	605	0.59	0.0749	0.0045	0.0111	0.0002	73	4	71	2
HB109-19	11	23	1.09	4.5366	0.1587	0.3086	0.0042	1738	29	1734	21
HB109-20	125	24169	0.16	0.0686	0.0022	0.0106	0.0003	67	2	68	2
HB109-21	10	1726	0.23	0.0690	0.0064	0.0106	0.0004	68	6	68	2
HB109-22	12	2019	0.18	0.0705	0.0024	0.0109	0.0004	69	2	70	2



a—继承锆石年龄；b—花岗斑岩岩脉年龄

图 5 奇峰花岗斑岩岩脉谐和年龄图

Fig. 5 U-Pb concordia diagrams for zircons from the Qifeng granite porphyry dikes

(a) Inherited zircon ages; (b) Granite porphyry dike ages

表 2 奇峰花岗斑岩岩脉主量元素含量/%

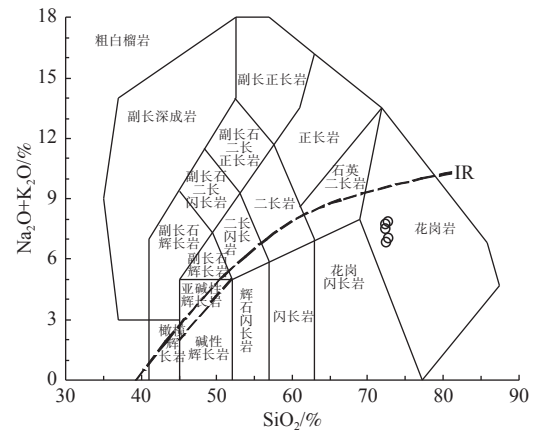
Table 2 Principal element contents (w%) of the Qifeng granite porphyry dikes

	QF-1-1	QF-1-2	QF-1-3	QF-1-4	QF-1-5
SiO ₂	71.87	72.80	71.99	72.35	72.70
Al ₂ O ₃	8.53	8.06	8.88	8.55	8.48
FeO	3.35	3.88	3.16	3.17	3.64
MgO	2.46	2.87	2.92	2.90	2.51
CaO	4.45	2.50	2.73	2.76	3.88
Na ₂ O	2.92	2.38	2.98	2.37	2.91
K ₂ O	3.31	4.38	4.55	4.48	4.78
MnO	0.22	0.08	0.08	0.07	0.21
P ₂ O ₅	0.05	0.07	0.08	0.07	0.11
TiO ₂	0.14	0.28	0.31	0.30	0.35
LOI	1.76	1.28	1.39	1.42	0.67
TAL	99.06	98.59	99.09	98.44	100.25
A/CNK	1.07	1.02	1.02	1.08	1.05
Mg [#]	0.44	0.55	0.71	0.68	0.73

表 3 奇峰花岗斑岩岩脉稀土与微量元素含量/ $\times 10^{-6}$

Table 3 Rare earth and trace element compositions (w%) of the Qifeng granite porphyry dikes

	QF-1-1	QF-1-2	QF-1-3	QF-1-4	QF-1-5
La	7.46	7.65	8.26	5.71	11.64
Ce	14.44	19.60	20.34	14.16	23.40
Pr	1.85	2.20	2.36	1.96	3.02
Nd	8.11	10.06	10.38	9.03	13.09
Sm	2.48	2.48	2.28	2.19	2.80
Eu	0.76	0.76	0.73	0.68	0.89
Gd	1.81	2.28	2.16	1.93	2.64
Tb	0.27	0.38	0.37	0.33	0.45
Dy	1.45	2.43	2.18	2.01	2.68
Ho	0.24	0.47	0.43	0.38	0.53
Er	0.55	1.26	1.16	1.08	1.40
Tm	0.09	0.22	0.20	0.19	0.25
Yb	0.57	1.47	1.26	1.29	1.54
Lu	0.07	0.22	0.19	0.19	0.23
Y	8.64	13.49	11.97	12.11	14.48
LREE	34.47	42.75	44.35	33.73	54.83
HREE	8.36	8.73	7.96	7.40	9.73
δ_{Eu}	0.95	0.96	0.99	1.00	0.98
δ_{Ce}	0.91	1.14	1.09	1.02	0.93
REE	54.47	64.96	64.29	53.24	79.04
(La/Yb) _N	3.21	3.50	4.42	2.99	5.09
(La/Sm) _N	2.50	1.94	2.27	1.64	2.62
Ba	2782.40	13293.66	6010.51	17958.84	2069.59
Cr	13.49	23.66	22.56	25.14	25.72
Cs	0.47	1.06	1.11	1.04	1.19
Ga	4.52	6.87	6.82	6.91	8.88
Hf	0.79	3.88	3.94	3.79	3.65
Nb	3.40	3.05	4.04	3.05	6.14
Pb	3.04	3.41	4.11	2.86	3.91
Rb	37.36	40.78	42.31	40.62	46.22
Sr	81.17	199.24	69.65	285.01	38.35
Ta	0.04	0.11	0.15	0.16	0.19
Th	0.28	0.70	1.33	1.60	1.94
U	0.86	1.30	1.54	1.23	1.76
Zr	123.31	127.93	125.35	127.25	122.86



IR—碱性—亚碱性界线

图 6 奇峰花岗斑岩岩脉 TAS 图解 (Middlemost, 1994)
Fig. 6 Total alkali vs. silica (TAS) diagram (Middlemost, 1994) for the Qifeng granite porphyry dikes

IR— boundary between alkaline and sub-alkaline

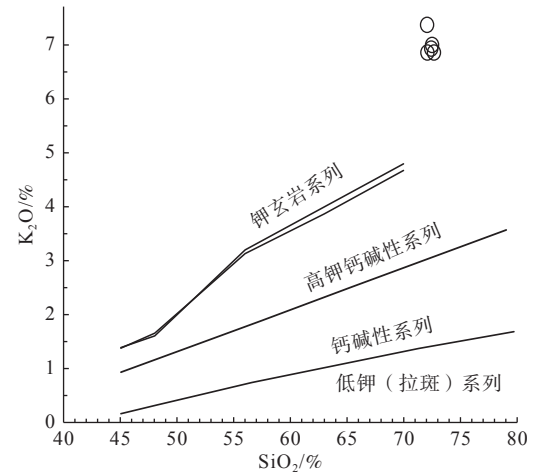


图 7 奇峰花岗斑岩岩脉 SiO₂-K₂O 图解 (Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 7 SiO₂ vs. K₂O diagram (Peccerillo and Taylor, 1976) for the Qifeng granite porphyry dikes

熊耳群火山岩以及侵位于马家河组顶部的石英闪长岩的形成时代均约为 1780 Ma (Peng et al., 2008; Cui et al., 2011), 因此, 一般研究认为熊耳群的形成时代在 1800~1750 Ma。此次研究中获得的 10 个锆石点年龄介于 1709~1788 Ma, 谐和年龄为 1769.8±8.7 Ma, 与熊耳群形成时代接近, 同时结合锆石特征认为, 其主要为继承性锆石, 代表了熊耳群火山岩的喷发年龄。测得的另一组锆石年龄介于 67~71 Ma, 谐和年龄为 69.14±0.85 Ma (图 5b), 结合锆石形态及 Th/U, 认为其代表了侵位于熊耳群安山岩中的花岗斑岩岩脉的年龄。

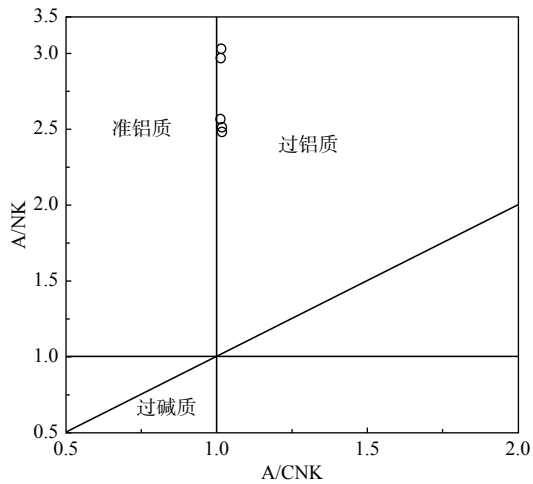
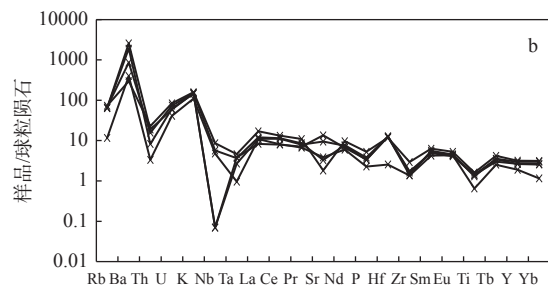
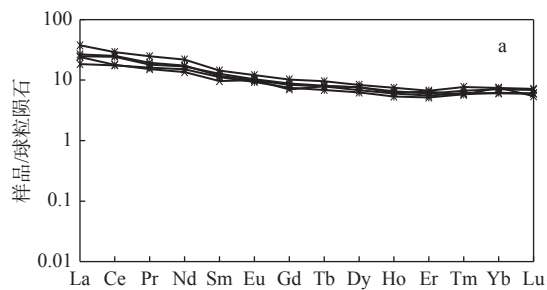


图 8 奇峰花岗斑岩岩脉 A/CNK-A/NK 图解 (Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 8 A/CNK vs. A/NK diagram for the Qifeng granite porphyry dikes (Maniar and Piccoli, 1989)

利用地球化学元素进行花岗岩成因类型的判定是花岗岩研究的核心问题之一,其中 I-S-M-A 图解是进行该项研究比较流行的分类方案,尤以



a—稀土元素蛛网图(球粒陨石值引自 Sun and McDonough, 1989); b—微量元素配分图

图 9 奇峰花岗斑岩岩脉稀土元素与微量元素特征

Fig. 9 Characterization of rare earth elements and trace elements in the Qifeng granite porphyry dikes

(a) Chondrite-normalized REE pattern (chondrite values from Sun and McDonough, 1989); (b) Partition diagram of trace elements

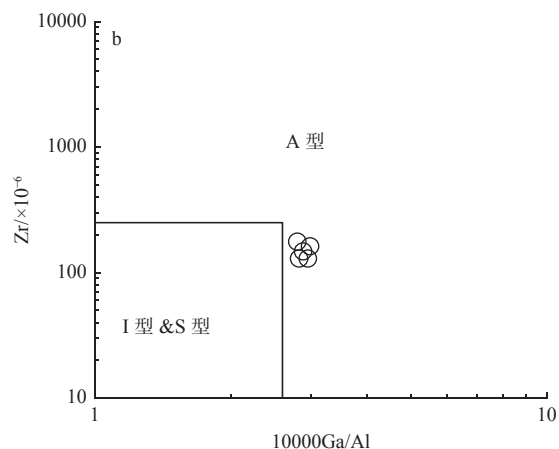
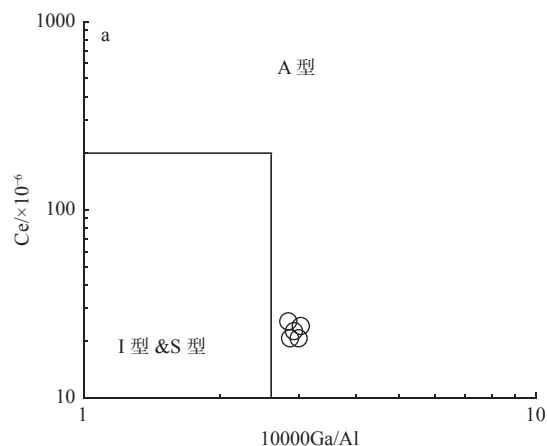


图 10 A 型花岗岩判别图解 (Whalen et al., 1987)

Fig. 10 Discrimination diagrams of the A - type granite (Whalen et al., 1987)

I-S-A 花岗岩成因分类比较多见。Whalen et al. (1987) 提出可根据 Ga 与 Al 的比值来区分 A 型花岗岩和 I-S 型花岗岩。在此次研究中,奇峰花岗斑岩样品的 Ga/Al 均大于 2.6, 所采集样品在 Ga/Al-Zr 和 Ga/Al-Y 判别图中均落在 A 型花岗岩范围内 (图 10)。

地球化学特征显示侵位于熊耳群安山岩中的奇峰花岗斑岩岩脉具有富硅、碱、钾, 贫钙, 高镁的特点 (图 9b), 微量元素显示其相对富集大离子亲石元素 Rb 和 Th, Zr 和 Hf 显示明显正异常特征, Sr、P、Ba、Ti、Nb 元素显示明显负异常特征 (图 9b), 以上均符合 A 型花岗岩的地球化学特征 (Whalen et al., 1987; 王强等, 2000)。球粒陨石标准化稀土元素配分图解显示 (图 9a), LREE 富集, HREE 亏损。Eu 弱正异常, 表明源区无斜长石残留; HREE 亏损, 表明源区有石榴子石残留; $Mg^\#$ 平均值为 0.62, 低于地幔的 $Mg^\#$ (~0.71), 高于地壳的 $Mg^\#$ (~0.42; Chappell et al., 1987), 说明岩浆物质来源于地幔与地壳物质的混染。Rb/Nb 为 7.53~13.37, 明显高于大陆地壳的 Rb/Nb (2.2~4.7), 说明地壳物质对花岗岩

岩体成岩影响较大, 从而导致 Rb 含量增加 (Sylvester, 1989)。Nb 含量出现低谷, 说明源区受地壳组分的影响较大。

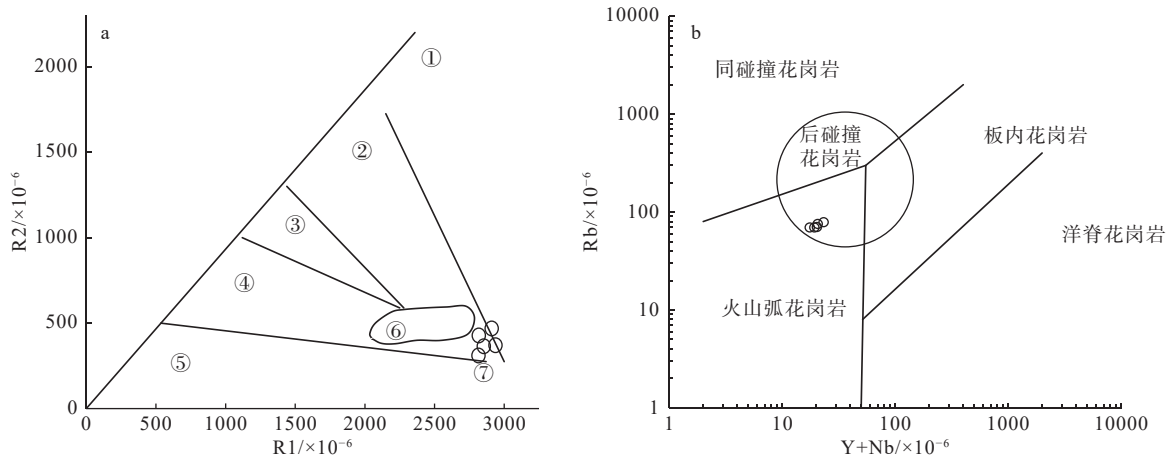
4.2 汾渭地堑系开启时限

《华北地区区域地层表山西分册》(山西省地层表编写组, 1979)中, 曾列出了平陆-三门峡盆地中的平陆县三门乡坝头-过村-刘林河实测剖面, 并将新生代平陆群划分为古新统一始新统坝头组和门里组、始新统坡里组、始新统一渐新统高庙组、渐新统刘林河组等。坝头组主要由暗紫色底砾岩、砾岩组成, 上部夹紫红色泥岩及砂质泥岩, 产古新世腹足类化石。下伏地层为二叠系下石盒子组砂岩、页岩及煤系地层, 以底砾岩底面为界, 与坝头组角度不整合接触。电子顺磁共振波谱 (ESR) 地层测年结果显示, 坝头组地层时代为 65~56.6 Ma (朱大岗等, 2008)。最新的古地磁测年结果将坝头组的底界年龄限定为 54 Ma (Chen et al., 2021), 但不包括底部厚层砾岩, 底部砾岩的年龄应该为古近纪。

鄂尔多斯盆地、秦岭造山带相邻地区的磷灰石裂变径迹研究结果表明, 在大约古近纪末一早始新世时期存在一期明显的构造事件, 该构造事件可能与西太平洋俯冲导致的伸展作用有关 (刘建辉等, 2010; Liu et al., 2013; Chen et al., 2015; Yang et al.,

2017; Su et al., 2021)。华山地区热年代学研究表明: 自晚白垩世以来至少经历了 3 次快速隆升阶段, 其中, 在 120~57 Ma 间华山经历了缓慢隆升过程, 约 57 Ma 以来华山开始相对渭河地堑的快速隆升 (吴中海等, 2003)。鄂尔多斯盆地内部磷灰石裂变径迹研究表明: 新生代构造热事件主要发生在 65~5 Ma, 其中 65 Ma 的年龄可能代表了汾渭地堑的开启时限 (孙少华等, 1997; 高峰等, 2000; 祁凯等, 2017)。汾渭地堑周缘在古近纪末一早始新世均有一起构造隆升事件, 可能与西太平洋俯冲导致的伸展作用有关 (Su et al., 2021)。

由于新生代沉积地层底部为一套厚层冲积扇砾岩, 缺乏古生物依据及具体的测年对象, 汾渭地堑系开启时限的研究从盆地自身的角度难以突破, 但通过对与盆地相邻的造山带岩浆岩侵入时限及构造背景的研究可以间接为其提供解决方案。中条山侵位于熊耳群安山岩中的花岗斑岩岩脉具有 A 型花岗岩特征, 以往的研究表明, A 型花岗岩均产于拉张的构造背景下 (Loiselle and Wones, 1979)。花岗斑岩岩脉在 R1-R2 构造环境判别图解中投影在造山期后, 在 Y+Nb-Rb 判别图解中投影在后碰撞花岗岩 (图 11)。奇峰花岗斑岩富集轻稀土元素和大



①—地幔斜长花岗岩; ②—破坏性活动板块边缘 (板块碰撞前) 花岗岩; ③—板块碰撞后隆起期花岗岩; ④—晚造期花岗岩; ⑤—非造山区 A 型花岗岩; ⑥—同碰撞 (S 型) 花岗岩; ⑦—造山期后 A 型花岗岩

a—R1-R2 图解 (底图据 Batchelor and Bowden, 1985; $R1=1000 \times [4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)]$; $R2=1000 \times (6Ca-2Mg+Al)$); b—Rb-Y+Nb 图解 (底图据 Pearce et al., 1984)

图 11 构造环境判别图解

Fig. 11 Tectonic discrimination digrams

(a) R1 vs. R2 diagram (base map from Batchelor and Bowden, 1985; $R1=1000 \times [4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)]$, $R2=1000 \times (6Ca-2Mg+Al)$); (b) Rb vs. Y+Nb diagram (base map from Pearce et al., 1984)

① mantle plagioclase granite; ② destructively active plate margin (pre-collision) granite; ③ post-collision uplift granite; ④ late orogenic granite; ⑤ non-mountain-forming A-type granite; ⑥ Syn-COLG granite; ⑦ post orogenic A-type granite

离子亲石元素(Rb、Ba 和 K), 亏损重稀土元素和高场强元素(Nb、Ta 和 Ti), 显示 Eu 弱负异常, 具有类似于岛弧岩浆岩的特征。郟庐断裂带的演化历史表明, 在晚白垩世—早古新世时期, 华北克拉通处于伸展的构造背景下, 与西太平洋板块向华北克拉通底部低角度俯冲有关(Zhu et al., 2017)。奇峰花岗斑岩岩脉形成于伸展背景下, 可能与西太平洋板块的俯冲有关。花岗斑岩形成时限为 69.14 ± 0.85 Ma, 为晚白垩世末期。与沉积地层以及区域热年代学的研究相结合(Zhang et al., 1998; 刘池洋等, 2006; 王建强, 2010; Su et al., 2021; 袁宝印等, 2012), 研究认为汾渭地堑系南段的开启时限可能在晚白垩世末期。

5 结论

中条山奇峰花岗斑岩岩脉地球化学特征表明, 其 Ga/Al 大于 2.6, 具有富硅、碱、钾, 贫钙, 高镁的特点; 微量元素显示其相对富集大离子亲石元素; 稀土元素中轻稀土元素富集、重稀土元素亏损; 具有 A 型花岗岩的特点。奇峰花岗斑岩岩脉的形成与西太平洋向华北板块俯冲导致的伸展环境有关, 锆石 U-Pb 测年获得的该岩体侵入时限为 69.14 ± 0.85 Ma。结合研究进展及区域地质资料, 研究认为汾渭地堑南段的开启时限可能在晚白垩世末期。

References

- ANDERSEN T, 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79.
- BATCHELOR R A, BOWDEN P, 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48(1-4): 43-55.
- BELLIER O, MERCIER J L, VERGELY P, et al., 1988. Evolution sédimentaire et tectonique du graben cénozoïque de la Wei He (province du Shaanxi, Chine du Nord)[J]. *Bulletin de la Société Géologique de France*, IV(6): 979-994.
- BELLIER O, VERGELY P, MERCIER J L, et al., 1991. Analyse tectonique et sédimentaire dans les monts Li Shan (province du Shaanxi, Chine du Nord); datation des régimes tectoniques extensifs dans le graben de la Wei He[J]. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 162(1): 101-112.
- CHAPPELL B W, WHITE A J R, WYBORN D, 1987. The importance of residual source material (restite) in granite petrogenesis[J]. *Journal of Petrology*, 28(6): 1111-1138.
- CHEN H, HU J M, WU G L, et al., 2015. Apatite fission-track thermochronological constraints on the pattern of Late Mesozoic–Cenozoic uplift and exhumation of the Qinling Orogen, Central China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114: 649-673.
- CHEN X Q, 2017. Sedimentary and tectonic evolution of the Cenozoic Weihe-Shanxi Graben and the mechanism[D]. Beijing: Peking University. (in Chinese with English abstract)
- CHEN X Q, DONG S W, SHI W, et al., 2021. Magnetostratigraphic ages of the Cenozoic Weihe and Shanxi Grabens in North China and their tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 813: 228914.
- CUI M L, ZHANG B L, ZHANG L C, 2011. U–Pb dating of baddeleyite and zircon from the Shizhaigou diorite in the southern margin of North China Craton: constrains on the timing and tectonic setting of the Paleoproterozoic Xiong'er Group[J]. *Gondwana Research*, 20(1): 184-193.
- CUI X F, XIE F R, LI R S, et al., 2010. Heterogeneous features of state of tectonic stress filed in North China and deep stress in coal mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(S1): 2755-2761. (in Chinese with English abstract)
- GAO F, WANG Y J, LIU S S, et al., 2000. Thermal history study in the west of the Ordos Basin using apatite fission track analysis[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 24(1): 87-91. (in Chinese with English abstract)
- HAN X M, LIU F, ZHANG W T, et al., 2015. Analyzing the variation characteristics of stress field in Hetao seismic belt using focal mechanism data[J]. *Seismology and Geology*, 37(4): 1030-1042. (in Chinese with English abstract)
- HOU G T, WANG C C, LI J H, et al., 2006. Late Paleoproterozoic extension and a paleostress field reconstruction of the North China Craton[J]. *Tectonophysics*, 422(1-4): 89-98.
- LI B, 2019. Thrust structure and its effect on hydrocarbon in the western margin of Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University. (in Chinese with English abstract)
- LIANG G H, 2023. Genesis of the Baikal Rift and the Fenwei graben and the remote effects of the Indo-Eurasian collision[J]. *Earth Science Frontiers*, 30(3): 282-293. (in Chinese with English abstract)
- LIN X D, YUAN H Y, XU P, et al., 2017. Zonational characteristics of earthquake focal mechanism solutions in North China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(12): 4589-4622. (in Chinese with English abstract)
- LIU C Y, ZHAO H G, GUI X J, et al., 2006. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 617-638. (in Chinese with English abstract)
- LIU H J, XUE X X, 2004. Discussion on the Cenozoic and its chronology in the Weihe River Basin[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 26(4): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- LIU J H, ZHANG P Z, ZHENG D W, et al., 2010. The cooling history of Cenozoic exhumation and uplift of the Taibai Mountain, Qinling, China: evidence from the apatite fission track (AFT) analysis[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(10): 2405-2414. (in Chinese with English abstract)
- LIU J H, ZHANG P Z, LEASE R O, et al., 2013. Eocene onset and Late Miocene acceleration of Cenozoic intracontinental extension in the North Qinling range–Weihe graben: Insights from apatite fission track thermochronology[J]. *Tectonophysics*, 584: 281-296.
- LIU Y S, HU Z C, ZONG K Q, et al., 2010. Reappraisal and refinement of

- zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535-1546.
- LOISELLE M C, WONES D R, 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. Abstracts with Programs - Geological Society of America, 12(7): 468.
- LUDWIG K R, 2003. ISOPLOT 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center: 39.
- MANIAR P D, PICCOLI P M, 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological society of America bulletin, 101(5): 635-643.
- MERCIER J L, VERGELY P, ZHANG Y Q, et al., 2013. Structural records of the Late Cretaceous-Cenozoic extension in Eastern China and the kinematics of the Southern Tan-Lu and Qinling Fault Zone (Anhui and Shaanxi Provinces, PR China)[J]. *Tectonophysics*, 582: 50-75.
- MIDDLEMOST E A K, 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3-4): 215-224.
- PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G, 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983.
- PECCERILLO A, TAYLOR S R, 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63-81.
- PENG P, ZHAI M G, ERNST R E, et al., 2008. A 1.78 Ga large igneous province in the North China Craton: the Xiong'er Volcanic province and the North China dyke swarm[J]. *Lithos*, 101(3-4): 260-280.
- QI K, REN Z L, CUI J P, et al., 2017. The Meso-Cenozoic tectonic thermal evolution of the Qishan-Linyou areas in Weiwei uplift of Ordos Basin and its response in geology: evidence from fission-track analysis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(1): 151-162. (in Chinese with English abstract)
- QIN B C, FANG W X, ZHANG J G, et al., 2021. Quaternary sedimentary sequence and sedimentary environment restoration in the Jinzhong Basin, Fenhe Rift Valley[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(6): 1035-1050. (in Chinese with English abstract)
- Shanxi Province Stratigraphic Table Compiling Group, 1979. North China regional stratigraphic table Shanxi Province division[M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- Shanxi Provincial Geological Prospecting Bureau, 1989. Regional geology of Shanxi province[M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- SHI W, DONG S W, LIU Y, et al., 2015. Cenozoic tectonic evolution of the South Ningxia region, northeastern Tibetan Plateau inferred from new structural investigations and fault kinematic analyses[J]. *Tectonophysics*, 649: 139-164.
- SHI W, DONG S W, HU J M, 2020. Neotectonics around the Ordos Block, North China: a review and new insights[J]. *Earth-Science Reviews*, 200: 102969.
- SONG Y G, QIAN L B, LI Y, 2013. Fission track evidence of tectonic uplift in Liupanshan area since Cretaceous[C]//Proceedings of the First National Youth Geological Congress. Fuzhou: Editorial Department of Geological Journal of the Chinese Geological Society: 121-124. (in Chinese)
- SU P, HE H L, TAN X B, et al., 2021. Initiation and evolution of the Shanxi rift system in North China: Evidence from low-temperature thermochronology in a plate reconstruction framework[J]. *Tectonics*, 40(3): e2020TC006298.
- SU Z Z, 1988. New tectonic background of seismic activity in Shanxi fault depression zone[J]. *Shanxi Earthquakes*(4): 2-6. (in Chinese)
- SUN S H, LI X M, GONG G L, et al., 1997. Study on tectonic thermal events in Ordos Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 42(3): 306-309. (in Chinese)
- SUN S S, MCDONOUGH W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[M]//SAUNDERS A D, NORRIS M J. Magmatism in the ocean basins. London: Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345.
- SYLVESTER P J, 1989. Post-collisional alkaline granites[J]. *The Journal of Geology*, 97(3): 261-280.
- WAN T F, 2004. Outline of Chinese geotectonics[M]. Beijing: Geology Press: 387. (in Chinese)
- WAN Y S, DONG C Y, XIE H Q, et al., 2022. Huge growth of the Late Mesoproterozoic-early Neoproterozoic (2.6~3.0 Ga) continental crust in the North China Craton: a review[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 866-906. (in Chinese with English abstract)
- WANG J Q, 2010. Mesozoic-Cenozoic basin evolution-reforming and basin-mountain coupling in southern Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University. (in Chinese with English abstract)
- WANG Q, ZHAO Z H, XIONG X L, 2000. The ascertainment of Late-Yanshanian A-type granite in Tongbai-Dabie Orogenic belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4): 297-306. (in Chinese with English abstract)
- WANG S, ZHANG S H, ZHANG Q Q, et al., 2022. In-situ zircon U-Pb dating method by LA-ICP-MS and discussions on the effect of different beam spot diameters on the dating results[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(4): 642-652. (in Chinese with English abstract)
- WANG X F, LI D W, DU Y S, et al., 2015. Zircon U-Pb dating of the sub-volcanic rocks dismantled from Gaoshanhe and Yunmengshan formations in southern margin of North China Craton[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(5): 919-932. (in Chinese with English abstract)
- WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W, 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419.
- WU M J, LIN X D, XU P, 2011. Analysis of focal mechanism and tectonic stress field features in northern part of North China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 31(5): 39-43. (in Chinese with English abstract)
- WU Q, XU L Q, LI S Z, et al., 2013. Active tectonics in the central North China Block and the cause of the formation of the Fenwei Graben[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(4): 104-114. (in Chinese with English abstract)
- WU Z H, WU Z H, WAN J L, et al., 2003. Cenozoic uplift and denudation history of Huashan Mountains: evidence from fission track thermo-chronology of Huashan granite[J]. *Geological Science and Technology Information*, 22(3): 27-32. (in Chinese with English abstract)
- XING Z Y, ZHAO B, TU M Y, et al., 2005. The formation of the Fenwei rift valley[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 247-262. (in Chinese with English abstract)
- XU X W, MA X Y, DENG Q D, 1993. Neotectonic activity along the Shanxi

- rift system, China[J]. *Tectonophysics*, 219(4): 305-325.
- YANG Z, SHEN C B, RATSCHBACHER L, et al., 2017. Sichuan Basin and beyond: eastward foreland growth of the Tibetan Plateau from an integration of Late Cretaceous-Cenozoic fission track and (U-Th)/He ages of the eastern Tibetan Plateau, Qinling, and Daba Shan[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 122(6): 4712-4740.
- YUAN B Y, TANG G A, ZHOU L P, et al., 2012. Control action on the geomorphic differentiation in loess plateau and the formation of Yellow River by Cenozoic tectogenesis[J]. *Quaternary Sciences*, 32(5): 829-838. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Q, MERCIER J L, VERGÉLY P, 1998. Extension in the graben systems around the Ordos (China), and its contribution to the extrusion tectonics of South China with respect to Gobi-Mongolia[J]. *Tectonophysics*, 285(1-2): 41-75.
- ZHONG Q M, SHAO B, HOU G T, 2022. Numerical simulation and analysis of lithospheric stress field in Fenwei graben[J]. *Progress in Geophysics*, 37(1): 152-163. (in Chinese with English abstract)
- ZHU D G, MENG X G, SHAO Z G, et al., 2008. Revision and classification of Paleogene fluvial-lacustrine strata in the Pinglu area, Shanxi[J]. *Geology in China*, 35(4): 656-669. (in Chinese with English abstract)
- ZHU R X, ZHANG H F, ZHU G, et al., 2017. Craton destruction and related resources[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 106(7): 2233-2257.
- ### 附中文参考文献
- 陈兴强, 2017. 汾渭地堑系新生代沉积-构造演化及其形成机制[D]. 北京: 北京大学.
- 崔效锋, 谢富仁, 李瑞莎, 等, 2010. 华北地区构造应力场非均匀特征与煤田深部应力状态[J]. *岩石力学与工程学报*, 29(S1): 2755-2761.
- 高峰, 王岳军, 刘顺生, 等, 2000. 利用磷灰石裂变径迹研究鄂尔多斯盆地西缘热历史[J]. *大地构造与成矿学*, 24(1): 87-91.
- 韩晓明, 刘芳, 张文韬, 等, 2015. 基于震源机制资料分析河套地震带的应力场变化特征[J]. *地震地质*, 37(4): 1030-1042.
- 李斌, 2019. 鄂尔多斯盆地西部冲断带构造与控油气因素研究[D]. 西安: 西北大学.
- 梁光河, 2023. 贝加尔裂谷和汾渭地堑成因与印度-欧亚碰撞的远程效应[J]. *地学前缘*, 30(3): 282-293.
- 林向东, 袁怀玉, 徐平, 等, 2017. 华北地区地震震源机制分区特征[J]. *地球物理学报*, 60(12): 4589-4622.
- 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等, 2006. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. *地质学报*, 80(5): 617-638.
- 刘护军, 薛祥煦, 2004. 对渭河盆地新生界及其年代的讨论[J]. *地球科学与环境学报*, 26(4): 1-5.
- 刘建辉, 张培震, 郑德文, 等, 2010. 秦岭太白山新生代隆升冷却历史的磷灰石裂变径迹分析[J]. *地球物理学报*, 53(10): 2405-2414.
- 祁凯, 任战利, 崔军平, 等, 2017. 鄂尔多斯盆地渭北隆起岐山-麟游地区中生代构造热演化及地质响应: 来自裂变径迹分析的证据[J]. *地质学报*, 91(1): 151-162.
- 秦帮策, 方维萱, 张建国, 等, 2021. 汾河裂谷晋中盆地内第四纪沉积序列与沉积环境恢复[J]. *地质力学学报*, 27(6): 1035-1050.
- 山西省地层表编写组, 1979. 华北地区区域地层表 山西省分册[M]. 北京: 地质出版社.
- 山西省地质矿产局, 1989. 山西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 宋友桂, 千琳勃, 李云, 2013. 白垩纪以来六盘山地区构造隆升的裂变径迹证据[C]//第一届全国青年地质大会论文集. 福州: 中国地质学会地质学报编辑部: 121-124.
- 苏宗正, 1988. 山西断陷带地震活动的新构造背景[J]. *山西地震*(4): 2-6.
- 孙少华, 李小明, 龚革联, 等, 1997. 鄂尔多斯盆地构造热事件研究[J]. *科学通报*, 42(3): 306-309.
- 万天丰, 2004. 中国大地构造学纲要[M]. 北京: 地质出版社: 387.
- 万渝生, 董春艳, 颜颜强, 等, 2022. 华北克拉通新太古代早期一中太古代晚期(2.6~3.0 Ga)巨量陆壳增生: 综述[J]. *地质力学学报*, 28(5): 866-906.
- 王建强, 2010. 鄂尔多斯盆地南部中生代演化—改造及盆山耦合关系[D]. 西安: 西北大学.
- 王强, 赵振华, 熊小林, 2000. 桐柏—大别造山带燕山晚期A型花岗岩的厘定[J]. *岩石矿物学杂志*, 19(4): 297-306.
- 王森, 张拴宏, 张琪琪, 等, 2022. LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 定年方法及不同束斑直径对年龄结果的影响作用探讨[J]. *地质力学学报*, 28(4): 642-652.
- 汪校锋, 李德威, 杜远生, 等, 2015. 华北南缘高山河组 and 云梦山组中解体的次火山岩: 锆石 U-Pb 定年[J]. *大地构造与成矿学*, 39(5): 919-932.
- 武敏捷, 林向东, 徐平, 2011. 华北北部地区震源机制解及构造应力场特征分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 31(5): 39-43.
- 吴奇, 许立青, 李三忠, 等, 2013. 华北地块中部活动构造特征及汾渭地堑成因探讨[J]. *地学前缘*, 20(4): 104-114.
- 吴中海, 吴珍汉, 万景林, 等, 2003. 华山新生代隆升-剥蚀历史的裂变径迹热年代学分析[J]. *地质科技情报*, 22(3): 27-32.
- 邢作云, 赵斌, 涂美义, 等, 2005. 汾渭裂谷系与造山带耦合关系及其形成机制研究[J]. *地学前缘*, 12(2): 247-262.
- 袁宝印, 汤国安, 周力平, 等, 2012. 新生代构造运动对黄土高原地貌分异与黄河形成的控制作用[J]. *第四纪研究*, 32(5): 829-838.
- 仲启蒙, 邵博, 侯贵廷, 2022. 汾渭地堑岩石圈的应力场数值模拟与分析[J]. *地球物理学进展*, 37(1): 152-163.
- 朱大岗, 孟宪刚, 邵兆刚, 等, 2008. 山西平陆地区古近纪河湖相地层的重新厘定与划分[J]. *中国地质*, 35(4): 656-669.