

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.05.007

北秦岭五朵山 I-S 型花岗岩成因及其对北秦岭早古生代构造演化的约束: 来自锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素的证据

胡鹏¹, 曾威^{1,2*}, 熊金莲³, 刘行¹, 李光耀¹, 王佳莹¹HU Peng¹, ZENG Wei^{1,2*}, XIONG Jinlian³, LIU Xing¹, LI Guangyao¹, WANG Jiaying¹

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

2. 吉林大学, 吉林 长春 130061;

3. 国家海洋信息中心, 天津 300171

1. Tianjin Geological Survey Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

2. Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China;

3. National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China

摘要: 秦岭造山带地处华北板块与扬子板块结合带, 经历了复杂的构造演化过程, 其板块拼合机制及碰撞时限一直备受争议。通过对北秦岭五朵山黑云母二长花岗岩进行年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素组成研究, 以期对北秦岭早古生代构造演化进行约束。五朵山岩体至少存在 2 期侵入, 分别为 431 Ma 和 417 Ma。岩石具有高硅 ($\text{SiO}_2 = 71.16\% \sim 74.22\%$), 富碱富钾 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.16\% \sim 8.88\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.69 \sim 2.34$), 过铝质 ($\text{A}/\text{CNK} = 1.01 \sim 1.19$) 等特征。岩石稀土元素总量总体偏低, 轻、重稀土元素分异较强, 呈右倾配分模式, 具轻微的负 Eu 异常。富集大离子亲石元素 Rb、Th、U, 亏损高场强元素 (Nb、Ta、Zr) 及 Ba、Sr, 在岩石类型上属于 I-S 过渡型花岗岩类。五朵山花岗岩具有相对低的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值 (0.70581~0.71093), $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -6.48~-3.18, 对应的 Nd 的二阶段模式年龄为 1.42~1.69 Ga; 绝大多数测点具负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-6.9~-0.1), $t_{\text{DM2}} = 1.50 \sim 2.34$ Ga。同位素特征指示这些花岗岩为古—中元古代地壳物质部分熔融的产物。五朵山花岗岩的形成与二郎坪岛弧与北秦岭微陆块碰撞作用关系密切, 属同碰撞—后碰撞型花岗岩, 岩浆源区为北秦岭微陆块古老的地壳物质。

关键词: 秦岭造山带; 五朵山岩体; I-S 型花岗岩; 锆石 U-Pb 定年; Sr-Nd-Hf 同位素; 地质调查工程

中图分类号: P588.12⁺; P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)05-0810-14

Hu P, Zeng W, Xiong J L, Liu X, Li G Y, Wang J Y. Genesis of Wuduoshan I-S type granite and the constraints on the Early Paleozoic tectonic evolution of the Northern Qinling: Evidence from zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(5): 810-823

Abstract: The Qinling orogenic belt, located at the junction zone of the North China plate and the Yangtze plate, has experienced a complex tectonic evolution process, and the mechanism of plate assembly and the collisional time are controversial. In this paper, the geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic composition of the Wuduoshan biotite monzogranite in North Qinling studied to constrain the early Paleozoic tectonic evolution of the North Qinling. Two periods of intrusion were identified in Wuduoshan batholith,

收稿日期: 2021-03-23; 修订日期: 2021-09-25

资助项目: 中国地质调查局项目《天山—华北陆块铀钍等矿产资源调查》(编号: DD20190813)、《内蒙古阿拉善—河套地区区域地质调查》(编号: DD20211191)、《华北地区铜铁稀有金属矿产地质调查》(编号: DD20221686) 和《渤海湾盆地氦气资源调查评价》(编号: DD20221668)

作者简介: 胡鹏 (1989-), 男, 硕士, 工程师, 地质学专业, 从事矿产地质调查与研究工作。E-mail: 824901364@qq.com

* 通信作者: 曾威 (1985-), 男, 在读博士生, 高级工程师, 矿床学专业, 从事矿产地质调查与研究工作。E-mail: 314818431@qq.com

which is dating 431 Ma and 417 Ma respectively. The rocks are characterized by high silicon ($\text{SiO}_2 = 71.16\% \sim 74.22\%$), alkali and potassium rich ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.16\% \sim 8.88\%$, $\text{K}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O} = 0.69 \sim 2.34$) and peraluminous ($A / \text{CNK} = 1.01 \sim 1.19$). The total REE content is generally low, and LREE and HREE are strongly fractionated, showing a right dipping distribution pattern and slight negative Eu anomalies. They are characterized by enrichment in large ion lithophile elements (Rb, Th, U), relative depletion in high field strength elements (Nb, Ta, Zr) and Ba and Sr. They belong to "I-S" type granitoids. The Wuduoshan granite has relatively low ($^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$) values ($0.70581 \sim 0.71093$), and negative $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (-6.48 to -3.18), with the corresponding two-stage Nd model age of $1.42 \text{ Ga} \sim 1.69 \text{ Ga}$. Most of zircons have negative $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -6.9 \sim -0.1$), and $t_{\text{DM2}} = 1.50 \sim 2.34 \text{ Ga}$. The isotopic characteristics indicate that the Wuduoshan granite is the product of partial melting of Paleoproterozoic-Mesoproterozoic crustal material. Combined with the tectonic evolution of Qinling orogenic belt, we concluded that the formation of Wuduoshan granite was related to the collision between Erlangping island arc and North Qinling micro-continent and belongs to syn-collisional and post-collisional type granite, and the magma source is the ancient crustal material of North Qinling micro-continent.

Key words: Qinling orogenic belt; Wuduoshan pluton; I-S type granite; zircon U-Pb dating; Sr-Nd-Hf isotopes; geological survey engineering

秦岭造山带位于中国中央造山带中部,是华北与扬子板块汇聚形成的复合造山带,记录了 4 期重要的构造岩浆热事件:新元古代板块间碰撞的对接事件^[1]、早古生代南北秦岭的俯冲碰撞、晚三叠世华南和华北陆块的碰撞造山^[2-4],以及侏罗纪—白垩纪的陆内造山作用^[5]。各期次花岗质岩浆活动都能很好地揭示和反演秦岭造山带的演化和动力学过程,对于阐明秦岭造山带的构造背景、成因机制、发展演化及动力学过程有重大意义。

北秦岭地体是秦岭造山带重要的组成部分,其岩石组成复杂,各类不同时代及性质的地质体拼贴、叠置,构造岩浆热事件频繁且与各类成矿作用密切相关。在北秦岭地区广泛分布的古生代花岗岩,是研究秦岭造山带古生代构造演化和动力学过程的理想载体,前人对北秦岭古生代花岗岩做了大量的研究工作,认为花岗岩的形成与北秦岭地体南北两端早古生代的俯冲碰撞相关^[6-7]。而对北秦岭地体早古生代构造演化存在争议,特别是近期对北秦岭地体中约 500 Ma 金刚石高压-超压榴辉岩的研究,表明约 500 Ma 时已发生陆壳深俯冲^[8]。然而,二郎坪火山岩为一套 475~463 Ma 的细碧角斑岩建造,形成于洋壳俯冲的岛弧或弧后盆地环境^[3-4,9],也导致了早古生代秦岭造山带的构造演化的争议,且对于二郎坪岛弧或弧后盆地碰撞转换的时限研究也相对薄弱。

分布于二郎坪单元的五朵山花岗岩体位于河南省西南部内乡、镇平、南召、卧龙等区县的交界处,出露面积可达 1420 km²,呈岩基产出,为由多种岩性组成的复式侵入体,由寺庄、黄龙庙、四棵树、

牧虎关、石门等岩体组成。岩性复杂,发育大量闪长岩脉和伟晶岩脉,为多期次的岩浆活动形成。主要岩石类型有中细粒黑云母二长花岗岩、中粒黑云母二长花岗岩、中细粒二云母二长花岗岩、斑状黑云母二长花岗岩等。刘丙祥^[7]获得 3 件五朵山岩体黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 448.5~451.5 Ma,李开文等获得南召县五朵山二云母花岗岩 U-Pb 年龄 $433 \pm 2 \text{ Ma}$,认为是 S 型花岗岩,指示陆陆碰撞环境^[10-11]。然而,对其成因机制、来源等缺乏系统性研究,笔者在野外地质研究的基础上,选择河南夏馆—七里坪地区五朵山黑云母二长花岗岩进行地球化学、年代学、同位素等研究,以期对秦岭造山带古生代的构造演化研究提供依据。

1 岩体地质与岩相学特征

北秦岭造山带呈透镜状夹持于秦岭商丹断裂带与洛南-栾川-方城断裂带间的秦岭北部区域,从北到南,主要由宽坪岩群、二郎坪岩群、秦岭岩群、丹凤岩群等组成。其中,秦岭岩群为一套中深变质杂岩系,被认为是北秦岭的基底^[1],主体由片麻岩、角闪岩、大理岩等组成,变质程度普遍表现为角闪岩相、局部为麻粒岩相,形成时代为中—新元古代^[1,12]。二郎坪群分布于秦岭岩群以北,以朱-夏断裂为界与秦岭岩群接壤,主要为一套火山-沉积岩系,化石时代为奥陶纪—志留纪,在豫西西峡—内乡县一带出露较好。本文研究的五朵山黑云母二长花岗岩样品采自河南省内乡县夏馆镇、七里坪乡一带。

五朵山花岗岩体位于北秦岭构造带南缘,侵入

于下古生界二郎坪群中,呈岩基状产出(图 1),发育大量闪长岩脉及岩浆暗色包体(图 2-a)。主要为中细粒-中粒黑云母二长花岗岩单元(图 2-b)、斑状中粒黑云母二长花岗岩单元组成五朵山序列的 2 个单元。中细粒和中粒黑云母二长花岗岩呈环带状分布于五朵山岩体的边部,局部分布于岩体顶部(图 1-b),被位于岩体中部的斑状中粒黑云母二长

花岗岩侵入。未见中细粒黑云母二长花岗岩和中粒黑云母二长花岗岩之间的直接接触关系,二者之间穿插大量伟晶岩脉和闪长岩脉。中细粒-中粒黑云母二长花岗岩具有中粒-中细粒花岗结构,块状构造。主要组成矿物为钾长石(40%~45%)、斜长石(约 25%)、石英(约 25%)和黑云母(5%~10%)。副矿物有磷灰石、锆石、褐帘石、绿帘石和白云母。

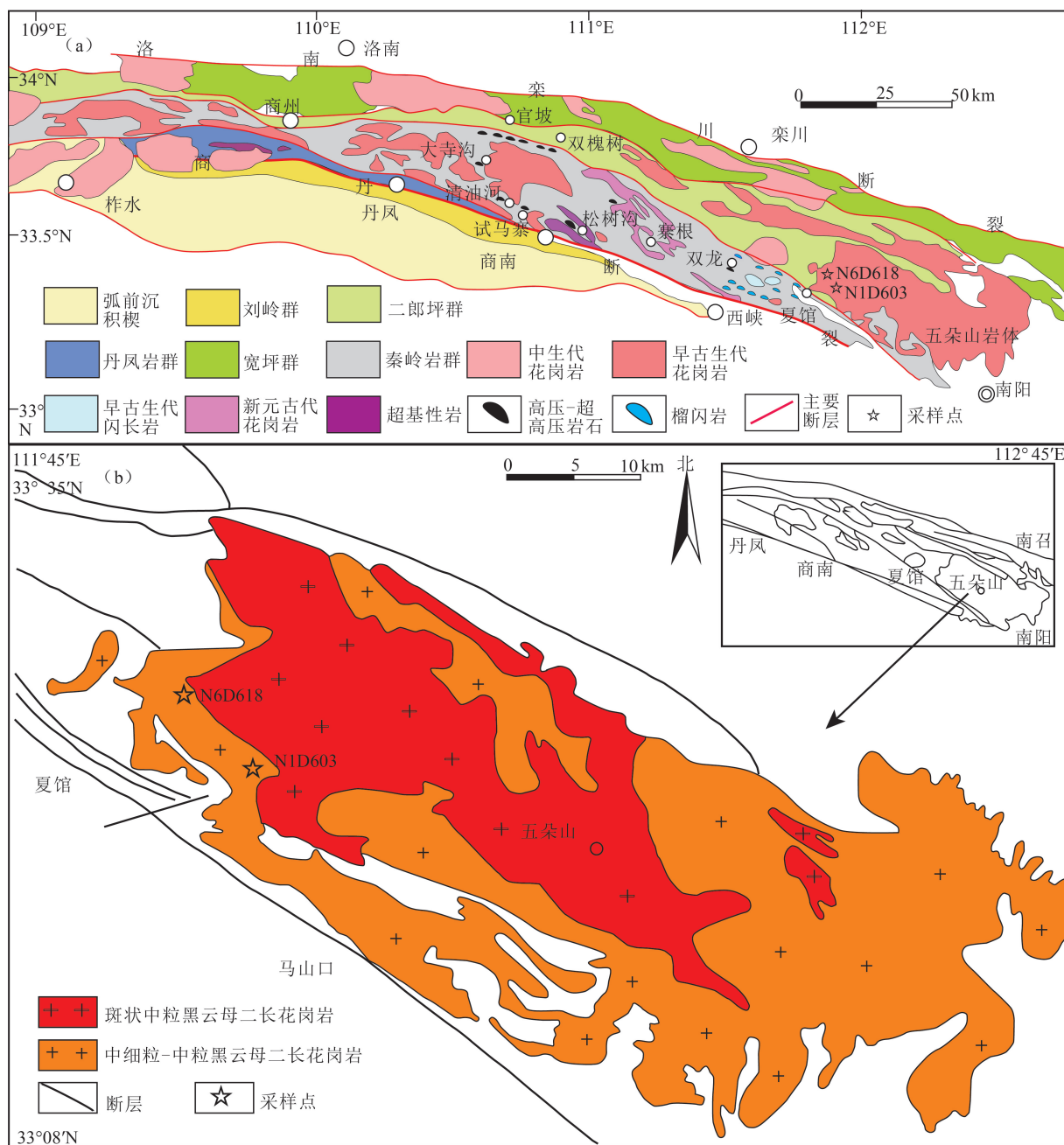


图 1 东秦岭造山带构造简图及花岗岩分布(a)^[13]和五朵山岩体地质简图(b)(据参考文献[11]修改)

Fig. 1 Structural sketch and granite distribution of east Qinling orogenic belt(a), and geological map and sampling locations of the Wuduoshan pluton(b)

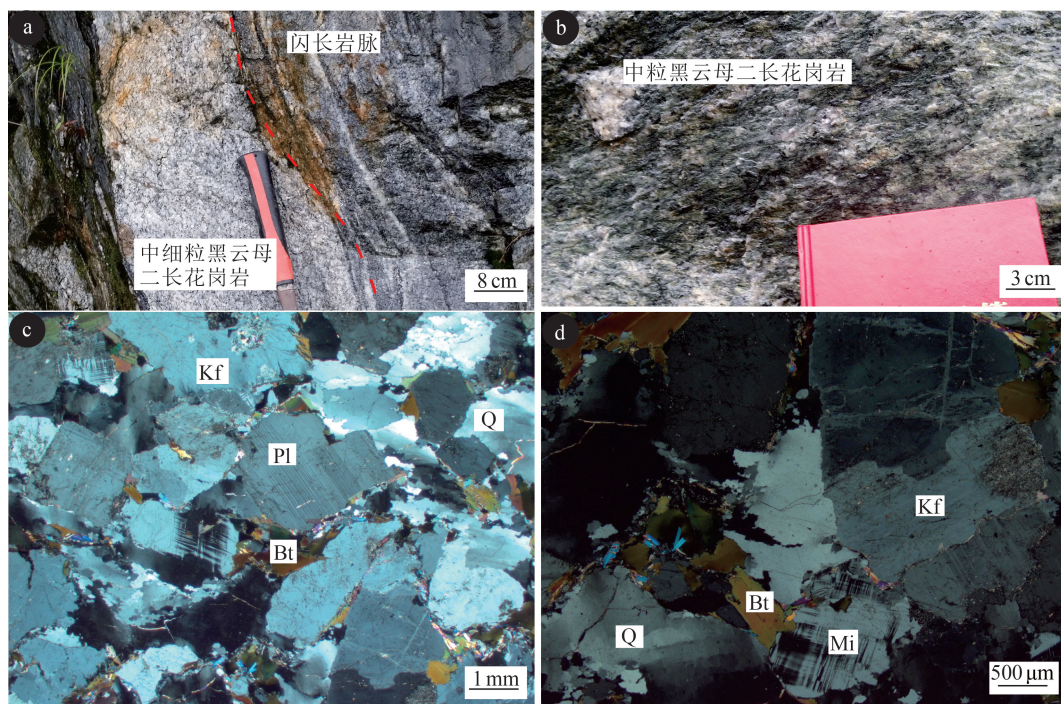


图 2 黑云母二长花岗岩岩相学特征

Fig. 2 Petrographic characteristics of biotite monzogranite

a—中细粒黑云母二长花岗岩被闪长岩脉侵入; b—中粒黑云母二长花岗岩; c—中细粒花岗结构; d—中粒花岗结构

黑云母为黄棕色, 自形—半自形, 部分蚀变为绿泥石或白云母(图 2-c、d)。

2 样品采集和分析方法

在五朵山岩体西部采集 2 件锆石样品。中细粒黑云母二长花岗岩(N1D603)采样坐标: 东经 $111^{\circ}54'52''$ 、北纬 $33^{\circ}22'54''$; 中粒黑云母二长花岗岩(N6D618)采样坐标: 东经 $111^{\circ}53'52''$ 、北纬 $33^{\circ}24'18''$ 。锆石的 U-Pb 年龄, 主量、微量元素及 Sr-Nd-Hf 同位素测试在天津地质调查中心实验室完成。将锆石靶清洗、喷碳并进行阴极发光(CL)和透射光、反射光照相, 然后选点进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素组成分析。阴极发光照相使用扫描电镜(ss550)加载阴极发光仪(monocl4)完成。锆石的 U-Pb 同位素组成分析使用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)完成。利用 193 nm 激光器对锆石进行剥蚀, 激光剥蚀斑束的直径为 $35\ \mu\text{m}$, 激光能量密度为 $13\sim 14\ \text{J}/\text{cm}^2$, 频率为 $8\sim 10\ \text{Hz}$ 。测试中用人工合成的硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化。锆石年龄计算采用标准锆石 GJ-1 为外标校正。利用刘勇胜教授研

发的 ICPMSDataCal 程序^[14]和 Ludwig 研发的 Isoplot 程序进行数据处理^[15], 采用 ^{208}Pb 校正法对普通铅进行校正。原位微区锆石 Lu-Hf 同位素测试使用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)完成。采用单点剥蚀, 激光束斑直径为 $35\ \mu\text{m}$, 剥蚀深度约为 $20\ \mu\text{m}$ 。详细的分析方法见参考文献[16-18]。

选取地表新鲜的岩石样品进行主量、微量元素的测试。将样品研磨至 200 目以下, 先采用熔片法制备成玻璃片, 然后采用 PW4400/40 X 射线荧光光谱仪进行测定; 微量元素(含稀土元素)测试采用 X Series 等离子体质谱仪, 并经 GB/T 14506.28-2010、GB/T 14506.1-2010、GHJZ003-2009、GHJZ002-2009 监控校准。主量、微量元素测量误差小于 $5\%\sim 10\%$ 。Sr、Nd 同位素样品先用混合酸($\text{HF} + \text{HClO}_4$)溶解, 然后在密闭的 Teflon 溶样器中和高温条件下反应半天以上, 通过 IC 流程(Isotope Concentration)得到的 Sr, 再经过二次纯化处理, Nd 的纯化采用 HDEHP 反色层技术。测试仪器型号为 Triton 热电离子质谱计, 全流程空白本底稳定在 $\text{Rb} = 5.6 \times 10^{-10}\ \text{g}$, $\text{Sr} = 3.8 \times 10^{-10}\ \text{g}$, $\text{Sm} = 3.0 \times 10^{-11}\ \text{g}$, $\text{Nd} =$

5.4×10^{-11} g。在样品测试的整个过程中,所测定的 BCR-2 Nd 标样和 NBS-987 Sr 标样的 Nd-Sr 同位素比值分别为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512202 \pm 30$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710245 \pm 30$ 。Sr、Nd 同位素测试数据分别以 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.37521$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 作为内标用指数律进行质量分馏校正。等时线拟合计算采用 Isoplot 标准程序。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

花岗岩锆石均以长柱状为主,长宽比在 1:1~3:1 之间,晶形完整,多发育典型的振荡环带,环带

较窄(图 3),指示其为岩浆锆石^[19-20]。中细粒黑云母二长花岗岩(N1D603)的 16 个数据点中,11 个测点位于谐和线上及其附近,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 433.5 ± 2.4 Ma (MSWD=0.6) (图 3-a),其余 5 个测点谐和度较低,偏离谐和线,可能发生了 ^{204}Pb 的丢失,未参与锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄计算。中粒黑云母二长花岗岩(N6D618)的 29 个数据点中,27 个位于谐和线上及其附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 417 ± 2 Ma (MSWD=1.6) (图 3-b),余下未参与加权平均计算的第 11 号测点谐和度低(75%),第 21 号测点环带清晰,谐和度较高, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 457 ± 4 Ma,代表早

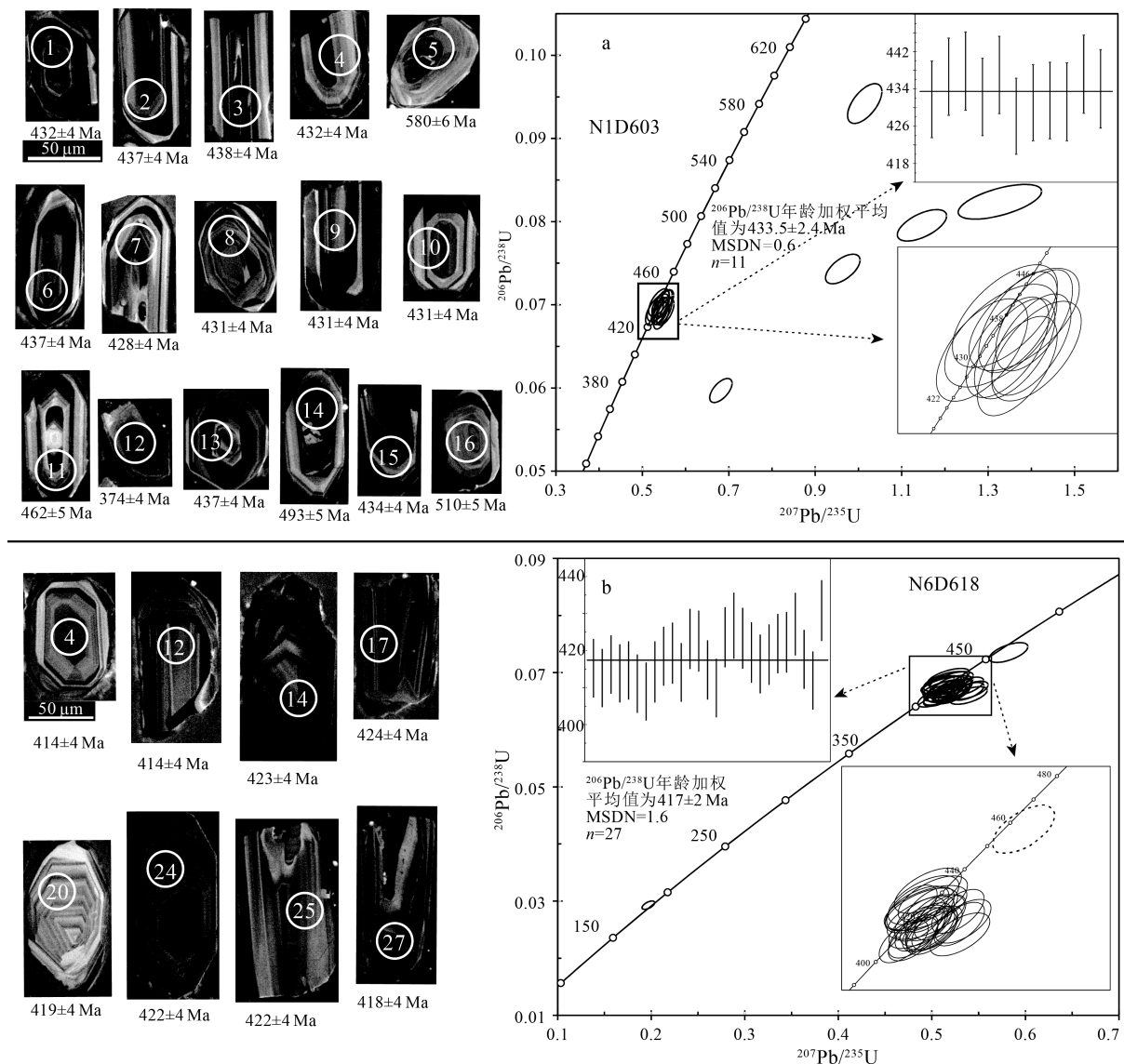


图 3 五朵山花岗岩样品锆石阴极发光 (CL) 图像和 U-Pb 谐和图

Fig. 3 CL image of zircons and the U-Pb zircon concordia diagrams from the Wuduoshan granite

期的岩浆活动。

3.2 地球化学特征

五朵山中粒、中细粒黑云母二长花岗岩形成时代不同,而主量元素地球化学特征总体一致。富硅($\text{SiO}_2 = 71.16\% \sim 74.22\%$),高分异指数($DI = 83.74 \sim 94.51$),富碱更富钾($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.16\% \sim 8.88\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.69 \sim 2.34$, 平均 1.45)(图 4-a),钙、钛、镁含量低,贫磷,相对富铁($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} = 0.94\% \sim 2.26\%$, 平均 1.74%);在 TAS 图解上样品落入花岗岩区; A/CNK 分别为 1.01~1.19,属于过铝质岩石系列(图 4-b),仅 1 个中粒黑云母二长花岗岩样品(Sr_1/N_5)表现出高钾特征。总体上,中粒黑云母二长花岗岩更富钾(图 4-a)。

2 期花岗岩的稀土元素总体特征基本一致(图 5-a),稀土元素总量($98.59 \times 10^{-6} \sim 332.71 \times 10^{-6}$)

总体偏低,轻、重稀土元素分异较强($\text{La}_N/\text{Yb}_N = 16.21 \sim 60.72$)。球粒陨石标准化稀土元素配模式图(图 5-a)上,总体表现为右倾型,除个别点外, $\delta\text{Eu} = 0.69 \sim 1.30$,Eu 异常较小。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5-b)上,表现出富集大离子亲石元素(Rb、Th、U),亏损高场强元素(Nb、Ta、Zr)及 Ba、Sr。样品(Sr_1/N_5)具有明显 Eu 负异常(表 2)。

3.3 全岩 Sr-Nd 同位素和锆石 Lu-Hf 同位素

全岩 Sr-Nd 同位素特征显示,五朵山黑云母二长花岗岩具有相对低的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i值(0.70581~0.71093),以及负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-6.48~-3.18),对应的 Nd 模式年龄为 1.42~1.69 Ga。

锆石原位 Hf 同位素分析结果(表 4)显示,花岗岩的锆石原位 Hf 同位素组成为: ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i =

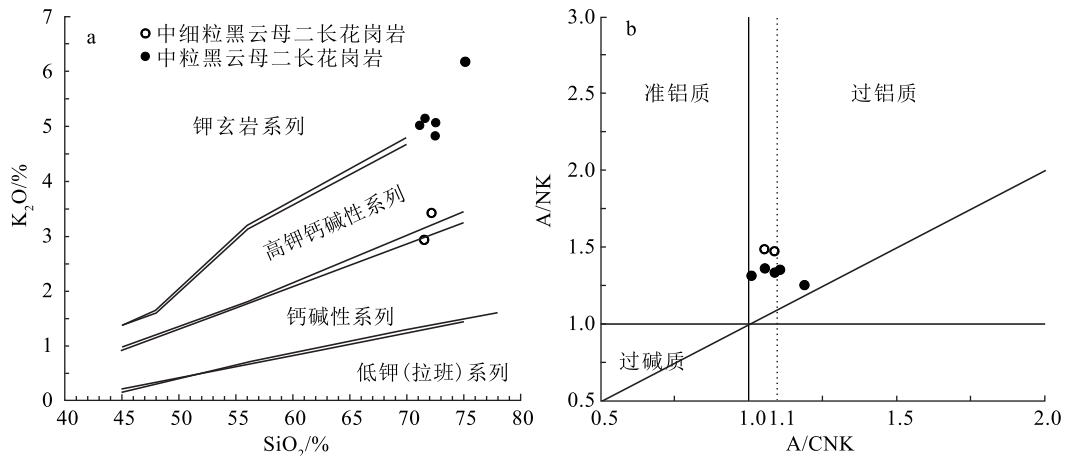


图 4 研究区黑云母花岗岩 SiO_2 - K_2O (a) 和 A/CNK - A/NK 图解(b)

Fig. 4 Plots of SiO_2 vs. K_2O (a) and A/CNK vs. A/NK of biotite granite in the study area(b)

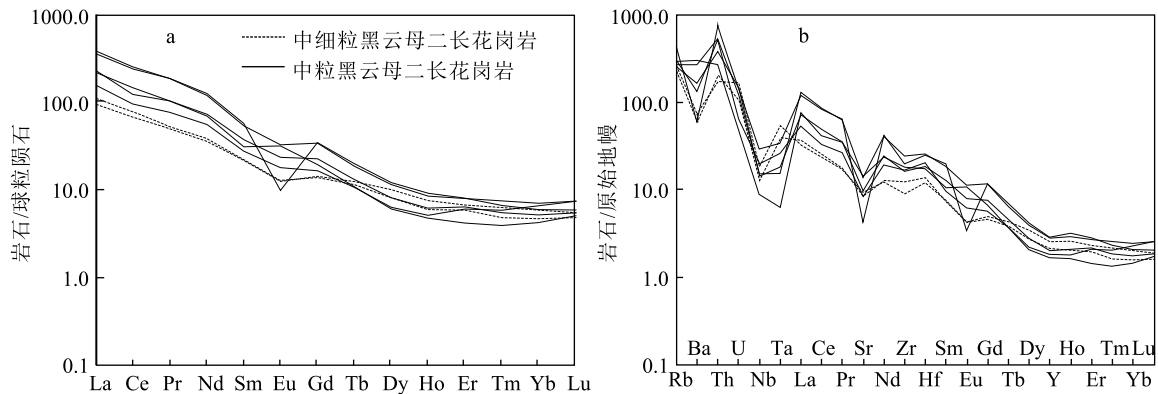


图 5 稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

(标准化值据参考文献[21])

Fig. 5 Chondrite normalized REE distribution patterns(a) and primitive mantle normalized trace element spider diagrams(b)

表 1 五朵山岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results of Wuduoshan granite

测定 点号	含量/ 10^{-6}		同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	U	^{207}Pb	1σ	^{207}Pb	1σ	^{206}Pb	1σ	^{207}Pb	1σ	^{207}Pb	1σ	^{206}Pb	1σ
			$/^{206}\text{Pb}$		$/^{235}\text{U}$		$/^{238}\text{U}$		$/^{206}\text{Pb}$		$/^{235}\text{U}$		$/^{238}\text{U}$	
N1D603(中细粒黑云母二长花岗岩)														
1	171	2426	0.0565	0.0008	0.5398	0.0077	0.0693	0.0007	473	31	438	6	432	4
2	116	1532	0.0564	0.0007	0.5446	0.0073	0.0701	0.0007	467	29	441	6	437	4
3	159	1941	0.0556	0.0009	0.5387	0.0097	0.0703	0.0007	436	37	438	8	438	4
4	153	2278	0.0576	0.0007	0.5507	0.0074	0.0694	0.0007	514	28	445	6	432	4
5	89	905	0.0781	0.0011	1.0146	0.0162	0.0942	0.0010	1150	27	711	11	580	6
6	124	1649	0.0571	0.0007	0.5519	0.0071	0.0701	0.0007	494	28	446	6	437	4
7	80	1087	0.0575	0.0008	0.5443	0.0074	0.0687	0.0007	510	30	441	6	428	4
8	111	1498	0.0580	0.0009	0.5530	0.0083	0.0691	0.0007	530	32	447	7	431	4
9	172	2431	0.0569	0.0008	0.5431	0.0075	0.0692	0.0007	488	29	440	6	431	4
10	50	694	0.0554	0.0008	0.5283	0.0085	0.0692	0.0007	428	33	431	7	431	4
11	78	928	0.0941	0.0015	0.9639	0.0163	0.0743	0.0007	1510	31	685	12	462	5
12	73	1165	0.0828	0.0013	0.6818	0.0106	0.0597	0.0006	1266	31	528	8	374	4
13	85	1173	0.0566	0.0010	0.5474	0.0102	0.0702	0.0007	475	39	443	8	437	4
14	144	1610	0.1046	0.0020	1.1471	0.0233	0.0795	0.0008	1707	35	776	16	493	5
15	77	1073	0.0559	0.0011	0.5368	0.0104	0.0696	0.0007	448	43	436	8	434	4
16	53	535	0.1169	0.0031	1.3274	0.0395	0.0824	0.0009	1909	47	858	26	510	5
N6D618(中粒黑云母二长花岗岩)														
1	30	409	0.0558	0.0009	0.5114	0.0081	0.0665	0.0006	443	34	419	7	415	4
2	112	1693	0.0571	0.0007	0.5204	0.0069	0.0661	0.0006	496	29	425	6	413	4
3	78	1199	0.0562	0.0007	0.5166	0.0071	0.0667	0.0006	459	30	423	6	416	4
4	102	1477	0.0569	0.0008	0.5205	0.0071	0.0663	0.0006	489	30	426	6	414	4
5	193	2858	0.0567	0.0007	0.5192	0.0068	0.0664	0.0006	479	28	425	6	415	4
6	132	2087	0.0560	0.0007	0.5080	0.0068	0.0658	0.0006	451	29	417	6	411	4
7	142	2293	0.0555	0.0007	0.5015	0.0067	0.0655	0.0006	434	29	413	6	409	4
8	98	1314	0.0567	0.0008	0.5192	0.0075	0.0664	0.0007	481	31	425	6	414	4
9	257	3890	0.0554	0.0007	0.5124	0.0069	0.0671	0.0006	429	29	420	6	418	4
10	315	4906	0.0568	0.0007	0.5260	0.0070	0.0672	0.0007	482	29	429	6	419	4
11	165	5692	0.0488	0.0006	0.1970	0.0028	0.0293	0.0003	139	31	183	3	186	2
12	111	1466	0.0560	0.0007	0.5126	0.0069	0.0663	0.0006	454	29	420	6	414	4
13	70	983	0.0546	0.0009	0.5105	0.0087	0.0678	0.0007	395	37	419	7	423	4
14	231	3299	0.0555	0.0007	0.5186	0.0069	0.0677	0.0007	433	29	424	6	423	4
15	312	4906	0.0572	0.0007	0.5239	0.0069	0.0665	0.0006	498	28	428	6	415	4
16	244	3898	0.0561	0.0007	0.5078	0.0068	0.0657	0.0006	457	28	417	6	410	4
17	131	1785	0.0542	0.0007	0.5071	0.0069	0.0679	0.0007	377	30	416	6	424	4
18	51	688	0.0546	0.0009	0.5149	0.0097	0.0684	0.0007	394	38	422	8	427	4
19	31	394	0.0552	0.0012	0.5162	0.0113	0.0679	0.0007	419	47	423	9	423	4
20	41	565	0.0557	0.0010	0.5164	0.0106	0.0672	0.0007	441	42	423	9	419	4
21	64	806	0.0574	0.0008	0.5820	0.0085	0.0735	0.0007	508	30	466	7	457	4
22	168	2638	0.0586	0.0007	0.5388	0.0069	0.0667	0.0006	551	28	438	6	416	4
23	189	2655	0.0561	0.0007	0.5191	0.0067	0.0671	0.0007	456	28	425	5	419	4
24	132	2028	0.0577	0.0008	0.5379	0.0072	0.0676	0.0006	518	29	437	6	422	4
25	47	656	0.0550	0.0010	0.5135	0.0099	0.0677	0.0007	413	42	421	8	422	4
26	103	1409	0.0552	0.0009	0.5211	0.0095	0.0685	0.0007	419	37	426	8	427	4
27	280	3693	0.0587	0.0008	0.5414	0.0076	0.0669	0.0006	555	30	439	6	418	4
28	293	4266	0.0593	0.0009	0.5393	0.0082	0.0660	0.0006	577	32	438	7	412	4
29	85	1248	0.0543	0.0009	0.5178	0.0092	0.0691	0.0007	385	39	424	8	431	4

表 2 五朵山黑云母花岗岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Major, trace and rare earth elements compositions for Wuduoshan biotite granite

送样号	Sr ₁ /N ₁	XWG302/27-1	Sr ₁ /N ₅	Sr ₂ /N ₅	Sr ₃ /N ₅	Sr ₁ /N ₆	Sr ₂ /N ₆
岩性区分	中细粒	中细粒	中粒	中粒	中粒	中粒	中粒
SiO ₂	71.55	72.11	74.22	72.52	71.62	72.56	71.16
TiO ₂	0.31	0.26	0.29	0.24	0.29	0.27	0.41
Al ₂ O ₃	15.05	14.86	13.9	14.2	14.43	14.24	14.46
FeO	1.11	1.2	0.23	0.25	0.25	1.04	0.98
Fe ₂ O ₃	0.69	0.46	0.71	1.52	1.67	0.72	1.28
MnO	0.038	0.04	0.012	0.027	0.029	0.032	0.038
MgO	0.61	0.62	0.19	0.45	0.46	0.44	0.63
CaO	2.29	1.95	0.32	1.28	1.34	1.79	1.69
Na ₂ O	4.23	3.94	2.66	3.21	3.19	3.26	3.16
K ₂ O	2.93	3.47	6.22	4.83	5.15	5.07	5.02
P ₂ O ₅	0.093	0.08	0.05	0.073	0.092	0.075	0.12
烧失量	0.99	0.97	1.16	1.36	1.46	0.72	0.95
Rb	154	176.6	298	200	192	170	175
Ba	419	501	402	924	2170	1160	1900
Th	18.2	15.11	69.4	46.6	23.7	34.4	47.5
U	2.24	3.6	3.3	1.37	1.11	3.2	2.56
Nb	9.1	13.06	21	14.1	6.41	10.2	10.9
Ta	1.66	2.31	1.38	1.07	0.26	0.76	0.63
La	25.8	22.62	85.5	37.4	54.8	52.4	91.6
Ce	46.7	41.45	147	58.7	75.5	90.6	155
Pr	4.91	4.8	17.8	7.35	9.93	10.1	17.7
Sr	179	196	85.6	171	300	206	289
Nd	17.5	16.84	58.8	26.2	33	34.6	56.6
Zr	139	101.2	220	187	207	186	273
Hf	4.37	3.8	7.77	6.39	5.55	5.88	8.08
Sm	3.26	3.35	8.86	4.29	4.79	5.81	8.28
Eu	0.72	0.72	0.56	1.04	1.87	1.36	1.9
Gd	2.78	2.97	7.16	3.4	4.03	4.66	7.06
Tb	0.42	0.47	0.75	0.4	0.4	0.5	0.7
Dy	2.02	2.55	3.08	1.61	1.55	2.09	2.91
Y	9.7	11.61	13	8.25	7.63	9.34	12.7
Ho	0.33	0.43	0.52	0.29	0.27	0.35	0.48
Er	0.95	1.11	1.35	1	0.7	1.06	1.3
Tm	0.12	0.16	0.17	0.15	0.1	0.14	0.19
Yb	0.78	1	1.01	1.11	0.72	0.88	1.2
Lu	0.12	0.14	0.15	0.19	0.13	0.14	0.19
A/CNK	1.05	1.08	1.19	1.11	1.09	1.01	1.06
ΣREE	106.41	98.59	332.71	143.13	187.79	204.69	345.11
LREE	98.89	89.76	318.52	134.98	179.89	194.87	331.08
HREE	7.52	8.83	14.19	8.15	7.9	9.82	14.03
LREE/HREE	13.15	10.17	22.45	16.56	22.77	19.84	23.6
La _N /Yb _N	23.73	16.21	60.72	24.17	54.59	42.71	54.75
δEu	0.73	0.69	0.21	0.83	1.3	0.8	0.76
δCe	1.02	0.98	0.92	0.87	0.79	0.97	0.94

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

表 3 五朵山花岗岩全岩 Sr-Nd 同位素数据
Table 3 Sr-Nd isotopic data of the Wuduoshan granite

样品号	Rb/ 10^{-6}	Sr/ 10^{-6}	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Sm/ 10^{-6}
Sr1/N1	154	179	2.4932	0.72389	0.70908	3.26
Sr1/N5	298	85.6	10.13515	0.77112	0.71093	8.86
Sr2/N5	200	171	3.39008	0.72594	0.70581	4.29
Sr3/N5	192	300	1.85343	0.71697	0.70596	4.79
Sr1/N6	170	206	2.39107	0.72205	0.70785	5.81
Sr2/N6	175	289	1.75358	0.71677	0.70635	8.28
样品号	Nd/ 10^{-6}	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM1}/Ga	t_{DM2}/Ga
Sr1/N1	17.5	0.10469	0.51216	-4.37	1.38	1.52
Sr1/N5	58.8	0.10469	0.51206	-6.48	1.53	1.69
Sr2/N5	26.2	0.10469	0.51217	-4.19	1.37	1.5
Sr3/N5	33	0.10469	0.51222	-3.18	1.3	1.42
Sr1/N6	34.6	0.10469	0.51216	-4.53	1.39	1.53
Sr2/N6	56.6	0.10469	0.51217	-4.27	1.37	1.51

0.282350~0.282730, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -6.9 \sim +3.6$, 主要分布于 -5~1 之间, 相应的 Hf 同位素二阶段模式年龄 t_{DM2} 变化于 1.50~2.34 Ga 之间, 大部分集中在 1.8~2.2 Ga 之间。

4 讨 论

4.1 岩石成因

五朵山黑云母二长花岗岩具有高硅、高碱且相对富钾等特征, A/CNK 值为 1.01~1.19, CIPW 标准矿物计算有刚玉出现, 属于过铝质岩石系列, Eu 异常整体不明显。岩体中未见基性岩捕虏体或捕虏晶, 且 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值大于 0.705。实际上, 从主量、微量地球化学数据看, 五朵山黑云母二长花岗岩为壳源花岗岩, 证据如下: 微量元素原始地幔标准化蛛网图显示富集 Rb、Th、U、Nd 等, 亏损 Ba、Nb、Ta、Sr 等; Rb/Sr 值为 0.61~3.48, 平均值为 1.21, 明显高于中国东部上地壳平均值 (0.31)^[22] 和全球上地壳平均值 (0.32)^[23]; Nb/Ta 值为 5.48~24.65, 平均值为 13.56, 接近平均地壳值 (12~13); Rb/Nb 值为 13.52~29.95, 高于全球上地壳 Rb/Nb 值 (4.5)^[24]; Ba 含量 ($402 \times 10^{-6} \sim 2170 \times 10^{-6}$) 明显高于大陆地壳岩石的 Ba 含量 (390×10^{-6}), Sr ($85.6.7 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$) 含量比地壳 (325×10^{-6}) 含量低; 在 Rb/Sr-Rb/Ba 图解 (图 6-a) 中, 样品点落入杂砂岩、页岩和泥质岩区域。综合以上证据, 笔者认为, 五朵山黑

云母花岗岩具有过铝质 S 型花岗岩特征。

然而, 五朵山黑云母二长花岗岩 P_2O_5 含量很低 (0.05%~0.12%), 在 SiO_2 - P_2O_5 、Rb-Th 和 Rb-Y 图解 (图 7) 上, 花岗岩样品表现出与 I 型花岗岩相似的演化趋势, 显示出 I 型花岗岩的部分特征。在 AFC 图解 (图 6-b) 上, 样品点落在 S 型花岗岩区域, 以及在 S 型与 I 型花岗岩交界附近。因此笔者认为, 五朵山黑云母二长花岗岩在岩石成因上属于过铝质 S 型花岗岩, 兼具 I 型花岗岩的部分特征, 认为五朵山黑云母二长花岗岩为 I-S 过渡型花岗岩。

除 1 个样品外, 所测样品具有较高的 Sr/Y 值 (18.45~39.32), 所有样品均具高的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值 (23.73~60.72), Y 和 Yb 含量较低 (分别为 $7.63 \times 10^{-6} \sim 13 \times 10^{-6}$ 和 $0.72 \times 10^{-6} \sim 1.2 \times 10^{-6}$), 除个别样品 (Sr_1/N_5) 外, Eu 异常整体不明显 (样品 Sr_1/N_5 的钾含量很高, 明显的负 Eu 异常, 可能因为局部钾长石含量明显高于斜长石, 属于岩浆分异常见现象)。以上地球化学特征指示, 其源区不存在 (或少量存在) 斜长石残留, 岩浆形成深度较深, 为加厚下地壳部分熔融的产物^[27]。五朵山黑云母花岗岩具有相对低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值, 负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 相应的 Nd 同位素二阶段模式年龄为 1.42~1.69 Ga, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 与 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 之间呈弱的负相关性。绝大部分 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为较大的负值, 个别点为较小的正值, Hf 同位素二阶

表 4 五朵山花岗岩锆石原位 Hf 同位素数据
Table 4 In-situ Hf isotopic data for zircons of the Wuduoshan granite

样品	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2s	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$	T_{DM}/Ma	T_{DMC}/Ma
N1D603(中细粒黑云母二长花岗岩)									
603-1	433	0.0259	0.0009	0.282522	0.000017	0.4	-0.97	1032	1788
603-2	433	0.0310	0.0008	0.282410	0.000019	-3.5	-0.98	1185	2140
603-3	433	0.0334	0.0010	0.282558	0.000020	1.7	-0.97	984	1676
603-4	433	0.0236	0.0006	0.282413	0.000019	-3.4	-0.98	1175	2126
603-5	433	0.0175	0.0005	0.282451	0.000018	-2.0	-0.99	1117	2002
603-6	433	0.0225	0.0007	0.282483	0.000015	-0.9	-0.98	1079	1906
603-7	433	0.0293	0.0008	0.282507	0.000019	-0.1	-0.98	1048	1832
603-8	433	0.0189	0.0005	0.282430	0.000019	-2.7	-0.99	1147	2069
603-9	433	0.0326	0.0010	0.282537	0.000013	0.9	-0.97	1012	1742
603-10	433	0.0164	0.0004	0.282387	0.000020	-4.2	-0.99	1205	2205
603-11	433	0.0265	0.0008	0.282538	0.000016	1.0	-0.98	1006	1735
603-12	433	0.0262	0.0007	0.282446	0.000018	-2.2	-0.98	1132	2024
603-13	433	0.0448	0.0012	0.282477	0.000020	-1.3	-0.96	1104	1940
603-14	433	0.0228	0.0007	0.282610	0.000015	3.6	-0.98	903	1504
603-15	433	0.0292	0.0008	0.282453	0.000019	-2.0	-0.98	1123	2002
603-16	433	0.0221	0.0006	0.282388	0.000018	-4.2	-0.98	1208	2204
603-17	433	0.0171	0.0006	0.282568	0.000016	2.1	-0.98	958	1634
N6D618(中粒黑云母二长花岗岩)									
618-1	417	0.0175	0.0005	0.282356	0.000016	-5.7	-0.99	1250	2328
618-2	417	0.0168	0.0005	0.282499	0.000017	-0.6	-0.98	1053	1872
618-3	417	0.0109	0.0003	0.282423	0.000017	-3.3	-0.99	1152	2109
618-4	417	0.0191	0.0005	0.282379	0.000015	-4.9	-0.99	1218	2252
618-5	417	0.0336	0.0009	0.282430	0.000017	-3.2	-0.97	1159	2099
618-6	417	0.0141	0.0004	0.282376	0.000021	-5.0	-0.99	1220	2260
618-7	417	0.0141	0.0003	0.282491	0.000016	-0.9	-0.99	1059	1894
618-8	417	0.0262	0.0007	0.282363	0.000019	-5.5	-0.98	1246	2307
618-10	417	0.0209	0.0006	0.282457	0.000016	-2.1	-0.98	1111	2005
618-11	417	0.0237	0.0006	0.282465	0.000016	-1.9	-0.98	1104	1984
618-12	417	0.0313	0.0008	0.282416	0.000019	-3.6	-0.98	1177	2142
618-13	417	0.0285	0.0008	0.282373	0.000018	-5.2	-0.98	1235	2278
618-14	417	0.0486	0.0014	0.282605	0.000021	2.9	-0.96	926	1555
618-15	417	0.0310	0.0008	0.282532	0.000016	0.5	-0.98	1014	1774
618-16	417	0.0294	0.0008	0.282480	0.000018	-1.4	-0.98	1088	1940
618-17	417	0.0257	0.0007	0.282441	0.000019	-2.7	-0.98	1137	2059
618-18	417	0.0207	0.0006	0.282462	0.000022	-2.0	-0.98	1106	1991
618-19	417	0.0154	0.0004	0.282520	0.000018	0.1	-0.99	1022	1804
618-20	417	0.0110	0.0003	0.282350	0.000017	-5.8	-0.99	1251	2337

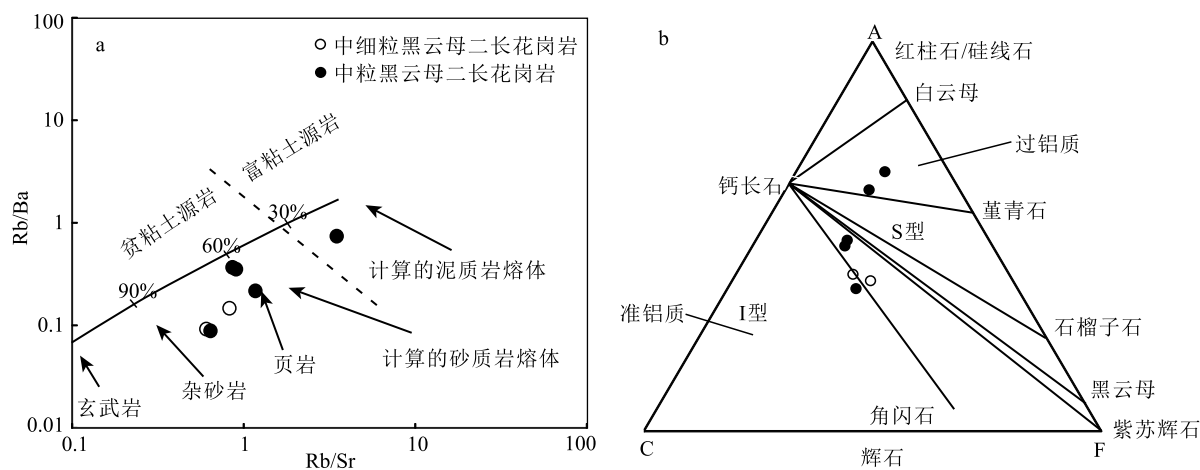
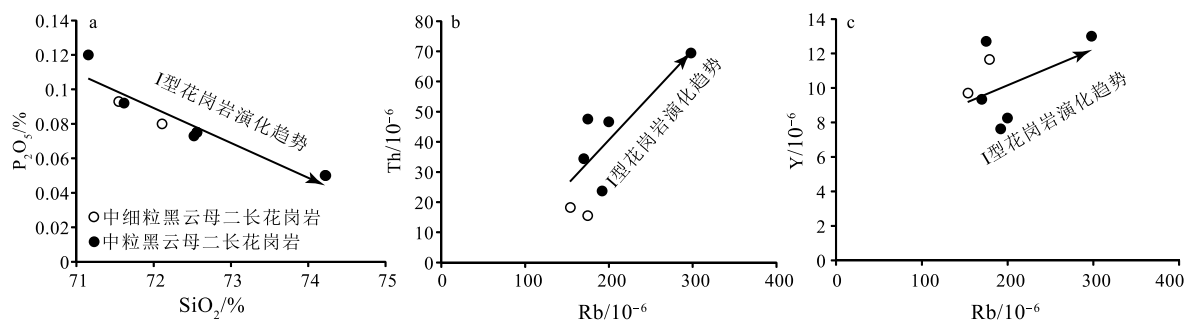
图 6 Rb/Sr-Rb/Ba^[25] (a) 和 A (Al-Na-K)-C (Ca)-F (Mg+Fe²⁺) (b) 图解^[26]

Fig. 6 Rb/Sr-Rb/Ba (a) and A-C-F (b) diagrams

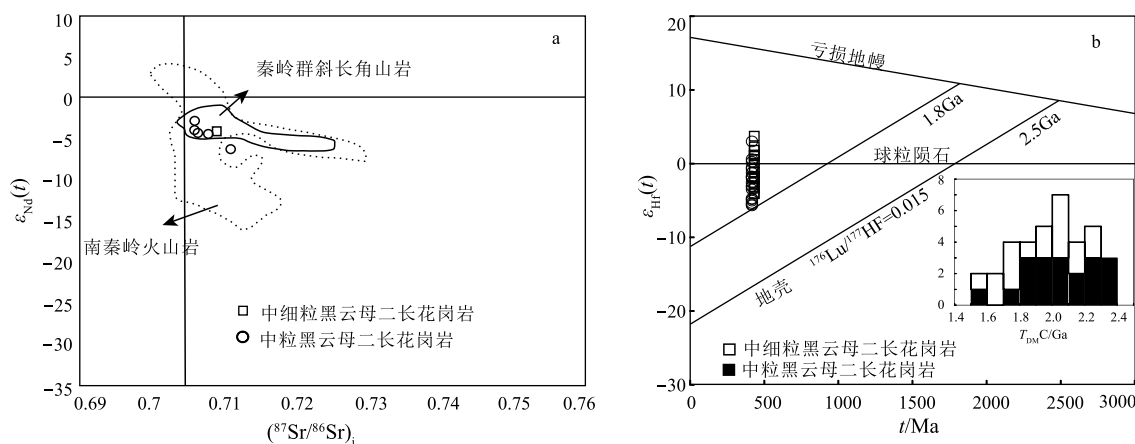
图 7 SiO₂-P₂O₅ (a)、Rb-Th (b) 和 Rb-Y (c) 图解Fig. 7 P₂O₅ vs. SiO₂ (a), Rb vs. Th (b) and Y vs. Rb (c) diagrams

段模式年龄为 1.50~2.34 Ga。其 Sr、Nd 同位素特征明显不同于二郎坪岛弧火山岩和侵入岩,它们具正的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值^[28-29],说明五朵山岩体的源区不是二郎坪岛弧火山岩和侵入岩。据古—中元古代的 Nd 和 Hf 二阶段模式年龄,指示其来源于古老的下地壳源区。北秦岭和南秦岭微陆块均存在古—中元古代的古老地壳^[7, 30-33],在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 图解 (图 8-a) 上,样品点落入秦岭群斜长角闪岩和南秦岭火山岩区域。但五朵山花岗岩体富集放射成因铅^[30-31],在晚古生代以前,南秦岭和北秦岭花岗岩类的长石铅同位素组成存在明显的差异,北秦岭富放射成因铅,而南秦岭贫放射成因铅,所以五朵山黑云母花岗岩的源区物质应为北秦岭微陆块的下地壳物质。

4.2 构造意义

北秦岭早古生代花岗岩与早古生代的构造演

化密切相关。对于北秦岭早古生代的构造演化及各阶段花岗岩形成的构造背景,前人进行了较多的讨论^[39-40]。张成立等^[41]认为,北秦岭早古生代花岗岩形成于陆壳的深俯冲和碰撞后环境;王涛等^[6]提出早古生代花岗岩记录了北秦岭南北 2 个洋盆从俯冲到碰撞的全过程,并将构造岩浆演化划分为 505~470 Ma 的陆缘俯冲阶段、450~422 Ma 的块体碰撞阶段及 415~400 Ma 的碰撞晚期阶段,并认为 450~422 Ma 块体碰撞阶段主要岩石类型为 I 型花岗岩类;秦拯伟^[42]通过对灰池子岩体和漂池岩体的研究认为,北秦岭早古生代花岗岩形成于商丹洋向北秦岭地体的持续俯冲及板块回撤作用。北秦岭早古生代五朵山黑云母二长花岗岩样品在 R_1 - R_2 判别图解 (图 9-a) 中^[43],主要落入同碰撞花岗岩区和晚造山期花岗岩区;在花岗岩 Rb - (Y + Nb) 判别图解 (图 9-b) 中^[44],多数点落入火山弧花岗岩与同碰撞

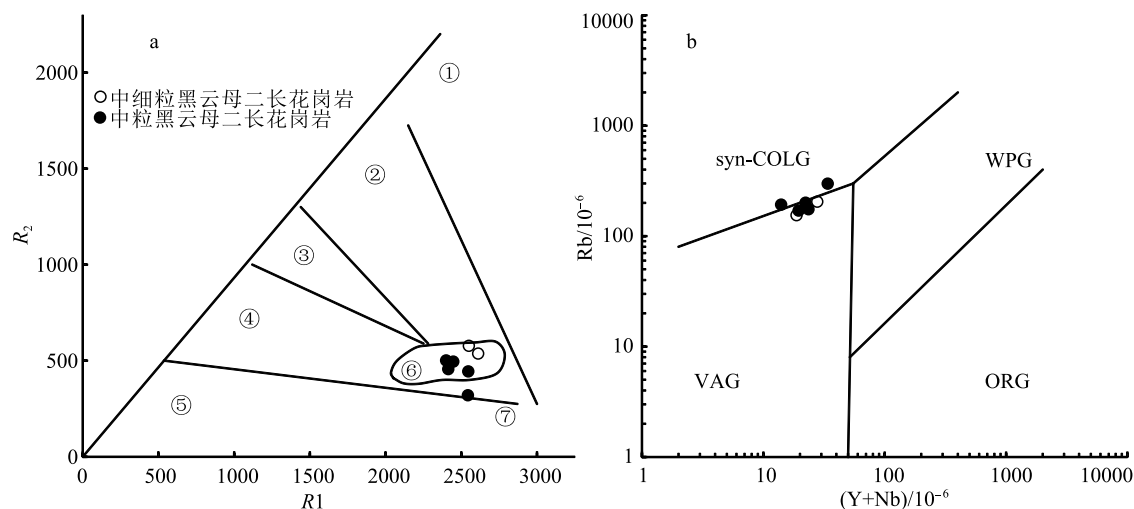
图 8 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i - \epsilon_{Nd}(t)$ (a) 和 $t - \epsilon_{Hf}(t)$ 图解 (b)

(秦岭群斜长角闪岩数据参考文献[33]; 南秦岭火山岩数据参考文献[34-38])

Fig. 8 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ vs. $\epsilon_{Nd}(t)$ (a) and $\epsilon_{Hf}(t)$ vs. t (b) diagrams

花岗岩的界线附近。花岗岩同位素和微量元素分析表明,其源区主要来源于加厚的古老下地壳部分熔融。综上所述,五朵山黑云母二长花岗岩形成于同碰撞的构造环境。对北秦岭微陆块上面状分布的榴辉岩研究,确定榴辉岩的形成时代为 500~490 Ma,且具有南秦岭新元古代基性火山岩的地球化学特征^[45-47]。表明晚寒武世时,南秦岭微陆块向北深俯冲到北秦岭之下,二者之间的洋盆已经闭合,这与商丹蛇绿岩和岛弧火山岩早中寒武世的年龄吻

合^[48]。北秦岭微陆块中 475 Ma 侵位的漂池岩体解释为俯冲板片折返至中下地壳部分熔融形成的 S 型花岗岩^[42]。本文获得五朵山中细粒和中粒黑云母二长花岗岩的年龄分别为 433.5 ± 2.4 Ma 和 417 ± 2 Ma,与北秦岭和南秦岭微陆块碰撞的时间(早于陆壳深俯冲的时间)约有 66 Ma 和 83 Ma 的时间间隔。因此笔者认为,五朵山花岗岩不可能是南北秦岭微陆块碰撞造山的产物。目前获得的二郎坪岛弧火山岩和侵入岩的年龄为 486~458 Ma^[29, 49-50],主

图 9 $R_2 - R_1$ (a) 和 $(Y+Nb) - Rb$ (b) 构造判别图解 (底图 a 据参考文献[49]; b 据参考文献[50])Fig. 9 $R_1 - R_2$ (a) and $(Y+Nb) - Rb$ (b) diagrams

- 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—晚造山期花岗岩; ⑤—非造山区 A 型花岗岩; ⑥—同碰撞花岗岩; ⑦—造山期后 A 型花岗岩;
syn-COLG—同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩

要由拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩,以及侵入其中的闪长岩、英云闪长岩、奥长花岗岩和花岗闪长岩组成,玄武岩的地球化学和同位素特征表明其具洋内弧的特征^[9]。笔者认为,五朵山岩体是二郎坪岛弧与北秦岭微陆块碰撞拼贴的地质响应,岩体的时代限定了弧陆碰撞时间,即早志留世—晚志留世,北秦岭地区处于持续的弧陆碰撞环境。前已述及,二郎坪岛弧火山岩和侵入岩均具正的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值^[28-29],不可能是五朵山岩体的源区,且二郎坪单元中未发现古老的地壳物质,同位素特征表明,五朵山岩体的源区最大可能是北秦岭微陆块的下地壳物质。

5 结 论

(1) 北秦岭五朵山岩体至少存在 2 期岩浆侵入,分别为 433 Ma 和 417 Ma。

(2) 五朵山黑云母二长花岗岩为 I-S 过渡型花岗岩。早志留世—晚志留世北秦岭地区处于持续的弧陆碰撞环境。

(3) 五朵山黑云母二长花岗岩物质来源主要是北秦岭微陆块古老的地壳物质。在弧陆碰撞的过程中,形成了五朵山花岗岩体。

参考文献

- [1] 张国伟,孟庆任,于在平,等.秦岭造山带与大陆动力学[M].北京:科学出版社,2001.
- [2] Dong Y P, Liu X M, Neubauer F, et al. Timing of Paleozoic amalgamation between the North China and South China Blocks: Evidence from detrital zircon U-Pb ages[J]. Tectonophysics, 2013, 586 (26): 173-191.
- [3] Dong Y P, Zhang G W, Hauzenberger C, et al. Palaeozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: Evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks[J]. Lithos, 2011, 122(1/2): 39-56.
- [4] Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41(3): 213-237.
- [5] 王晓霞,王涛,齐秋菊,等.秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义[J].岩石学报,2011,27(6): 1573-1593.
- [6] 王涛,王晓霞,田伟,等.北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示[J].中国科学(D 辑),2009,39(7): 949-971.
- [7] 刘丙祥.北秦岭地体东段岩浆作用与地壳演化[D].中国科学技术大学博士学位论文,2014.
- [8] Wang H, Wu Y B, Gao S, et al. Deep subduction of continental crust in accretionary orogen: Evidence from U-Pb dating on diamond-bearing zircons from the Qinling orogen, central China [J]. Lithos, 2014, 190/191: 420-429.
- [9] 赵姣,陈丹玲,谭清海,等.北秦岭东段二郎坪群火山岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J].地质前缘,2012,19(4): 118-125.
- [10] 李开文,方怀宾,郭君功,等.东秦岭南召县五朵山岩体二云母花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及地质意义[J].地球科学, 2019, 44(1): 123-134.
- [11] 周澍,张贺,陈福坤.北秦岭五朵山花岗岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及成因[J].高校地质学报,2019,25(6): 901-913.
- [12] 赵利刚,李承东,武志宇,等.豫西五里川—寨根一带秦岭岩群碎屑锆石 U-Pb 年龄研究[J].中国地质,2018,45(4): 753-766.
- [13] 翟文建,郭君功,杨俊峰,等.北秦岭双龙—夏馆地区大面积榴闪岩的发现及锆石 U-Pb 年代学研究[J].大地构造与成矿学, 2019, 43(5): 1052-1068.
- [14] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15): 1535-1546.
- [15] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot/EX Version 3.00: A geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003: 1-70.
- [16] 耿建珍,李怀坤,张健,等.锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定[J].地质通报,2011,30(10): 1508-1513.
- [17] 肖志斌,张然,叶丽娟,等.沥青铀矿(GBW04420)的微区原位 U-Pb 定年分析[J].地质调查与研究,2020,43(1): 1-4.
- [18] 李国占,郝爽,王家松,等.浅谈多接收器电感耦合等离子体质谱仪的日常维护[J].地质调查与研究,2019,42(4): 271-277.
- [19] Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143(5): 602-622.
- [20] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism [J]. Chemical Geology, 2002, 184(1): 123-138.
- [21] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [22] Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. Structure and composition of the continental crust in East China [J]. Science in China (Series D), 1999, 43(2): 129-140.
- [23] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. Rev. Geophys., 1995, 33: 241-265.
- [24] Taylor S R, McLennan S M. The continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1985: 1-132.
- [25] White A, Chappell B W. Ultrametamorphism and granitoid genesis[J]. Tectonophysics, 1977, 43(1/2): 7-22.
- [26] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. Lithos, 1998, 45(1): 29-44.
- [27] 张旗,李承东.花岗岩: 地球动力学意义[M].北京:海洋出版社,2012.
- [28] 孙卫东,李曙光,孙勇,等.北秦岭西峡二郎坪群枕状熔岩中一个岩枕的年代学和地球化学研究[J].地质论评,1996, (2): 144-153.

- [29] Wang H, Wu Y B, Gao S, et al. Continental growth through accreted oceanic arc: Zircon Hf-O isotope evidence for granitoids from the Qinling orogen [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 182: 109-130.
- [30] 张宏飞, 张本仁, 赵志丹, 等. 东秦岭造山带花岗岩类长石铅同位素组成及其构造学意义[J]. *地质学报*, 1997, 71(2): 142-149.
- [31] 张宏飞, 张本仁, 赵志丹, 等. 东秦岭商丹构造带陆壳俯冲碰撞——花岗质岩浆源区同位素示踪证据[J]. *中国科学(D 辑)*, 1996, (3): 231-236.
- [32] 杨力, 陈福坤, 杨一增, 等. 丹凤地区秦岭岩群片麻岩锆石 U-Pb 年龄: 北秦岭地体中—新元古代岩浆作用和早古生代变质作用的记录[J]. *岩石学报*, 2010, 26(5): 1589-1603.
- [33] 万渝生, 刘敦一, 董春艳, 等. 西峡北部秦岭群变质沉积岩锆石 SHRIMP 定年: 物源区复杂演化历史和沉积、变质时代确定[J]. *岩石学报*, 2011, 27(4): 1172-1178.
- [34] 张宗清, 刘敦一, 付国民. 北秦岭变质地层同位素年代研究[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [35] Yan Q R, Wang Z Q, Hanson A D, et al. SHRIMP Age and Geochemistry of the Bikou Volcanic Terrane: Implications for Neoproterozoic Tectonics on the Northern Margin of the Yangtze Craton[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(4): 479-490.
- [36] 张宗清, 张国伟, 唐索寒. 南秦岭变质地层同位素年代学[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [37] 杨斌虎, 张成立, 李雷. 东秦岭陡岭杂岩花岗岩的 Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义[J]. *地质通报*, 2011, 30(2/3): 439-447.
- [38] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 碧口群火山岩岩石成因研究[J]. *地学前缘*, 2007, (3): 84-101.
- [39] 曾威, 周红英, 孙丰月, 等. 北秦岭官坡地区稀有金属伟晶岩锡石 U-Pb 年龄[J]. *地质通报*, 2021, 40(12): 2179-2182.
- [40] Wang Y, Shi Y H, Chen B L, et al. Zircon U-Pb age of Fengxian acid pyroclastic rocks and its enlightenment to the existence of Pan-African orogeny in the West Qinling Orogenic Belt, China [J]. *China Geology*, 2019, 4(2): 557-559.
- [41] 张成立, 刘良, 王涛, 等. 北秦岭早古生代大陆碰撞过程中的花岗岩浆作用[J]. *科学通报*, 2013, 58(23): 2323-2329.
- [42] 秦拯伟. 北秦岭造山带早古生代岩浆作用及其大陆地壳演化意义[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2016.
- [43] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America bulletin*, 1989, 101(5): 635-643.
- [44] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. *Chemical Geology*, 1985, 48(1): 43-55.
- [45] 刘良, 廖小莹, 张成立, 等. 北秦岭高压-超高压岩石的多期变质时代及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(5): 1634-1656.
- [46] 陈丹玲, 刘良. 北秦岭榴辉岩及相关岩石年代学的进一步确定及其对板片俯冲属性的约束[J]. *地学前缘*, 2011, 18(2): 158-169.
- [47] 陈丹玲, 刘良, 廖小莹, 等. 北秦岭高压-超高压岩石的时空分布、P-T-t 演化及其形成机制[J]. *地球科学*, 2019, 44(12): 4017-4027.
- [48] Liu L, Liao X M, Wang Y W, et al. 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*, 2016, 159: 58-81.
- [49] 郭彩莲, 陈丹玲, 樊伟, 等. 豫西二郎坪满子营花岗岩体地球化学及年代学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(1): 15-22.
- [50] 雷敏. 秦岭造山带东部花岗岩成因及其与造山带构造演化的关系[D]. 中国地质科学院博士学位论文, 2010.