

西秦岭中生代花岗岩锆石U-Pb-Lu-Hf 同位素特征及地质意义

刘巍¹ 郭丽爽² 廖延福³ 赵永红¹ 刘玉琳^{1,4,†} 肖彦君¹

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国地震局地壳应力研究所地壳动力学重点实验室, 北京 100085;
3. 陕西天地矿业有限公司, 西安 710068; 4. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871;

† 通信作者, E-mail: ylliu@pku.edu.cn

摘要 对西秦岭地区中川岩体、柏家庄岩体和教场坝花岗岩体进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学分析, 获得其岩浆侵位年龄分别为 220 ± 1 , 216 ± 6 和 222 ± 3 Ma, 表明 3 个岩体均形成于中-晚三叠世。样品的全岩地球化学分析结果表明, 3 个岩体具有相似的稀土及微量元素特征, 均表现为显著亏损高场强元素 Nb, Ti 和 P 等, 具有明显的右倾式球粒陨石标准化稀土元素配分模式。锆石 Lu-Hf 同位素分析结果表明, 3 个岩体锆石测年样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-3.31\sim+1.68$ 之间, 二阶段模式年龄介于 1151~1456 Ma 之间。岩石成因分析表明, 这些印支期花岗岩体的母岩浆主要来源于新元古代地壳物质的部分熔融。结合岩体形成时代、岩石成因和区域岩浆作用, 认为这些岩体形成于南秦岭与华南海域板块沿勉略缝合带相碰撞的造山动力学背景, 可能与华南海域板块的俯冲板片断离有关。

关键词 西秦岭; 花岗岩体; 锆石 U-Pb-Lu-Hf 同位素; 全岩地球化学; 岩石成因

Zircon U-Pb-Lu-Hf Isotopic Characteristics and Geological Implications of Mesozoic Granites in Western Qinling

LIU Wei¹, GUO Lishuang², LIAO Yanfu³, ZHAO Yonghong¹, LIU Yulin^{1,4,†}, XIAO Yanjun¹

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. Key Laboratory of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085; 3. Shaanxi Tiandi Geology Co. Ltd, Xi'an 710068; 4. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: ylliu@pku.edu.cn

Abstract LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses reveal that the granitoid intrusions of Zhongchuan, Baijiazhuang and Jiaochangba in Western Qinling orogeny emplaced at ages of 220 ± 1 , 216 ± 6 and 222 ± 3 Ma, respectively, showing that all of them belongs to Middle-Late Triassic granitoid magmatism. Whole rock geochemistry analyses indicate that the primitive mantle-normalized trace element patterns and Chondrite-normalized REE patterns of the rock samples from the three intrusions show significant similarity, for example, depletion in high field strength elements of Nb, Ti and P, and enrichment in LREE. Analyses for zircon Lu-Hf isotopes indicate that the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values range from -3.31 to $+1.68$ of the three intrusions with the two-stage model ages between 1151 and 1456 Ma. Petrogenetic studies indicate that the granitoid magmas of these Indosinian granitoid intrusions were derived mainly from the partial melting of mesoproterozoic crust material. Combined with the formation age, petrogenesis and tectonic background, these Indosinian intrusions were most likely formed in the collision process between South Qinling orogen and South China Block along Mianlue suture zone, and might be related to the subducted slab break off of South China Block.

Key words Western Qinling; granitoid intrusions; zircon U-Pb-Lu-Hf isotopes; whole rock geochemistry; petrogenesis

秦岭造山带位于中国中央造山带的中段,是华南与华北两大板块的结合带,自新元古代以来经历多期次的造山运动,保存了新元古代、古生代和中生代丰富的岩浆作用记录^[1]。

西秦岭造山带早中生代柏家庄、中川、闫井、碌础坝和教场坝5个花岗岩体统称为西秦岭二长花岗岩岩体群,其周边分布众多金矿和多金属矿床,使得该岩体群受到众多学者的关注。对于该二长花岗岩群所处的南秦岭构造带在早中生代所处的构造背景,一直存在较大的争议。学者们常以某些侵入体作为研究对象来探讨其动力学背景,导致对华南板块与南秦岭构造带之间碰撞作用的起止时间也存在较大的分歧^[2-3]。

前人对该岩体群的成因机制及其与成矿作用的关系开展了一些研究工作^[4-15],但关于岩体的形成时代和岩石成因仍有较大分歧。用不同方法测定的成岩年龄跨度很大,中川岩体为182~264 Ma^[4-10],柏家庄岩体为196~216 Ma^[8,11],教场坝岩体为201~208 Ma^[8,12],闫井岩体为179~218 Ma^[8,11],碌础坝岩体为185~209 Ma^[8]。岩石成因方面,李永军等^[13]通过对柏家庄、中川和碌础坝岩体的化学成分和稀土配分特征的研究,认为这3个岩体的花岗质岩浆起源于不同源区,但并未对岩浆源区给予明确的说明。许亚玲等^[14]通过分析稀土元素配分模式、区域构造控制和岩体群侵位的方式,认为5个岩体为印支运动导致深部地壳部分熔融,中酸性岩浆多次

侵入形成的同源岩体群。彭璇^[15]对5个岩体进行多个成岩期次的划分,对比各期次的成岩时间,结合岩相学和岩石学特征,推断西秦岭二长花岗岩群可能为泥质岩部分熔融形成的同源岩体群。

本文针对柏家庄岩体、中川岩体和教场坝岩体,进行锆石LA-ICP-MS U-Pb年代学、锆石Lu-Hf同位素和全岩地球化学分析,旨在限定这些岩体的形成时代、岩浆来源和动力学背景,并探讨各岩体之间的成因联系。

1 区域地质概况

秦岭造山带位于华北板块与华南板块之间,绵延1500 km。该地区在古生代和中生代分别经历商丹洋和勉略洋的大洋俯冲过程,在商丹洋和勉略洋分别闭合之后,相邻区域的板块沿着缝合带发生块体之间的相互碰撞。多数研究者认为可以将秦岭造山带划分为以洛南-栾川断裂、商丹缝合带和勉略缝合带为界的华北板块南缘、北秦岭构造带、南秦岭构造带和华南板块北缘4个区域块体^[1,16-17]。本文研究区位于南秦岭构造带的西部(图1),是秦岭早中生代岩浆作用非常强烈的区域,所研究的3个岩体是西秦岭二长花岗岩岩体群的一部分。

3个花岗岩体基本情况如下:中川岩体以黑云母二长花岗岩为主,侵入于泥盆系大草滩组和下石炭统巴都组,出露面积约为210 km²;柏家庄岩体位于西秦岭二长花岗岩岩群中央,以二长花岗岩为主,

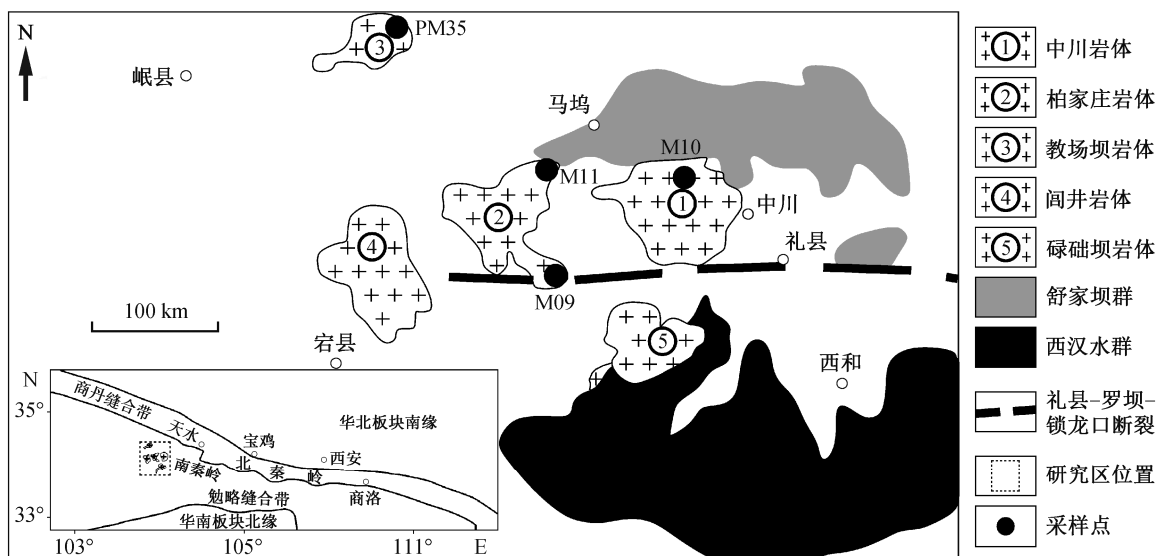


图1 西秦岭花岗岩体分布简图及采样点位置(据文献[15-16]修改)

Fig. 1 Distribution of granitoid intrusions in Western Qinling and sampling locations (modified from Ref. [15-16])

侵入地层为下石炭统巴都组, 出露面积约为 150 km²; 教场坝岩体以黑云母二长花岗岩为主, 边部为花岗闪长岩, 侵入于二叠纪下统十里墩组和中统大关山组, 出露面积约为 120 km²[15]。围绕中川岩体分布着金山、鹿儿坝、李坝、锁龙、马泉、马坞和寨上等大型金矿床, 成矿时代为 162~197 Ma, 中川岩体的侵入为成矿提供巨大而持久的热场[5], 李坝-锁龙口断裂和礼县-洮坪深断裂为成矿热液从地壳深部向上运移提供主要通道[15]。

2 样品采集及描述

本研究对中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体分别进行采样分析。

中川岩体样品 M10 采集于甘肃礼县苗河水库西北约 10 km 处(34°20'18"N, 105°1'10"E), 为黑云母二长花岗岩, 主要矿物为钾长石(20%)、斜长石(35%)、石英(35%)和黑云母(≈10%), 副矿物有磁铁矿、磷灰石和锆石等(图 2(a)和(b))。

柏家庄岩体样品 M09 采集于甘肃礼县老赵沟(34°10'38"N, 104°54'52"E), 为黑云母二长花岗岩, 主要矿物为钾长石(30%)、斜长石(25%)、石英

(35%)和黑云母(≈10%), 副矿物有磁铁矿和锆石等。

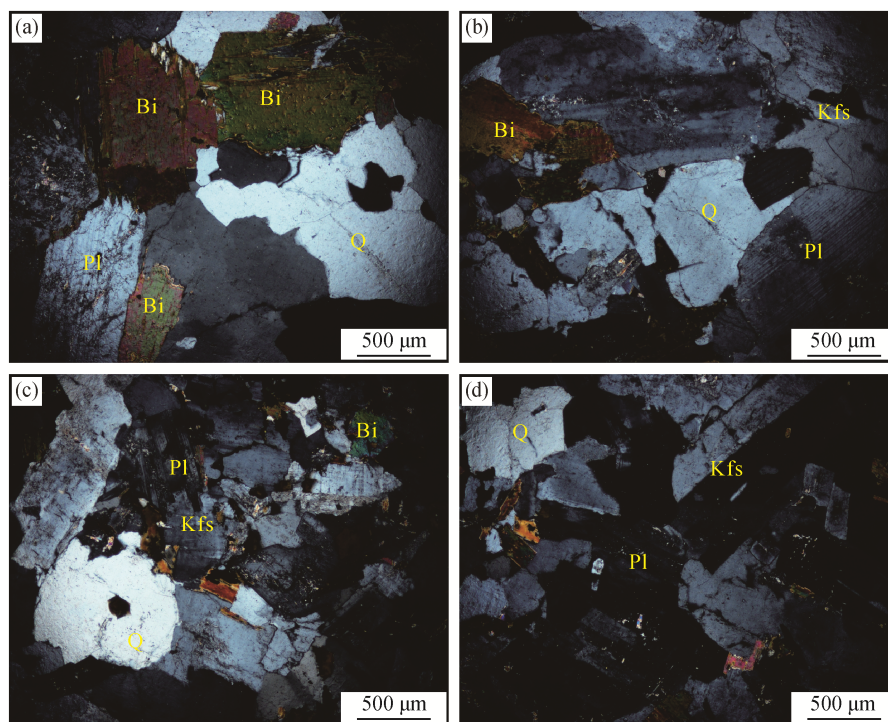
柏家庄岩体样品 M11 采集于甘肃岷县陈氏家安子(34°24'19"N, 104°49'39"E), 为细粒黑云母二长花岗岩, 主要矿物为钾长石(30%)、斜长石(30%)、石英(30%)和黑云母(≈10%), 副矿物有磁铁矿和锆石等(图 2(c)和(d))。

教场坝岩体样品 PM35 采集于甘肃武山县新庄里(34°33'49"N, 104°44'11"E), 为闪长岩, 主要矿物为斜长石(65%)、石英(5%)、角闪石(20%)和黑云母(≈10%), 副矿物有磁铁矿和锆石等。

3 锆石 U-Pb 同位素分析测试方法与年龄结果

用于 U-Pb 年龄测试的锆石分选由廊坊市诚信地质服务有限公司完成。样品经机械粉碎后, 采用常规的重液分离和磁选方法将锆石分离。将显微镜下人工挑选出的锆石用环氧树脂制成样品靶。阴极发光(CL)图像在北京大学电子显微镜室的 Quanta 200FEG 扫描电子显微镜下拍摄。

LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 同位素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室 COMP



(a)和(b) 黑云母花岗闪长岩样品 M10; (c)和(d) 细粒黑云母二长花岗岩样品 M11。Q: 石英; Pl: 斜长石; Bi: 黑云母; Kfs: 钾长石

图 2 代表性岩石样品的岩相学和矿物组合特征

Fig. 2 Photomicrographs of petrographic features and mineral assemblages of representative samples

WX Pro102型准分子激光器(波长193 nm)和Agilent 7500型 ICP-MS的联机上进行。采用He为剥蚀物质的载气,采用标准参考物质NIST610作为元素含量的外标,用91500标准锆石外部校正法进行锆石原位U-Pb分析。采用的激光束斑直径为32 μm ,激光剥蚀深度为20~40 μm 。普通铅校正采用 Andersen^[18]的方法,年龄计算及谐和图的绘制由程序 Iso-plot^[19]完成。锆石U-Pb同位素分析结果列于表1。

1) 中川岩体。二长花岗岩样品M10的锆石晶体呈自形-半自形,多数为长柱状,少数为短柱状,粒径在40~150 μm 之间,长宽比介于2:1~3:1之间,具有清晰的环带结构(图3)。对20颗锆石进行20个点的分析,获得20个有效数据测点。所有测点的数据均分布在谐和线附近(图4(a)),计算得出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为220 \pm 1 Ma, MSWD=1.2,代表该岩体的侵位年龄。

2) 柏家庄岩体。采自柏家庄岩体的细粒黑云母二长花岗岩样品M11中,锆石晶体呈自形-半自形,多数为长柱状,粒径在60~100 μm 之间,长宽比约为3:1,具有清晰的环带结构(图3)。对20颗锆石进行20个点的分析,获得9个有效数据测点。测点M11-08的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄(228 Ma)偏高,测点M11-01和M11-02偏离谐和线较远,计算平均年龄时将这3个点剔除。其余6个点都位于谐和线上或谐和线附近(图4(b)),计算得出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为216 \pm 6 Ma, MSWD=1.1,代表柏家庄岩体的侵位年龄。

3) 教场坝岩体。闪长岩样品PM35的锆石晶体呈自形-半自形,多数为短柱状,粒径在20~60 μm 之间,少数可达100 μm ,长宽比接近1:1,具有清晰的环带结构(图3)。对33颗锆石进行35个点的分析。测点PM35-34和PM35-35的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄值(分别为262和158 Ma)明显偏离其他数据点,测点PM35-03, PM35-18, PM35-22, PM35-23, PM35-26, PM35-27, PM35-30, PM35-32和PM35-34偏离谐和线较远,计算平均年龄值时将这9个点剔除。其余24个点都位于谐和线上或谐和线附近(图4(c)),计算得出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为222 \pm 3 Ma, MSWD=2.0,代表教场坝岩体的侵位年龄。

4 锆石Lu-Hf同位素分析测试方法及结果

完成锆石LA-ICP-MS定年之后,挑选年龄和谐

的锆石点位,在年龄测点的相同位置进行Lu-Hf同位素测定。锆石原位Lu-Hf同位素测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室型号为Nu Plasma HR的MC-ICP-MS和型号为Geo-Las 2005的激光剥蚀系统中进行。用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.02669$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=0.5886$ 进行同量异位干扰校正,计算样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值。在样品测定期间,对标准参考物质GJ-1和91500进行分析,一方面据此对样品进行校正,另一方面进行仪器状态监控。所测锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值均小于0.002,显示锆石在形成后具有较低的放射性Hf积累,岩体的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 平均值为-0.96。计算 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和模式年龄时,现今球粒陨石以及亏损地幔的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值分别采用0.0332和0.282772, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别采用0.0384和0.28325,计算二阶段模式年龄时,地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值采用平均值0.55^[20]。锆石Lu-Hf同位素测定结果见表2。

1) 中川岩体。选取样品M10中年龄和谐的10个测点进行Hf同位素测定,其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值介于0.282573~0.282649之间,平均值为0.282612,均一性较好。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 在-2.44~0.28之间,平均值为-0.97,落在1440 Ma与1100 Ma之间平均地壳演化线范围内(图5)。一阶段Hf模式年龄(t_{DM1})的变化范围为866~979 Ma,平均911 Ma;二阶段Hf模式年龄(t_{DM2})的变化范围为1235~1408 Ma,平均1315 Ma。

2) 柏家庄岩体。样品M11共计分析9个测点,其中参与加权平均年龄计算的6个测点(M11-03, M11-04, M11-05, M11-06, M11-07和M11-09)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值介于0.282548~0.282667之间,平均值为0.282606,均一性较好。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在-3.24~0.92之间,平均值为-1.30,主体落在1440 Ma与1100 Ma之间平均地壳演化线范围内(图5)。 t_{DM1} 的变化范围为828~986 Ma,平均值为923 Ma; t_{DM2} 的变化范围为1192~1456 Ma,平均值为1333 Ma。

3) 教场坝岩体。样品PM35共计分析10个测点,其中参与加权平均年龄计算的8个测点(PM35-11, PM35-12, PM35-14, PM35-15, PM35-17, PM35-19, PM35-20以及PM35-25)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值介于0.282604~0.282686之间,平均值为0.282637,均一性较好。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在-1.20~1.63之间,平均值为-0.05,落在1440 Ma与1100 Ma间平均地壳演化线范围内(图5)。 t_{DM1} 的变化范围为812~918 Ma,平均值为874 Ma; t_{DM2} 的变化范围为1151~1331 Ma,平均值为1258 Ma。

表 1 中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素测定结果
Table 1 LA-ICP-MS analyzed zircon U-Th-Pb isotopic data and calculated apparent ages for samples from Zhongchuan, Baijiazhuang and Jiaochangba intrusions

测点号	含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				同位素比值				年龄/Ma		
	Pb	^{232}Th	^{238}U	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ($\pm 1\sigma$)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ($\pm 1\sigma$)	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ ($\pm 1\sigma$)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ($\pm 1\sigma$)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ($\pm 1\sigma$)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ($\pm 1\sigma$)	
中川岩体											
M10-01	45.60	179.64	1277.08	0.14	0.2386 \pm 0.0042	0.0342 \pm 0.0003	0.0110 \pm 0.0002	220 \pm 23	217 \pm 3	217 \pm 2	
M10-02	42.70	358.79	1129.68	0.32	0.2464 \pm 0.0048	0.0344 \pm 0.0003	0.0108 \pm 0.0002	285 \pm 27	224 \pm 4	218 \pm 2	
M10-03	46.68	373.64	1272.44	0.29	0.2414 \pm 0.0047	0.0341 \pm 0.0003	0.0099 \pm 0.0001	258 \pm 26	220 \pm 4	216 \pm 2	
M10-04	29.66	213.85	811.66	0.26	0.2465 \pm 0.0066	0.0343 \pm 0.0004	0.0108 \pm 0.0002	291 \pm 41	224 \pm 5	217 \pm 2	
M10-05	35.01	246.92	910.63	0.27	0.2516 \pm 0.0053	0.0349 \pm 0.0004	0.0120 \pm 0.0002	296 \pm 30	228 \pm 4	221 \pm 2	
M10-06	47.01	208.30	1295.77	0.36	0.2416 \pm 0.0041	0.0346 \pm 0.0003	0.0109 \pm 0.0002	224 \pm 22	220 \pm 3	219 \pm 2	
M10-07	50.62	321.24	1369.72	0.23	0.2432 \pm 0.0043	0.0346 \pm 0.0003	0.0106 \pm 0.0002	243 \pm 23	221 \pm 4	219 \pm 2	
M10-08	36.41	133.40	1008.97	0.13	0.2423 \pm 0.0045	0.0347 \pm 0.0003	0.0116 \pm 0.0002	228 \pm 25	220 \pm 4	220 \pm 2	
M10-09	52.36	226.22	1437.28	0.16	0.2463 \pm 0.0041	0.0349 \pm 0.0003	0.0105 \pm 0.0002	253 \pm 21	224 \pm 3	221 \pm 2	
M10-10	48.50	524.66	1240.05	0.42	0.2411 \pm 0.0042	0.0347 \pm 0.0003	0.0107 \pm 0.0001	213 \pm 23	219 \pm 3	220 \pm 2	
M10-11	83.27	389.91	2228.02	0.36	0.2517 \pm 0.0040	0.0351 \pm 0.0003	0.0099 \pm 0.0001	288 \pm 19	228 \pm 3	222 \pm 2	
M10-12	31.77	258.94	832.46	0.31	0.2433 \pm 0.0049	0.0348 \pm 0.0004	0.0112 \pm 0.0002	227 \pm 28	221 \pm 4	221 \pm 2	
M10-13	52.97	319.84	1417.59	0.23	0.2467 \pm 0.0043	0.0352 \pm 0.0003	0.0101 \pm 0.0001	233 \pm 23	224 \pm 3	223 \pm 2	
M10-14	47.39	210.10	1258.77	0.17	0.2519 \pm 0.0046	0.0355 \pm 0.0004	0.0101 \pm 0.0002	263 \pm 24	228 \pm 4	225 \pm 2	
M10-15	20.13	156.52	542.03	0.29	0.2392 \pm 0.0062	0.0345 \pm 0.0004	0.0117 \pm 0.0002	207 \pm 40	218 \pm 5	219 \pm 2	
M10-16	44.64	212.49	1203.81	0.36	0.2444 \pm 0.0042	0.0347 \pm 0.0003	0.0121 \pm 0.0002	243 \pm 22	222 \pm 3	220 \pm 2	
M10-17	55.09	352.97	1475.99	0.24	0.2505 \pm 0.0041	0.0349 \pm 0.0003	0.0107 \pm 0.0001	291 \pm 21	227 \pm 3	221 \pm 2	
M10-18	69.37	275.84	1864.58	0.15	0.2492 \pm 0.0041	0.0351 \pm 0.0003	0.0101 \pm 0.0002	262 \pm 21	226 \pm 3	222 \pm 2	
M10-19	22.23	226.19	574.66	0.39	0.2419 \pm 0.0065	0.0344 \pm 0.0004	0.0113 \pm 0.0002	244 \pm 41	220 \pm 5	218 \pm 2	
M10-20	60.81	261.20	1672.85	0.16	0.2490 \pm 0.0041	0.0347 \pm 0.0003	0.0112 \pm 0.0002	287 \pm 21	226 \pm 3	220 \pm 2	
柏家庄岩体											
M11-01	17.02	362.19	412.46	0.88	0.2482 \pm 0.0062	0.0319 \pm 0.0004	0.0104 \pm 0.0001	471 \pm 35	225 \pm 5	202 \pm 2	
M11-02	54.44	202.92	1638.24	0.12	0.2351 \pm 0.0043	0.0322 \pm 0.0003	0.0092 \pm 0.0002	324 \pm 24	214 \pm 4	205 \pm 2	
M11-03	14.92	178.48	390.77	0.46	0.2417 \pm 0.0069	0.0336 \pm 0.0004	0.0102 \pm 0.0002	293 \pm 44	220 \pm 6	213 \pm 2	
M11-04	10.92	66.50	304.58	0.22	0.2340 \pm 0.0066	0.0337 \pm 0.0004	0.0111 \pm 0.0002	214 \pm 45	213 \pm 5	213 \pm 2	
M11-05	15.00	166.95	393.38	0.42	0.2383 \pm 0.0064	0.0338 \pm 0.0004	0.0107 \pm 0.0002	250 \pm 42	217 \pm 5	214 \pm 2	
M11-06	15.98	209.51	396.24	0.53	0.2413 \pm 0.0073	0.0345 \pm 0.0004	0.0112 \pm 0.0002	225 \pm 48	219 \pm 6	219 \pm 3	
M11-07	24.31	262.58	640.89	0.41	0.2417 \pm 0.0050	0.0337 \pm 0.0004	0.0107 \pm 0.0001	286 \pm 29	220 \pm 4	214 \pm 2	
M11-08	39.79	448.03	960.56	0.47	0.2618 \pm 0.0058	0.0360 \pm 0.0004	0.0118 \pm 0.0002	317 \pm 31	236 \pm 5	228 \pm 2	
M11-09	10.82	141.63	282.08	0.50	0.2319 \pm 0.0093	0.0333 \pm 0.0004	0.0103 \pm 0.0002	217 \pm 69	212 \pm 8	211 \pm 3	
教场坝岩体											
PM35-01	56.20	491.03	1538.12	0.32	0.2310 \pm 0.0051	0.0332 \pm 0.0006	0.0102 \pm 0.0003	216 \pm 23	211 \pm 4	211 \pm 4	
PM35-02	26.87	288.92	622.57	0.46	0.2477 \pm 0.0145	0.0349 \pm 0.0007	0.0110 \pm 0.0002	263 \pm 143	225 \pm 12	221 \pm 4	
PM35-03	18.82	260.57	473.90	0.55	0.2317 \pm 0.0070	0.0333 \pm 0.0006	0.0112 \pm 0.0004	215 \pm 37	212 \pm 6	211 \pm 4	

续表

测点号	含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)			同位素比值				年龄/Ma		
	Pb	^{232}Th	^{238}U	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ($\pm 1\sigma$)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ($\pm 1\sigma$)	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ ($\pm 1\sigma$)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ($\pm 1\sigma$)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ($\pm 1\sigma$)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ($\pm 1\sigma$)
PM3-5-04	39.80	484.28	916.38	0.53	0.2532 \pm 0.0139	0.0362 \pm 0.0007	0.0114 \pm 0.0002	230 \pm 135	229 \pm 11	229 \pm 4
PM3-5-05	43.01	674.65	946.50	0.71	0.2684 \pm 0.0062	0.0366 \pm 0.0007	0.0118 \pm 0.0003	337 \pm 24	241 \pm 5	232 \pm 4
PM3-5-06	45.75	469.64	1132.42	0.41	0.2622 \pm 0.0060	0.0354 \pm 0.0007	0.0115 \pm 0.0003	360 \pm 23	236 \pm 5	224 \pm 4
PM3-5-07	26.78	337.77	633.81	0.53	0.2381 \pm 0.0147	0.0342 \pm 0.0007	0.0108 \pm 0.0002	221 \pm 149	217 \pm 12	216 \pm 4
PM3-5-08	22.34	213.31	593.76	0.36	0.2377 \pm 0.0065	0.0338 \pm 0.0006	0.0104 \pm 0.0004	242 \pm 31	217 \pm 5	214 \pm 4
PM3-5-09	25.28	334.79	604.81	0.55	0.2524 \pm 0.0064	0.0358 \pm 0.0007	0.0105 \pm 0.0003	250 \pm 28	229 \pm 5	226 \pm 4
PM3-5-10	37.41	444.40	921.03	0.48	0.2476 \pm 0.0058	0.0352 \pm 0.0007	0.0108 \pm 0.0003	240 \pm 25	225 \pm 5	223 \pm 4
PM3-5-11	25.26	383.76	566.40	0.68	0.2501 \pm 0.0064	0.0367 \pm 0.0007	0.0113 \pm 0.0004	171 \pm 29	227 \pm 5	232 \pm 4
PM3-5-12	30.23	244.37	780.44	0.31	0.2456 \pm 0.0109	0.0346 \pm 0.0007	0.0109 \pm 0.0002	260 \pm 114	223 \pm 9	220 \pm 4
PM3-5-13	28.17	309.45	707.11	0.44	0.2458 \pm 0.0060	0.0350 \pm 0.0007	0.0107 \pm 0.0003	239 \pm 27	223 \pm 5	222 \pm 4
PM3-5-14	29.95	335.74	770.89	0.44	0.2418 \pm 0.0061	0.0341 \pm 0.0006	0.0104 \pm 0.0004	257 \pm 28	220 \pm 5	216 \pm 4
PM3-5-15	21.57	175.90	537.16	0.33	0.2532 \pm 0.0065	0.0364 \pm 0.0007	0.0113 \pm 0.0004	219 \pm 28	229 \pm 5	230 \pm 4
PM3-5-16	45.56	947.62	989.18	0.96	0.2642 \pm 0.0062	0.0349 \pm 0.0006	0.0110 \pm 0.0003	411 \pm 24	238 \pm 5	221 \pm 4
PM3-5-17	22.51	256.56	556.55	0.46	0.2404 \pm 0.0063	0.0350 \pm 0.0007	0.0114 \pm 0.0004	184 \pm 30	219 \pm 5	222 \pm 4
PM3-5-18	18.30	200.73	447.08	0.45	0.2482 \pm 0.0067	0.0358 \pm 0.0007	0.0111 \pm 0.0004	210 \pm 31	225 \pm 5	227 \pm 4
PM3-5-19	54.79	493.06	1308.82	0.38	0.2514 \pm 0.0123	0.0355 \pm 0.0007	0.0112 \pm 0.0002	260 \pm 123	228 \pm 10	225 \pm 4
PM3-5-20	44.48	566.00	1097.44	0.52	0.2677 \pm 0.0062	0.0343 \pm 0.0006	0.0112 \pm 0.0003	478 \pm 24	241 \pm 5	217 \pm 4
PM3-5-21	26.65	291.32	666.34	0.44	0.2492 \pm 0.0062	0.0352 \pm 0.0007	0.0105 \pm 0.0004	258 \pm 27	226 \pm 5	223 \pm 4
PM3-5-22	32.89	289.64	818.37	0.35	0.2535 \pm 0.0061	0.0361 \pm 0.0007	0.0112 \pm 0.0004	239 \pm 26	229 \pm 5	229 \pm 4
PM3-5-23	12.31	204.51	279.15	0.73	0.2508 \pm 0.0083	0.0353 \pm 0.0007	0.0114 \pm 0.0004	264 \pm 42	227 \pm 7	224 \pm 4
PM3-5-24	25.04	362.30	625.76	0.58	0.2327 \pm 0.0064	0.0335 \pm 0.0006	0.0108 \pm 0.0004	213 \pm 31	212 \pm 5	212 \pm 4
PM3-5-25	21.31	222.48	580.63	0.38	0.2425 \pm 0.0069	0.0324 \pm 0.0006	0.0106 \pm 0.0004	386 \pm 32	220 \pm 6	205 \pm 4
PM3-5-26	19.46	204.46	502.55	0.41	0.2429 \pm 0.0064	0.0341 \pm 0.0006	0.0108 \pm 0.0004	269 \pm 30	221 \pm 5	216 \pm 4
PM3-5-27	19.32	102.23	526.81	0.19	0.2380 \pm 0.0070	0.0347 \pm 0.0007	0.0104 \pm 0.0005	186 \pm 35	217 \pm 6	220 \pm 4
PM3-5-28	25.12	295.68	661.84	0.45	0.2470 \pm 0.0063	0.0329 \pm 0.0006	0.0106 \pm 0.0004	390 \pm 27	224 \pm 5	209 \pm 4
PM3-5-29	50.07	269.27	1323.98	0.20	0.2489 \pm 0.0093	0.0351 \pm 0.0007	0.0110 \pm 0.0002	263 \pm 98	226 \pm 8	222 \pm 4
PM3-5-30	19.90	284.00	470.66	0.60	0.2613 \pm 0.0083	0.0350 \pm 0.0007	0.0113 \pm 0.0004	375 \pm 38	236 \pm 7	222 \pm 4
PM3-5-31	40.48	221.42	1116.03	0.20	0.2471 \pm 0.0060	0.0339 \pm 0.0006	0.0111 \pm 0.0004	322 \pm 26	224 \pm 5	215 \pm 4
PM3-5-32	15.12	153.83	376.24	0.41	0.2536 \pm 0.0072	0.0354 \pm 0.0007	0.0112 \pm 0.0004	285 \pm 33	230 \pm 6	224 \pm 4
PM3-5-33	34.29	389.37	874.24	0.45	0.2416 \pm 0.0063	0.0341 \pm 0.0006	0.0110 \pm 0.0004	259 \pm 29	220 \pm 5	216 \pm 4
PM3-5-34	6.94	106.84	129.33	0.83	0.2983 \pm 0.0117	0.0414 \pm 0.0008	0.0142 \pm 0.0005	265 \pm 9	262 \pm 5	262 \pm 5
PM3-5-35	29.59	425.58	846.00	0.50	0.2565 \pm 0.1506	0.0249 \pm 0.0029	0.0181 \pm 0.0066	232 \pm 122	158 \pm 18	158 \pm 18

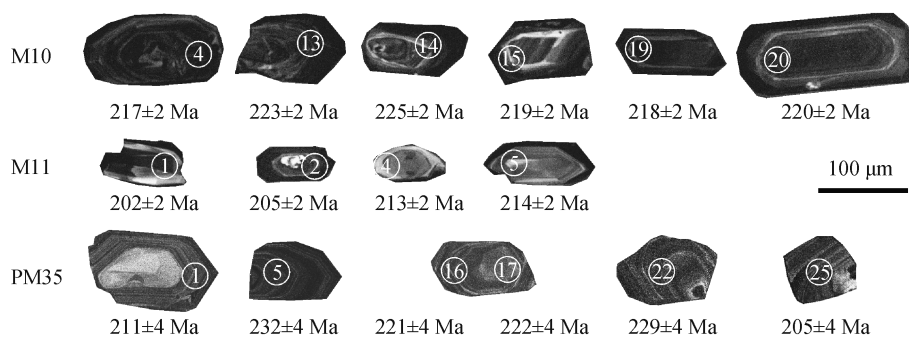


图 3 中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体样品锆石 CL 图像

Fig. 3 CL images of zircons for samples from Zhongchuan, Baijiazhuang and Jiaochangba intrusions

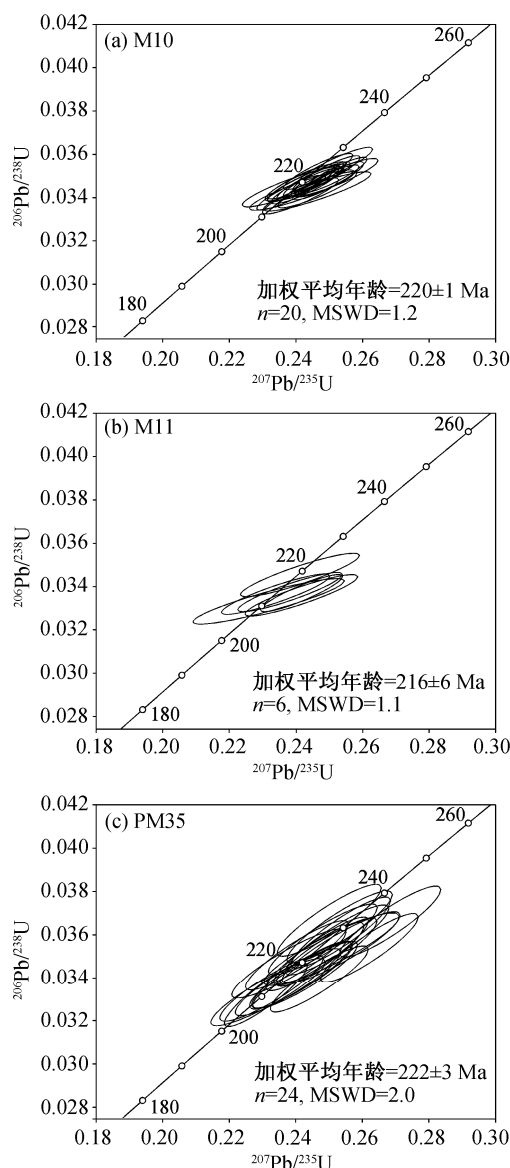


图 4 中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 Concordia diagrams of zircon U-Pb isotopes for samples from Zhongchuan, Baijiazhuang and Jiaochangba intrusions

5 岩体的元素地球化学特征

5.1 主量元素

主量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。去除岩石样品的风化表面后,将新鲜的部分粉碎至 200 目。取 0.4 g 岩石粉末与 3 g $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 和 1 g LiBO_2 混合均匀,加入 2 滴饱和 LiBr ,在铂金坩埚内 1100°C 下融化成玻璃薄片。样品烧失量用称重法测定,主量元素用 X 荧光光谱法(XRF)测定,分析精度为 0.5%。

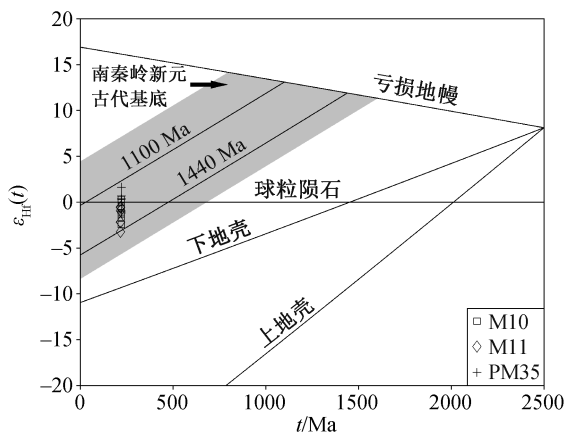
中川岩体、柏家庄岩体和教场坝 3 个岩体的主量元素分析结果见表 3。可以看出,3 个岩体的 SiO_2 含量范围为 59.66%~75.81%,属于石英闪长质-花岗质岩石。 Al_2O_3 含量为 15.02~17.10%, CaO 含量为 0.37%~9.86%, MgO 含量为 0.18%~1.66%, K_2O 含量为 2.26%~4.76%, Na_2O 含量为 0.01%~3.80%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值均大于 1, TiO_2 含量为 0.12%~0.55%。结合前人研究成果^[4,15],在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 6(a))中,3 个岩体的样品主体落入高钾钙碱性系列范围内,属于高钾钙碱性系列岩石。3 个岩体的 A/CNK 值为 0.77~1.39,在 $A/\text{NK}-A/\text{CNK}$ 图解(图 6(b))中主要位于准铝质到过铝质的区域。

5.2 微量和稀土元素

微量元素和稀土元素的分析在北京大学造山带和地壳演化教育部重点实验室完成。精确地称量 25 mg 岩石粉末至 Teflon 罐中,加入 1.5 mL HNO_3 和 1.5 mL HF ,加盖后于 80°C 加热 24 小时,开盖蒸发至湿盐状。向罐中加入 1.5 mL HF , 1.5 mL HNO_3 和 0.5 mL HClO_4 ,置于密闭钢瓶中,在 180°C 加热 48 小时至岩石粉末完全溶解,用 1%的 HNO_3 稀释到 50 mL。使用 GSR-1, GSR-9 和 GSR-14 标样,微量元素和稀土元素用 ELEMENT-I 型等离子质谱仪测定,结果见表 4 和 5。

表 2 中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体锆石 Lu-Hf 同位素分析结果
Table 2 Lu-Hf isotope data of zircons for samples from Zhongchuan, Baijiazhuang and Jiaochangba intrusions

样品号	年龄/Ma	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(\pm 1\sigma)$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_t$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma
M10-01	217	0.282603±0.000014	0.01	0.000407	-5.97	-1.17	0.282602	-0.99	904	1328
M10-06	219	0.282619±0.000016	0.03	0.000698	-5.41	-0.66	0.282616	-0.98	889	1295
M10-07	221	0.282638±0.000022	0.04	0.001210	-4.73	-0.05	0.282633	-0.96	874	1257
M10-08	220	0.282607±0.000015	0.04	0.001180	-5.82	-1.14	0.282603	-0.96	917	1326
M10-10	220	0.282630±0.000017	0.07	0.001841	-5.04	-0.45	0.282622	-0.94	901	1282
M10-12	220	0.282603±0.000014	0.05	0.001240	-5.97	-1.29	0.282598	-0.96	924	1335
M10-13	223	0.282606±0.000015	0.04	0.001083	-5.86	-1.16	0.282602	-0.97	916	1327
M10-15	219	0.282573±0.000017	0.07	0.001701	-7.04	-2.44	0.282566	-0.95	979	1408
M10-16	220	0.282593±0.000017	0.04	0.001092	-6.34	-1.65	0.282588	-0.97	935	1358
M10-19	218	0.282649±0.000015	0.06	0.001546	-4.35	0.28	0.282643	-0.95	866	1235
M11-01	202	0.282603±0.000020	0.05	0.001319	-5.97	-1.39	0.282598	-0.96	926	1338
M11-02	205	0.282325±0.000030	0.05	0.001545	-15.80	-11.26	0.282319	-0.95	1328	1962
M11-03	213	0.282580±0.000033	0.04	0.001121	-6.80	-2.19	0.282575	-0.97	954	1389
M11-04	213	0.282548±0.000028	0.02	0.000626	-7.92	-3.24	0.282546	-0.98	986	1456
M11-05	214	0.282582±0.000024	0.05	0.001409	-6.73	-2.17	0.282576	-0.96	959	1388
M11-06	219	0.282630±0.000022	0.08	0.002212	-5.03	-0.58	0.282621	-0.93	910	1287
M11-07	214	0.282630±0.000024	0.07	0.001907	-5.03	-0.53	0.282622	-0.94	903	1284
M11-08	228	0.282622±0.000013	0.04	0.001024	-5.32	-0.69	0.282617	-0.97	893	1295
M11-09	211	0.282667±0.000023	0.04	0.000995	-3.71	0.92	0.282663	-0.97	828	1192
PM35-03	221	0.282607±0.000012	0.04	0.000917	-5.85	-1.09	0.282603	-0.97	911	1324
PM35-11	226	0.282612±0.000079	0.05	0.001438	-5.65	-0.97	0.282606	-0.96	916	1316
PM35-12	223	0.282656±0.000012	0.03	0.000829	-4.10	0.67	0.282653	-0.98	840	1212
PM35-14	220	0.282647±0.000014	0.04	0.001155	-4.41	0.32	0.282643	-0.97	860	1235
PM35-15	222	0.282604±0.000014	0.04	0.000975	-5.93	-1.18	0.282600	-0.97	916	1330
PM35-17	230	0.282637±0.000013	0.03	0.000830	-4.78	-0.01	0.282633	-0.97	867	1256
PM35-19	222	0.282649±0.000014	0.05	0.001319	-4.36	0.34	0.282643	-0.96	861	1233
PM35-20	227	0.282604±0.000014	0.04	0.001044	-5.94	-1.20	0.282599	-0.97	918	1331
PM35-23	223	0.282637±0.000014	0.04	0.000961	-4.77	-0.02	0.282633	-0.97	870	1256
PM35-25	224	0.282686±0.000026	0.05	0.001454	-3.05	1.63	0.282680	-0.96	812	1151



球粒陨石和亏损地幔演化参考线分别引自文献[21]和[22],
南秦岭新元古代基底参考线引自文献[23]

图 5 中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体锆石年龄
 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解

Fig. 5 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. t diagram for samples from Zhongchuan,
Baijiazhuang and Jiaochangba intrusions

在稀土元素球粒陨石标准化分布图(图 7(a))中, 稀土元素配分模式呈现较明显的右倾趋势。3 个岩体的 LREE/HREE 值为 7.13~16.46, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 9.38~33.55, 除柏家庄岩体(M09)具有较强的 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.44$)外, 其余样品具有微弱的 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.81\sim0.89$)。岩体的稀土元素总含量(ΣREE)变化范围为 124.63~189.14 $\mu\text{g/g}$ 。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图 7(b))中, 各岩体微量元素配分曲线较为相似, 高场强元素 Nb, Ti 和 P 等显著负异常, 样品 M09 具有显著的 Sr 负异常。

6 讨论

6.1 岩体形成时代

前人通过对五龙岩体群(五龙岩体和华阳岩体)和东江口岩体群(东江口岩体、柞水岩体、曹坪岩体和沙河湾岩体)的锆石 U-Pb 年代学研究, 确认晚

表 3 中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体岩体主量元素分析结果(%)

Table 3 Analyzed major elements data of granites for samples from Zhongchuan, Baijiazhuang and Jiaochangba intrusions (%)

分析项目	M10	M09	M11	PM35
SiO ₂	65.14	75.81	69.51	59.66
TiO ₂	0.55	0.12	0.41	0.45
Al ₂ O ₃	17.10	15.02	15.50	15.68
Fe ₂ O ₃	3.77	0.60	2.25	7.76
MnO	0.08	0.02	0.06	0.13
MgO	1.66	0.18	0.87	0.45
CaO	3.16	0.37	1.61	9.86
Na ₂ O	3.69	3.05	3.80	0.01
K ₂ O	3.94	4.73	4.76	2.26
P ₂ O ₅	0.24	0.10	0.16	0.44
LOI	0.54	0.00	0.88	2.78
总和	99.87	100.00	99.81	99.48
K ₂ O/N ₂ O	1.07	1.55	1.25	226
Mg#	27.34	20.39	24.8	4.74
A/CNK	1.06	1.39	1.08	0.77

说明: LOI 为烧失量, Mg# 为 $100 \times \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}_{\text{total}})$ 原子数之比, A/CNK 为 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 分子数之比。

三叠世的岩浆活动在该地区是持续的,但在不同的位置有不同期次的岩浆作用记录^[3,23,27-29]。

与南秦岭中-东部地区相比,对西秦岭二长花岗岩群的研究相对薄弱。前人通过 K-Ar 法^[6-8]、全

岩 Rb-Sr 等时线法^[7-8,12]和锆石 U-Pb 法^[4-5,9-11],给出中川岩体、柏家庄岩体和教场坝 3 个岩体的形成时代为 264~185 Ma。本文通过 LA-ICP-MS 锆石微区原位 U-Th-Pb 定年方法,获得中川岩体的年龄为 220 ± 1 Ma, 柏家庄岩体的年龄为 216 ± 6 Ma, 教场坝岩体的年龄为 222 ± 3 Ma, 与前人的测年结果在误差范围内基本上一致。因此,西秦岭二长花岗岩的岩浆活动时代与南秦岭其他地区基本上一致,反映中-晚三叠世岩浆活动在南秦岭构造带是呈东-西向连续分布的。

6.2 岩石成因探讨

前人认为西秦岭二长花岗岩岩体群普遍具有多期次特征,岩性呈现从偏基性向偏酸性演化的特征^[15]。南秦岭构造带内出露 3 个大型中生代花岗岩群,从西到东分别为光头山岩体群、五龙岩体群和东江口岩体群,岩浆活动同样具有从偏基性向酸性演化的多期次活动特征^[3,23,28-30]。Deng 等^[30]对光头山岩体群中光头山、新院、张家坝、姜家坪和火烧店岩体做了深入的研究,认为该岩体群的岩浆主要来自新元古代变质基性岩和变质杂砂岩的部分熔融,少量岩石形成于被沉积物交代的岩石圈地幔部分熔融。Hu 等^[23]对五龙岩体群中华阳侵入杂岩开展岩石地球化学,特别是锆石 Hf-O 同位素研究,确认华阳侵入杂岩体中的花岗质岩石具有准铝质-强过铝质的特征,早期(218~213 Ma)发育少量镁铁质

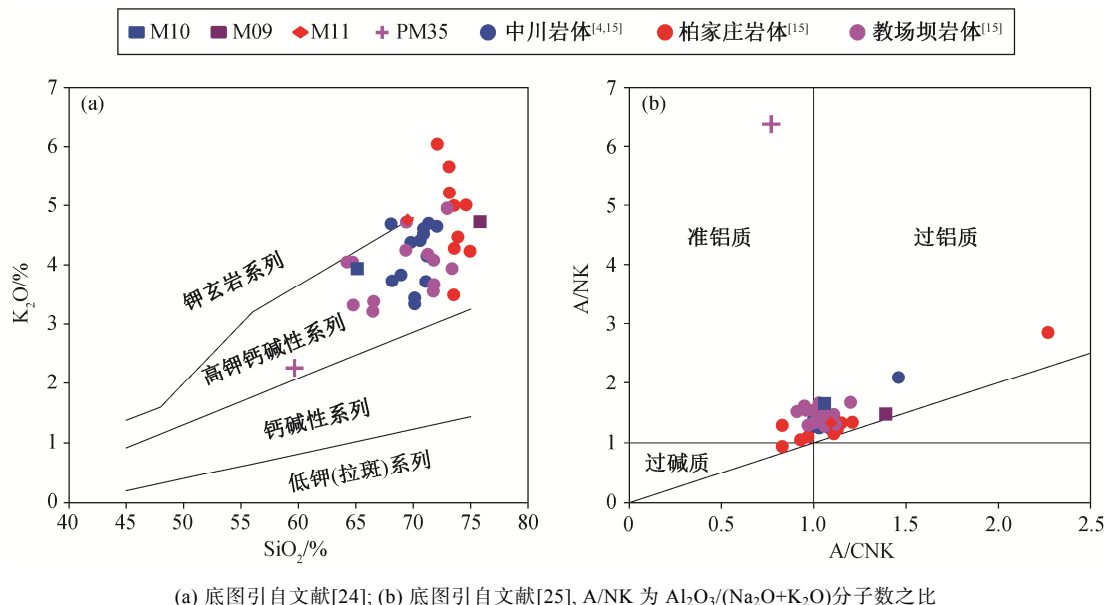


图 6 中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 和 $\text{A/NK}-\text{A/CNK}$ 图解

Fig. 6 K_2O vs. SiO_2 and A/NK vs. A/CNK diagrams for samples from Zhongchuan, Baijiazhuang and Jiaochangba intrusions

表 4 中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体岩体微量元素分析结果(μg/g)

Table 4 Analyzed trace element data of granites for samples from Zhongchuan, Baijiazhuang and Jiaochangba intrusions (μg/g)

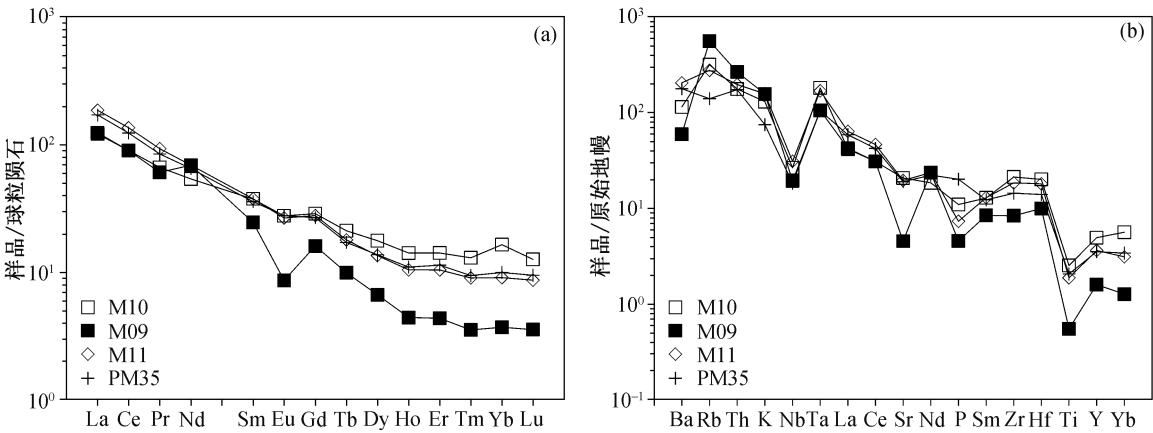
分析项目	M10	M09	M11	PM35
Rb	201.80	356.00	176.44	89.12
Sr	439.40	96.36	415.40	401.40
Ba	804.8	416.8	1436.0	1246.4
Th	15.04	22.58	16.74	14.83
U	7.45	4.33	6.94	4.31
Nb	18.99	13.82	22.20	13.14
Ta	2.09	1.95	2.17	0.84
Zr	239.00	93.88	207.60	161.40
Hf	6.23	3.09	5.59	4.34
Co	6.49	0.94	2.74	35.10
Ni	5.91	45.66	7.33	148.08
Cr	18.43	14.44	15.24	329.00
V	46.52	5.23	36.86	123.96
Sc	6.95	1.63	3.99	8.15
Li	85.82	119.68	43.66	33.62
Cs	12.87	31.90	4.16	—
Ga	23.98	22.74	22.30	20.10
Cu	6.81	6.42	3.46	21.54
Pb	27.98	29.46	21.08	15.92
Zn	65.58	50.58	14.74	42.34
Bi	0.85	—	0.45	0.01
Mo	3.66	—	2.40	0.18

表 5 中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体岩体稀土元素分析结果(μg/g)

Table 5 Analyzed REE data of granites for samples from Zhongchuan, Baijiazhuang and Jiaochangba intrusions (μg/g)

分析项目	M10	M09	M11	PM35
La	28.68	29.28	43.98	40.46
Ce	55.02	58.70	82.8	75.28
Pr	6.28	5.74	8.80	8.01
Nd	25.08	19.70	32.16	30.24
Sm	5.71	3.57	5.75	5.46
Eu	1.60	0.50	1.54	1.61
Gd	5.90	3.30	5.71	5.49
Tb	0.79	0.37	0.67	0.64
Dy	4.48	1.69	3.43	3.48
Ho	0.80	0.25	0.59	0.62
Er	2.34	0.72	1.72	1.88
Tm	0.33	0.09	0.23	0.24
Yb	2.19	0.63	1.54	1.69
Lu	0.32	0.09	0.22	0.24
Y	22.56	7.29	16.57	16.1
ΣREE	139.52	124.63	189.14	175.35
LREE	122.37	117.49	175.03	161.06
HREE	17.15	7.14	14.11	14.29
L/H	7.13	16.46	12.40	11.27
(La/Yb) _N	9.38	33.55	20.46	17.13
δEu	0.84	0.44	0.81	0.89
δCe	0.96	1.04	0.97	0.96

说明: ΣREE, LREE 和 HREE 为别为稀土元素总量、轻稀土元素总量和重稀土元素总量, L/H 为轻重稀土元素总量比, (La/Yb)_N 为球粒陨石标准化后两元素比值。



球粒陨石和原始地幔标准化数值引自文献[26]

图 7 中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a)及微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)
Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle normalized multi-element spidergrams for samples from Zhongchuan, Baijiazhuang and Jiaochangba intrusions

捕掳体, 岩浆主要来源于岩石圈地幔; 中期(214~207 Ma)的英闪长岩和花岗闪长岩来源于新元古代玄武质地壳的部分熔融, 并有少量镁铁质岩浆注入, 岩浆上升过程中发生分离结晶和部分地壳混染作用; 晚期(207~202 Ma)的中-细粒花岗岩形成于新元古代变质杂砂岩的部分熔融。Hu 等^[28-29]通过对东江口岩体群中东江口、柞水、曹坪和沙湾岩体的研究, 认为这些岩体的主体岩浆来自新元古代基性下地壳物质部分熔融产生的熔体与交代岩石圈地幔部分熔融产生的熔体的混合, 少量岩浆形成于新元古代变质杂砂岩的部分熔融。由此可以判断, 中-晚三叠世南秦岭构造带的岩浆活动主要来源于中-新元古代的地壳源区(玄武质地壳和变质杂砂岩)。

中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体属于准铝质-弱过铝质和高钾钙碱性系列岩石, 在球粒陨石标准化稀土元素配分图解中表现为较一致的右倾特征, 轻重稀土元素分异明显($(La/Yb)_N=7.13\sim33.55$), 其中柏家庄岩体轻重稀土分异最明显, 且显示强烈的 Eu 负异常。在原始地幔标准化后的微量元素蛛网图中表现出高场强元素 Nb、Ti 和 P 等的显著负异常, 柏家庄岩体具有显著的 Sr 负异常。这些特征与光头山岩体群、五龙岩体群和东江口岩体群的基本地球化学特征^[3,23,27-30]相似。实验岩石学研究表明, 由玄武质岩石部分熔融形成的岩浆往往具有低的 Mg# 值(小于 40), 而在有地幔组分参与的情况下,

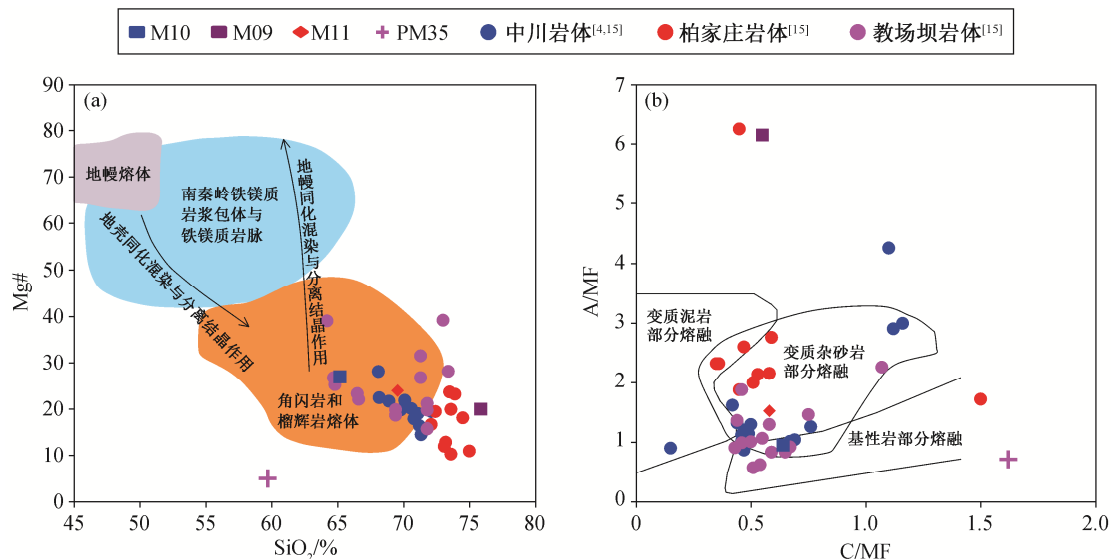
Mg# 值一般大于 40^[31]。本文研究的 3 个岩体均具有较低的 Mg# 值(小于 30), 在 SiO_2 -Mg# 图解(图 8(a))中显示没有地幔物质的加入, 表明在这些岩浆的形成过程中只是单一的地壳岩石部分熔融。在 AMF-CMF 图解(图 8(b))中, 这些岩体大部分落入变质杂砂岩到变玄武岩的区域, 与华阳岩体和光头山岩体^[23,27,30]相似, 表明其岩浆源区主要是变质玄武岩和变质杂砂岩。

本文的锆石 Lu-Hf 同位素研究结果表明, 中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体的锆石 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值比较均一, 介于 0.282515~0.282686 之间, $\epsilon_{Hf}(t)$ 值的变化范围为 -3.2~+1.63, 在 Hf 同位素演化图解中, Hf 同位素分布于球粒陨石均一储库线附近, 介于 1100~1440 Ma 下地壳演化线之间, 同时落在南秦岭新元古代新生地壳物质的演化区域内(图 5), 并且与光头山岩体群、五龙岩体群和东江口岩体群的 Hf 同位素组成特征^[3,23,27-30]相似, 表明岩浆的源区可能为新元古代的地壳物质。

综上所述, 西秦岭和南秦岭构造带在中-晚三叠世不仅岩浆活动连续分布, 并具有多期次的活动特征, 而且其岩浆源区相近, 主要来源于新元古代下地壳变质玄武质岩石和变质杂砂岩的部分熔融。

6.3 动力学背景

前人研究表明, 西秦岭二长花岗岩岩体群普遍具有多期次特征, 且根据不同定年方法获得时间跨



(a) 底图引自文献[23]; (b) 底图引自文献[32], A/MF 为 $Al_2O_3/(TFeO+MgO)$ 分子数之比, C/MF 为 $CaO/(TFeO+MgO)$ 分子数之比

图 8 中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体 AMF-CMF 和 Mg#- SiO_2 图解

Fig. 8 AMF vs. CMF and Mg# vs. SiO_2 diagrams of Zhongchuan, Baijiazhuang and Jiaochangba intrusions

度较大的年代学数据, 包括 264~232 Ma^[4,9], 218~210 Ma^[5,10-11]和<200 Ma^[8,12], 这些年代学数据与南秦岭构造带内早中生代岩浆作用的年代^[2,16]相近。一般认为, 在约 235 Ma 之前, 南秦岭构造带(特别是其西段)处于俯冲构造体制, 发生与俯冲作用相关的岩浆作用, 岩石具有岛弧岩浆的特征, 这也与古地磁学研究获得的证据^[33-35]相符。因此, 中川岩体获得的约 264 Ma 的年龄可能代表着早期俯冲作用的岩浆记录。

根据本文的研究结果, 西秦岭二长花岗岩岩体群的主体岩浆作用产生于晚三叠世, 这也是南秦岭构造带岩浆作用最强烈的时期, 五龙岩体群、东江口岩体群和光头山岩体群中的大部分岩体均形成于这一时期^[3,23,27-30], 说明该时期南秦岭构造带岩浆活动频繁, 导致地壳岩石发生大规模的部分熔融。由于这一时期华南板块与华北板块已经发生大陆碰撞, 因此产生这些岩石最有可能的构造背景为与俯冲板片断离有关或与后碰撞拆沉作用有关^[2-3,28,30]。已有的研究表明, 这一时期秦岭造山带的地壳厚度达到峰值(即处于加厚地壳的状态), 与拆沉模型^[27]不相符, 并且, 拆沉作用通常形成具有高 Mg# 值和高 Sr/Y 值特征的花岗质岩浆^[36], 因此本文研究的西秦岭中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体更可能形成于俯冲板片断离的过程。在板片断离过程中, 软流圈地幔上涌导致岩石圈地幔发生部分熔融, 进一步导致上覆地壳发生部分熔融, 从而形成花岗质岩浆^[23,28-30]。

7 结论

本文通过对西秦岭地区中川、柏家庄和教场坝 3 个花岗岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb-Lu-Hf 同位素和元素地球化学分析, 得出以下结论。

1) 3 个岩体的锆石 U-Pb 年龄数据较为接近, 介于 216~222 Ma 之间, 说明其形成时间基本上一致, 属于中晚三叠世。

2) 中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体都属于高钾钙碱性系列岩石, 具有较低的 Mg# 值和准铝质-弱过铝质特征、相似的微量和稀土元素特征和较明显的右倾式稀土元素配分图谱, 岩浆主要来源于变质玄武岩和变质杂砂岩的部分熔融。

3) 3 个岩体的 Hf 同位素特征与区域其他岩体相似, 在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解中落在南秦岭新远古带新生地壳物质的演化线内, 表明岩浆主要来源于新元古代地

壳物质的部分熔融。

4) 中川岩体、柏家庄岩体和教场坝岩体形成于南秦岭与华南板块碰撞过程, 可能与俯冲板片的断离有关。

参考文献

- [1] 王晓霞. 秦岭造山带花岗质岩浆作用与造山带演化. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(8): 1109-1125
- [2] Dong Yunpeng, Santosh M. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Gondwana Research*, 2016, 29(1): 1-40
- [3] Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Li Yongfei. Multi-stage granitic magmatism during exhumation of subducted continental lithosphere: evidence from the Wulong pluton, South Qinling. *Gondwana Research*, 2013, 24: 1108-1126
- [4] 李婷, 徐学义, 陈隽璐, 等. 西秦岭造山带礼县地区中川岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造环境. 地质通报, 2012, 31(6): 875-883
- [5] 姜启明, 鲁挑建. 甘肃礼县中川地区黄金成岩和成矿年龄的 SHRIMP 厘定. 地质科学, 2014, 49(4): 1184-1200
- [6] 陈源. 西秦岭北带中川花岗岩杂岩体与微细浸染型金矿关系探讨. 有色金属矿产与勘查, 1993, 2(2): 72-78
- [7] 宋忠宝, 冯益民, 何世平. 中川花岗岩构造岩浆活动特征与成矿作用. 西安地质学院院报, 1997, 19(4): 48-52
- [8] 殷先明. 浅议弧形构造对西秦岭金矿的控制. 甘肃地质, 2009, 18(4): 16-22
- [9] Zhu Laimin, Zhang Guowei, Yang Tao, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of the Zhongchuan granitic pluton in Western Qinling metallogenic belt, China. *Geological Journal*, 2013, 48(4): 310-334
- [10] Yang Shangsong, Liu Jiajun, Zhang Fangfang, et al. Petrogenesis and geodynamic setting of the Triassic granitoid plutons in West Qinling, China: insights from LA-ICP-MS zircon U-Pb ages, Lu-Hf isotope signatures and geochemical characteristics of the Zhongchuan pluton. *International Geology Review*, 2017, 59(15): 1908-1928
- [11] 段梦, 牛耀龄, 孔娟娟, 等. 西秦岭柏家庄、闫井花岗岩的成因: 年代学和地球化学证据 // 2014 年中国地球科学联合学术年会论文集. 北京, 2014: 2038-2040

- [12] 温志亮. 西秦岭教场坝岩体岩浆混合成因的新认识. 矿物岩石, 2008, 28(3): 29–36
- [13] 李永军, 段永民, 李新锋. 西秦岭洮坪地区花岗岩内部接触关系及等级体制填图. 地球科学与环境学报, 1993, 15(增刊 1): 98–106
- [14] 许亚玲, 毛永忠, 王刚刚. 甘肃省岷县—礼县一带柏家庄岩体群成岩成矿特点及成矿机制探讨. 甘肃地质, 2006, 15(2): 36–41
- [15] 彭璇. 西秦岭二长花岗岩体同源性研究. 西北地质, 2013, 46(1): 63–80
- [16] Wang Xiaoxia, Wang Tao, Zhang Chengli. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granite magmatism in the Qinling Orogen, China: constraints on orogenic process. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 72(4): 129–151
- [17] Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Neubauer F, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(3): 213–237
- [18] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 2002, 192(1): 59–79
- [19] Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.70: a geochronological toolkit for Microsoft Excel [EB/OL]. (2008) [2016–03–08]. http://www.bgc.org/isoplot_etc/isoplot.html
- [20] 吴福元, 李献华, 郑永飞. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 2007, 23(2): 185–220
- [21] Blichert-Toft J, Albarède F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148(1): 243–258
- [22] Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(1): 133–147
- [23] Hu Fangyang, Liu Shuwen, Ducea M N, et al. Interaction among magmas from various sources and crustal melting processes during continental collision: insights from the Huayang intrusive complex of the South Qinling Belt, China. *Journal of Petrology*, 2018, 59(4): 735–770
- [24] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58(1): 63–81
- [25] Altherr 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). *Lithos*, 2000, 50(1): 51–73
- [26] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42(1): 313–345
- [27] 孟旭阳, 王晓霞, 柯昌辉, 等. 南秦岭华阳花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Hf 同位素组成——对五龙岩体群成因的约束. 地质通报, 2013, 32(11): 1704–1719
- [28] Hu Fangyang, Liu Shuwen, Zhang Wanyi, et al. A westward propagating slab tear model for Late Triassic Qinling Orogenic Belt geodynamic evolution: insights from the petrogenesis of the Caoping and Shahewan intrusions, central China. *Lithos*, 2016, 262: 486–506
- [29] Hu Fangyang, Liu Shuwen, Ducea M N, et al. The geochemical evolution of the granitoid rocks in the South Qinling Belt: insights from the Dongjiangkou and Zhashui intrusions, central China. *Lithos*, 2017, 278/279/280/281: 195–214
- [30] Deng Zhengbin, Liu Shuwen, Zhang Wanyi, et al. Petrogenesis of the Guangtoushan granite suite, central China: implications for Early Mesozoic geodynamic evolution of the Qinling Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 2016, 30: 112–131
- [31] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 1995, 36(4): 891–931
- [32] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635–643
- [33] 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. 岩石学报, 2005, 21(3): 959–966
- [34] Zhao Xixi, Coe R S, Gilder S A, et al. Palaeomagnetic constraints on the palaeogeography of China: implications for Gondwanaland. *Journal of the Geological Society of Australia*, 1996, 43(6): 643–672
- [35] Yang Pengtao, Liu Shuwen, Li Qiugen, et al. Chronology and petrogenesis of the Hejiazhuang granitoid pluton and its constraints on the Early Triassic tectonic evolution of the South Qinling Belt. *Sci China Ser D: Earth Sci*, 2014, 57(2): 232–246
- [36] Chen Bin, Jahn B M, Suzuki K. Petrological and Nd-Sr-Os isotopic constraints on the origin of high-Mg adakitic rocks from the North China Craton: tectonic implications. *Geology*, 2013, 41(1): 91–94