

doi: 10.12029/gc20200416

谭人文,王永,陈柏林,石永红,高允,申景辉. 2020.西秦岭何家庄—老虎窑岩体 U-Pb 年龄和成因及其对板块俯冲时间的限定[J]. 中国地质, 47(4):1155-1172.

Tan Renwen, Wang Yong, Chen Bailin, Shi Yonghong, Gao Yun, Shen Jinghui. 2020. U-Pb age and genesis of the Hejiazhuang-Laohuyao intrusion in West Qinling and limitation of plate subduction time[J]. *Geology in China*, 47(4):1155-1172 (in Chinese with English abstract).

西秦岭何家庄—老虎窑岩体 U-Pb 年龄和成因及其对 板块俯冲时间的限定

谭人文^{1,2},王永²,陈柏林²,石永红^{1,2},高允^{1,3},申景辉^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所,古地磁与古构造重建重点实验室,北京 100081;
2. 中国地质大学(北京),北京 100083;3. 中国地质大学(武汉),湖北 武汉 430074)

摘要:何家庄—老虎窑岩体位于勉略缝合带以北,靠近秦岭微板块北部的商丹断裂带西段内部,两者的主体岩性为花岗闪长岩。本文对何家庄—老虎窑岩体进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年和地球化学特征以及 Hf 同位素特征研究。结果表明,西部何家庄附近花岗闪长岩侵位时间为 235~240 Ma,东部老虎窑附近花岗岩侵位时间为 239 Ma,两者均侵位于早三叠世。何家庄—老虎窑岩体花岗闪长岩均为高钾钙碱性系列,表现出强过铝质特征,属于 I 型花岗岩。两者岩浆锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值都是以负值为主,包含一到两个正值,地壳模式年龄为中元古代(1255~1754 Ma),指示它们的源岩有地幔物质的加入,可能是以中元古代古老地壳的部分熔融为主的壳源物质与地幔物质混合的岩浆。且表现出与埃达克质岩相似的地球化学特征,反映其岩浆可能起源于俯冲洋壳在高压环境下部分熔融产生的溶体与由于底侵作用被橄榄岩混染的下地壳部分熔融产生的高钾溶体的岩浆混合。两者的侵位年龄和成因证明了扬子板块与秦岭微板块在 235~240 Ma 的这个期间处于俯冲阶段。

关键词:商丹断裂带;何家庄—老虎窑岩体;锆石 U-Pb 年龄;地球化学;Hf 同位素;西秦岭造山带;地质调查工程
中图分类号:P597.3 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2020)04-1155-18

U-Pb age and genesis of the Hejiazhuang-Laohuyao intrusion in West Qinling and limitation of plate subduction time

TAN Renwen^{1,2}, WANG Yong², CHEN Bailin², SHI Yonghong^{1,2}, GAO Yun^{1,3}, SHEN Jinghui^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*; 2. *China University of Geoscience (Beijing), Beijing 100083, China*; 3. *China University of Geoscience (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China*)

Abstract: The Hejiazhuang-Laohuyao intrusions are located in the north of the Mianlue suture zone, close to the west section of the

收稿日期:2019-11-23;改回日期:2019-12-26

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20160053,DD20190161)、中国地质调查局中央级公益性科研院所基本科研业务费(JYYWF20183702和JYYWF20180602)联合资助。

作者简介:谭人文,男,1996年生,硕士生,构造地质学专业;E-mail:328187562@qq.com。

通讯作者:王永,男,1982年生,高级工程师,主要从事矿床学和地球化学研究;E-mail:wangyong429@163.com。

Shangdan fault zone in the north of the Qinling microplate, and their main lithology is granodiorite. The authors studied the LA-ICP-MS zircon U-Pb ages, geochemical characteristics and Hf isotope characteristics of the Hejiazhuang-Laohuyao intrusions. The results show that the emplacement time of the Hejiazhuang intrusion is 235–240 Ma and that of the Laohuyao intrusions is 239 Ma, suggesting that their emplacement epochs were the early Triassic. The granodiorite in the Hejiazhuang and Laohuyao intrusions are both high-potassium calcareous and alkaline series, showing strong over-aluminum characteristics and belonging to type I granite. The $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of both magmatic zircons are mostly negative and contain one or two positive values. The model age of the crust is Mesoproterozoic (1255–1754 Ma), indicating that their source rocks experienced the addition of mantle materials, which might have been magma mixed with mantle materials dominated by partial melting of Mesoproterozoic ancient crust, showing similar geochemical characteristics to adakian rocks and indicating that the magma might have originated from high potassium solution magma mixing produced by partial melting of subducted oceanic crust under high pressure and partial melting of lower crust contaminated by peridotite due to bottom transgression. The emplacement time and genesis of them indicate that the Yangtze plate and Qinling microplates were subducted during the period of 235–240 Ma.

Key words: Shangdan fault zone; Hejiazhuang-Laohuyao intrusions; zircon U-Pb age; geochemistry; Hf isotope; West Qinling orogenic belt; geological survey engineering

About the first author: TAN Renwen, male, born in 1996, master candidate, majors in structural geology; E-mail: 328187562@qq.com.

About the corresponding author: WANG Yong, male, born in 1982, senior engineer, mainly engages in the study of mineral deposits and geochemistry; E-mail: wangyong429@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20160053, No. DD20190161), and Basic Scientific Research Business Funds of Central Public Welfare Research Institute of China Geological Survey (No. JYYWF20183702 and No. JYYWF20180602).

1 引 言

秦岭造山带是横贯中国东西、分布在华北板块和华南板块之间的中央造山带的重要组成部分。以宝成铁路划分为东、西两段,东部为东秦岭造山带,西部为西秦岭造山带(黄邦毅等,2015)。秦岭造山带中的商南—丹凤断裂带(简称商丹断裂带),是扬子板块与华北板块的缝合带,即南秦岭微陆块的北界。南秦岭位于商丹缝合带和勉略缝合带之间,秦岭造山带尤其是南秦岭构造带中分布了大量的三叠纪花岗岩(图 1a)。自西向东主要有糜署岭岩体、迷坝岩体、光头山岩体、留坝岩体、西坝岩体、华阳岩体、五龙岩体、老城岩体、胭脂坝岩体、东江口岩体、柞水岩体、曹坪岩体和沙河湾岩体等(杨朋涛等,2013)。本文以西秦岭东部商丹断裂带西段南侧的何家庄—老虎窑岩体作为研究对象,通过详细的锆石 U-Pb 同位素定年、岩石学、矿物学和岩石地球化学研究以及 Hf 同位素特征分析,确定岩体形成时代,探索其岩浆演化过程和岩浆源区性质,探讨其构造演化背景,为研究勉略洋的俯冲-闭合时限以及秦岭的构造演化提供重要的参考。

2 区域地质背景及岩相学特征

2.1 区域地质背景

秦岭造山带的形成演化可以概括为 3 个主要的构造演化阶段,分别是新太古代—中元古代造山带基底的形成阶段和新元古代—中三叠世以现代板块构造体制为基本特征的板块构造演化阶段以及中生代陆内造山作用与构造演化。按照张国伟(1997)对秦岭造山带构造单元的划分,分为商丹缝合带、勉略缝合带、华北地块南部带、扬子地块北部带、秦岭微板块五个构造单元。本文研究的对象位于商丹断裂带西段的内部,秦岭微板块北部。何家庄岩体位于陕西凤县西北部,出露面积约 25 km²,空间上整体展布呈发簪状,西边“发簪尾”,东边“尖头”,东西向长约 13 km。紧邻“尖头”北边的老虎窑岩株呈竹叶状,位于老虎窑附近,长约 2 km。何家庄岩体北部侵入到下古生界罗汉寺岩群中,南部侵入到石炭系草凉驿组的石英砂岩中,岩体与白垩纪东河群呈断层接触(图 1b)。

2.2 岩相学特征

何家庄—老虎窑岩体主体岩性为花岗闪长岩

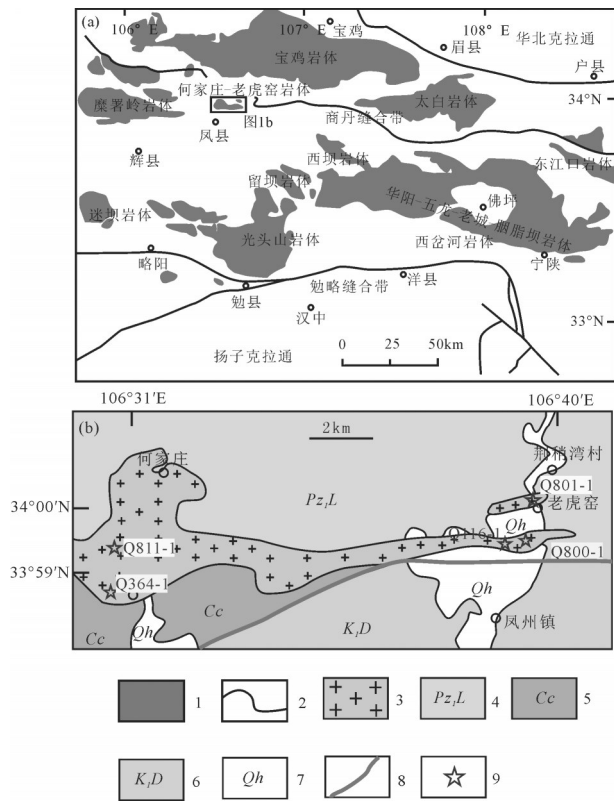


图1 秦岭造山带三叠纪花岗岩分布(a)(据杨朋涛等, 2013)与采样位置简图(b)(据 1:50000 地质图)

1—花岗质侵入体; 2—主要板块边界; 3—花岗岩体; 4—下古生界罗汉寺岩群; 5—石炭系草凉驿组; 6—白垩系东河群; 7—第四系; 8—断层; 9—取样点

Fig.1 Sketch geological map of the Triassic granite distribution in Qinling orogenic belt (after Yang Pengtao et al., 2013) and location of the samples (after 1:50000 geological map)

1—Granitic intrusion; 2—Major plate boundaries; 3—Granite body; 4—Luohansi Rock Group of Lower Paleozoic; 5—Caoliangyi Formation of Carboniferous; 6—Donghe Group of Cretaceous; 7—Quaternary; 8—Fault; 9—Sampling point

(图2a),何家庄岩体中可见与寄主岩石呈截然接触关系的暗色包体(图2b),呈椭圆状或不规则状,包体直径3~50 cm,且岩体中有基性岩脉侵入(图2e、f),老虎窑岩株中也可见基性岩脉。两者中的花岗闪长岩呈灰绿色、浅肉红色(钾化),粗粒花岗结构,块状构造,发育片麻状构造。主要矿物组合为斜长石(35%~40%)、钾长石(20%~25%)、石英(15%~20%)、黑云母(~10%)和少量角闪石,副矿物有锆石、榍石,绿帘石(图2c)。通过镜下观察,斜长石发生了高岭土化,黑云母发生了绿帘石化,且部分斜

长石拥有酸化边(图2d),反映了矿物经历了一期很强的热液蚀变。

3 样品分析方法

锆石的分选工作由河北省廊坊市地质勘探技术服务有限公司完成。采用常规方法将样品粉碎,经人工水淘洗分选出锆石,在实体双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒作为测定对象。将锆石颗粒黏在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后,对其表面进行抛光至锆石内部暴露,然后进行锆石显微照相(反射光和透射光)、阴极发光(CL)图像研究及LA-ICP-MS测试分析。测试点的选取首先根据锆石反射光和透射光显微照片进行初选,再与CL图像反复对比,力求避开内部裂隙和包体以及不同成因的区域,以期获得较准确的年龄信息。锆石U-Pb同位素定年在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室利用LA-ICP-MS分析完成。激光剥蚀系统为Coherent公司生产的193 nm准分子激光系统,ICP-MS为Agilent 7700x电感耦合等离子质谱仪。激光剥蚀过程中采用氦气作载气,由一个T型接头将氦气和氩气混合后进入ICP-MS中。每个采集周期包括大约30 s的空白信号和60 s的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及U-Th-Pb同位素比值和年龄计算)采用软件ICPMSDataCal(Liu et al.,2008a, 2010)完成。U-Pb同位素定年中采用锆石标准91500作外标进行同位素分馏校正,每分析6~8个样品点,分析2次91500。对于与分析时间有关的U-Th-Pb同位素比值漂移,利用91500的变化采用线性内插的方式进行了校正(Liu et al., 2010)。锆石样品的U-Pb年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用IsoplotR(Pieter, 2018)完成。

主、微量元素分析测试在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。主量元素使用X-射线荧光仪(XRF-1500)法测试。微量元素及稀土元素利用酸溶法制备样品,使用ICPMS(Element II)测试,分析精度为:按照GSR-1和GSR-2国家标准,当元素含量大于 10×10^{-6} 时,精度优于5%,当含量小

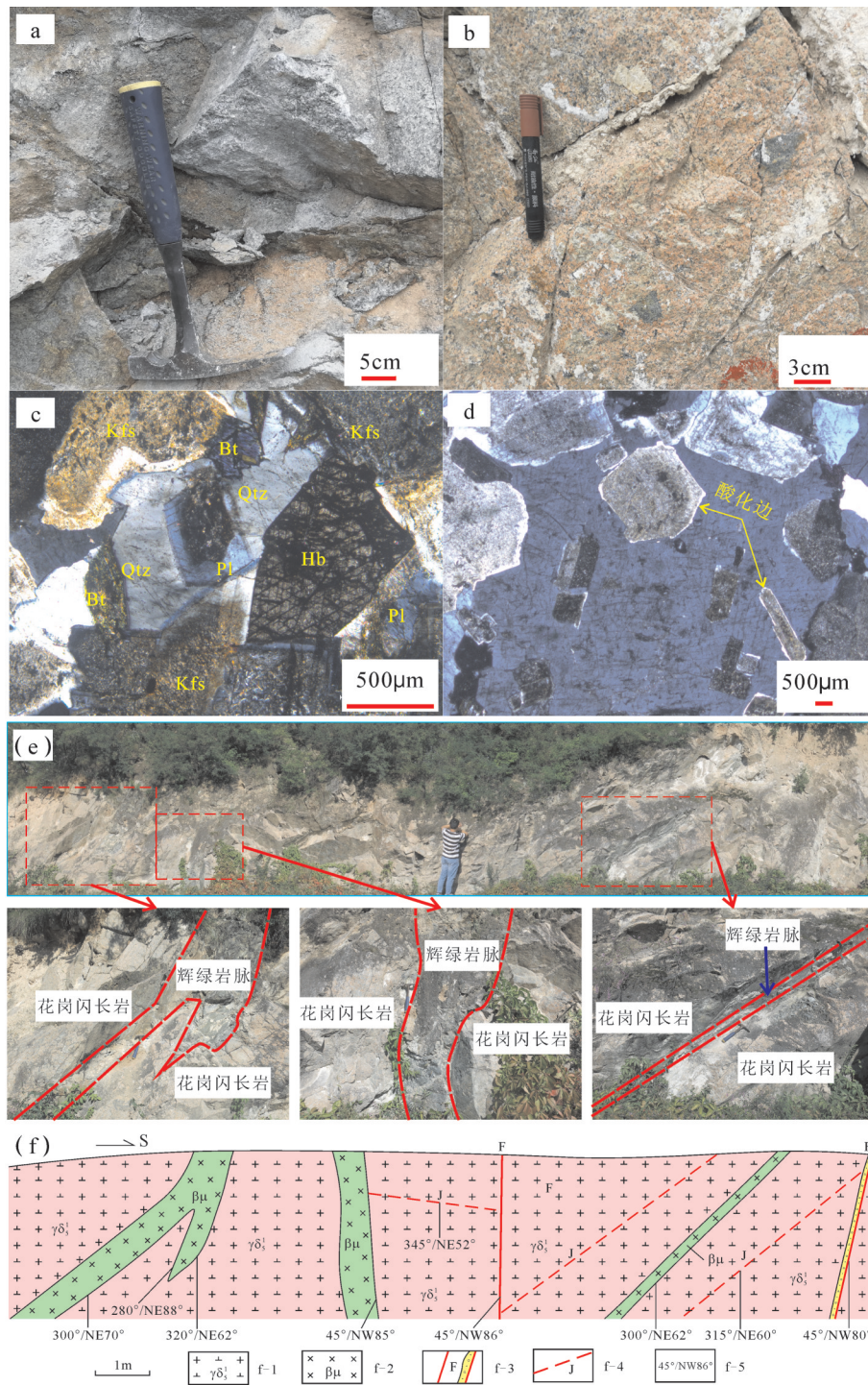


图2何家庄—老虎窑岩体中花岗闪长岩野外照片及代表性显微照片(正交偏光)
 a—花岗闪长岩;b—暗色包裹体;c—镜下矿物组合;d—酸化边;e—基性岩脉;f—基性岩脉剖面图;f-1—花岗闪长岩;
 f-2—基性岩脉;f-3—断层;f-4—节理;f-5—产状

Fig. 2 Field photographs of the granodiorite in the Hejiashuang and Laohuyao intrusions and representative microphotographs (crossed nicols)

a— Granodiorite; b— Dark inclusion; c— Mineral assemblage under the microscope; d— Acidizing edge; e— Basic dike;
 f— Profile of basic dike; f-1—Granodiorite; f-2—Basic dike; f-3—Fault; f-4—Joint; f-5—Attitude

于 10×10^{-6} 时,精度优于10%。

4 分析结果

4.1 LA-ICP-MS 锆石U-Pb测年

本文研究的样品为陕西省凤县北部的花岗闪长岩,野外编号为Q800-1(何家庄岩体)、Q801-1(老虎窑岩株)、Q811-1(何家庄岩体),对其进行LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄研究。对于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄小于1000 Ma的数据,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄进行加权平均计算,继承锆石内核中 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄大于1000 Ma的数据,使用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄计算加权平均值,使用的计算软件为IsoplotR(Pieter, 2018)。3个样品中所含锆石的自形程度均较高,Q800-1样品中锆石多为短柱状,个别为长柱状或板状,锆石颗粒大小不一,粒度多为100~250 μm ,长宽比介于1:1~2:1,它们的Th/U值介于0.10~1.84。Q801-1样品中锆石大部分为长柱状或板状,少部分为短柱状,粒度多为100~300 μm ,长宽比介于1:1~3:1,它们的Th/U值介于0.08~0.77。Q811-1样品中锆石大部分为短柱状,少数为长柱状或板状,粒度多为100~200 μm ,长宽比介于1:1~2:1,它们的Th/U值介于0.06~0.91。阴极发光(CL)图像显示(图3),3个样品几乎所有锆石均发育良好的震荡环带,且几乎所有锆石内保存有继承锆石内核,为典型的岩浆锆石(Hoskin et al., 2003; 吴元保等,2004; 刘明强等,2018)。

对3个样品共71颗锆石的74个点进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素定年分析,分析结果见表1。

样品Q800-1的24个分析点几乎全部落在谐和线上或其附近(图4a,b),根据CL图像(图3a)中锆石形态及表观年龄值,可将分析数据分为3组,第一组包括1个分析点(#28),该组分析点的打点位置为岩浆锆石继承内核,它的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄为506 Ma,显示岩浆源区存在早古生代的壳源物质。第二组包括9个分析点,该组分析点的打点位置为岩浆锆石继承内核,其中5个分析点(#13、#23、#24、#27、#29)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄介于667~981 Ma,其余4个分析点(#21、#22、#25、#26)的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表观年龄介于1343~1758 Ma,显示岩浆源区存在元古宙的壳源物质。第三组包括14个分析点,该组分析点的打

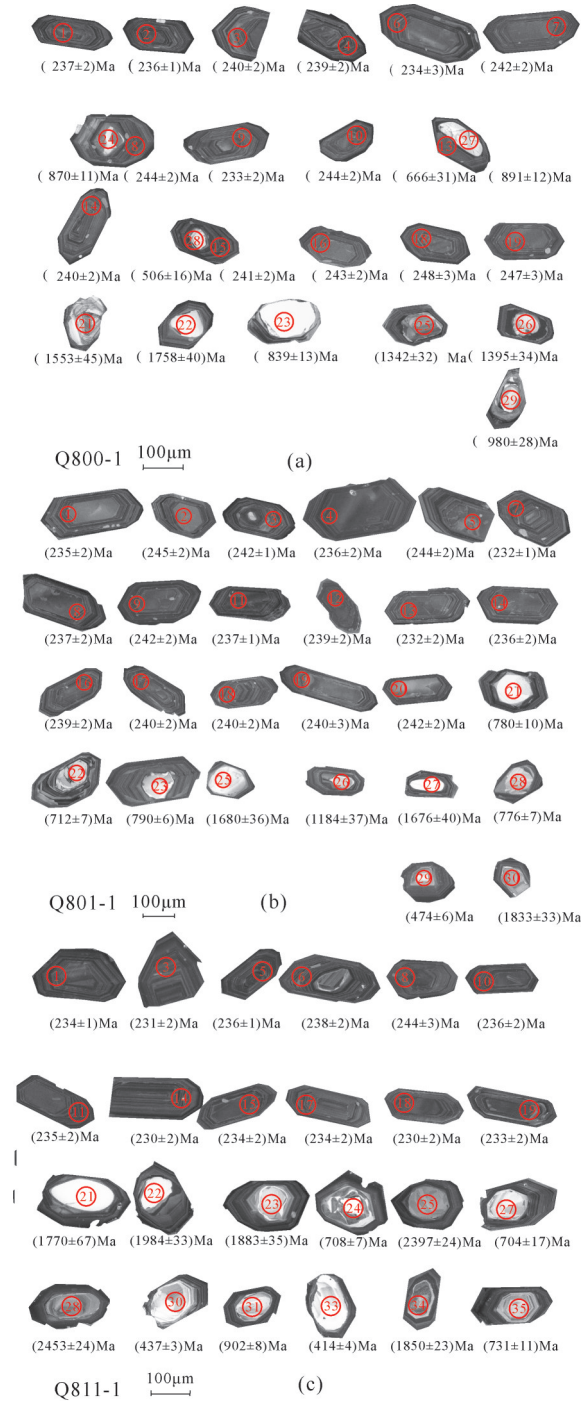


图3 何家庄—老虎窑岩体中花岗闪长岩锆石CL图像和年龄值

a—Q800-1样品锆石CL图像和年龄值;b—Q801-1样品锆石CL图像和年龄值;c—Q811-1样品锆石CL图像和年龄值

Fig. 3 CL images and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of single zircon in the granodiorite in the Hejiazhuang and Laohuyao intrusion

a—CL images and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of sample Q800-1; b—CL images and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of sample Q801-1; c—CL images and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of sample Q811-1

表1 花岗闪长岩LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of the granodiorite

测点编号	元素含量/ 10^{-6}		同位素比值						同位素年龄/Ma						
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
Q800-1-1	412	2102	0.20	0.05549	0.00123	0.29117	0.00789	0.03747	0.00040	432	45	259	6	237	2
Q800-1-2	420	2387	0.18	0.05380	0.00095	0.27849	0.00506	0.03728	0.00030	361	71	249	4	236	2
Q800-1-3	181	1843	0.10	0.04842	0.00087	0.25445	0.00468	0.03795	0.00037	120	43	230	4	240	2
Q800-1-4	329	2241	0.15	0.05004	0.00089	0.26359	0.00509	0.03791	0.00034	198	43	238	4	240	2
Q800-1-6	223	1681	0.13	0.05556	0.00126	0.28695	0.00809	0.03701	0.00049	435	50	256	6	234	3
Q800-1-7	355	2115	0.17	0.04967	0.00091	0.26371	0.00494	0.03826	0.00034	189	10	238	4	242	2
Q800-1-8	293	1938	0.15	0.05256	0.00110	0.28046	0.00566	0.03857	0.00039	309	53	251	4	244	2
Q800-1-9	391	2549	0.15	0.05525	0.00158	0.28603	0.01001	0.03694	0.00044	433	58	255	8	234	3
Q800-1-10	327	2313	0.14	0.04997	0.00097	0.26762	0.00553	0.03859	0.00042	195	46	241	4	244	3
Q800-1-13	239	818.78	0.29	0.06182	0.00152	0.99006	0.06120	0.10892	0.00545	733	54	699	31	666	32
Q800-1-14	369	2176	0.17	0.04997	0.00100	0.26305	0.00532	0.03795	0.00037	195	46	237	4	240	2
Q800-1-15	265	2167	0.12	0.04971	0.00100	0.26330	0.00529	0.03819	0.00039	189	14	237	4	242	2
Q800-1-16	244	1811	0.13	0.05000	0.00108	0.26671	0.00589	0.03845	0.00042	195	50	240	5	243	3
Q800-1-18	213	1712	0.12	0.04822	0.00114	0.26339	0.00684	0.03927	0.00053	109	56	237	6	248	3
Q800-1-19	250	1746	0.14	0.05360	0.00145	0.29193	0.00872	0.03907	0.00052	354	56	260	7	247	3
Q800-1-21	222	438	0.51	0.09627	0.00231	3.29902	0.07888	0.24668	0.00284	1554	46	1481	19	1421	15
Q800-1-22	85	96	0.88	0.10753	0.00268	4.92379	0.12476	0.33032	0.00427	1758	40	1806	21	1840	21
Q800-1-23	41	22	1.84	0.06543	0.00347	1.25577	0.06661	0.13901	0.00239	787	111	826	30	839	14
Q800-1-24	88	620	0.14	0.07080	0.00142	1.41842	0.03173	0.14449	0.00208	952	42	897	13	870	12
Q800-1-25	560	773	0.72	0.08614	0.00147	2.70199	0.04733	0.22580	0.00187	1343	32	1329	13	1312	10
Q800-1-26	219	409	0.54	0.08859	0.00161	2.90300	0.07031	0.23543	0.00367	1395	34	1383	18	1363	19
Q800-1-27	126	252	0.50	0.08170	0.00172	1.66856	0.03668	0.14829	0.00225	1239	41	997	14	891	13
Q800-1-28	111	450	0.25	0.05858	0.00130	0.67138	0.02865	0.08174	0.00279	550	48	522	17	506	17
Q800-1-29	68	703	0.10	0.08198	0.00247	1.98633	0.11160	0.16431	0.00518	1256	59	1111	38	981	29
Q801-1-1	262	2146	0.12	0.05084	0.00108	0.26129	0.00565	0.03719	0.00044	235	50	236	5	235	3
Q801-1-2	246	1464	0.17	0.04957	0.00108	0.26656	0.00608	0.03885	0.00041	176	55	240	5	246	3
Q801-1-3	246	1991	0.12	0.05431	0.00106	0.28781	0.00575	0.03826	0.00030	383	44	257	5	242	2
Q801-1-4	164	1696	0.10	0.04994	0.00098	0.25902	0.00528	0.03743	0.00031	191	46	234	4	237	2
Q801-1-5	86	1043	0.08	0.05247	0.00123	0.28087	0.00670	0.03869	0.00036	306	58	251	5	245	2
Q801-1-7	371	2156	0.17	0.05073	0.00097	0.25813	0.00508	0.03675	0.00031	228	44	233	4	233	2
Q801-1-8	198	1653	0.12	0.05591	0.00107	0.29041	0.00566	0.03756	0.00036	450	47	259	4	238	2
Q801-1-9	285	2045	0.14	0.05158	0.00105	0.27332	0.00554	0.03839	0.00038	333	51	245	4	243	2
Q801-1-11	256	2085	0.12	0.05096	0.00096	0.26524	0.00527	0.03756	0.00031	239	44	239	4	238	2
Q801-1-12	236	1892	0.12	0.05129	0.00097	0.26885	0.00553	0.03778	0.00037	254	44	242	4	239	2
Q801-1-13	234	2071	0.11	0.05128	0.00112	0.26063	0.00610	0.03666	0.00036	254	45	235	5	232	2
Q801-1-14	217	1715	0.13	0.05066	0.00099	0.26237	0.00519	0.03743	0.00033	233	72	237	4	237	2
Q801-1-16	305	2078	0.15	0.05094	0.00101	0.26673	0.00550	0.03785	0.00038	239	46	240	4	240	2
Q801-1-17	309	2085	0.15	0.05946	0.00109	0.31260	0.00570	0.03808	0.00037	583	45	276	4	241	2
Q801-1-18	282	1851	0.15	0.05128	0.00092	0.26897	0.00488	0.03793	0.00033	254	41	242	4	240	2
Q801-1-19	155	1229	0.13	0.05177	0.00125	0.27210	0.00751	0.03793	0.00055	276	56	244	6	240	3
Q801-1-20	282	1832	0.15	0.05310	0.00102	0.28125	0.00530	0.03837	0.00034	332	44	252	4	243	2

续表 1

测点编号	元素含量/ 10^{-6}		同位素比值						同位素年龄/Ma						
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
Q801-1-21	39	95	0.41	0.06832	0.00209	1.21802	0.04025	0.12868	0.00176	880	64	809	18	780	10
Q801-1-22	63	188	0.33	0.07239	0.00180	1.16516	0.02807	0.11693	0.00127	998	55	784	13	713	7
Q801-1-23	175	330	0.53	0.06370	0.00128	1.14908	0.02409	0.13042	0.00116	731	43	777	11	790	7
Q801-1-25	142	189	0.75	0.10309	0.00173	4.39004	0.07633	0.30833	0.00298	1681	36	1710	14	1732	15
Q801-1-26	157	289	0.54	0.07950	0.00150	2.29776	0.06237	0.20742	0.00376	1184	37	1212	19	1215	20
Q801-1-27	39	84	0.46	0.10284	0.00221	4.06576	0.13831	0.28423	0.00749	1676	41	1647	28	1613	38
Q801-1-28	156	203	0.77	0.06654	0.00161	1.17677	0.02932	0.12796	0.00136	833	50	790	14	776	8
Q801-1-29	81	114	0.71	0.05434	0.00246	0.56685	0.02315	0.07642	0.00101	387	102	456	15	475	6
Q801-1-30	87	331	0.26	0.11206	0.00204	5.28332	0.10963	0.34114	0.00446	1833	33	1866	18	1892	21
Q811-1-1	268	1929	0.14	0.04938	0.00092	0.25276	0.00459	0.03700	0.00029	165	44	229	4	234	2
Q811-1-3	322	2192	0.15	0.05270	0.00094	0.26630	0.00490	0.03650	0.00034	317	45	240	4	231	2
Q811-1-5	374	2374	0.16	0.04988	0.00082	0.25830	0.00446	0.03737	0.00031	191	39	233	4	237	2
Q811-1-6	350	2274	0.15	0.05342	0.00096	0.28011	0.00617	0.03761	0.00035	346	41	251	5	238	2
Q811-1-8	354	2582	0.14	0.05694	0.00100	0.30658	0.00768	0.03863	0.00056	500	39	272	6	244	3
Q811-1-10	411	2377	0.17	0.05721	0.00097	0.29728	0.00569	0.03743	0.00036	498	69	264	4	237	2
Q811-1-11	272	2058	0.13	0.05071	0.00095	0.26108	0.00527	0.03716	0.00039	228	75	236	4	235	2
Q811-1-14	231	1861	0.12	0.05020	0.00100	0.25301	0.00525	0.03641	0.00036	211	42	229	4	231	2
Q811-1-15	283	2039	0.14	0.05822	0.00121	0.29861	0.00636	0.03702	0.00036	539	42	265	5	234	2
Q811-1-17	305	1921	0.16	0.04991	0.00094	0.25582	0.00512	0.03700	0.00037	191	44	231	4	234	2
Q811-1-18	268	2261	0.12	0.05017	0.00088	0.25354	0.00490	0.03644	0.00037	211	41	229	4	231	2
Q811-1-19	321	2210	0.15	0.05334	0.00105	0.27352	0.00611	0.03693	0.00038	343	44	246	5	234	2
Q811-1-21	17	25	0.68	0.10823	0.00403	3.85439	0.13853	0.25938	0.00384	1770	67	1604	29	1487	20
Q811-1-22	34	94	0.36	0.12193	0.00229	5.04623	0.09660	0.29908	0.00303	1985	33	1827	16	1687	15
Q811-1-23	89	158	0.57	0.11511	0.00194	5.02592	0.09071	0.31540	0.00352	1883	36	1824	15	1767	17
Q811-1-24	31	525	0.06	0.06147	0.00107	0.98853	0.01886	0.11611	0.00135	657	38	698	10	708	8
Q811-1-25	69	217	0.32	0.15464	0.00219	9.77021	0.14115	0.45563	0.00346	2398	24	2413	13	2420	15
Q811-1-27	137	310	0.44	0.06850	0.00151	1.08601	0.03388	0.11542	0.00303	883	44	747	16	704	17
Q811-1-28	518	943	0.55	0.15967	0.00233	9.36080	0.14582	0.42248	0.00368	2454	25	2374	14	2272	17
Q811-1-30	382	422	0.91	0.05748	0.00138	0.55790	0.01286	0.07017	0.00064	509	52	450	8	437	4
Q811-1-31	7	220	0.03	0.06828	0.00143	1.42225	0.03044	0.15026	0.00143	876	44	898	13	902	8
Q811-1-33	153	201	0.76	0.05607	0.00185	0.51373	0.01665	0.06637	0.00079	454	69	421	11	414	5
Q811-1-34	168	269	0.63	0.11313	0.00173	5.14138	0.08296	0.32757	0.00293	1850	23	1843	14	1827	14
Q811-1-35	99	249	0.40	0.06445	0.00137	1.07176	0.02750	0.12007	0.00203	767	245	740	13	731	12

点位置是岩浆锆石震荡环带,它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄介于234~248 Ma,获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(240.3\pm 0.65)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.6$),这一年龄代表了花岗闪长质岩浆的结晶年龄。

样品801-1的26个分析点几乎全部落在谐和线上或其附近(图4c、d),根据CL图像(图3b)中锆石形态及表观年龄值,可将分析数据分为四组,第一组包括8个分析点,该组分析点的打点位置为岩浆锆石继承内核,其中4个分析点(#21、#22、#23、#28)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄介于713~790 Ma,另外4个分析点(#25、#26、#27、#30)的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表观年龄介于1184~1833 Ma,暗示岩浆源区存在中、新元古代的

壳源物质。第二组包括1个分析点(#29),打点位置为继承内核,它的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄为475 Ma,暗示岩浆源区存在早古生代的壳源物质。第三组包括6个分析点(#2、#5、#11、#12、#13、#20),打点位置也是岩浆锆石继承内核,它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄介于232~246 Ma,较结晶年龄稍早,表明源岩可能是早期同源岩浆结晶后重熔后的物质,发生了岩浆脉动结晶。第四组包括剩余的11个分析点,打点位置为岩浆锆石的震荡环带,它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄介于233~243 Ma,获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(238.5\pm 0.58)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=5.3$)。

样品Q811-1的24个分析点几乎全部落在谐和

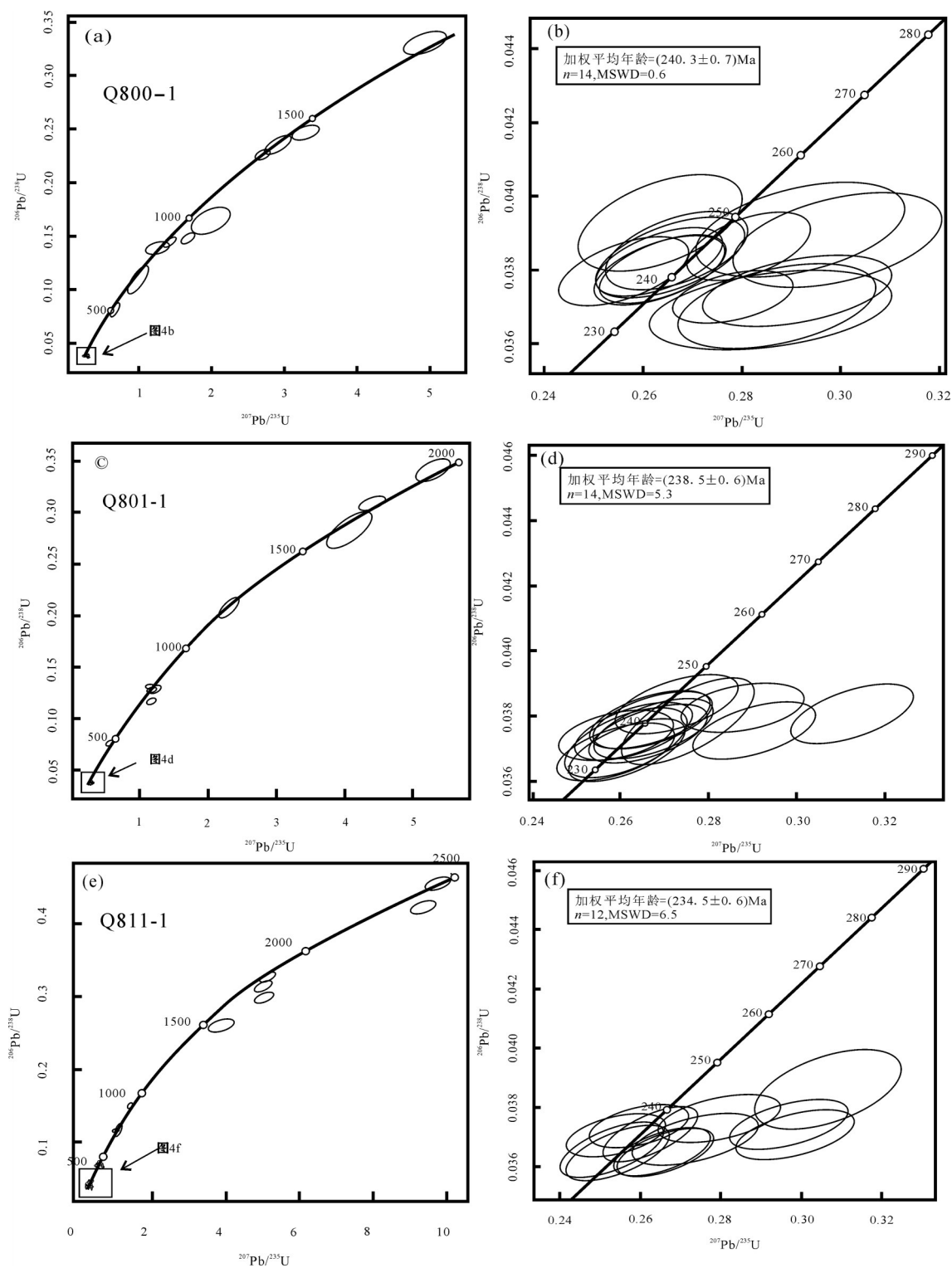


图4 花岗岩长岩样品(Q800-1)、(Q801-1)、(Q811-1)LA-ICPMS 锆石U-Pb谐和年龄图
 Fig. 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram of granodiorite(Q800-1), (Q801-1), (Q811-1)

线上或其附近(图4e、f),根据CL图像(图3c)中锆石形态及表观年龄值,可将分析数据分为3组,第一组包括2个分析点(#30、#33),该组分析点的打点位置为岩浆锆石继承内核,它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄分别为437 Ma、414 Ma,显示岩浆源区存在早古生代的壳源物质。第二组包括10个分析点,该组分析点的打点位置是岩浆锆石继承内核,其中4个分析点(#24、#27、#31、#35)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄介于704~902 Ma,其余6个分析点(#21、#22、#23、#25、#28、#34)的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表观年龄介于1770~2454 Ma,显示岩浆源区存在元古宙的壳源物质。第三组包括12个分析点,该组分析点的打点位置是岩浆锆石震荡环带,它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄介于231~244 Ma,获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (234.5 ± 0.64) Ma(MSWD=6.5)。三者结晶年龄的加权平均值在误差之内基本一致。

4.2 主量元素

从本文研究的5个中生代花岗岩体样品主量元素氧化物含量(表2)可知, SiO_2 含量为66.47%~69.41%,平均值为67.64%。在岩浆岩/火山岩系统全碱-硅(TAS)分类图(图5a)中5个样品基本落在花岗闪长岩区域内,与野外及岩相学鉴定结果基本一致。 Al_2O_3 含量偏高,含量介于15.02%~15.91%,平均值为15.38%。 $\text{A/CNK}(\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}))$ 分子比在1.48~1.70变化,平均值为1.57>1.10,为铝饱和花岗岩,在 $\text{A/NK}(\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}))$ 分子比)对 A/CNK 图(图5b)中均分布与过铝质范围内,表现为强过铝质特征。全碱含量($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)为7.16%~7.87%,平均值为7.65%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值在0.71~1.10变化。在 SiO_2 - K_2O 图中,全部落在高钾钙碱性系列中(图5c)。

4.3 稀土元素

样品的稀土总量较高, ΣREE 在 89.71×10^{-6} ~ 119.07×10^{-6} (表2),平均值为 104.63×10^{-6} , δEu (均值0.92)和 δCe (均值0.97)均呈弱负异常。 LREE/HREE 平均值为17.79, La_N/Yb_N 普遍大于15(25.11~35.73),平均值为30.01。 LREE 和 HREE 之间分异很强,轻稀土元素强烈富集,重稀土元素较为平坦,在球粒陨石标准化的稀土配分模式图中表现为强烈的右倾型稀土配分模式(图6b)。

表2 何家庄—老虎窑岩体中花岗闪长岩主量(%)和微量元素(10^{-6})分析结果

Table 2 Analytical results of major (%) and trace element (10^{-6}) of the granodiorite in the Hejiashuang-Laohuyao intrusions

样品号	Q116-1	Q346-1	Q800-1	Q801-1	Q811-1
SiO_2	69.41	67.30	66.47	66.80	68.21
Al_2O_3	15.02	15.91	15.45	15.10	15.41
CaO	1.00	2.83	2.68	2.31	2.17
TFe_2O_3	2.50	2.34	2.60	2.71	2.54
FeO	2.03	2.12	1.90	1.98	1.69
K_2O	3.51	2.97	3.68	4.12	3.36
MgO	1.79	1.58	1.77	1.71	1.41
MnO	0.02	0.04	0.05	0.04	0.04
Na_2O	4.33	4.19	4.05	3.75	4.30
P_2O_5	0.11	0.12	0.11	0.11	0.12
TiO_2	0.40	0.44	0.41	0.42	0.43
LOI	2.12	1.65	2.53	2.33	1.91
TOTAL	97.62	97.50	96.57	96.34	97.14
A/CNK	1.70	1.59	0.65	1.48	1.57
$\text{Mg}^\#$	56.07	54.54	54.80	52.91	49.71
Li	39.60	62.00	45.40	24.70	48.80
Be	3.04	3.22	3.52	2.49	3.81
Sc	4.50	5.11	5.28	4.94	4.53
V	32.60	31.90	36.60	32.90	27.30
Cr	52.30	53.60	58.20	50.40	33.80
Mn	134.00	288.00	337.00	271.00	290.00
Co	6.28	7.32	6.97	6.85	5.63
Ni	20.70	16.00	21.20	17.50	11.70
Cu	2.10	3.94	2.87	2.95	2.34
Zn	68.60	65.80	72.40	80.80	95.80
Ga	21.70	24.70	23.10	20.70	23.60
As	2.13	2.46	3.61	1.57	1.21
Mo	0.15	0.26	0.45	0.60	0.14
Sb	0.64	0.53	0.49	0.44	0.14
Cs	2.63	5.79	2.15	2.20	2.95
Ta	0.33	0.55	0.48	0.39	0.52
W	0.75	1.73	1.61	0.99	0.93
Tl	0.73	0.51	0.59	0.66	0.61
Pb	28.60	34.40	36.10	42.00	44.00
Bi	0.11	0.18	0.07	0.08	0.09
Ti	2338.00	2673.00	2457.00	2372.00	2645.00
Zr	146.00	145.00	148.00	134.00	165.00
Hf	4.20	4.60	4.27	3.75	4.82
Sr	297.00	529.00	680.00	387.00	557.00
Rb	135.00	92.20	105.00	109.00	102.00
Ba	892.00	925.00	1330.00	1467.00	1274.00
Th	9.88	13.30	11.50	10.80	12.50
U	2.83	3.11	3.32	2.51	2.55
Nb	6.36	7.77	6.27	5.76	7.11
La	22.50	28.30	23.80	27.40	21.50
Ce	40.70	51.30	46.50	51.40	42.00
Pr	4.32	5.77	4.99	5.21	4.84
Nd	14.80	21.50	18.20	19.70	19.20
Sm	2.49	4.41	3.11	3.13	3.52
Eu	0.78	0.98	0.90	0.76	0.85
Gd	1.66	2.71	2.23	2.06	2.40
Tb	0.22	0.34	0.31	0.33	0.35
Dy	0.97	1.77	1.46	1.43	1.62
Ho	0.17	0.29	0.28	0.24	0.26
Er	0.48	0.83	0.74	0.60	0.64
Tm	0.07	0.10	0.10	0.09	0.10
Yb	0.48	0.67	0.68	0.55	0.61
Lu	0.07	0.10	0.10	0.08	0.09
Y	5.03	8.44	7.55	6.39	7.74
ΣREE	89.71	119.07	109.57	118.66	105.00
δEu	1.10	0.80	1.00	0.86	0.85
La_N/Yb_N	41.69	32.90	29.46	32.28	34.49

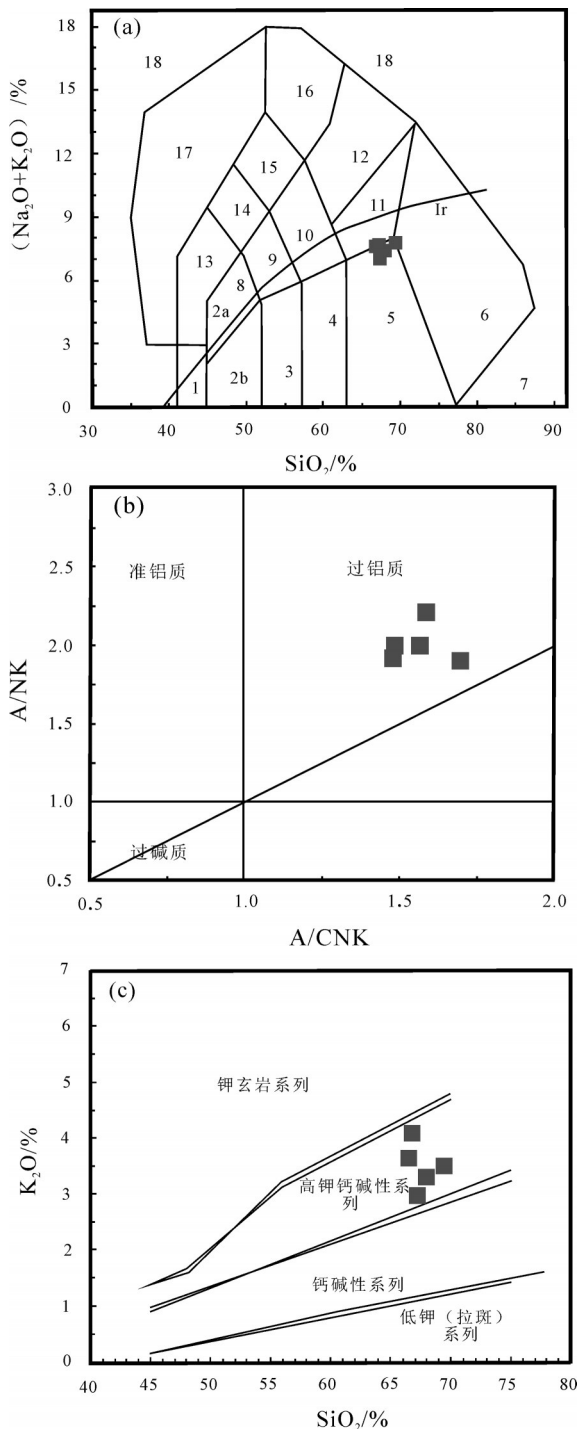


图5 岩浆岩全碱-硅(TAS)图(a)、A/CNK-ANK图解(b)和SiO₂-K₂O图解(c)

a—全碱-硅(TAS)图; b—A/CNK-ANK图解; c—SiO₂-K₂O图解
 Fig. 5 TAS classification (a), A/ CNK- ANK(b) and SiO₂-K₂O(c) diagrams of igneous or volcanic rock system
 a-TAS classification diagram; b- A/ CNK- ANK diagram; c- SiO₂-K₂O₂ diagram

4.4 微量元素

样品的微量元素分析结果列于表(1),微量元素蛛网图(图6a)显示总体表现出略右倾型式,富集大离子亲石元素(LILE)Rb、Ba、Sr,产热元素Th、U,以及高场强元素Zr、Hf,显著亏损Nb、P、Ti,指示源区存在含钛矿物(金红石)的结晶分离作用,说明花岗闪长岩具有典型下地壳来源特征,形成于与俯冲作用有关的构造环境,应为弧岩浆岩。

4.5 Hf同位素

对样品Q800-1、Q801-1、Q811-1进行锆石U-Pb同位素测年的同时,还进行了锆石原位Hf同位素测试分析,测点的位置都是在锆石U-Pb年龄分析点原位或其附近,具体的分析数据见表3。

花岗闪长岩样品Q800-1、Q801-1、Q811-1分别有15、17、15个分析点,Q800-1中有4个打点位置为继承内核的分析点(#7、#11、#14、#15),其¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值明显过低,均为无效分析,没有参与讨论。Q801-1中有5个打点位置为继承内核的分析点(#12、#14、#15、#16、#17)的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值明显过低,有1个打点位置为继承内核的分析点(#4)¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf值异常高,均为无效分析,没有参与讨论。Q811-1中有6个打点位置为继承内核的分析点(#1、#3、#4、#8、#12、#15)的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值明显过低,均为无效分析,没有参与讨论,其相关数据均见表3。3个样品中除去无效分析,剩余分析点锆石¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf值变化范围在0.000447~0.000975,均小于0.002,表明了锆石形成后具有很低的放射性成因Hf积累,所测的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf值可以代表锆石结晶时候岩浆体系的Hf同位素组成。三者锆石¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf值范围为0.017729~0.051019,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值范围在0.282267~0.282749,对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 范围为-7.562840~3.461166,二阶段模式年龄 T_{DM2} 集中在1255~1754 Ma。

在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解(图7a)和(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)- t 图解(图7b)中,3个样品投点均是大部分位于下地壳和球粒陨石之间的区域,有个别落入球粒陨石区域,显示了源岩来自于下地壳壳源物质,且有少量幔源物质加入。由于锆石Lu-Hf同位素体系具有较高的封闭温度,后期岩石的部分熔融和结晶分离不会影响Hf同位素的比值,锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值代表岩浆源区的成分特征,正值通常代表源区为亏损地幔或者是从亏损地幔中增生的年轻地壳,负值通常代表源区为古老地

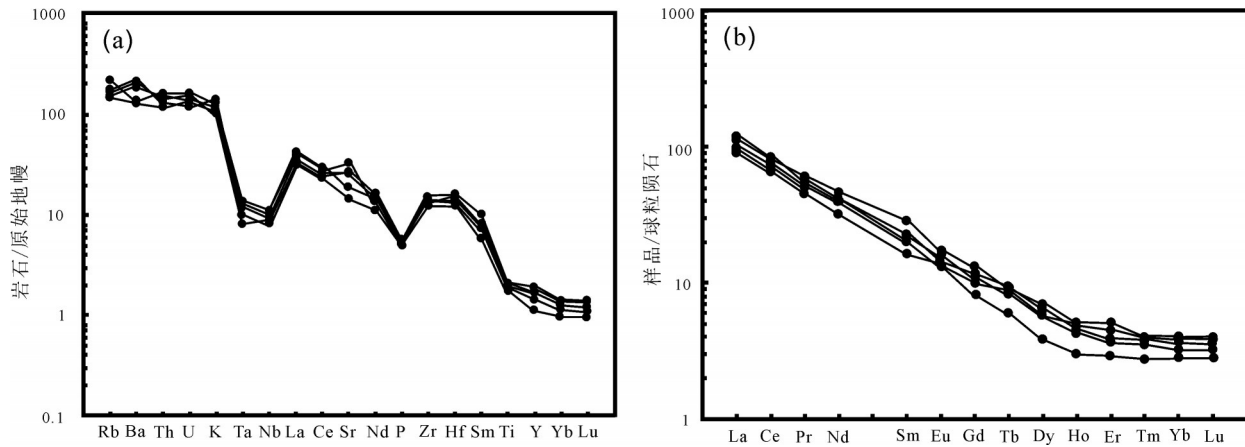


图6 何家庄—老虎窑岩体中花岗闪长岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土配分模式图(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.6 Primitive mantle-normalized trace element spidergram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of the granodiorite in the Hejiazhuang and Laohuyao intrusions (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

表3 花岗闪长岩锆石 Hf 同位素组成

Table 3 Zircon Hf isotopic compositions of the granodiorite

测点号	Age/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	f_{LwHf}
Q800-1-1	237	0.034353	0.000042	0.000805	0.000001	0.282529	0.000015	-3.50	1018	1492	-0.98
Q800-1-2	236	0.038995	0.000062	0.000975	0.000003	0.282566	0.000014	-2.28	972	1413	-0.97
Q800-1-3	240	0.032536	0.000092	0.000749	0.000002	0.282557	0.000012	-2.46	978	1428	-0.98
Q800-1-4	240	0.033919	0.000082	0.000739	0.000002	0.282571	0.000012	-1.96	958	1396	-0.98
Q800-1-5	234	0.033424	0.000035	0.000752	0.000001	0.282575	0.000010	-1.95	953	1391	-0.98
Q800-1-6	242	0.036117	0.000140	0.000844	0.000005	0.282582	0.000012	-1.53	945	1370	-0.97
Q800-1-9	244	0.023336	0.000067	0.000520	0.000002	0.282561	0.000013	-2.18	966	1413	-0.98
Q800-1-10	234	0.036798	0.000093	0.000838	0.000003	0.282615	0.000014	-0.56	899	1302	-0.97
Q800-1-12	507	0.035354	0.000078	0.000837	0.000002	0.282562	0.000012	3.46	973	1255	-0.97
Q801-1-1	235	0.029454	0.000230	0.000660	0.000005	0.282583	0.000012	-1.63	940	1371	-0.98
Q801-1-2	246	0.039462	0.000100	0.000946	0.000002	0.282542	0.000015	-2.91	1005	1460	-0.97
Q801-1-5	713	0.017729	0.000150	0.000447	0.000003	0.282371	0.000011	1.32	1228	1548	-0.99
Q801-1-6	237	0.028922	0.000075	0.000638	0.000002	0.282543	0.000013	-3.00	995	1460	-0.98
Q801-1-7	245	0.028782	0.000340	0.000700	0.000008	0.282581	0.000012	-1.50	944	1370	-0.98
Q801-1-8	233	0.030452	0.000110	0.000694	0.000002	0.282556	0.000012	-2.63	977	1433	-0.98
Q801-1-9	238	0.029183	0.000063	0.000679	0.000001	0.282578	0.000011	-1.75	947	1380	-0.98
Q801-1-10	243	0.037075	0.000270	0.000826	0.000008	0.282563	0.000010	-2.19	971	1413	-0.98
Q801-1-11	234	0.033132	0.000067	0.000783	0.000002	0.282525	0.000012	-3.73	1024	1504	-0.98
Q801-1-13	239	0.032445	0.000170	0.000803	0.000004	0.282561	0.000010	-2.33	973	1419	-0.98
Q811-1-2	234	0.031495	0.000029	0.000699	0.000001	0.282552	0.000013	-2.74	983	1441	-0.98
Q811-1-5	708	0.051019	0.000041	0.001200	0.000001	0.282347	0.000013	0.02	1286	1626	-0.96
Q811-1-6	238	0.029144	0.000076	0.000661	0.000002	0.282504	0.000012	-4.35	1049	1546	-0.98
Q811-1-7	237	0.039000	0.000290	0.000922	0.000008	0.282617	0.000014	-0.42	898	1295	-0.97
Q811-1-9	244	0.032032	0.000110	0.000738	0.000002	0.282410	0.000013	-7.56	1182	1754	-0.98
Q811-1-10	237	0.034563	0.000076	0.000875	0.000001	0.282584	0.000015	-1.59	943	1370	-0.97
Q811-1-11	235	0.036021	0.000053	0.000832	0.000001	0.282557	0.000015	-2.56	980	1430	-0.97
Q811-1-13	231	0.027882	0.000049	0.000622	0.000001	0.282543	0.000013	-3.14	995	1464	-0.98
Q811-1-14	234	0.032545	0.000097	0.000721	0.000002	0.282516	0.000013	-4.03	1034	1523	-0.98

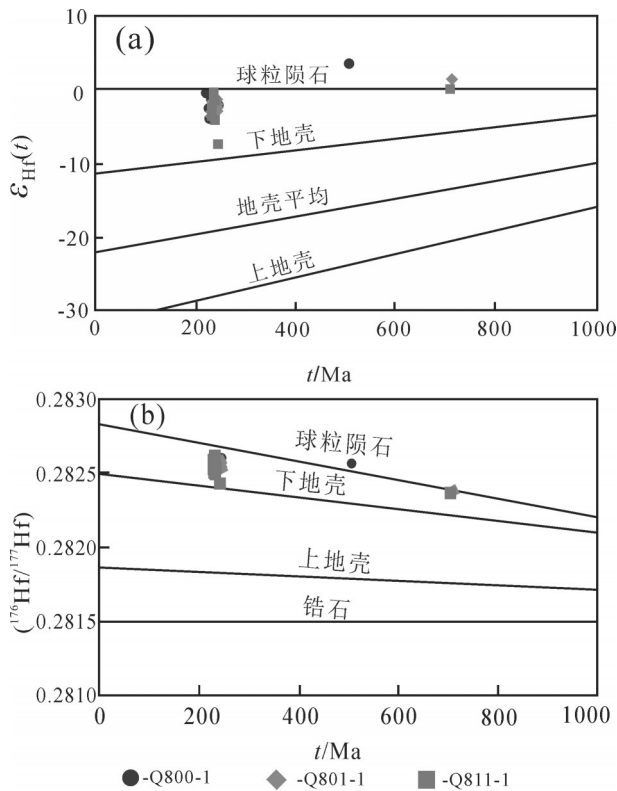


图7 何家庄—老虎窑岩体中花岗闪长岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ (a)和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})-t$ (b)图解(据袁永盛等,2018)

Fig.7 Diagrams of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ (a) and $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})-t$ (b) for the granodiorite in the Hejiazhuang and Laohuyao intrusions (after Yuan Yongsheng et al., 2018)

壳(吴福元等,2007)。3个花岗闪长岩样品所有有效分析点的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值都是以负值为主,包含一到两个正值,地壳模式年龄为中元古代(1255~1754 Ma),指示它们的源岩有地幔物质的加入(王钊飞等,2019),可能是以中元古代古老地壳的部分熔融为主的壳源物质与地幔物质混合的岩浆。

5 讨 论

5.1 成岩年代

秦岭地区出露了大量早中生代花岗岩侵入体,这些花岗岩侵入体年龄大部分集中在225~200 Ma(杨朋涛等,2013);张成立等(2008)认为秦岭早中生代这个年龄段的花岗岩体的产出特征、岩石类型、地球化学特征以及与煌斑岩脉和基性岩脉的组合一致表明,这些花岗岩体侵位于后碰撞构造环境,是中国南北两大陆块早中生代碰撞的响应,代表了后碰撞不同演化阶段的产物。王晓霞等

(2015)将秦岭早中生代花岗质岩浆作用分为早期(250~235 Ma)和晚期(235~185 Ma)两个阶段,且将整个早中生代花岗质岩浆作用的构造环境解释为形成于勉略洋俯冲到闭合—扬子克拉通与秦岭地块碰撞环境。李佐臣等(2013)对位于西秦岭地区勉略缝合带北侧的糜署岭岩体进行测年,糜署岭岩体的结晶年龄为 $(214.5 \pm 1.6)\text{Ma}$,金维浚等(2005)对位于夏河—礼县一带的冶力关和夏河岩体进行了SHRIMP测年,分别侵位与 $(245 \pm 6)\text{Ma}$ 和 $(238 \pm 4)\text{Ma}$ 。雷敏等(2010)对秦岭造山带东部的沙河湾岩体、柞水岩体、东江口岩体进行了测年,年龄结果分别为 $(228.4 \pm 1.4)\text{Ma}$ 、 $(230.6 \pm 2.7)\text{Ma}$ 、 $(242.3 \pm 2.5)\text{Ma}$ 。本文对研究区出露的何家庄—老虎窑岩体进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb测年,其侵位年龄分别为235~240 Ma和239 Ma,成岩年龄均为早三叠世,属于早中生代早期勉略洋俯冲构造环境的花岗质岩浆作用。

5.2 花岗岩成因类型

花岗岩分类被较多关注的主要是国际地科联的矿物学-岩石学分类和I-S-M-A分类,后者在反映岩浆源区信息以及指示特征构造环境方面作用明显,成为目前最常用的花岗岩成因分类方案(吴福元等,2007)。结合主、微量元素特征,在 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解(图8a)中除了Q801-1落入A型花岗岩范围内,其余全部落入I型花岗岩区域内,在 SiO_2-Y 图解(图8b)中,花岗闪长岩全部落入I型花岗岩区域内,王德滋等(1993)认为Sr和Ca有相似的地球化学行为,Sr富集于成熟度低、演化不充分的地壳中。因此,Rb/Sr比值能灵敏地记录源区物质的性质,当 $\text{Rb}/\text{Sr} > 0.9$ 时,为S型花岗岩; $\text{Rb}/\text{Sr} < 0.9$ 时,为I型花岗岩,本文所有样品的Rb/Sr值介于0.15~0.45,均小于0.9,因此,本文研究的花岗闪长岩属于I型花岗岩。

石榴子石强烈富集HREE,而角闪石相对更富集中稀土(MREE)(秦江峰等,2007),当石榴子石为主要残留相时,熔体表现为HREE的强烈亏损,这时 $\text{Y}/\text{Yb} > 10$, $(\text{Ho}/\text{Yb})_{\text{N}} > 1.2$ (葛小月等,2002)。本文所研究的花岗岩相关的地球化学参数为: $\text{Y}/\text{Yb}=10.48\sim 12.69$,平均值为11.70(> 10), $(\text{Ho}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.06\sim 1.30$,平均值为1.24(> 1.20)(图8a),这暗示了本区花岗岩残留相可能主要为石榴子石。当源区压力小于1.0 GPa(相当于地壳30 km),熔融残留物中会

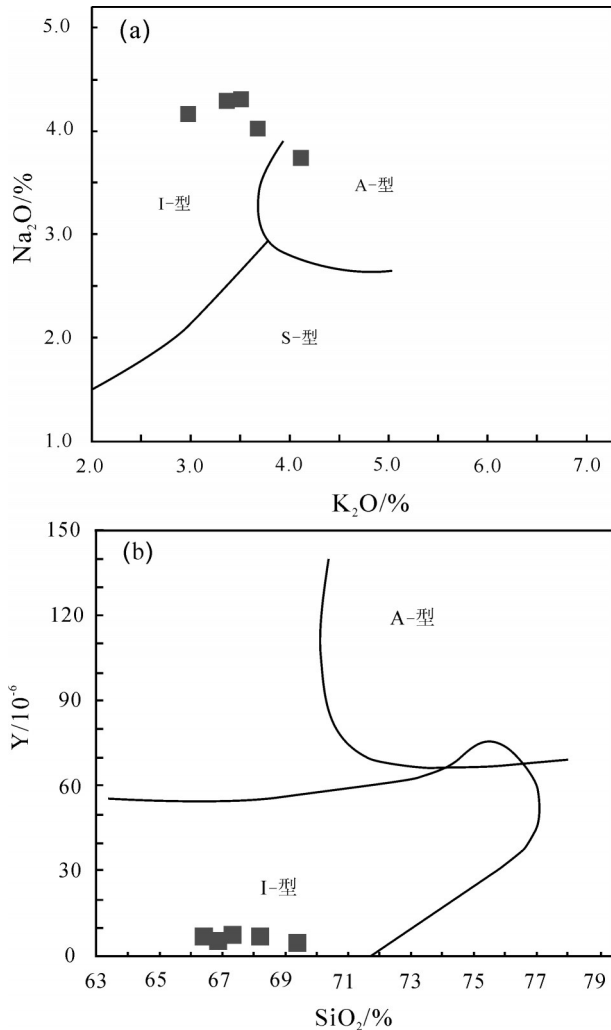


图8 K_2O-Na_2O 图解(a)、岩石系列 SiO_2-Y 图解(b) (据 collis et al., 1982)

Fig. 8 K_2O-Na_2O diagram (a), SiO_2-Y diagram (b) (after collis et al., 1982)

有较多的斜长石;当源区压力大于1.0 GPa时,熔融残留物中将会出现石榴子石,当压力大于1.2 GPa(相当于地壳40 km)熔体才能够与残留石榴子石平衡,并呈现强烈亏损的HREE和Y元素特征(陈绍聪等,2018),暗示了源岩形成深度较大。

Rb/Sr值介于0.15~0.45,均值为0.25,远小于0.9,非常接近大陆壳的平均值(0.24)(李玉静等,2018),表明花岗闪长岩的源岩来自于陆壳物质。稀土元素配分图中(图8a),Zr、Hf的相对富集和Nb、Ta、Ti的亏损表明岩浆源区岩石中以陆壳组分为主(Barth et al., 2000)。Nb亏损同时还伴随着Nb/Ta比值下降,Nb/Ta比值较低(13.06~19.27,平

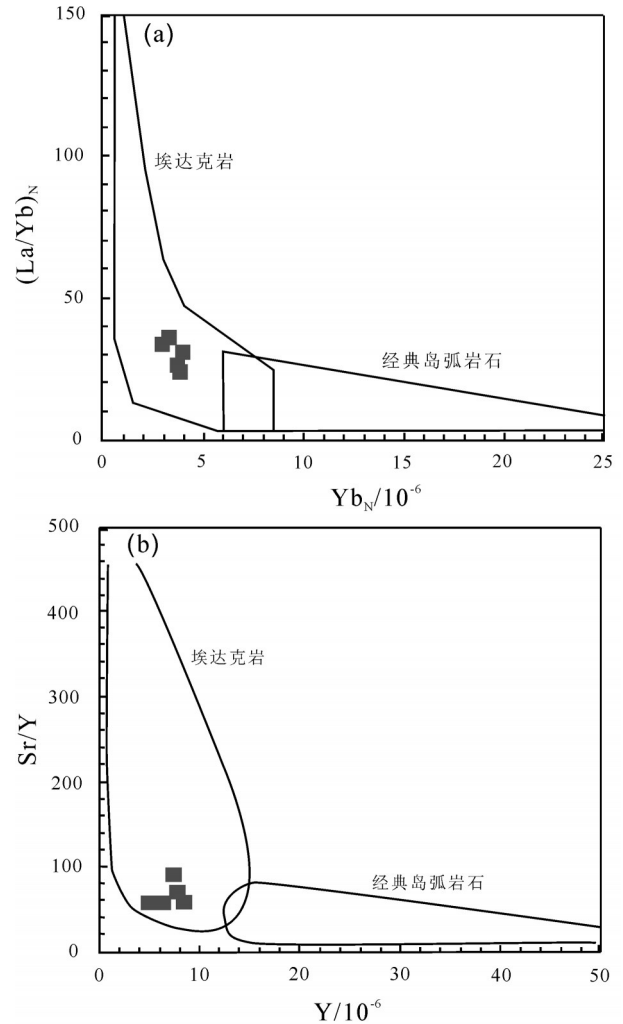


图9 $Yb_N-(La/Yb)_N$ 图解(a)与Y-Sr/Y图解(b)

Fig.9 $Yb_N-(La/Yb)_N$ (a) and Y-Sr/Y(b) diagrams

均值为14.98),与地壳值(Nb/Ta=11~17.5, Barth et al., 2000)接近,且Zr/Hf值介于31.52~35.73,平均值为34.18,与地壳值(Zr/Hf=33)接近,Th/U值介于3.46~4.90,平均值为4.09,与地壳平均值3.8接近(李玉静等,2018),以上均表明了花岗闪长岩的源岩来自于陆壳物质。

花岗闪长岩的 SiO_2 和 Al_2O_3 质量分数较大,且富 Na_2O ,Sr/Y值介于59.05~90.07,平均值为68.86, $(La/Yb)_N$ 值介于25.11~35.73,平均值为30.01。表现出与埃达克质岩相似的地球化学特征(赵院冬等,2018),但是 K_2O/Na_2O 值(0.71~1.10)明显高于典型埃达克质岩。在 $(La/Yb)_N-Yb_N$ 和Sr/Y-Y图解中(图9a,b),这些花岗闪长岩的样品全部落入埃达克岩范

围内。

目前研究认为埃达克质岩岩浆的物质来源和成因模式主要有4种:①年轻俯冲洋壳的部分熔融;②玄武质岩浆的地壳混染与分离结晶过程(巨银娟等,2018);③增厚玄武质下地壳的脱水熔融(张旗等,2001);④拆沉下地壳的熔融(秦江峰等,2007)。在区分不同成因埃达克质岩的 SiO_2 - MgO 图解(图10a)中,这些花岗岩样品比较集中,有3个样品落入拆沉地壳熔融成因区域,有两个样品落入俯冲洋壳熔融成因区域,在 SiO_2 - $\text{Mg}^\#$ 图解(图10b)中,样品全部落入俯冲洋壳成因区域,接近于被橄榄岩混染的下地壳熔融成因区域,吴福元等(2007)认为活动大陆边缘的背景下,弧后的扩张使地幔发生部分熔融造成岩浆底侵作用,而正是持续不断的底侵作用又使早期的底侵物质发生部分熔融而形成花岗岩,这对岛弧和活动大陆边缘环境下I型花岗岩的形成可能有一定的普适性。岩浆可能起源于俯冲洋壳在高压环境下部分熔融产生的溶体与由于底侵作用被橄榄岩混染的下地壳部分熔融产生的高钾溶体的岩浆混合。

5.3 构造环境

在Y-Nb图解(图11a)上,数据点落入火山弧花岗岩(VAG)和同碰撞花岗岩(Syn-COLG)范围内,在 $(\text{Yb}+\text{Ta})$ -Rb和 $(\text{Y}+\text{Nb})$ -Rb图解(图11b、c)上,数据点落入火山弧花岗岩(VAG)区域内,在 $\text{Rb}/30$ - Hf - $\text{Ta} \times 3$ 判别图解(图11d)上投点落入火山岛弧范围内。在中酸性火山岩的 Ta/Yb - Th/Yb 构造环境判别图解(图12)中,花岗岩落入活动大陆边缘范围内,金维俊等(2005)通过对西秦岭夏河岩体和冶力关岩体的研究,认为西秦岭印支早期的埃达克质岩石形成于活动大陆边缘环境。且根据埃达克质岩石成因图解(图10a、b),本文研究的花岗闪长岩部分落入俯冲洋壳熔融区域,也表明本研究区的花岗闪长岩形成于俯冲环境。

印支期西秦岭构造演化总体处于沿勉略带俯冲、碰撞背景之下,但对于勉略洋盆闭合和陆陆碰撞结束时限仍存在争议。一部分学者则认为245~210 Ma时期,勉略带处于向北俯冲阶段,至~210 Ma,洋盆闭合,扬子板块与南秦岭微地体发生碰撞;也有学者认为勉略洋盆在早三叠世开始俯冲,向同碰撞的转换时限为~220 Ma,而于~210 Ma向碰撞后

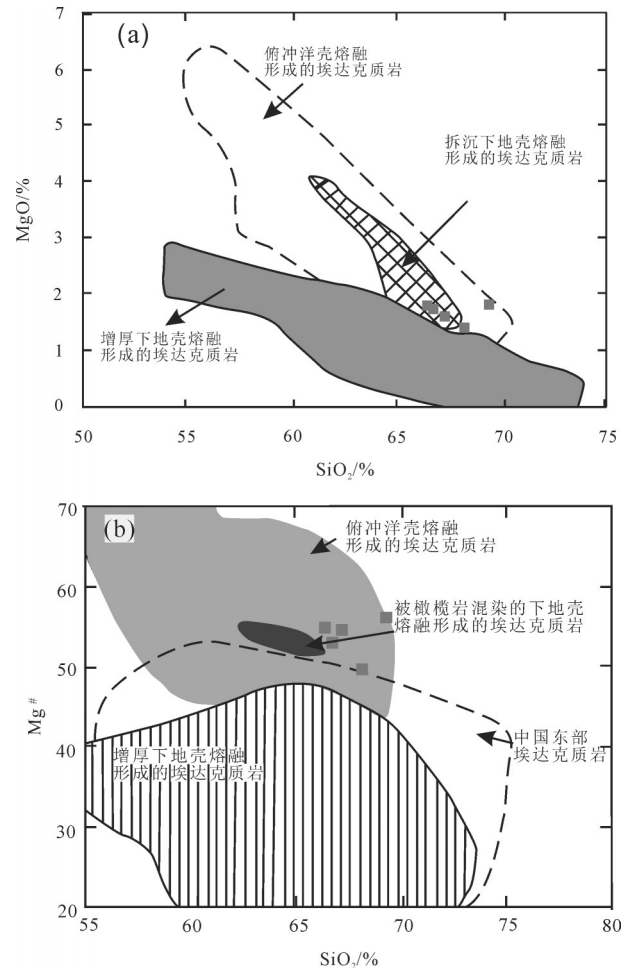


图10何家庄—老虎窑岩体中花岗闪长岩 SiO_2 - MgO 图(a)、 SiO_2 - $\text{Mg}^\#$ 图9(b)(据武广等,2008)
Fig. 10 SiO_2 - MgO (a), SiO_2 - $\text{Mg}^\#$ (b) diagrams for the granodiorite in the Hejiazhuang and Laohuyao intrusions (after Wu Guang et al., 2008)

转换(刘树文等,2011;杨朋涛等,2013)。早—中三叠世全面俯冲阶段,根据地球化学方法确定洋盆宽度及扩张速率,计算得出小洋盆扩张结束时间大致为早三叠世前,而且,早三叠世的地层中尚未见报道深海硅质岩、放射虫等存在。从武都—勉县一带,由于与俯冲相关的片岩Sm-Nd年龄为 (242 ± 21) Ma、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为220~230 Ma,代表了俯冲作用导致的变质年龄(李曙光等,1996),故全面俯冲在早三叠世早期便发生了(李三忠等,2002)。

在大别地区陆壳物质高压变质时限为246~244 Ma(Ames et al.,1993,1996;Li et al.,1993),一致认为同碰撞至少发生在245 Ma左右(郑永飞,2008),大别山到秦岭有一定的距离,从大别山地区的点碰撞

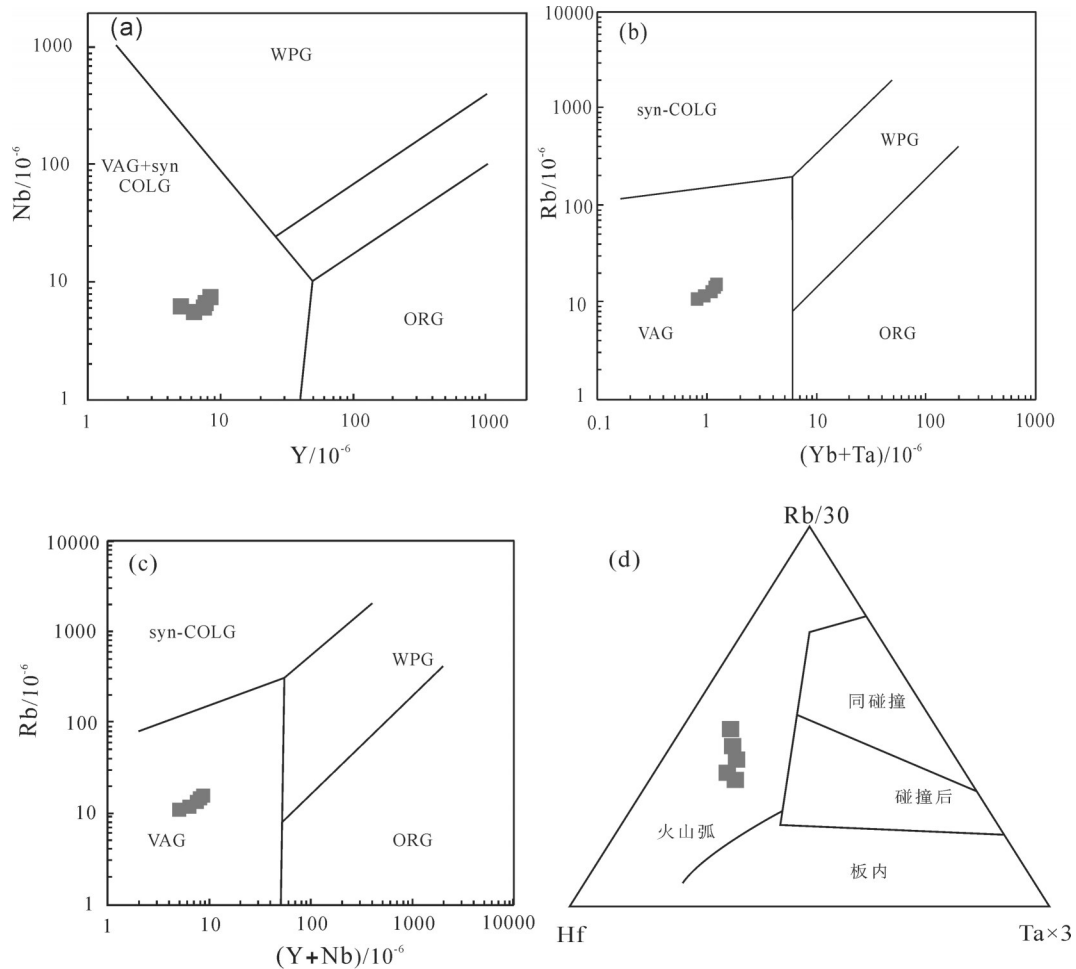


图 11 花岗岩体微量元素构造环境判别图

a—Nb—Y 图解; b—Rb—(Yb+Ta) 图解; c—Rb—(Y+Nb) 图解; d—Rb/30—Hf—Ta×3 图解; WPG—板内花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; Syn—COLG—同碰撞花岗岩; ORG—洋脊花岗岩

Fig. 11 Diagrams of the tectonic setting of trace elements for granodiorite

a—Nb—Y diagram; b—Rb—(Yb+Ta) diagram; c—Rb—(Y+Nb) diagram; d—Rb/30—Hf—Ta×3 diagram; WPG— Intraplate granite; VAG— Volcanic arc granite; Syn—COLG— Cocolliding granite; ORG— Ridge granite

(在大别山)到秦岭的剪刀状全面碰撞的时间会有很大差别,因此,沿勉略带的碰撞峰期时间也应该晚于 245 Ma,而且有证据显示勉略带的碰撞峰期时间在 242~221 Ma,且主要在中三叠世 234~227 Ma(王晓霞等, 2015)。本文研究的花岗闪长岩年龄为 235~240 Ma,早于勉略带的碰撞期,应该是勉略带向秦岭微板块之下俯冲的时期,所以花岗闪长岩应该是形成于俯冲环境。

吴福元等(2007)认为拉张情况下,压力的降低非常有利于岩石的熔融;同时,地壳的拉张减薄还可伴随深部软流圈地幔的上涌和幔源岩浆的底侵作用,从而使地壳加热而进一步发生部分熔融,花岗岩主要是在拉张环境中形成,挤压环境下形成的

花岗岩可能非常有限。在俯冲带,花岗岩的形成多是与其上方的拉张和底侵作用有关。金性春(1990)根据弧后区的应力状态及其他特征,上田诚也等划出了智利(高应力型)和马里亚纳型(低应力型)俯冲带,智利型俯冲带弧后区的构造应力是挤压,马里亚纳型俯冲带弧后区正在活跃扩张,俯冲带通常较陡,上覆板块与俯冲板块之间耦合不紧,张应力还见于火山弧和弧前区。石炭纪开始,由于秦岭微板块与华北板块沿商丹带开始对接碰撞,导致秦岭微地块向北运移速率小于勉略洋盆向北扩张速率,洋盆扩张受阻,同时随着深部地幔动力作用减弱,洋盆于 C₁ 开始向北俯冲闭合(李亚林等, 2002)。早石炭世至晚二叠世,勉略洋出现扩

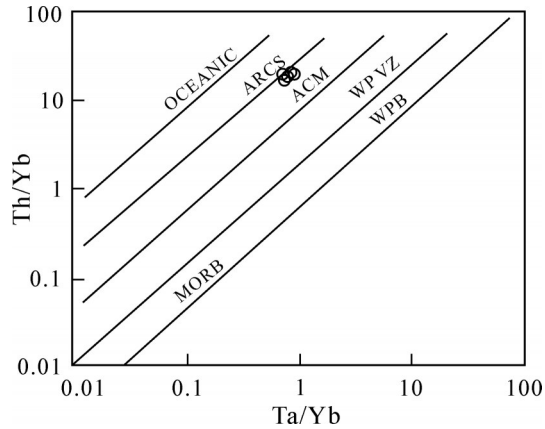


图12 Th/Yb-Ta/Yb图解(据李佐臣等,2013)

OCEANIC ARCS—大洋岛弧; ACM—活动大陆边缘; WPVZ—板内火山岩带; WPB—板内玄武岩; MORB—大洋中脊玄武岩

Fig. 12 Th/Yb - Ta/Yb diagrams (after Li Zuochen et al., 2013)

OCEANIC ARCS - Oceanic island arc; ACM- Active continental margin; WPVZ- Intraplate volcanic zone; WPB- Intraplate basalt; MORB- Mid-ocean ridge basalt

张与俯冲并存的构造格局(李三忠等,2002)。早三叠世之前洋盆扩张结束,到了早三叠世发生全面俯冲,板块的俯冲速率肯定加大,且勉略洋在泥盆纪打开,至早三叠世洋壳存在了 > 100 Ma,上覆板块的后退与俯冲板块的加速对于一个弧后扩张幕的开始是必需的。当俯冲板块年龄大于 80 Ma 时,汇聚速率急剧增加可导致弧后扩张发生(金性春,1990),秦岭微板块作为上覆板块有向北后退的活动和勉略洋壳年龄超过 100 Ma,以及勉略洋壳在早三叠世的俯冲加速均表明勉略带应该就是低应力型的马里亚纳俯冲带,本文研究的花岗岩位于秦岭微板块(南秦岭)北部,扬子板块向北俯冲于秦岭微板块之下的阶段,属于弧后拉张区域,表明了本文研究的花岗闪长岩形成于俯冲环境下。

6 结 论

通过对何家庄—老虎窑岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地质和地球化学特征及其构造环境的详细研究,得出如下结论:

(1) 西秦岭地区何家庄岩体花岗闪长岩侵位时间为 235~240 Ma,老虎窑岩株侵位时间为 239 Ma,两者均侵位于早三叠世。

(2) 何家庄—老虎窑岩体花岗闪长岩均为高钾钙碱性系列,表现出强过铝质特征,属于 I 型花岗

岩。3 个花岗闪长岩样品地壳模式年龄为中元古代(1255~1754 Ma),指示它们的源岩有地幔物质的加入,可能是以中元古代古老地壳的部分熔融为主的壳源物质与地幔物质混合的岩浆,起源于俯冲洋壳在高压环境下部分熔融产生的溶体与由于底侵作用被橄榄岩混染的下地壳部分熔融产生的高钾溶体的岩浆混合。

(3) 何家庄—老虎窑岩体的测年结果和地化特征及 Hf 同位素显示,该岩体是由同一源区不同期次的岩浆活动形成的,侵位于早三叠世扬子板块向秦岭微板块俯冲的构造环境下,证明了扬子板块与秦岭微板块在 235~240 Ma 的这个期间处于俯冲阶段,为勉略洋早三叠世构造演化提供了精细数据支持。

致谢:感谢江万老师在薄片观察上的指导,感谢陈安东、李季霖师兄的帮助。

References

- Ames L, Tilton G R, Zhou G. 1993. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U- Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites[J]. *Geology*, 21: 339-342.
- Ames L, Zhou G Z, Xiong B C. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China[J]. *Tectonics*, 15: 472-489.
- Barth M G, McDougough W F, Rudnick R L. 2000. Tracking the budget of Nb and Ta in the Continental crust[J]. *Chemical Geology*, 165: 197-213.
- Chen Shaocong, Wang Yitian, Hu Qiaoqing, Zhang Juan, Wang Ruiting, Wang Changan, Liu Xielu, Ouyang Sheng. 2018. Genetic type and geochronology of the granodiorite porphyry dikes in the Fengtai ore concentration area, west Qinling orogen, and their geological significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(1): 14-26 (in Chinese with English abstract).
- Ge Xiaoyue, Li Xianhua, Chen Zhigang, Li Wuping. 2002. Geochemical characteristics and genesis of middle-acid igneous rocks with high Sr and low Y type in yanshanian in eastern China: Constraints on crustal thickness in eastern China[J]. *Geological Bulletin of China*, (6): 474-480 (in Chinese with English abstract).
- Hoskin P, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Rev. Mineral Geochem.*, 53: 27-62.
- Huang Bangyi, Wang Long, Xin Yujia, Qin Gan. 2015. Geochemistry of adakitic rocks and Cu-Au mineralization in the Tianzishan Region, west Qinling orogenic belt[J]. *Southern Metals*, (5): 13-16 (in Chinese with English abstract).
- Jin Weijun, Zhang Qi, He Dengfa, Jia Xiuqin. 2005. SHRIMP dating

- of adakites in western Qinling and their implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3):959–966(in Chinese with English abstract).
- Jin Xingchun. 1990. Subduction process and its relationship with tectogenetic cycle[J]. *Marine Science Bulletin*, (2):77–83(in Chinese with English abstract).
- Ju Yinjuan, Wang Xingying, Zhang Zezhong. Late Triassic monzogranite and its mafic enclaves from the chajiazhuang pluton in Tianshui area, Western Qinling Mountains: Petrogenesis and magmatic mixing[J]. *Geology and Resources*, 27(1): 41–47(in Chinese with English abstract).
- Lei Min. 2010. Petrogenesis of Granites and their Relation to Tectonic Evolution of Orogen in the East Part of Qinling Orogenic Belt[D]. Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- Li Sanzhong, Zhang Guowei, Li Yalin, Lai Shaocong, Li Zonghui. 2002. Deformation and orogeny of the Mian–Lue suture zone in the Qinling orogenic belt[J]. *Acta Geological Sinica*, (4):469–483(in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang, Sun Weidong, Zhang Guowei, Chen Jiayi, Yang Yongchen. 1996. Chronology and geochemistry of metavolcanic rocks from Heigouxia valley in the Mian–Lue tectonic zone, South Qinling—Evidence for a Paleozoic oceanic basin and its close time[J]. *Science in China*, (3): 223–230(in Chinese).
- Li S G, Xiao Y L, Liu D L. 1993. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes[J]. *Chem. Geol.*, 109: 89–111.
- Li Yalin, Li Sanzhong, Zhang Guowei. 2002. Composition of the Mianlue suture zone and its relation with the evolution of the old oceanic basin[J]. *Geology in China*, (2):129–134(in Chinese with English abstract).
- Li Yujing, Wang Yufang, Xu Guoxin, Li Zhibin, Qi Yunfei, Sun Jinlong, Zhao Bingang, Zhang Bo, Yue Yue. 2018. Geochronology, geochemical characteristics in the Fenshuiling complex in the East Hebei Province and its significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92 (9) :1904–1917(in Chinese with English abstract).
- Li Zuochen, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Pei Lei, Hu Bo, Liu Chengjun, Chen Guochao, Chen Youxin. 2013. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating, geochemistry of the Mishuling intrusion in western Qinling and their tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8): 2617–2634(in Chinese with English abstract).
- Liu Mingqiang, Zhu Yongxin. 2018. Zircon LA–ICP–MS U–Pb dating of the porphyritic monzonitic granite from Southwest Hongyanjing in Beishan Area, Gansu Province and its significance[J]. *Northwestern Geology*, 51(1):23–33(in Chinese with English abstract).
- Liu Shuwen, Yang Pengtao, Li Qiugen, Wang Zongqi, Zhang Wanyi, Wang Wei. 2011. Indosinian granitic magmatism and orogenic processes in the middle Qinling Mountains[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(6): 1928–1943 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA–ICP–MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257: 34–43.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing. 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.
- Pieter Vermeesch. 2018. Isoplot R: A free and open toolbox for geochronology[J]. *Geoscience Frontiers*, 9(5):1479–1493.
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Li Yongfeng. 2007. Genesis of the Indosinian Guangtoushan adakitic biotite plagiogranite in the Mianxian–Lueyang (Mianlue) suture, South Qinling, China, and its tectonic implications[J]. *Geological Bulletin of China*, (4):466–471(in Chinese with English abstract).
- Sun S S, Mc Donough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J. (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. London: Geological Society Special Publication, 42 (1): 313–345.
- Wang Dezi, Liu Changshi. 1993. The contrast between Tonglu I–type and Xiangshan S–type clastoporphyritic lava[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(1) : 44–54(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Zhang Chengli. 2015. The granitic magmatism and orogenic belt evolution of the Qinling orogenic belt[J]. *Science in China:Earth Science*, 45(8):1109–1125(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhaofei, Sui Qinglin, He Yongkang. 2019. Geochronology, geochemistry and Hf isotopic compositions of the granodiorite in the Shazigou copper deposit, West Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 52(3):90–110(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (6) : 1217–1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu Guang, Chen Yanjing, Sun Fengyue, Li Jingchun, Li Zhitong, Wang Xijin. 2008. Geochemistry of the Late Jurassic granitoids in the northern end area of Da Hinggan Mountains and their geological and prospecting implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4):899–910.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. The research of zircon genetic mineralogy and its limitations on U–Pb age interpretation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49:1589–1604 (in Chinese).
- Yang Pengtao, Liu Shuwen, Li Qiugen, Wang Zongqi, Zhang Fan, Wang Wei. 2013. Chronology and petrogenesis of the Hejiazhuang granitoid pluton and its constraints on the Early Triassic tectonic evolution of the South Qinling Belt[J]. *Science China:Earth Sciences*, 57(2): 232–246(in Chinese with English abstract).
- Yao Huijiang, Guo Dongjin, Shi Yongliao, Qing Zhou, Peng Zhao.

2010. Geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic constraints on the origin of late Triassic granitoids from the Qinling orogeny, central China: Implications for a continental arc to continent–continent collision[J]. *Lithos*, 117: 183–197.
- Yuan Yongsheng, Liu Sheng, Nan Zhenglu, Zhan Huasi. 2018. Zircon U–Pb dating, Hf isotope characteristics and geological significance of the Yong'an pluton in southeastern Guangxi[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(6):869–883 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Wang Tao, Wang Xiaoxia. 2008. Origin and tectonic setting of the early Mesozoic granitoids in Qinling orogenic belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, (3):304–316 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Yao Anping. 1997. The crustal compositions, structures and tectonic evolution of the Qinling orogenic belt[J]. *Geology of Shaanxi*, (2):1–14 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing. 2001. The characteristics and tectonic–metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2):236–244 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuandong, Che Jiying, Xu Fengming, Zhu Qun, Wang Kuiliang. 2018. Late Jurassic adakitic granites in northeastern Xing'an block: Geochronology and geochemical characteristics and tectonic significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(6):240–253 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈绍聪, 王义天, 胡乔青, 张娟, 王瑞廷, 王长安, 刘协鲁, 欧阳升. 2018. 西秦岭凤太矿集区花岗闪长斑岩脉的成因类型和年龄及其地质意义[J]. *地球学报*, 39(1):14–26.
- 葛小月, 李献华, 陈志刚, 李伍平. 2002. 中国东部燕山期高Sr低Y型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约[J]. *科学通报*, (6):474–480.
- 黄邦毅, 汪龙, 辛宇佳, 覃敢. 2015. 西秦岭造山带天子山埃达克岩地球化学特征及Cu–Au成矿[J]. *南方金属*, (5):13–16.
- 金维浚, 张旗, 何登发, 贾秀勤. 2005. 西秦岭埃达克岩的SHRIMP定年及其构造意义[J]. *岩石学报*, (3):959–966.
- 金性春. 1990. 俯冲作用及其与构造旋回的关系[J]. *海洋通报*, (2):77–83.
- 巨银娟, 王邢颖, 张泽中. 2018. 西秦岭天水地区晚三叠世柴家庄二长花岗岩及其暗色包体地球化学——岩石成因及岩浆混合作用[J]. *地质与资源*, 27(1):41–47.
- 雷敏. 2010. 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]. 北京: 中国地质科学院.
- 李三忠, 张国伟, 李亚林, 赖绍聪, 李宗会. 2002. 秦岭造山带勉略缝合带构造变形与造山过程[J]. *地质学报*, (4):469–483.
- 李曙光, 孙卫东, 张国伟, 陈家义, 杨永成. 1996. 南秦岭勉略构造带黑沟峡变质火山岩的年代学和地球化学——古生代洋盆及其闭合时代的证据[J]. *中国科学*, (3):223–230.
- 李亚林, 李三忠, 张国伟. 2002. 秦岭勉略缝合带组成与古洋盆演化[J]. *中国地质*, (2):129–134.
- 李玉静, 王玉芳, 徐国新, 李智斌, 齐云飞, 孙金龙, 赵丙刚, 张勃, 越悦. 2018. 冀东分水岭岩体锆石U–Pb年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *地质学报*, 92(9):1904–1917.
- 李佐臣, 裴先治, 李瑞保, 裴磊, 胡波, 刘成军, 陈国超, 陈有圻. 2013. 西秦岭糜署岭花岗岩体年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 29(8):2617–2634.
- 刘明强, 朱永新. 2018. 甘肃北山红岩井西南似斑状二长花岗岩LA–ICP–MS锆石U–Pb定年及其地质意义[J]. *西北地质*, 51(1):23–33.
- 刘树文, 杨朋涛, 李秋根, 王宗起, 张万益, 王伟. 2011. 秦岭中段印支期花岗质岩浆作用与造山过程[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(6):1928–1943.
- 秦江锋, 赖绍聪, 李永飞. 2007. 南秦岭勉县—略阳缝合带印支期光头山埃达克质花岗岩的成因及其地质意义[J]. *地质通报*, (4):466–471.
- 王德滋, 刘昌实. 1993. 桐庐I型和相山S型两类碎斑岩对比[J]. *岩石学报*, 9(1):44–54.
- 王晓霞, 王涛, 张成立. 2015. 秦岭造山带花岗质岩浆作用与造山带演化[J]. *中国科学:地球科学*, 45(8):1109–1125.
- 王钊飞, 隋清霖, 贺永康. 2019. 西昆仑沙子沟铜矿区花岗闪长岩年代学、地球化学及Hf同位素特征[J]. *西北地质*, 52(3):90–110.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, (6):1217–1238.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对U–Pb年龄解释的制约. *科学通报*, 49:1589–1604.
- 武广, 陈衍景, 孙丰月, 李景春, 李之彤, 王希今. 2008. 大兴安岭北端晚侏罗世花岗岩类地球化学及其地质和找矿意义[J]. *岩石学报*, 24(4):899–910.
- 杨朋涛, 刘树文, 李秋根, 王宗起, 张帆, 王伟. 2013. 何家庄岩体的年龄和成因及其对南秦岭早三叠世构造演化的制约[J]. *中国科学:地球科学*, 43(11):1874–1892.
- 袁永盛, 刘胜, 南争路, 詹华思. 2018. 桂东南永安岩体锆石U–Pb测年、Hf同位素特征及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 37(6):869–883.
- 张成立, 王涛, 王晓霞. 2008. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境[J]. *高校地质学报*, (3):304–316.
- 张国伟, 董云鹏, 姚安平. 1997. 秦岭造山带基本组成与结构及其构造演化[J]. *陕西地质*, (2):1–14.
- 张旗, 王焰, 钱青. 2001. 中国东部埃达克岩的特征及其构造成矿意义[J]. *岩石学报*, 17(2):236–244.
- 赵院冬, 车继英, 许逢明, 朱群, 王奎良. 2018. 兴安地块东北部晚侏罗世C型埃达克质花岗岩年代学、地球化学特征及构造环境意义[J]. *地学前缘*, 25(6):240–253.