

地球深部真的贫铀钍吗?

——来自秦岭造山带加里东期岩浆岩体锆石铀钍含量的讨论

伍皓¹⁾, 李小刚²⁾, 吴晨³⁾, 夏彧¹⁾, 周恩恩¹⁾, 熊国庆¹⁾, 姚雪婷²⁾



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

1) 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都, 610081;

2) 重庆科技学院复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室, 重庆, 401331;

3) 中国科学院青藏高原研究所青藏高原地球系统科学国家重点实验室, 北京, 100101

内容提要:为尝试利用锆石来初步探索地球内部铀、钍的丰度,通过搜集秦岭造山带加里东期岩浆岩体锆石U-Th-Pb同位素测年文献,掌握了3件超基性岩、52件基性岩、46件中性岩、90件酸性岩,共计191件样品,6979个(铀含量数据3552个,钍含量数据3427个)锆石定年数据。数据分析指示铀和钍在同一类型岩浆岩锆石中含量均相差悬殊,可在不同类型岩浆岩锆石中富集或亏损,不具有从超基性岩到基性岩到中性岩再到酸性岩总体增加的趋势。在所有样品锆石铀、钍平均值2倍以上的45件高富集样品中的34件呈现“局部长期”分布的特征,表现为:10件在451.0~422.1 Ma期间的以OIB型基性、中基性岩为主的样品约29 Ma时间集中产出在南秦岭大巴山地区,岩浆多来自HIMU, EMII和EMI三个富集地幔端元组分混合而成的复杂地幔区;24件在495.9~413.6 Ma期间的以I型、S-I型酸性岩为主的样品约82 Ma时间集中产出于北秦岭商丹(商南—丹凤)地区,岩浆可来自地幔、壳幔混合和地壳源区。结合华南金属铀(0价)的发现等前人研究成果初步分析认为,加里东期大巴山和商丹地区可能分别存在地幔柱和大陆型热点,地核中大量铀、钍沿地幔柱和大陆型热点上升致使地幔和地壳局部熔体中铀、钍长期富集,其超高含量可能被熔体中锆石结晶部分记录,这一元素迁移过程可能是两区域产出高锆石铀、钍含量样品和商丹地区生成铀矿的主要原因。支持铀、钍可在地核和地幔柱富集的认识。

关键词:秦岭造山带;加里东期岩浆岩体;锆石铀、钍含量;地核;地幔柱;大陆型热点

1954年,挪威地球化学家戈尔德施密特(Goldschmidt)根据化学元素在陨石各相和冶金过程产物的分布情况,结合他自己提出的地球模型,将元素区分为亲铁、亲铜、亲石、亲气和亲生物五类。铀和钍与氧的亲合力强,易熔于硅酸盐熔体中,主要分布在硅酸盐相的地幔和地壳中,被归为亲石性元素(戈尔德施密特,1959)。随后几十年,地球化学家们主要采用陨石类比法、地球模型和陨石类比法、地球物理类比法等方法计算出铀和钍在地球各圈层的丰度,得出铀、钍于地壳富集,于地幔、地核亏损的一致认识(沃依特克维奇,1958;黎彤,1976;Taylor and McLennan, 1985;赵振华,2016),最新研究也估算出地核中铀、钍含量可以忽略不计(Faure et al., 2020)。Turekian和Wedepohl(1961)、维诺格拉多夫(Vinogradov, 1962)分析了铀、钍在各类岩浆岩中

的含量,指出铀、钍含量从超基性岩到基性岩到中性岩到酸性岩具有总体升高的趋势。岩浆岩中锆石铀、钍含量一般被认为也是随着岩石基性程度降低而明显地增高(郑懋公和朱杰辰,1984;李耀菘等,1995;鲍学昭和张阿利,1998;Belousova et al., 2002)。

尽管如此,极少数学者通过实验与理论分析认为铀、钍可在地核中大量富集并能成为地球演化的重要能源(Elsasser, 1950; Feber et al., 1984; Murrell and Burnett, 1986; Herndon, 1993, 2014; 鲍学昭, 1999; 马学昌, 2016)。另外,高铀、钍含量的中、基性岩也偶见报道,如:腾冲滇滩铁矿区白垩系辉绿岩脉铀含量高达 363×10^{-6} ,闪长岩铀含量为 104×10^{-6} ,钍含量为 38×10^{-6} ^①,分别是基性岩铀丰度(1×10^{-6})、中性岩铀丰度(3×10^{-6})和钍丰度($13 \times$

注:本文为中国地质调查局二级项目(编号:DD20190122)、重庆市自然科学基金资助项目(编号:cstc2013jcyjA90017,cstc2017jcyjA1300,cstc2020jcyj-msxmX0487)和重庆科技学院大学生科技创新训练计划项目(编号:2019042,2020006)的成果。

收稿日期:2020-12-08;改回日期:2021-04-30;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.04.306

作者简介:伍皓,男,1984年生,硕士,高级工程师,主要从事铀矿沉积学与成矿机制研究,Email:wuhao@gsig.ac.cn。通讯作者:李小刚,男,1983年生,博士,副教授,主要从事构造地质学与能源矿产勘查研究,Email:xg_lee@cqu.edu.cn。

10^{-6} ; Turekian and Wedepohl, 1961) 的 363 倍、35 倍和 3 倍, 部分铀矿地质专家据此并结合典型铀矿床分析认为地幔中铀含量存在不均一性, 在大陆型热点活动(地幔柱)区的岩石圈地幔可能含有较高的铀丰度, 可直接提供铀源(李子颖等, 1999, 2010; 李子颖, 2006, 2009; 王正其和李子颖, 2007, 2016; 王正其等, 2010; 刘成东等, 2016)。鲍学昭和张阿利(1998)还推测岩石圈之下存在一个富含 U、Th、K 放射性生热元素的富集圈。不仅如此, 我们甚至发现某些超镁铁岩体锆石中也可具有高铀、钍含量, 如: 云南弥渡金宝山 260 Ma 辉石橄榄岩样品(1309-3) 13 粒 SHRIMP U-Th-Pb 定年锆石铀含量范围 $146 \times 10^{-6} \sim 4104 \times 10^{-6}$, 平均 2176×10^{-6} , 钍含量范围 $151 \times 10^{-6} \sim 14372 \times 10^{-6}$, 平均 4312×10^{-6} (陶琰等, 2008), 锆石铀含量可排前人用中子活化法测得的全国 81 个岩体的第 9 位, 钍含量居 8 个岩体的第 1 位, 高于绝大多数酸性岩体(李耀菘等, 1995), 也高于华南诸广山南体花岗岩用 LA-ICP-MS U-Th-Pb 或 SHRIMP U-Th-Pb 法测得的 37 件样品中的 32 件的铀含量(伍皓等, 2020)。因此, 地球内部是否贫铀、钍? 岩浆岩全岩及其锆石中铀、钍含量是否具有从超基性岩到基性岩到中性岩再到酸性岩总体增长的趋势? 有待进一步讨论。

相较于全岩中铀含量易受变质、风化等作用影响而发生变化, 锆石铀含量则通常能较恒定反映原始岩浆的铀含量情况(李耀菘等, 1995)。锆石中铪元素含量也被证明能指示结晶时熔体中的铪的丰度(Wang Di et al., 2018), 锆石中钍等其他微量元素也具有相同的原理(Claiborne et al., 2010)。据此, 为尝试利用锆石初步探索地球内部铀、钍的丰度, 本文以各类岩浆岩发育较齐全且研究程度相对较高的秦岭造山带加里东期岩浆岩体为例, 通过充分搜集该区岩体锆石 U-Th-Pb 同位素测年文献, 开展系统的锆石年龄、铀、钍含量、锆石 Lu-Hf 同位素、全岩地球化学、Sr-Nd 和 Sm-Nd 同位素等数据统计分析, 以期探讨锆石中铀、钍含量与岩浆岩类型及其岩浆源区之间的关系, 力图为地球内部铀、钍丰度研究提供新证据和新方法, 并试图为地球动力学和地震成因研究带来新的启发。

1 区域地质背景

秦岭造山带是中国大陆的脊梁, 东西向横亘中国大陆中央, 在中国大陆形成与演化中占有突出重要位置(张国伟等, 2019)。该造山带经历了原特提

斯洋和古特提斯洋打开—闭合的演化过程, 发育有两条重要的缝合带, 即北部的商丹缝合带(商南—丹凤缝合带)和南部的勉略缝合带(勉县—略阳缝合带), 以商丹缝合带为界, 秦岭造山带可以划分为北秦岭和南秦岭造山带(张国伟等, 1995; Dong Yunpeng et al., 2011a, b; 图 1)。秦岭造山带经历了复杂的造山过程, 有研究认为早古生代沿商丹带发育了一个成熟的古秦岭洋, 南北两侧为被动大陆边缘, 随后古秦岭洋向华北地块俯冲, 北侧转化成活动大陆边缘(许志琴等, 1986; Hsu et al., 1987; Zhang Guowei et al., 1989)。也有学者认为古秦岭洋向扬子地块俯冲, 南侧转化为活动大陆边缘(Xue Feng et al., 1996)。而作为印支期板块缝合带的南秦岭勉略带(李春昱等, 1982; 张国伟等, 2001), 其究竟是泥盆纪—三叠纪期间古特提斯洋分支有限洋盆(张国伟等, 1995, 2003; 赖绍聰等, 2003); 还是早古生代—泥盆纪的有限洋盆(殷鸿福和黄定华, 1995); 亦或是一个新元古代形成, 泥盆纪南北双向俯冲增生, 在三叠纪末闭合的原始古大洋(王涛, 2008; 王宗起等, 2009), 仍有争议。基于此, 前人重建了多种秦岭造山带构造演化过程模型, 如: 张国伟等(2001)认为秦岭造山带由洋—陆板块俯冲造山($Pt_3-S-C-P_1$); 陆—陆板块俯冲碰撞造山($D-C-P_1-T_{2,3}$) 和陆内造山($J-K$) 的多期多样不同属性性质的复合造山, 构成特征突出鲜明的秦岭式大陆复合造山模式; 姜涌泉(1998)指出秦岭造山带应属“楔入造山”的陆内碰撞挤压造山带; 杨志华等(2002)则提出秦岭造山带中存在 3 类沉积盆地, 3 种盆山转换, 3 个发展阶段及 3 种型式的“抽拉构造”造山模式。与秦岭造山带形成演化息息相关的物质记录, 即多时期、多成因、多类型的岩浆岩在区内广泛发育。

2 数据搜集与处理

笔者查阅搜集了近 20 年来国内外学者发表的秦岭造山带加里东期($534.0 \sim 413.6$ Ma) 岩浆岩体锆石 U-Th-Pb 测年文献, 共搜集到论文 69 篇, 博、硕士论文 16 部, 专著 1 本, 掌握了区内 3 件超基性岩、52 件基性岩、46 件中性岩、90 件酸性岩, 共计 191 件样品, 6979 个(铀含量数据 3552 个, 钍含量数据 3427 个) 参与岩体定年的岩浆锆石铀、钍含量数据(表 1, 表 2, 表 3), 191 件样品大致分布如下: 3 件超基性岩样品零星分布于河南桐柏、湖北竹溪地区, 主要岩性为云斜煌岩和碳酸岩(图 1, 表 1); 52 件基

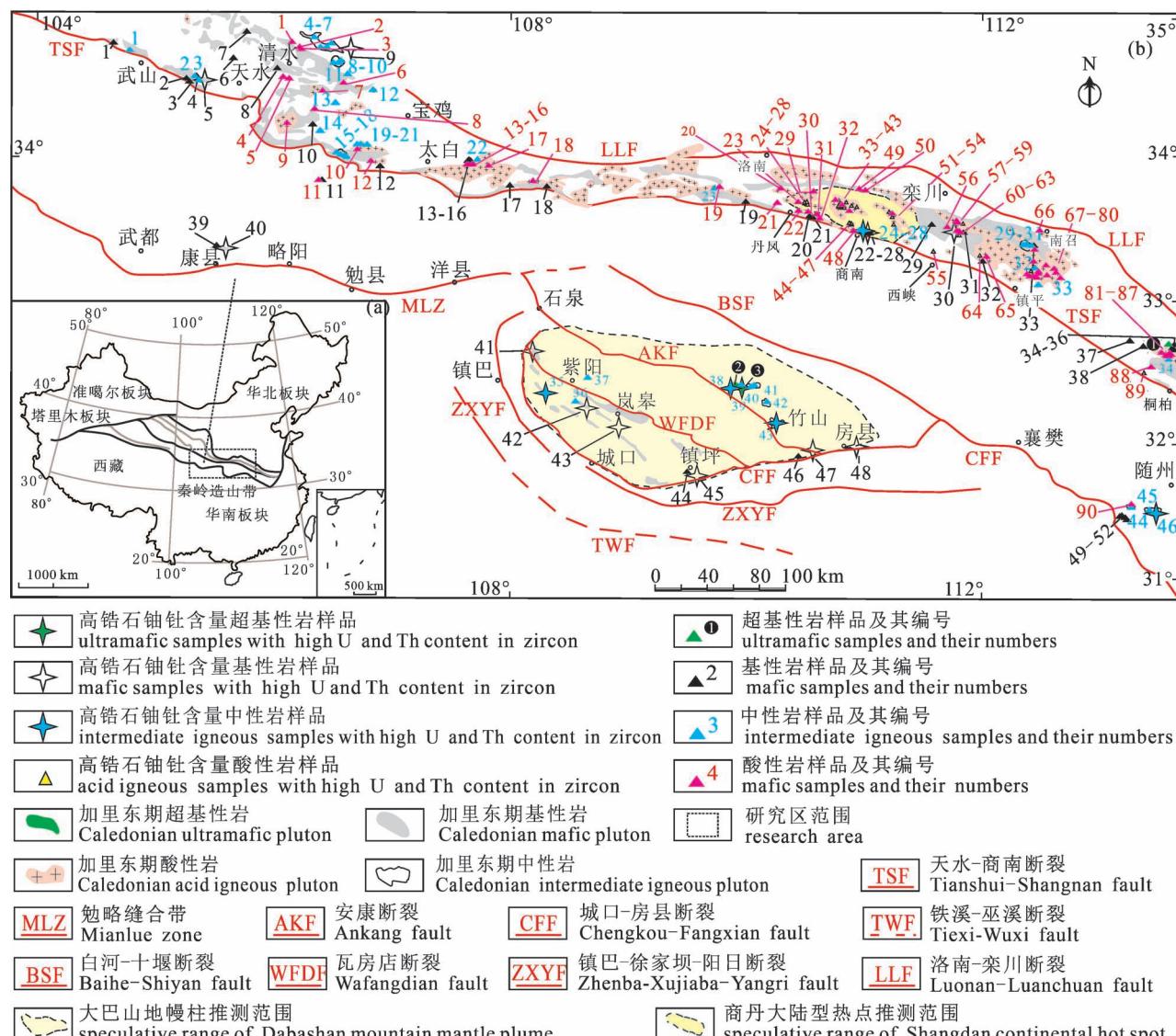


图1 秦岭造山带加里东期岩浆岩样品分布图(据 Dong Yunpeng et al., 2011a, b, 2018; Shi Wei et al., 2012, 2013 修改)

Fig. 1 The distribution map of Caledonian igneous samples from the Qinling Orogen

(modified after Dong Yunpeng et al., 2011a, b, 2018; Shi Wei et al., 2012, 2013)

性岩样品主要分布于北秦岭和南秦岭大巴山地区,少量分布于陕西略阳和湖北随州地区,主要岩性为辉长岩、辉绿岩、玄武岩和粗玄岩等(图1,表1);46件中性岩样品同样主要分布于北秦岭和南秦岭大巴山地区,少量分布于湖北随州地区,主要岩性为石英闪长岩、二长闪长岩、辉长闪长岩、正长岩、安山岩等(图1,表2);90件酸性岩样品集中分布于北秦岭地区,零星分布在湖北随州,主要岩性为花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、英安岩等(图1,表3)。我们将所有样品按类别自西向东,由北往南的顺序进行了编号,其中,25号基性岩样品,2号、28号中性岩样品,74~78号酸性岩样品,共8件样品缺少锆石钍

含量数据。样品锆石均用 LA-ICP-MS、SHRIMP、SIMS 或 TIMS U-Th-Pb 法测定,136 件样品以全岩地化数据指示了样品产出构造环境或岩浆源区等信息,50 件样品的锆石 Lu-Hf 同位素数据和 66 件样品的全岩 Sr-Nd 或 Sm-Nd 同位素数据示踪了各样品的岩浆源区。

锆石数据处理过程中有 4 件酸性岩样品不易识别出原作者 U-Th-Pb 定年所选锆石,包括:22 号(KP006)、51 号(09CL252-3)、57 号(05Q)样品中的各 1 粒和 41 号(09CL229-3)样品中的 5 粒,所以上述样品锆石铀、钍平均值存在些许误差。另外,8 件样品存在锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}_{(1)}}$ 与全岩 $\varepsilon_{\text{Nd}_{(1)}}$ 范围不一致的

序号	样品编号	采样位置	岩性	构造环境 (岩浆源区)	全岩 $\varepsilon\text{Nd}_{(t)}$ (锆石 $\varepsilon\text{Hf}_{(t)}$)	测试方法	年龄 (Ma)	U(Th)平均 含量 (10^{-6})	锆石数 据(个)	数据来源
30	* 09Q38	湘潭	细碧岩	IAB	LA-ICP-MS U-Th-Pb	475±1.5	697(1600)	15	赵娇等,2012	
31	QL18T01	N33°33.007', E111°41.78'	火山熔岩	IAB	SHRIMP U-Th-Pb	466.6±7.4	748(563)	10	陆松年等,2003	
32	09Q68	湍河	细碧岩	IAB	LA-ICP-MS U-Th-Pb	473±1.3	299(372)	23	赵娇等,2012	
33	BSh-20	板山坪	(DM)	0.4	LA-ICP-MS U-Th-Pb	446.5±3.1	172(114)	29	刘丙祥,2014	
34	YDP4	N32°34'6.9", E111°32'49.4"	变辉长岩	(DM)	5.69	SHRIMP U-Th-Pb	431.7±8.3	156(132)	9	江思宏等,2009
35	YDP11	N32°33'36", E111°26'01"	辉长岩	(DM)	4.72	SHRIMP U-Th-Pb	432.3±7.5	301(359)	10	江思宏等,2009
36	14TB02	黄岗镇	IAB(DM)	(8.9~12.5)	SIMS U-Th-Pb	436±4	184(127)	18	郑菲,2019	
37	14TB020	小王庄河	IAB(DM)	(10.7~14.5)	SIMS U-Th-Pb	437±5	257(296)	13	郑菲,2019	
38	14TB09	小王庄河	IAB(DM)	4(10~14.1)	SIMS U-Th-Pb	449±4	752(930)	21	郑菲,2019	
39	KD3	能干上	OIB(EMI)	SHRIMP U-Th-Pb	446±6	147(213)	11	王涛等,2009a		
40	* KDY05	鹤壁峡	OIB(EMI)	SHRIMP U-Th-Pb	455±5	836(1272)	12	王涛等,2009a		
41	* DBS257 / 1	N32°44'40.8", E108°07'32.8"	OIB(EMI-EMII-HIMU)	SHRIMP U-Th-Pb	422.1±4.7	649(1417)	12	陈虹等,2014		
42	* 11HLC-25	N32°19'43", E108°39'16"	OIB(EMI-EMII-HIMU)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	436.9±2.4	634(2154)	28	许光等,2018a		
43	* 11LGC-8	嵐皋四季镇	OIB(EMI-EMII-HIMU)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	441.9±3.2	838(4725)	29	王坤明,2014		
44	D0212	N31°52'33", E109°30'24"	WPB	SHRIMP U-Th-Pb	439±6	298(465)	9	邹先武等,2011		
45	* ZP-7	钟宝镇	OIB(EMI-EMII-HIMU)	SHRIMP U-Th-Pb	451±4	658(1476)	17	向忠金等,2016		
46	13DH-B2	N31°58'36", E110°22'48"	OIB(HIMU-EMI)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	439.3±4.1	137(198)	16	曹亮等,2015		
47	* 16MG08	N32°00'26.7", E110°29'21.6"	OIB(HIMU-EMI)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	444.9 ± 2.5	940(1576)	18	许光等,2018b		
48	* 17WT06	N32°01'38.7", E110°51'35.6"	WPB	LA-ICP-MS U-Th-Pb	432.4±3.3	866(1841)	20	许光等,2018b		
49	D5076-1	N31°30'20", E112°57'08"	WPB	LA-ICP-MS U-Th-Pb	433.7±2.2	495(176)	19	陈超等,2018		
50	PM07-26-1	N31°29'12", E112°58'11"	WPB	LA-ICP-MS U-Th-Pb	435.6±2.3	519(194)	17	陈超等,2018		
51	D5024-5	N31°14'11", E113°09'29"	WPB	LA-ICP-MS U-Th-Pb	436.4±3.1	314(260)	9	陈超等,2018		
52	D5021-5	N31°23'16", E113°06'28"	WPB	LA-ICP-MS U-Th-Pb	433.4±3.9	313(95)	7	陈超等,2018		

注:①—③为基性岩样品;1-52为基性岩样品;*代表高锆石铀钍含量(高富集)样品;IAB—岛弧玄武岩;WPB—板内玄武岩;OIB—洋岛玄武岩;MORB—大洋中脊玄武岩;N-MORB—正常型大洋中脊玄武岩;E-MORB—富集型大洋中脊玄武岩;PM—正常地幔;DM—亏损地幔;EMI—富集地幔;EMII—富集地幔Ⅱ;HIMU—高μ地幔;Crust—地壳。

表2 秦岭造山带加里东期中性岩样品综合信息表

序号	样品编号	采样位置	岩性	构造环境 (岩浆源区)	全岩 $\varepsilon\text{Nd}_{(t)}$ (锆石 $\varepsilon\text{Hf}_{(t)}$)	测试方法	年龄 (Ma)	U(Th)平均 含量 ($\times 10^{-6}$)	锆石数 据(个)	数据来源
1	YY-3	N34°47'51", E104°48'10"	变辉长闪长岩	IAB (Crust)	-5.5	SHRIMP U-Th-Pb	456±3	1422(1105)	11	李玉晔,2008
2	QL46TW01	N34°36.78', E105°23.259'	辉长闪长岩	IAB	3	TIMS U-Th-Pb	507.5±3	597	3	裴先治等,2005
3	GZ-10	关子沟	MORB(DM)	MORB	517±8	SHRIMP U-Th-Pb	263(68)	14	李玉晔等,2007	
4	GMZ01	N34°56'12.6", E106°17'34.6"	闪长岩	IAB	440.2±0.92	LA-ICP-MS U-Th-Pb	254(203)	18	裴先治等,2007c	
5	YJD-2	国家店	IAB (Crust)	-3.6	SHRIMP U-Th-Pb	441±10	741(1116)	13	Zhang Hongfei et al., 2006	

序号	样品编号	采样位置	岩性	构造环境 (岩浆源区)	全岩 $\text{εNd}_{(t)}$ (锆石 $\text{εHf}_{(t)}$)	测试方法	年龄 (Ma)	U/Th 平均 含量 ($\times 10^{-6}$)	锆石数 据 (个)	数据来源
6	15LS16-05	自家店	闪长岩	(Crust)	LA-ICP-MS U-Th-Pb (-5.7~+0.6)	418.1±2	165 (180)	36	孟祥舒等, 2017	
7	ML-02	N34°55'.684'', E106°24.890'	石英闪长岩	(DM-Crust)	LA-ICP-MS U-Th-Pb (1.7~4.9)	448±19	134 (125)	21	唐效, 2017	
8	LS-04	N34°42'.319', E106°36.562'	石英闪长岩	(DM)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	460±21	187 (154)	25	唐效, 2017	
9	GS3-1TW	N34°42'18.2'', E106°36'33.9''	石英闪长岩	(1)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	454.7±1.7	454 (394)	9	陈隽璐等, 2007	
10	GS-14/B	N34°42'22'', E106°36'17.1''	石英二长闪长岩	(DM-Crust)	-2 (1.9~+3.8)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	435±2	157 (114)	20	杨阳, 2017
11	CGH-11/B	N34°38'56.4'', E106°32'42.2''	石英闪长岩	(DM-Crust)	-2.6 (-3.8~+3.4)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	428±2	284 (313)	19	杨阳, 2017
12	NTS-02	N34°35.405', E106°56.631'	石英闪长岩	(Crust)	(-1.5~+1.9)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	451±14	654 (474)	28	唐效, 2017
13	SCZ-01	N34°30.718', E106°30.404'	正长闪长岩	(Crust)	(-10.8~-1.1)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	423±16	521 (547)	20	唐效, 2017
14	BJ-06/1B	N34°15'16'', E106°24'30''	角闪闪长岩	(1)	-5.4 (1.7~4.6)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	433±3	244 (186)	22	杨阳, 2017
15	TZL/TW	N34°05'24.5'', E106°35'12.6''	石英闪长岩	(Crust)	-2.78	LA-ICP-MS U-Th-Pb	454±1.7	638 (376)	29	陈隽璐等, 2008b
16	LWG13-1	唐藏	石英闪长岩	(Crust)	-0.74	LA-ICP-MS U-Th-Pb	425±3.1	661 (313)	18	任龙, 2019
17	LWG11-1	唐藏	石英闪长岩	(Crust)	-0.74	LA-ICP-MS U-Th-Pb	429±2.4	640 (556)	22	任龙, 2019
18	LWG19-3	唐藏	石英闪长岩	(Crust)	-0.74	LA-ICP-MS U-Th-Pb	427±2.7	610 (342)	24	任龙, 2019
19	LWG02-5	杨家庄	石英闪长岩	(Crust)	-1.03	LA-ICP-MS U-Th-Pb	439±2.5	406 (326)	23	任龙, 2019
20	LWG08-1	红花铺	石英闪长岩	(Crust)	-0.77	LA-ICP-MS U-Th-Pb	438±3	301 (243)	23	任龙, 2019
21	HNP-02	N34°08.979, E106°45.647'	石英闪长岩	(DM)	(2.7~6)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	431±19	280 (24.4)	15	唐效, 2017
22	TY-18	铜峪	IAB (DM)	(6.5~7.25)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	439.2±4.7	281 (288)	12	熊潇, 2017	
23	LJM	拉鸿庙	变安山岩	IAB (DM)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	422±7	371 (278)	19	刘军峰等, 2009	
24	14FS17	富水	闪长岩	IAB (Crust)	-5.3 (-2.1~-3.7)	SIMS U-Th-Pb	488±4	986 (1093)	15	郑菲, 2019
25	* 14FS02	富水	二长闪长岩	IAB (Crust)	(-1.9~-3.2)	SIMS U-Th-Pb	490±4	1571 (2212)	12	郑菲, 2019
26	FS0807	富水	闪长岩	(Crust)	-6.8~-5.3	LA-ICP-MS U-Th-Pb	503.5±5.8	720 (219)	23	刘丙祥, 2014
27	* FS0808	富水	闪长岩	(Crust)	-6.8~-5.3	LA-ICP-MS U-Th-Pb	495.9±2.2	1672 (2384)	27	刘丙祥, 2014
28	DQ16	N33°32.325', E110°57.96'	角闪黑云二长岩	(DM)	TIMS U-Th-Pb	514.3±1.3	347	4	陈志宏等, 2004	
29	09CL214	板山坪	石英二长闪长岩	(1)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	486.9±9.3	488 (442)	32	李名则等, 2014	
30	09CL216	板山坪	闪长岩	(1)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	496±8.1	91 (51)	32	李名则等, 2014	
31	09CL217-3	N33°27.133', E112°18.035'	石英闪长岩	(1)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	486±6.8	118 (67)	30	雷敏, 2010	
32	09CL213-3	N33°16.419', E112°19.586'	石英闪长岩	(S-1)	(-2~+3.7)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	468.5±4.1	1098 (657)	31	雷敏, 2010
33	TK-6	镇坪	石英闪长岩	(DM)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	473.5±2.3	395 (737)	13	李开文等, 2019a	
34	YDP6	N32°35'41'', E113°22'31.6''	变石英闪长岩	(DM)	SHRIMP U-Th-Pb	431.5±8.2	199 (218)	10	江思宏等, 2009	
35	* 12GQB-10	高桥	辉石闪长岩	OB (EMI-EMII)	2.88	SIMS U-Th-Pb	438.4±3.4	1322 (2052)	17	王坤明, 2014
36	12XHG-9	许河	辉石闪长岩	OB (EMI-EMII)	2.25~2.35	SIMS U-Th-Pb	438.4±3.1	640 (844)	16	王坤明, 2014
37	QYG07	N32°34'13.2'', E108°38'48.7''	正长斑岩	(Al)	SHRIMP U-Th-Pb	432±5.8	174 (291)	5	龙井山等, 2016	
38	* MY04	庙垭	正长岩	(HMU-EMI-EMII)	(2.12~7.65)	LA-ICP-MS Th-Pb	442.6±4	57 (2951)	53	应元灿, 2018
39	13MY-4	N32°29'49'', E109°53'29''	正长岩	(HMU-EMI)	2.7~5.68 (5.04~8.9)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	445.2±2.6	297 (897)	16	Zhu Jiang et al., 2017
40	TTC5	土地岭	粗面岩	WPB	LA-ICP-MS U-Th-Pb	441.6±4	396 (255)	17	鲁显松等, 2019	
41	YK1	土地岭	粗面质凝灰熔岩	WPB	LA-ICP-MS U-Th-Pb	441.7±3.7	431 (869)	16	鲁显松等, 2019	

表3 秦岭造山带加里东期酸性岩样品综合信息表
Table 3 The comprehensive information table of Caledonian acid igneous samples from the Qinling Orogen

序号	样品编号	采样位置	岩性	构造环境 (岩浆源区)	全岩 $\delta^{143}\text{Nd}_{(0)}$ (锆石 $\varepsilon\text{Hf}_{(0)}$)	测试方法	年龄(Ma)	U(Th)平均 含量($\times 10^{-6}$)	锆石数 据(个)	数据来源
42	205	溢水	粗面质火山碎屑岩	WPB	LA-ICP-MS U-Th-Pb	430.6±2.7	260(480)	16	万俊等,2016	
43	*SXD	杀熊洞	正长岩	(HIMU-EMI)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	441.8±2.2	571(1850)	16	Xu Cheng et al., 2008	
44	SZ08	N31°34'.348', E113°02'.359'	石英正长岩 正长斑岩 正长斑岩	(Al) (DM) (DM)	SHRIMP U-Th-Pb LA-ICP-MS U-Th-Pb LA-ICP-MS U-Th-Pb	439±6 415.7±7.3 477±6	989(1045) 259(231) 1135(1388)	7 6 17	马昌前等,2004 曹强等,2015 曹强等,2015	
45	13QMC-013	荞麦冲	正长斑岩	(2.9~11.8)						
46	*13QMC-011	荞麦冲	正长斑岩	(6.3~15.4)						
序号	样品编号	采样位置	岩性	岩石类型 (岩浆源区)	全岩 $\delta^{143}\text{Nd}_{(0)}$ (锆石 $\varepsilon\text{Hf}_{(0)}$)	测试方法	年龄(Ma)	U(Th)平均 含量($\times 10^{-6}$)	锆石数 据(个)	数据来源
1	HMC03/1TW	N34°52'06.5", E106°11'21.1"	花岗闪长岩 英安岩	(1) (Crust)	-3.7 -3.4	LA-ICP-MS U-Th-Pb SHRIMP U-Th-Pb	440.5±4.4 447±8	146(93) 172(152)	19	魏方群等,2012
2	XC-4	新城	英安质次火山岩	(Crust)	-5.3(-1.7~+5.4)	SHRIMP U-Th-Pb	448±8	133(110)	9	季玉晔,2008
3	XC-9	新城	二长花岗岩	(1)		LA-ICP-MS U-Th-Pb	417±3	502(177)	9	季玉晔,2008
4	CCP-01/1B	N34°41'34", E106°05'15.1"	花岗岩	C-adakite (Crust)	-0.3	LA-ICP-MS U-Th-Pb	434±10	1631(837)	10	杨阳,2017
5	CCP-2	草川铺	角闪石花岗岩	(1)	-3.3(-1.5~-3.4)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	426±2	305(325)	6	Zhang Hongfei et al., 2006
6	CGH-16/1B	N34°38'50.5", E106°36'37.4"	花岗斑岩	(1-A)	-1.8(8.4~12.3)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	430±4	142(97)	23	杨阳,2017
7	CGH-07/1B	N34°33'26.3", E106°26'38"	黑云母花岗岩	(1)	(-1.8~+1.9)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	428±2	843(659)	20	杨阳,2017
8	BJ-14/2B	N34°27'01.4", E106°22'09.7"	花岗岩	C-adakite (Crust)	-2.48	LA-ICP-MS U-Th-Pb	438±3	1107(497)	24	王婧等,2008
9	0588	N34°18'43.6", E106°08'03.6"	钠质流纹岩	(DM)	1.61	LA-ICP-MS U-Th-Pb	435±2.9	130(102)	14	任龙,2019
10	LWG01-2	杨家庄	花岗闪长岩 二长花岗岩	(DM-Crust) (1)	(-0.3~+5.3)	SIMS U-Th-Pb	433.7±1.7	450(511)	18	唐欢,2017
11	SY14-01	N34°10'28.28", E106°31'9.54"	花岗闪长岩 二长花岗岩	O-adakite (DM)	(2.57~11.2)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	435±2	683(685)	55	徐通等,2018
12	JGY-1	N34°02.0.4', E106°50.06'	变英安岩	(DM)	(0.11~10.1)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	439.3±3	387(322)	22	李韩等,2010
13	TB05	煤沟	花岗闪长岩	O-adakite (DM)	(8.69~15.02)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	436.6±4.2	230(232)	20	熊骥,2017
14	XYG2-3	铜峪	花岗闪长岩	O-adakite (DM)	(8.45~14.82)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	440.6±2	207(144)	23	熊骥,2017
15	MGG2	集沟	花岗闪长岩	O-adakite (DM)		LA-ICP-MS U-Th-Pb	441.9±2.2	167(150)	20	熊骥,2017
16	MGG3	煤沟	黑云母二长花岗岩			LA-ICP-MS U-Th-Pb	431±2	998(79)	18	吕星球等,2014
17	TB17/1B	N34°02'32.6", E107°47'52.1"	安山-英安岩	(DM)	8.47	SHRIMP U-Th-Pb	442±7	850(712)	14	Yan Quanren et al., 2008
18	QD04-07	N33°52'.832', E108°09'.792'	花岗岩	Adakite	(5.75~11.03)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	490.8±2.9	104(36)	24	刘春花等,2013
19	09CL268-3	N33°49'.339', E109°44.428'	黑云母花岗岩	(1-S)	-3.4~-5.6	LA-ICP-MS U-Th-Pb	451±4	696(302)	18	刘丙祥,2014
20	ZYL-01	N33°49'42.61", E110°17'04.45"	黑云母花岗岩	(1-S)	-3.4~-5.6	LA-ICP-MS U-Th-Pb	451.7±3.8	1307(41)	20	刘丙祥,2014
21	LXPL-03	N33°44'05.18", E110°15'19.89"	黑云母花岗岩	(1)		LA-ICP-MS U-Th-Pb	448.3±4.5	235(159)	15	王江波等,2018
22	KP006	N33°43'03.49", E110°24'47.35"	黑云母二长花岗岩							

序号	样品编号	采样位置	岩性 (岩浆源区)	岩石类型 (S)	全岩 ϵ Nd ₍₀₎ (锆石 ϵ Hf ₍₀₎)	测试方法	年龄 (Ma)	U(Th) 平均 含量 ($\times 10^{-6}$)	锆石数 据 (个)	数据来源
23	D2210	N33°26'15", E110°27'21"	二长花岗岩 黑云母花岗岩	C-adakite (1)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	415.2±2	1624(804)	15	赵如意等, 2014	
24	* 3CJZ-43	黄龙庙	二长花岗岩	LA-ICP-MS U-Th-Pb	446±3	2798(783)	17	张帆等, 2019		
25	* 2CJZ-11	陈家庄	花岗伟晶岩	LA-ICP-MS U-Th-Pb	419±2	2679(389)	18	张帆等, 2019		
26	* 3CJZ-44		花岗伟晶岩	LA-ICP-MS U-Th-Pb	417±3	2011(300)	13	张帆等, 2019		
27	* 3CJZ-5		花岗伟晶岩	LA-ICP-MS U-Th-Pb	414±4	2999(89)	13	张帆等, 2019		
28	* 3CJZ-7		花岗伟晶岩	LA-ICP-MS U-Th-Pb	416±3	2356(82)	15	张帆等, 2019		
29	HBCII-01	N33°48'41".83", E110°32'51.22"	花岗岩	(1-S)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	449.2±2.3	1033(315)	25	刘丙祥, 2014	
30	TYP	N33°38'21", E110°33'59.7"	花岗闪长岩	(1)	-0.6~-0.3 (2.65~12.89)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	438±1.8	531(99)	30	李桐, 2017
31	KP009	N33°39'04.61", E110°36'53.39" N33°36'32.9", E110°37'03.6"	黑云母二长花岗岩 花岗闪长岩	(S)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	421.4±2.5	659(403)	21	王江波等, 2018	
32	09C1237-3	N33°45.475', E110°43.394'	二长花岗岩	(S-1)	(1.2~12.8) (-10.9~+9.9)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	438.6±2.2 SIMS U-Th-Pb	109(44) 445.6±6.1 434±7	21 24	李平等, 2011 雷敏, 2010
33	* H1		二长花岗岩	(1)	2.94	LA-ICP-MS U-Th-Pb	424±10	1156(398)	23	王涛等, 2009b
34	H1507	N33°41'57", E110°43'34"	花岗闪长岩	(1)	1.7	LA-ICP-MS U-Th-Pb	423±7	1683(506)	11	张元潮, 2019
35	* H1502	N33°40'20", E110°43'6"	花岗闪长岩	(1)	-0.5~+1.5	LA-ICP-MS U-Th-Pb	462.8±6	3346(1010)	18	张元潮, 2019
36	* FKII-25	N33°41'05.7", E110°43'38.3"	花岗岩	(1)	-0.5~+1.5	LA-ICP-MS U-Th-Pb	457±13	1759(264)	17	刘丙祥, 2014
37	* FKII-31	N33°38'18.2", E110°43'24"	花岗岩	(1)	-0.5~+1.5	LA-ICP-MS U-Th-Pb	460±3.9	2143(592)	11	刘丙祥, 2014
38	* FKII-30	N33°35'47.72", E111°11'45.52"	花岗岩	(1)	-0.5~+1.5	LA-ICP-MS U-Th-Pb	454.9±7.7	1743(474)	21	刘丙祥, 2014
39	* FKII-21	N33°40'24.3", E110°43'03.6"	花岗岩	(1)	-0.5~+1.5	LA-ICP-MS U-Th-Pb	450.2±2.6	3494(127)	15	刘丙祥, 2014
40	* 09CL229-3	N33°39.088', E110°46.356'	钾长花岗岩	(S-1)	(0.2~3.5)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	432.1±3.8	22	雷敏, 2010	
41	* 09CL244-3	N33°41.233', E110°54.062'	花岗岩	(S-1)	(0.5~10.8)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	440.3±2.6	1039(287)	15	雷敏, 2010
42	GSC-52	灰池子	黑云母花岗闪长岩	(1)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	418.3±8.8	2768(482)	18	袁峰等, 2017	
43	* GF01	大毛沟	花岗岩	(1)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	420.4±2.7	2298(726)	10	左文乾等, 2010	
44	* GSG-19	光石沟	黑云母正长花岗岩	(1)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	415.1±2.6	4371(335)	18	袁峰等, 2017	
45	* PD1080-8	光石沟	花岗伟晶岩	(1)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	413.6±2.4	4849(121)	17	袁峰等, 2017	
46	* GSG-49	光石沟	钾长花岗岩	(1)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	424±11	590(232)	15	张元潮, 2019	
47	QL1514	N33°31'57", E110°52'26"	花岗闪长岩	(S-1)	-10.5~+0.5 (7.33~8.34)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	442±4	199(161)	18	Mohammed, 2018
48	12QL71	看峰沟	花岗闪长岩	(S)	(5.2~11.1)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	437±5	148(110)	11	雷敏, 2010
49	11QL101	看峰沟	花岗闪长岩	(S)	(-8.7~-0.8)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	436.2±6.7	3224(344)	36	Qin Zhengwei et al., 2014
50	* 09CL252-3	N33°40.357', E111°10.17'	漂池	(S)	-9.8	SIMS U-Th-Pb	471±9	1068(147)	7	刘丙祥, 2014
51	10QL154		花岗岩	(S)	-9~-1.9	SIMS U-Th-Pb	487.3±9.6	2292(277)	12	刘丙祥, 2014
52			二长花岗岩 淡色花岗岩	(S)	-8.2	LA-ICP-MS U-Th-Pb	449.9±1.6	2268(420)	30	刘丙祥, 2014
53	* YLG0816	N33°40'21.42", E111°10'10.68"	花岗岩	(S)	-7.6	SIMS U-Th-Pb	424.8±5.6	3021(146)	14	刘丙祥, 2014
54	* AJ11-01	N33°35'47.72", E111°11'45.52"	花岗岩	(S)	(8.37~11.3)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	461±0.9	720(628)	18	郭彩莲等, 2011
55	* YLG0824	N33°23'07.6", E111°30'41.5"	花岗闪长岩	(S)	(8.37~11.3)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	459.5±0.9	682(519)	17	郭彩莲等, 2010
56	10Q	N33°32'47.6", E111°40'45.9"	花岗闪长岩	(S)						
57	05Q	N33°32'47.6", E111°40'45.9"	满子营	(S)						

序号	样品编号	采样位置	岩性	岩石类型 (岩浆源区)	全岩 $\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ (锆石 $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$)	测试方法	年龄(Ma)	U/Th平均 含量($\times 10^{-6}$)	锆石数 据(个)	数据来源
58	YLG0808	N33°34'26.4", E111°46'40.4"	花岗岩	(S-I)	-9	SIMS U-Th-Pb	481.9±5.2	1661(396)	13	刘丙祥,2014
59	*08HN33	N33°34'26.4", E111°46'40.5"	花岗岩	(S-I)	0.5	LA-ICP-MS U-Th-Pb	485.2±4.3	1477(1133)	28	刘丙祥,2014
60	09RLP-03	青岗坪	花岗闪长岩	Adakite(DM)	(2~5.7)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	475.2±2.7	594(413)	19	王锦等,2012
61	Q4	湾潭	斜长花岗岩	OP (DM)		LA-ICP-MS U-Th-Pb	468.5±1.5	144(154)	15	杨士杰等,2015
62	Q20	湾潭	斜长花岗岩	OP (DM)		LA-ICP-MS U-Th-Pb	470±2.6	165(181)	23	杨士杰等,2015
63	*08HN32	N33°21'07.8", E111°54'30.5"	花岗闪长岩	(I)	1.7	LA-ICP-MS U-Th-Pb	499.2±3.5	1397(1207)	22	刘丙祥,2014
64	*08HN27	N33°21'12.6", E111°54'38.9"	花岗岩	(I-S)	-1.6~-4.6	LA-ICP-MS U-Th-Pb	451.5±4.5	2191(1035)	19	刘丙祥,2014
65	08HN28	N33°21'12.6", E111°54'38.9"	花岗闪长岩	(I)	-1.6~-4.6	LA-ICP-MS U-Th-Pb	448.5±6.5	352(343)	26	刘丙祥,2014
66	09CL22-3	南召	花岗闪长岩	(I)	0.8	LA-ICP-MS U-Th-Pb	452.3±6.2	348(378)	12	李名则等,2014
67	BS11-22	N33°27'07.98", E112°18'02.1"	花岗闪长岩	(I)		LA-ICP-MS U-Th-Pb	487.2±3.6	500(418)	35	刘丙祥,2014
68	1106/1	廖庄水库	花岗岩	(I-S)	-1.6~-4.6	LA-ICP-MS U-Th-Pb	435.2±2.4	594(776)	13	李开文等,2019a
69	*ZPl-11	N33°16'18.41", E112°19'56.27"	钾质花岗岩	(I)	-1.6~-4.6	LA-ICP-MS U-Th-Pb	449.3±4.1	4789(47)	30	刘丙祥,2014
70	ZPl-07	N33°16'12.26", E112°19'51.08"	四棵树			LA-ICP-MS U-Th-Pb	425.2±3.7	451(248)	35	刘丙祥,2014
71	016/2	余堂	正长花岗岩			LA-ICP-MS U-Th-Pb	432.1±2.2	1079(632)	15	李开文等,2019a
72	TK11	N33°09'.520', E112°16.309'	似斑状黑云母花岗岩	(S-I)	(3~6.3)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	418±2.9	1361(879)	8	李开文等,2019a
73	09CL21-1-5	五垛山	黑云母二长花岗岩	(S)		LA-ICP-MS U-Th-Pb	464.1±4.6	1034(554)	36	雷敏,2010
74	ZHW2-2	五垛山	黑云母二长花岗岩	(S)		LA-ICP-MS U-Th-Pb	416±2	852	25	易志强等,2017
75	ZHW1-2	五垛山	黑云母二长花岗岩	(S)		LA-ICP-MS U-Th-Pb	414.5±2.4	298	25	易志强等,2017
76	ZHW2-4	五垛山	黑云母二长花岗岩	(S)		LA-ICP-MS U-Th-Pb	418±1.3	1365	24	易志强等,2017
77	ZHS3-2	石门	黑云母二长花岗岩	(S)		LA-ICP-MS U-Th-Pb	428.9±1.9	850	24	易志强等,2017
78	ZHS1-2	石门	黑云母二长花岗岩	(S)		LA-ICP-MS U-Th-Pb	428.3±2.1	936	17	易志强等,2017
79	1038/3	N33°16'41", E112°29'28"	二云母花岗岩	(S)		LA-ICP-MS U-Th-Pb	433±2	740(398)	17	李开文等,2019b
80	09CL208-1	N33°14'.121', E112°33.895'	似斑状花岗岩	(S-I)	(3.8~9.5)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	460.3±3.9	594(502)	38	雷敏,2010
81	YDP8	N32°38'10.2", E113°19'50.9"	黑云母花岗岩	(DM)	4.79	SHRIMP U-Th-Pb	426.7±9.1	114(94)	9	江思宏等,2009
82	YDP7	N32°35'41", E113°22'31.6"	花岗闪长岩	(DM)	6.03~-6.07	SHRIMP U-Th-Pb	433±11	112(93)	7	江思宏等,2009
83	D9058-TW1	桃园	TTG (Crust)			LA-ICP-MS U-Th-Pb	423.2±2.9	138(61)	24	谷浩,2017
84	D9036-TW1	桃园	TTG (Crust)			LA-ICP-MS U-Th-Pb	445.3±1.7	207(145)	25	谷浩,2017
85	D9055-TW1	桃园	TTG (Crust)			LA-ICP-MS U-Th-Pb	440±1.8	187(150)	23	谷浩,2017
86	D9053-TW1	桃园	奥长花岗岩			LA-ICP-MS U-Th-Pb	440.5±2.2	488(219)	16	谷浩,2017
87	D9014-TW1	桃园	奥长花岗岩			LA-ICP-MS U-Th-Pb	431±6	143(69)	25	谷浩,2017
88	D9091-TW1	N32°32'2.1", E113°16'33.3"	二长花岗岩	(S)		LA-ICP-MS U-Th-Pb	429±3	934(987)	9	李运冬等,2018
89	*PM26-TW1	N32°30'50.1", E113°12'54.3"	二长花岗岩	(S-I)		LA-ICP-MS U-Th-Pb	445±3	3181(149)	16	李运冬等,2018
90	11QL01	花岗闪长岩	(A)		3.62(6.6~10)	LA-ICP-MS U-Th-Pb	444±3.3	1236(622)	13	Mohammed, 2018

注: O—adakite—O型埃达克岩; C—adakite—C型埃达克岩; Sanukite—赞歧岩; OP—大洋斜长花岗岩; TTG—奥长花岗岩、英云闪长岩、花岗闪长岩岩石组合

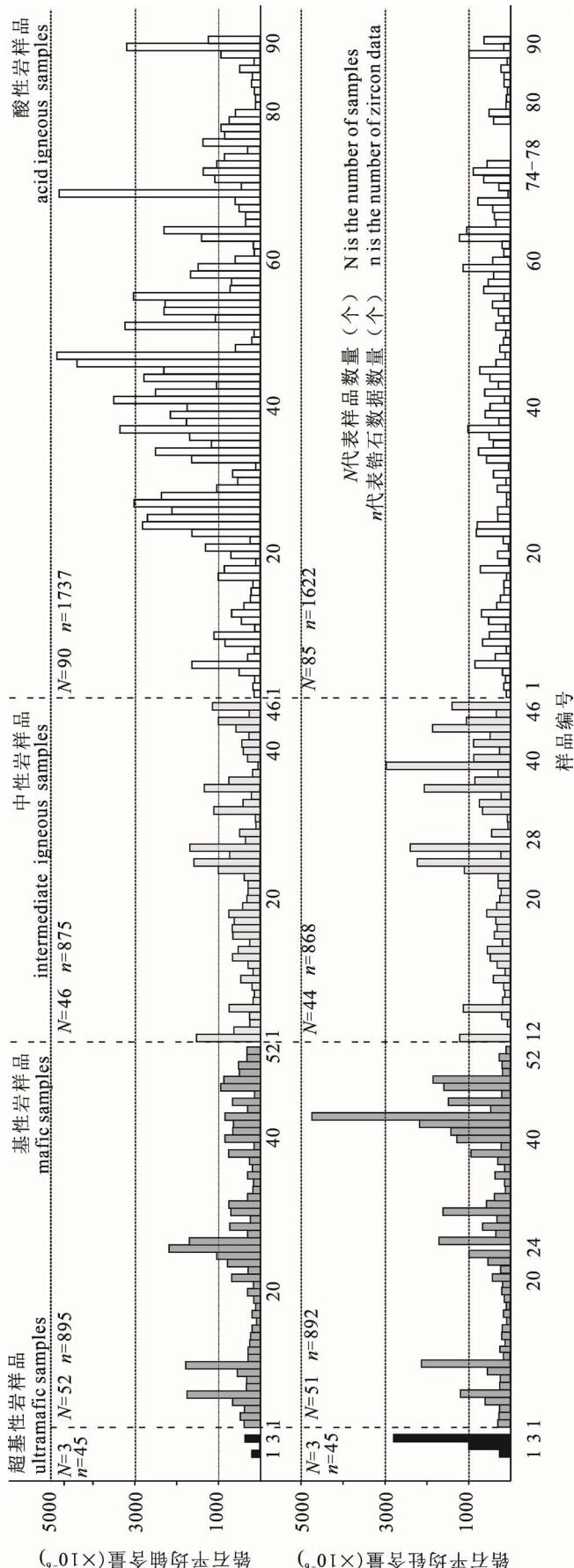


图 2 秦岭造山带加里东期不同类型岩浆岩样品中锆石铀、钍含量对比图

Fig. 2 The comparison diagram of zircon uranium and thorium contents in different types of Caledonian igneous samples from the Qinling Orogen

情况,包括 23 号(14FS09)、24(14FS21)号 2 件基性岩样品,10 号(GS-14/1B)、11 号(CGH-11/1B)、14 号(BJ-06/1B)3 件中性岩样品,4 号(CCP-01/1B)、7 号(CGH-07/1B)、30 号(TYP)3 件酸性岩样品。考虑到锆石 Hf 同位素在示踪岩浆源区组成时优于全岩 Sr—Nd、Sm—Nd 同位素(吴福元等,2007; 邱检生等,2008),我们选取锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 来确定样品岩浆源区。

3 岩浆岩样品锆石中铀、钍含量特点

在同一研究区域,由不同学者测得的加里东期各类岩浆岩样品中锆石铀、钍含量具有以下特点:3 件超基性岩锆石平均铀含量范围 $11 \times 10^{-6} \sim 361 \times 10^{-6}$,平均钍含量范围 $260 \times 10^{-6} \sim 2785 \times 10^{-6}$;52 件基性岩锆石平均铀含量范围 $84 \times 10^{-6} \sim 2173 \times 10^{-6}$,51 件基性岩锆石平均钍含量范围 $35 \times 10^{-6} \sim 4725 \times 10^{-6}$;46 件中性岩锆石平均铀含量范围 $57 \times 10^{-6} \sim 1672 \times 10^{-6}$,44 件中性岩锆石平均钍含量范围 $51 \times 10^{-6} \sim 2951 \times 10^{-6}$;90 件酸性岩样品平均铀含量范围 $104 \times 10^{-6} \sim 4849 \times 10^{-6}$,85 件酸性岩锆石平均钍含量范围 $36 \times 10^{-6} \sim 1207 \times 10^{-6}$ (表 1, 表 2, 表 3)。大巴山地区 41~48 号基性岩样品和北秦岭灰池子花岗岩体 34~43 号样品绝大多数显示出统一的高锆石钍或铀含量(平均在 1000×10^{-6} 以上),这一共性在反映出事物自身客观规律的同时,也体现出前人测试数据的可靠性。结合样品铀、钍含量对比图(图 2)可以看出,铀和钍在同一类型岩浆岩锆石中含量均相差悬殊,可在不同类型岩浆岩锆石中富集或亏损。例如:酸性岩样品中最高铀含量的 47 号(GSG-49)是最低的 19 号(09CL268-3)的 46.6 倍(表 3),基性岩样品中最高钍含量的 43 号(11LGC-8)是 17 号(H-01)的 135 倍(表 1);前期被认为应具高锆石铀、钍含量的花岗岩样品中虽有 46 号(PD1080-8)、47 号(GSG-49)、69 号(ZPll-11)3 件样品平均铀含量在 4000×10^{-6} 以上,37 号(FKll-25)、59 号(08HN33)、63 号(08HN32)、64 号(08HN27)4 件样品平均钍含量大于 1000×10^{-6} ,但也有 17 件样品平

均铀含量仅在 104×10^{-6} ~ 199×10^{-6} 之间, 19号(09CL268-3)、21号(LXPll-03)、32号、69号(ZPll-11)4件样品平均钍含量甚至低于 50×10^{-6} (表3)。同样的, 被认为应具低锆石铀、钍含量的超基性岩、基性岩样品虽大多数铀、钍平均值在 1000×10^{-6} 以下, 但仍存在极高含量的样品, 如: 3号(13MY-6)超基性岩平均钍含量为 2785×10^{-6} , 25号(YQG15-02)基性岩平均铀含量为 2173×10^{-6} , 43号(11LGC-8)基性岩平均钍含量达 4849×10^{-6} (表1)。本团队在大巴山辉绿岩样品(LXG-8-16-2017-1B)测得9粒同期定年锆石平均铀含量高达 5275×10^{-6} , 平均钍含量甚至达 17114×10^{-6} (注: 样品在2个实验室进行了对比测定; 待发表)。因此, 本文数据分析指示锆石中铀、钍含量与岩浆岩类型之间的关系复杂, 铀和钍在同一或不同类型岩浆岩锆石中含量均高低差异明显。并不具有前人认为的从超基性岩到基性岩到中性岩再到酸性岩总体增加的趋势。

4 高锆石铀、钍含量(高富集)样品特点

针对铀和钍在同一类型岩浆岩锆石中含量均相差悬殊, 可在不同类型岩浆岩中富集或亏损的特点, 本文选取具高锆石铀、钍含量的样品(高富集样品)进行岩石类型、构造环境和岩浆源区等系统分析。首先, 笔者以191件样品锆石平均铀、钍含量2倍为参考值筛选出高富集样品, 具体为3552个锆石数据平均铀含量 841×10^{-6} , 2倍含量为 1682×10^{-6} , 3427个锆石数据平均钍含量 564×10^{-6} , 2倍含量为 1128×10^{-6} 。依据锆石平均铀、钍含量分别高于 1682×10^{-6} 和 1128×10^{-6} 标准筛选出超基性岩、基性岩、中性岩、酸性岩高富集样品各1件、12件、6件、26件, 共45件(图1, 表1, 表2, 表3), 分别占各类样品总数的33.3%、23.1%、13%和28.9%。其中, 10件集中分布于南秦岭大巴山地区, 包括1件超基岩(表1中的3号)、6件基性岩(表1中的41~43、45、47、48号)、3件中性岩(表2中的35、38、43号), 样品多具有洋岛玄武岩(OIB)地化特征, 岩浆多来自HIMU、EMII和EMI3个富集地幔端元组分混合而成的复杂地幔区, 样品时代为451.0~422.1 Ma。24件集中分布于北秦岭南—丹凤地区, 包括20件花岗岩(表3中的24~28、34、36~42、44~47、51、53、54号), 2件基性岩(表1中的25、26号), 2件中性岩样品(表2中的25、27号)。20件花岗岩中5件采自陈家庄铀矿区, 8件采自灰池子岩体, 4件采自光

石沟铀矿区, 3件采自漂池岩体(图1), 17件属I型、S-I型, 岩浆来自地幔、壳幔混合源区, 样品时代462.8~413.6 Ma; 仅漂池岩体3件为S型, 岩浆来自地壳源区, 样品时代487.3 Ma、449.9 Ma、436.2 Ma; 2件基性岩样品采自富水岩体, 表1中的23、24号样品指示岩体具岛弧玄武岩(IAB)地化特征, 岩浆来自壳幔混合源区, 样品时代480 Ma、476 Ma; 2件中性岩样品同样采自富水岩体, 具岛弧玄武岩(IAB)地化特征, 岩浆来自地壳源区, 样品时代495.9 Ma、490 Ma。其余11件高富集样品有3件分布于陕西湾潭地区, 包括1件基性岩(表1中30号)和2件酸性岩(表3中59、63号), 基性岩属岛弧玄武岩(IAB), 源区未知, 样品时代475 Ma; 酸性岩为I型、S-I型, 岩浆源区为亏损地幔, 样品时代为499.2 Ma、485.2 Ma。剩余8件样品零星分布于甘肃天水、清水、康县、陕西西峡—镇平、河南桐柏、湖北随州地区。

总体看来, 45件高富集样品中的34件呈现出“局部长期”分布的特点, 表现为: 10件在451.0~422.1 Ma期间的以OIB型基性、中基性岩为主的样品, 约29 Ma时间集中产出在南秦岭大巴山地区, 岩浆多来自HIMU、EMII和EMI三个富集地幔端元组分混合而成的复杂地幔区; 24件在495.9~413.6 Ma期间的以I型、S-I型酸性岩为主的样品, 约82 Ma时间集中产出在北秦岭南—丹凤地区, 岩浆可来自地幔、壳幔混合和地壳源区。剩余的11件样品零星分布于甘肃天水、陕西湾潭、河南桐柏、湖北随州等地。

5 讨论

5.1 高富集样品局部长期分布原因探讨

鉴于现测锆石铀含量与早古生代锆石形成时初始铀含量差异不大(郑懋公和朱杰辰, 1984), Th^{232} 的半衰期为 1.45×10^{10} 年(侯德封等, 1974), 衰变对钍含量的影响可以忽略, 所以本文锆石铀、钍含量基本能代表锆石结晶时的初始铀、钍含量。另在锆石铀钍含量与主岩铀钍含量成正相关的研究基础之上(郑懋公和朱杰辰, 1984; 李耀菘等, 1995; 雷玮琰等, 2013), 初步认为锆石中铀钍含量的多少可在一定程度上反映其结晶时熔体中铀钍含量的高低。以此为依据, 本文将分别分析南秦岭大巴山和北秦岭南—丹凤地区长期产出高富集样品的原因。

5.1.1 南秦岭大巴山长期产出高富集样品的原因分析

南秦岭大巴山地区10件高富集样品多显示洋

岛玄武岩(OIB)地化特征,源区主要来自 HIMU, EMII 和 EMI 三个富集地幔端元组分混合而成的复杂地幔区,样品时代 451.0~422.1 Ma。锆石中高铀、钍含量指示其结晶时该地幔源区熔体中存在高丰度的铀、钍,那么,铀、钍从何处来,又是如何在地幔局部熔体长达 29 Ma 时间里富集的呢?关于南秦岭大巴山早古生代地幔性质的研究,徐学义等(2001)认为地幔柱的活动与岚皋早志留世煌斑岩浆的起源密切相关,并制约了其源区的地幔交代作用。地幔柱活动亦是南秦岭早古生代大陆裂谷—裂解的先兆。张成立等(2002)根据该区仅发育碱性岩浆活动的产物而明显缺失大陆拉斑玄武岩,同样认为该区存在短暂活动的地幔柱,因其活动时间短、热量有限未能沿陕西紫阳、岚皋、平利和湖北竹溪等地东西一线扩张打开形成新的洋盆,该区基性岩脉应来自于与地幔柱活动密切相关的富集地幔源区。后期,他则认为该区基性岩具 HIMU, EMII 和少量 EMI 端元组分混合的亏损软流圈上地幔 Sr—Nd—Pb 特征,是新元古代早期扬子北缘大洋地壳俯冲消减及其携带的陆源沉积物再循环进入亏损软流圈地幔的结果,南秦岭区地幔性质自新元古代中期至早古生代晚期的大约 360 Ma 时期内保持稳定一致(张成立等,2007)。多数学者也认为早志留世或之前北大巴山地区可能存在一期与俯冲相关的弧后拉张作用导致下部岩浆上涌侵位,最终完成该区岩浆作用(邹先武等,2011; 陈虹等,2014; 王坤明,2014; 许光等,2018a,b)。

锆石指示的地幔局部熔体可长期富集铀、钍的现象若以“自上而下”的大洋地壳和陆缘物质再循环观点来解释相当困难,一方面,铀、钍离子半径比 Fe、Ni 等基性离子大得多,因而在变质作用过程中易于随 K、Na 等迁移离开母岩。即在大洋板块俯冲部位,铀、钍不易于大量随板块俯冲进入地幔,而是随变质热液或因俯冲碰撞引起的岩浆再上升进入大陆地壳,这也是大陆地壳铀、钍富集的一个重要过程(鲍学昭和张阿利,1998),另一方面,即使它们随板块俯冲进入地幔源区,首先,因其地球化学特征表现强亲石性,长期与周围地幔储库相隔离而单独富集的可能性较小。其次,Grffithes(1986)通过模拟计算认为洋岛火山活动的原因可能来自深地幔柱,利用海洋俯冲玄武岩和沉积物中放射性元素浓度的增加不足以提供地幔柱热动力; Niu Yaoling(2009)也认为板块运动和地幔对流允许玄武岩的地幔源区中有循环古洋壳(ROC)和循环古陆壳(RCC)存在,但它

们对洋岛玄武质岩浆作用的贡献微不足道。所以,地幔熔体中高丰度的铀、钍不大可能来自浅部大洋地壳和陆缘物质再循环。相反,在地核大量富集铀、钍的前提下,“自下而上”的地幔柱假说则能很好解释这一现象。地幔柱一般被认为起源于核幔边界(Morgan, 1972; 陈凌等,2020),是连接地球深部与浅部的特殊通道。大巴山加里东期若存在地幔柱,地核中大量富集的铀、钍则可以长期沿着地幔柱由地核进入地幔,其超高含量则可能被地幔局部熔体中锆石结晶部分记录并保存,其余部分则存留在熔体、其他共存矿物和包裹体等等中。因而,相对来说,地幔熔体中高丰度的铀、钍最有可能自深部地核沿地幔柱而来。

特别需要指出的是:最近 Li Ziyi 等(2015)在华南贵东 330 矿床和诸广山 302 矿床的沥青铀矿中首次发现了 0 价的金属铀,6 件沥青铀矿样品中 U⁰ 原子百分数为 0.02%~1.57%。到目前为止,已知铀矿床的铀矿物中仅有四价和六价态铀存在,金属铀(0 价)的发现表明铀来自地球的深处,铀可作为自然状态或更低的价态形成于地球内部的强还原环境(刘成东和梁良,2017)。鲍学昭(1999)也认为在极度还原和缺挥发份的下地幔和地核,铀、钍将以低价的化合物、氧化物或金属的形式存在,且极易沉入地核。另有资料显示:在超高压条件下,深度相当于 2900 km 的地带(核幔边界),压力达到百万个大气压以上,此时原子的核外电子层完全被破坏,电子呈自由状态,为所有原子核公有,所有元素在超高压下,均呈超导电性的金属状态,即零价态(南京大学地质系,1979)。因此,金属铀(0 价)的发现不仅初步证实了上述地核“金属化”物态认识,更表明地核中极可能存在铀元素,也存在钍元素,这就为地核富集铀、钍提供了可靠前提。综上,我们初步认为地核可能大量富集铀、钍,且南秦岭大巴山存在地幔柱是该区域长期产出高富集样品的根本原因。

5.1.2 北秦岭商丹(商南—丹凤)长期产出高富集样品的原因分析

北秦岭商南—丹凤地区 24 件高富集样品岩石类型、岩浆源区比较复杂,主要为 I 型、S-I 型花岗岩,岩浆可来自地幔、壳幔混合和地壳源区,样品时代 495.9~413.6 Ma。锆石年龄和铀、钍含量指示该区域至少长达 82 Ma 的时间里地幔和地壳熔体中铀、钍含量高于周缘。北秦岭商丹地区长期产出高富集样品的原因是否可能同大巴山一样同受地幔柱活动影响?

热点一般被认为是地幔柱到达地表的作用形式 (Wilson, 1963, 1973; Morgan, 1972), 李子颖 (2006) 根据热点活动背景的不同将其分为大洋型和大陆型热点。大洋型热点活动产生于洋壳, 主要表现为: 上升的炽热地幔柱把上覆岩石圈抬升, 使地壳呈现巨大穹窿构造; 地幔柱冲破岩石圈作用于地表, 并多以大规模的基性火山喷出作用为特点。典型热点活动的例子是在大洋环境中形成火山岛链 (海山链), 如“热点行迹”的夏威夷岛链。大陆型热点活动作用于大陆, 其特点是: 由于较厚的陆壳硅铝层, 当地幔柱在深部作用于壳幔时, 一般产生熔融和混熔, 并在热动力作用下出露地表, 多产生构造伸展、多期次成分复杂的岩浆活动和火山作用、流体活动和热泉等, 且岩浆活动多以酸性组分为主, 典型例子为发育“交点型”热液铀矿床的华南贵东岩体东部 (李子颖等, 2010; 王正其等, 2010)。北秦岭商南—丹凤地区岩浆岩体与贵东岩体相比, 同样多以酸性组分为主, 且先后发现了 4 个伟晶岩型铀矿床和数十个铀矿点以及数以千计的矿化异常点, 铀矿年龄在 423~382 Ma (刘德成, 1991; 王江波等, 2020), 我们由此怀疑 495.9~413.6 Ma 期间北秦岭商南—丹凤地区可能存在与华南相似的大陆型热点, 推测地核中大量富集的铀、钍可沿着地幔柱由地核进入地幔, 并以热点为通道由地幔进入地壳, 其超高含量则被地幔和地壳熔体中锆石结晶部分记录。因此, 在地核大量富集铀、钍的状态下, 发育大陆型热点可能是该区域长期产出多类型、多源区高富集样品并生成铀矿的主要原因。

5.2 样品锆石 Th/U 变化的原因探讨

通常随着岩浆基性程度增大, 岩浆锆石的 Th/U 值增大 (Belousova et al., 2002), 本区样品也存在这种现象, 商丹地区高富集酸性岩样品主要是平均铀含量超标, Th/U 低, 大巴山高富集中基性岩样品主要是平均钍含量超标, Th/U 高 (图 2)。首先, 这不能简单的认为商丹热点熔体中只富集铀, 大巴山地幔柱岩浆熔体中只富集钍, 因商丹热点中性岩 27 号样品 FS0808 钍含量达 2384×10^{-6} , 本团队在大巴山辉绿岩样品 (LXG-8-16-2017-1B) 9 粒锆石中测得平均铀含量高达 5275×10^{-6} (待发表), 为全区最高, 所以两地质体岩浆熔体中铀、钍均可富集。其次, 岩浆锆石的 Th/U 值与铀钍在岩浆中的含量以及它们在锆石与岩浆之间的分配系数有关 (Rowley et al., 1997; Mojzsis and Harrison, 2002), 一般情况下分配系数为 0.2 (吴元保和郑永飞, 2004), 锆石 Th/U 则

多取决于岩浆中铀钍含量, 其随基性程度变化可能是由于地球中钍含量本底 (0.24 g/t) 较铀含量 (0.045 g/t) 高 (黎彤, 1976), 铀在流体中的活动性比钍强 (Rollinson and Windley, 1980; Nozhkin and Turkina, 1995), 所以流体含量相对少的基性岩浆及其锆石中 Th/U 多大于 1, 而碱性岩浆和酸性岩浆富含 H₂O、F、CO₂ 等流体, 因 F 能活化、迁移熔体中的铀, CO₂ 则是铀在转入溶液后进行搬运和沉淀的主要载体 (余达淦, 2001), 致使铀易从碱性岩浆流失, 锆石 Th/U 异常高, 如碳酸岩样品 13MY-6 (表 1), Th/U 为 4.9~22.0。而在酸性岩浆中铀易富集, 锆石 Th/U 较低, 如花岗伟晶岩样品 GSG-49 (表 3), Th/U 为 0.01~0.06。此外, 独居石等矿物也会对 Th/U 造成影响, 由于形成独居石会吸收大量钍, 如果独居石形成早于锆石, 则锆石具有低的钍含量和 Th/U 值, 反之亦然 (Harley et al., 2007)。

5.3 铀、钍在地球深部富集的指示意义探讨

5.3.1 对地球动力学研究的启示

大约自 1954 年以来, 铀、钍在地壳中富集在地幔、地核中亏损逐渐被视为地学常识, 但国内外仍有极少数学者坚持认为它们可能在地核中大量富集并成为地球演化的重要能源, 如: Elsasser (1950) 提出地核中铀和钍的衰变能可引发外核热对流; Deffeyes (1972) 和 Anderson (1975) 认为在 “D” 层产生的放射性元素的衰变热是地幔柱启动的主要动力; Feber 等 (1984) 实验研究表明 UO₂—Fe 液相体系在高于 3120 k 的温度下具完全混溶性, 从而推断地核中可能富集大量的铀, 其丰度足以维持地球磁场; Murrell 和 Burnett (1986) 实验研究指出在还原情况下, 铀、钍将脱离亲石性和倾向于亲硫性, 因此他们比钾更易于进入地核和成为行星核部的重要能源; 美国跨学科科学家 Herndon 长期致力于地球与行星体系核能驱动演化研究, 2006 年, 他在地核核裂变认识基础之上 (Herndon, 1993), 提出 “减压驱动 (Whole-Earth decompression dynamics)” 地球动力学模式 (Herndon, 2006, 2014), 并以此对超大陆的形成、冰川峡湾和海底峡谷的产生以及石油天然气成因进行了独特的分析 (Herndon, 2016a, b, 2017)。国内, 中科院地化所鲍学昭 (1999) 率先提出地球的外地核中存在大量的生热元素铀和钍的认识, 认为它们是驱动地球内部物质运动、包括板块运动的主要动力。最近, 马学昌 (2016) 认为前 4.5 Ga 以后, 铀的核裂变反应停止, 钍的核裂变继续在内地核上发生, 经外地核和地幔外导, 引发地壳的构造运动, 地

球内有充足的铀和钍可以驱动地壳运动。本文以秦岭造山带加里东岩浆岩体锆石铀、钍含量为示踪剂,结合金属铀的发现等前人研究成果,初步证实铀、钍可能在地核大量富集,并可沿地幔柱和大陆型热点在地幔和地壳中局部长期富集,这不仅为前人地核富铀、钍的认识新增了有利证据,更为地球演化由地核核能驱动的假说提供了重要“立足点”,使其成为地球与行星动力学研究中一种亟待进一步验证的可行思路。

5.3.2 对地震成因研究的启示

人类探究地震的历史悠久,对地震的认识不断加深,但地震成因至今仍在争论当中(杜建国等,2018),由 Reid 在 1906 年创立的“弹性回跳假说”一直被视为主流学说(Reid, 1910)。我们注意到:早在 1968 年,Rosue 和 Bisque 在研究贝尼奥夫带的几何特征时发现了地表构造、贝尼奥夫带和地核之间的一种特殊关系。即地球上几乎所有的贝尼奥夫带都具有 60° 左右的倾角,200~300 km 宽度的倾斜带。此带向下延伸与地核相切,向上延伸与地球表面交成一个大圆带。这大圆带同地震带、洋脊、岛弧和大型断层系有密切关系,他们认为地球的金属核(内核)表面的变化可能是地壳构造运动,包括火山喷发、地震等的根本原因(Rouse and Bisque, 1988)。该假说先见性地将地球内核表面与地震成因关联起来,Thomas (1987)通过地球深部构造分析和超高温高压实验支持上述认识。巧合的是,内地核表面被部分学者认为可能是地核中铀、钍或钚集中富集并发生核裂变之地(鲍学昭,1999; 马学昌,2016)。那地震的形成有无可能与地球内核表面放射性元素核反应生成能量的释放有着紧密的联系?

6 结论

为探索地球内部铀、钍丰度,本文基于锆石中铀钍含量的多少可在一定程度上反映其结晶时熔体中铀钍含量高低的初步认识,大胆尝试以秦岭造山带加里东期岩浆岩体为样本,开展对已发表岩浆岩体锆石 U—Th—Pb 同位素测年文献中大量锆石铀、钍含量、地化、同位素等数据的二次开发利用,通过系统的数据统计分析暂得出以下结论:

(1) 铀和钍在同一类型岩浆岩锆石中含量均相差悬殊,可在不同类型岩浆岩中富集或亏损,不具有前人认为的从超基性岩到基性岩到中性岩再到酸性岩总体增加的趋势。

(2) 高富集样品呈现在南秦岭大巴山地区和北

秦岭商南—丹凤地区长期产出的特征,结合金属铀的发现等前人研究成果分析认为:加里东期两地区可能分别存在地幔柱和大陆型热点,地核中大量铀、钍沿大巴山地幔柱和商丹大陆型热点上升致使地幔和地壳局部熔体中铀、钍富集,其超高含量被锆石结晶部分记录,上述元素迁移过程可能是两区域产出高锆石铀、钍含量样品和商丹地区生成铀矿的主要原因,即“核源—地幔柱”成因。本文通过对秦岭造山带加里东期岩浆岩锆石中铀、钍含量特征分析,初步证实铀、钍可在地核和地幔柱富集的推论。

(3) 以地核中可能富集铀、钍等放射性元素为依据,地核核能“自下而上”的驱动地球演化、引发地震等认识不是“天方夜谭”。加强岩浆岩锆石中铀、钍含量等微量、稀土元素数据的重复利用,可获得更多有意义的地质信息。

致谢: 审稿专家提出的建设性意见提升了文章质量; 成文过程中得益于前期众多参考文献作者辛勤工作所得的客观、真实、准确的数据,为本文开展探索性研究奠定了坚实的基础,在此一并表示衷心感谢!

注 释 / Notes

❶ 云南省地质矿产局. 1989. 中华人民共和国区域地质调查报告(1 : 5 万麻栗坝幅、固东街幅).

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 鲍学昭, 张阿利. 1998. 铀钍的地球化学及对地壳演化和生物进化的影响. 岩石矿物学杂志, 17(2): 160~172.
- 鲍学昭. 1999. 外地核中 U、Th 的分布、核裂变及其对地球动力学的影响. 地质论评, 45(S1): 82~92.
- 曹亮, 张权绪, 胡尚军, 段其发, 周云, 于玉帅, 邹先武, 甘金木. 2015. 大巴山南部房县东河辉绿玢岩 LA—ICP—MS 锆石 U—Pb 测年及其构造意义. 地质学报, 89(12): 2314~2322.
- 曹强, 刘家军, 李龙吟, 孙义伟, 杨明银, 李书涛, 杨尚松. 2015. 秦岭造山带南缘莽麦冲金矿床正长斑岩锆石 U—Pb 年龄及其地质意义. 中国地质, 42(5): 1303~1323.
- 陈超, 苑金玲, 孔令耀, 叶竹君, 杨青雄, 杨成, 周峰. 2018. 扬子北缘大洪山地区早古生代基性岩脉的厘定及其地质意义. 地球科学, 43(7): 2370~2388.
- 陈虹, 田蜜, 武国利, 胡健民. 2014. 南秦岭构造带内早古生代碱基性岩浆活动: 古特提斯洋裂解的证据. 地质论评, 60(6): 1437~1452.
- 陈隽璐, 何世平, 王洪亮, 徐学义, 曾佐勋, 王宗起, 闫全人. 2006. 秦岭祁连造山带接合部位基性岩墙的 LA—ICP MS 锆石 U—Pb 年龄及地质意义. 岩石矿物学杂志, 25(6): 455~462.
- 陈隽璐, 李好斌, 王洪亮, 何世平, 曾佐勋, 徐学义, 李向民. 2007. 秦祁结合部位王家岔石英闪长岩体锆石 LA—ICP MS 定年及地

- 质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 37(3): 423~431.
- 陈隽璐, 徐学义, 王宗起, 闫全人, 王洪亮, 曾佐勋, 李平. 2008a. 西秦岭太白地区岩湾—鹦鹉咀蛇绿混杂岩的地质特征及形成时代. 地质通报, 27(4): 500~509.
- 陈隽璐, 徐学义, 王洪亮, 王宗起, 曾佐勋, 王超, 李平. 2008b. 北秦岭西段唐藏石英闪长岩岩体的形成时代及其地质意义. 现代地质, 22(1): 45~52.
- 陈凌, 王旭, 梁晓峰, 万博, 刘丽军. 2020. 俯冲构造 vs. 地幔柱构造—板块运动驱动力探讨. 中国科学: 地球科学, 50: 501~514.
- 陈志宏, 陆松年, 李怀坤, 周红英, 相振群, 郭进京. 2004. 秦岭造山带富水中基性侵入杂岩的成岩时代—锆石 U-Pb 及全岩 Sm-Nd 同位素年代学新证据. 地质通报, 23(4): 322~328.
- 杜建国, 仵柯田, 孙凤霞. 2018. 地震成因综述. 地学前缘, 25(4): 255~267.
- 戈尔德施密特. 1959. 地球化学. 沈永直和郑康乐译. 北京: 科学出版社: 1~566.
- 谷浩. 2017. 河南泌阳县陈庄—马谷田一带桃园岩体形成构造环境: 岩石地球化学及锆石年代学证据. 华南地质与矿产, 33(2): 111~126.
- 郭彩莲, 陈丹玲, 樊伟, 王爱国. 2010. 豫西二郎坪满子营花岗岩体地球化学及年代学研究. 岩石矿物学杂志, 29(1): 15~22.
- 郭彩莲, 陈丹玲. 2011. 豫西二郎坪地区 O型埃达克岩的厘定及其地质意义. 地质学报, 85(12): 1994~2002.
- 何世平, 王洪亮, 徐学义, 张宏飞, 任光明. 2007. 北祁连东段红土堡基性火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其地质意义. 地球科学进展, 22(2): 143~151.
- 侯德封, 欧阳自远, 于津生. 1974. 核转变能与地球物质的演化. 北京: 科学出版社: 1~91.
- 贾晨. 2016. 秦岭三十里铺辉长杂岩体地球化学特征及构造环境. 导师: 刘军锋. 西安: 长安大学硕士学位论文: 1~51.
- 江思宏, 聂凤军, 方东会, 刘翼飞. 2009. 河南桐柏围山城地区侵入岩年代学与地球化学特征. 地质学报, 83(7): 1011~1029.
- 赖绍聪, 张国伟, 董云鹏, 裴先治, 陈亮. 2003. 秦岭一大别勉略构造带蛇绿岩与相关火山岩性质及其时空分布. 中国科学(D辑), 33(12): 1174~1183.
- 姜涌泉. 1998. 关于秦岭造山带的新认识及有关启示. 海相油气地质, 3(3): 1~5.
- 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. 导师: 吴才来. 北京: 中国地质科学院博士学位论文: 1~162.
- 雷玮琰, 施光海, 刘迎新. 2013. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展. 地学前缘, 20(4): 273~284.
- 黎彤. 1976. 化学元素的地球丰度. 地球化学, (3): 167~174.
- 李犇, 朱赖民, 张国伟, 郭波, 弓虎军, 姚安平. 2010. 北秦岭西部陕西铜峪 VHMS 型铜矿床矿化地质特征、成矿背景与矿床成因. 中国科学: 地球科学, 40(8): 970~995.
- 李春昱, 王荃, 刘雪亚, 汤耀庆. 1982. 亚洲大地构造图说明书. 北京: 地图出版社: 1~49.
- 李惠民, 陈志宏, 相振群, 李怀坤, 陆松年, 周红英, 宋彪. 2006. 秦岭造山带商南—西峡地区富水杂岩的变辉长岩中斜锆石与锆石 U-Pb 同位素年龄的差异. 地质通报, 25(6): 653~659.
- 李开文, 方怀宾, 刘坤, 郭君功, 赵焕, 王小娟. 2019a. 东秦岭南召—镇平地区早古生代花岗岩类锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 矿物岩石地球化学通报, 38(6): 1091~1099.
- 李开文, 方怀宾, 郭君功, 刘坤, 赵焕, 王小娟. 2019b. 东秦岭南召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. 地球科学, 44(1): 123~134.
- 李名则, 吴才来, 雷敏, 秦海鹏, 刘春花. 2014. 东秦岭南召地区花岗岩岩石地球化学特征及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄. 地质论评, 60(2): 427~442.
- 李平, 陈隽璐, 徐学义, 王洪亮, 李婷, 高婷. 2011. 北秦岭武关岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及岩石成因研究. 岩石矿物学杂志, 30(4): 610~624.
- 李桐. 2017. 北秦岭丹凤地区晚古生代花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义. 导师: 秦江锋. 西安: 西北大学硕士学位论文: 1~63.
- 李王晔, 李曙光, 裴先治, 张国伟. 2007. 西秦岭关子镇蛇绿混杂岩的地球化学和锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. 岩石学报, 23(11): 2836~2844.
- 李王晔. 2008. 西秦岭—东昆仑造山带蛇绿岩及岛弧型岩浆岩的年代学和地球化学研究—对特提斯洋演化的制约. 导师: 李曙光. 合肥: 中国科学技术大学博士学位论文: 1~154.
- 李耀菘, 朱杰辰, 夏毓亮. 1995. 锆石特征及铀含量在铀成矿远景评价中的意义. 中国核科技报告: 1~14.
- 李运冬, 张盼, 何孝良, 张洒. 2018. 桐柏地区北秦岭地体中片麻状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义. 西北地质, 51(4): 82~96.
- 李子颖, 黄志幸, 李秀珍, 何建国. 2010. 南岭贵东岩浆岩与铀成矿作用. 北京: 地质出版社: 1~277.
- 李子颖, 李秀珍, 林锦荣. 1999. 试论华南中新生代地幔柱构造、铀成矿作用及其找矿方向. 铀矿地质, 15(1): 9~17.
- 李子颖. 2006. 华南热点铀成矿作用. 铀矿地质, 22(2): 65~69, 82.
- 李子颖. 2009. 核地质科技论文集—庆祝核工业北京地质研究院建院 50 周年. 北京: 地质出版社: 1~404.
- 刘丙祥. 2014. 北秦岭地体东段岩浆作用与地壳演化. 导师: 陈福坤. 合肥: 中国科学技术大学博士学位论文: 1~244.
- 刘成东, 李志文, 刘江浩, 梁良. 2016. 地幔流体参与铀成矿作用的研究进展—以粤北花岗岩型铀矿床为例. 铀矿地质, 32(4): 193~199.
- 刘成东, 梁良. 2017. 热液铀矿床的沥青铀矿研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 36(2): 339~344.
- 刘成军, 裴先治, 李佐臣, 李瑞保, 裴磊, 陈有忻, 魏方辉, 高景民, 吴树宽, 王银川, 魏博, 胥晓春. 2014. 秦祁结合部位天水地区磨石沟变基性火山岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其构造意义. 地质学报, 88(3): 347~360.
- 刘春花, 吴才来, 郁源红, 雷敏, 秦海鹏, 李名则. 2013. 南秦岭麻池河乡和沙河湾花岗岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及 Lu-Hf 同位素组成. 地学前缘, 20(5): 36~56.
- 刘德成. 1991. 陈家庄铀矿同位素地质年代学特征. 矿物岩石, 11(1): 73~79.
- 刘军锋, 孙勇, 孙卫东. 2009. 秦岭拉鸡庙镁铁质岩体锆石 LA-ICP-MS 年代学研究. 岩石学报, 25(2): 320~330.
- 刘军锋, 孙勇, 李洪英, 杨磊. 2012. 北秦岭四方台基性—超基性杂岩锆石 LA-ICP-MS 年代学研究. 岩石矿物学杂志, 31(4): 524~530.
- 刘军锋, 孙勇, 张红. 2007. 北秦岭罗汉寺岩群锆石年龄及地质意义. 西北大学学报(自然科学版), 37(6): 907~911.
- 龙井山, 张贵山, 韩文华, 盛学成, 赵凯强. 2016. 北大巴山紫阳地区正长斑岩岩墙地球化学特征与锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 矿物岩石地球化学通报, 35(4): 681~691.
- 鲁显松, 黄景孟, 熊意林, 钟石玉, 聂育明, 李志刚, 朱正勇. 2019. 南秦岭土地岭铌钽矿床火山岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学特征及地质意义. 地质科技情报, 38(3): 40~51.
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 郝国杰, 周红英, 郭进京, 牛广华, 相振

- 群. 2003. 秦岭中—新元古代地质演化及对 Rodinia 超级大陆事件的响应. 北京: 地质出版社: 1~194.
- 吕星球, 王晓霞, 柯昌辉, 李金宝, 杨阳, 孟旭阳, 聂政融, 章培春. 2014. 北秦岭太白花岗岩体 LA—ICP—MS 镍石 U—Pb 测年及其地质意义. 矿床地质, 33(1): 37~52.
- 马昌前, 余振兵, 许聘, 王琳燕. 2004. 桐柏一大别山南缘的志留纪 A 型花岗岩类: SHRIMP 镍石年代学和地球化学证据. 中国科学(D 辑: 地球科学), 34(12): 1100~1110.
- 马学昌. 2016. 地壳运动驱动力的探讨—核能与地球演化. 地质学报, 90(1): 24~36.
- 孟祥舒, 何艳红, 陈亮, 务磊. 2017. 秦岭—祁连结合部位早古生代埃达克岩的发现及其造山作用意义. 地质学报, 91(12): 2679~2696.
- 南京大学地质学系. 1979. 地球化学(修订本). 北京: 科学出版社: 47.
- 裴先治, 李勇, 陆松年, 陈志宏, 丁仁平, 胡波, 李佐臣, 刘会彬. 2005. 西秦岭天水地区关子镇中基性岩浆杂岩体镍石 U—Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 24(1): 23~29.
- 裴先治, 丁仁平, 李佐臣, 刘战庆, 李高阳, 李瑞保, 王飞, 李夫杰. 2007a. 西秦岭北缘关子镇蛇绿岩的形成时代: 来自辉长岩中 LA—ICP—MS 镍石 U—Pb 年龄的证据. 地质学报, 81(11): 1550~1561.
- 裴先治, 刘战庆, 丁仁平, 李佐臣, 李高阳, 李瑞保, 王飞, 李夫杰. 2007b. 甘肃天水地区百花岩浆杂岩的镍石 LA—ICP—MS U—Pb 定年及其地质意义. 地球科学进展, 22(8): 818~827.
- 裴先治, 孙仁奇, 丁仁平, 刘会彬, 李佐臣, 刘战庆, 孟勇. 2007c. 陇东地区阎家店闪长岩 LA—ICP—MS 镍石 U—Pb 测年及其地质意义. 中国地质, 34(1): 8~16.
- 邱检生, 肖娥, 胡建, 徐夕生, 蒋少涌, 李真. 2008. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 镍石 U—Pb 年代学、地球化学和 Nd—Hf 同位素制约. 岩石学报, 24(11): 2468~2484.
- 任龙. 2019. 秦岭造山带西段唐藏地区加里东—印支期岩浆作用及地质意义. 导师: 梁华英. 北京: 中国科学院大学博士学位论文: 1~172.
- Rouse G, Bisque R. 1988. 地核表面与地震活动——一种地震成因的新理论. 何永年等译: 地震地质译丛, (1): 38~41.
- 苏犁, 宋述光, 宋彪, 周鼎武, 郝建荣. 2004. 松树沟地区石榴辉石岩和富水杂岩 SHRIMP 镍石 U—Pb 年龄及其对秦岭造山带构造演化的制约. 科学通报, 49(12): 1209~1211.
- 孙仁奇. 2011. 祁连山东段葫芦河变质基性火山岩的年代学地球化学特征及构造意义. 导师: 裴先治. 西安: 长安大学硕士学位论文: 1~61.
- 唐欢. 2017. 宝鸡—天水地区北秦岭早古生代变质作用与岩浆活动. 导师: 张宏福. 西安: 西北大学硕士学位论文: 1~71.
- 陶琰, 马言胜, 苗来成, 朱飞霖. 2008. 云南金宝山超镁铁岩体镍石 SHRIMP 年龄. 科学通报, 53(22): 2828~2832.
- 万俊, 刘成新, 杨成, 刘万亮, 李雄伟, 付娟, 刘虹显. 2016. 南秦岭竹山地区粗面质火山岩地球化学特征、LA—ICP—MS 镍石 U—Pb 年龄及其大地构造意义. 地质通报, 35(7): 1134~1143.
- 王江波, 秦江锋, 胡鹏, 张良, 赵友东, 张泽中. 2018. 北秦岭早古生代宽坪岩体两期花岗质岩浆镍石 U—Pb 年代学、地球化学及其实质意义. 地质论评, 64(1): 127~140.
- 王江波, 侯晓华, 李万华, 张良, 赵友东, 陈宏斌, 李卫红. 2020. 东秦岭丹凤地区伟晶岩型铀矿化特征与成矿模式. 地球科学, 45(1): 61~71.
- 王锦, 第五春荣, 孙勇, 刘晔, 王维. 2012. 豫西西峡地区青岗坪花岗闪长岩 LA—ICP—MS 镍石 U—Pb 测年、Hf 同位素组成及其地质意义. 地质通报, 31(6): 884~895.
- 王婧, 张宏飞, 徐旺春, 蔡宏明. 2008. 西秦岭党川地区花岗岩的成因及其构造意义. 地球科学, 33(4): 474~486.
- 王坤明. 2014. 陕西紫阳—岚皋地区镁铁质岩岩石成因、构造环境及成矿作用研究. 导师: 王宗起. 北京: 中国地质科学院博士学位论文: 1~175.
- 王涛. 2008. 南秦岭增生杂岩带构造岩石组合及其形成过程. 导师: 王宗起. 北京: 中国地质科学院博士学位论文: 1~108.
- 王涛, 王宗起, 闫臻, 闫全人, 张英利, 向忠金. 2009a. 南秦岭大堡组奥陶纪洋岛玄武岩的识别及其构造意义: 来自地球化学和年代学证据. 岩石学报, 25(12): 3241~3250.
- 王涛, 王晓霞, 田伟, 张成立, 李伍平, 李舢. 2009b. 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. 中国科学(D 辑: 地球科学), 39(7): 949~971.
- 王宗起, 闫全人, 闫臻, 王涛, 姜春发, 高联达, 李秋根, 陈隽璐, 张英利, 刘平, 谢春林, 向忠金. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分. 地质学报, 83(11): 1527~1546.
- 王正其, 李子颖. 2007. 幔源铀成矿作用探讨. 地质论评, 53(5): 608~615.
- 王正其, 李子颖. 2016. 浙西新路盆地中生代岩浆作用与铀成矿深部动力学过程. 北京: 地质出版社: 1~132.
- 王正其, 李子颖, 吴烈勤, 陈国胜. 2010. 幔源铀成矿作用的地球化学证据—以下庄小水“交点型”铀矿床为例. 铀矿地质, 26(1): 24~34.
- 魏方辉, 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 裴磊, 高景民, 王银川, 刘成军, 吴树宽, 陈有忻. 2012. 甘肃天水地区早古生代黄门川花岗闪长岩体 LA—ICP—MS 镍石 U—Pb 定年及构造意义. 地质通报, 31(9): 1496~1509.
- 沃伊特克维奇. 1958. 放射性地质学及其在认识地球历史上的意义. 胡受奚和孙大中译. 北京: 地质出版社: 1~125.
- 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. 岩石学报, 23(6): 1217~1238.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 镍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(16): 1589~1604.
- 伍皓, 夏彧, 周恩恩, 张建军. 2020. 高分异花岗岩浆可能是华南花岗岩型铀矿床主要铀源—来自诸广山南体花岗岩镍石铀含量的证据. 岩石学报, 36(2): 589~600.
- 向忠金, 闫全人, 宋博, 王宗起. 2016. 北大巴山超基性、基性岩墙和碱质火山杂岩形成时代的新证据及其地质意义. 地质学报, 90(5): 896~916.
- 熊潇. 2017. 秦岭造山带典型矿床地质—地球化学及其对关键造山事件的指示—以铜峪铜矿床、温泉钼矿床和小河口铜矿床为例. 导师: 朱赖民. 西安: 西北大学博士学位论文: 1~261.
- 徐世钊. 2017. 商丹构造带东段辉长岩年代学和地球化学研究. 导师: 李玮. 西安: 西北大学硕士学位论文: 1~54.
- 徐通, 郭岐明, 陈清敏, 王强, 张拴厚, 左文乾, 任仓智. 2018. 北秦岭宝鸡地区早志留世鸡冠崖高分异碰撞型花岗岩年龄、地球化学特征及地质意义. 地质科技情报, 37(1): 79~87.
- 徐学义, 夏林圻, 夏祖春, 黄月华. 2001. 岚皋早古生代碱质煌斑杂岩地球化学特征及成因探讨. 地球科学, 22(1): 55~60.
- 许光, 王坤明, 王宗起, 张英利, 王刚, 武昱东. 2018a. 北大巴山花栎村镁铁质岩地球化学、年代学及其构造环境制约. 地质通报, 37(7): 1279~1290.
- 许光, 王刚, 王宗起, 武昱东, 王东升, 王嘉玮. 2018b. 湖北武当山南缘房县地区早古生代镁铁质岩石成因及大地构造意义. 地球学报, 39(3): 306~318.
- 许志琴, 卢一伦, 汤耀庆, Mattauer M, Matte P H, Malavieille J, Tappronnier P, Maluski H. 1986. 东秦岭造山带的变形特征与构

- 造演化. 地质学报, (3): 237~247.
- 闫全人, 王宗起, 陈隽璐, 闫臻, 王涛, 李秋根, 姜春发, 张宗清. 2007. 北秦岭斜峪关群和草滩沟群火山岩成因的地球化学和同位素约束、SHRIMP 年代及其意义. 地质学报, 81(4): 488~500.
- 杨士杰, 陈丹玲, 宫相宽, 赵姣. 2015. 北秦岭东段二郎坪群基性火山岩中浅色岩体的地球化学、年代学及其地质意义. 岩石学报, 31(7): 2009~2022.
- 杨阳. 2017. 秦岭造山带中段花岗岩的时空格架、源区物质及其对地壳深部物质组成的示踪. 导师:王晓霞. 北京:中国地质科学院博士学位论文: 1~185.
- 杨钊, 董云鹏, 柳小明, 张津海. 2006. 西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩锆石 LA—ICP—MS U—Pb 定年. 地质通报, 25(11): 1321~1325.
- 杨志华, 郭俊锋, 苏生瑞, 李勇, 苏春乾, 张传林, 黑爱芝, 梁云. 2002. 秦岭造山带基础地质研究新进展. 中国地质, 29(3): 246~256.
- 易志强, 文景, 赖群生, 谢珂, 闫贺龙, 王忠建, 李帅. 2017. 五垛山复式岩基锆石 U—Pb 年龄及其地质意义. 地质找矿论丛, 32(4): 594~603.
- 殷鸿福, 黄定华. 1995. 早古生代镇渐地块与秦岭多岛小洋盆的演化. 地质学报, 69(3): 193~204.
- 应元灿. 2018. 湖北庙垭碳酸岩杂岩体年代学和地球化学特征及成岩成矿过程. 导师: 陈唯. 武汉: 中国地质大学硕士学位论文: 1~119.
- 余达淦. 2001. 华南中生代花岗岩型、火山岩型、外接触带型铀矿找矿思路(I). 铀矿地质, 17(5): 257~265.
- 袁峰, 刘家军, 吕古贤, 沙亚洲, 张帅, 翟德高, 王功文, 张宏远, 刘刚, 杨尚松, 王菊婵, 仁王瑞. 2017. 北秦岭光石沟铀矿区花岗岩、伟晶岩锆石 U—Pb 年代学、地球化学及成因意义. 地学前缘, 24(6): 25~45.
- 张成立, 高山, 袁洪林, 张国伟, 晏云翔, 罗静兰, 罗金海. 2007. 南秦岭早古生代地幔性质: 来自超镁铁质、镁铁质岩脉及火山岩的 Sr—Nd—Pb 同位素证据. 中国科学: 地球科学, 37(7): 857~865.
- 张成立, 高山, 张国伟, 柳小明, 于平. 2002. 南秦岭早古生代碱性岩墙群的地球化学及其地质意义. 中国科学(D辑), 32(10): 819~829.
- 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 郭安林, 孟庆任, 刘少峰, 程顺有, 姚安平, 张宗清, 裴先治, 李三忠. 2003. 秦岭一大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带. 中国科学(D辑), 33(12): 1121~1134.
- 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 姚安平. 2019. 关于秦岭造山带. 地质力学学报, 25(5): 746~768.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社: 1~863.
- 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 1995. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义. 岩石学报, 11(2): 101~114.
- 张帅, 刘家军, 袁峰, 刘刚, 王功文, 张宏远, 张红雨. 2019. 陕西商丹陈庄铀矿区花岗岩体和伟晶岩脉的 U—Pb 年龄、地球化学特征与铀成矿作用. 地学前缘, 26(5): 270~289.
- 张元朔. 2019. 北秦岭造山带东段显生宙花岗岩浆作用及其演化规律. 导师: 陈福坤, 张贺. 合肥: 中国科学技术大学博士学位论文: 1~158.
- 赵姣, 陈丹玲, 谭清海, 陈森, 朱小辉, 郭彩莲, 刘良. 2012. 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. 地学前缘, 19(4): 118~125.
- 赵如意, 李卫红, 姜常义, 王江波, 汪邦耀, 惠争卜. 2014. 东秦岭丹凤地区黄龙庙二长花岗岩 LA—ICP—MS 锆石 U—Pb 年龄、岩石地球化学特征及其地质意义. 地质论评, 60(5): 1123~1132.
- 赵振华. 2016. 微量元素地球化学原理. 第二版. 北京: 科学出版社: 496~511.
- 郑菲. 2019. 秦岭—桐柏造山带早古生代镁铁质岩浆岩地球化学研究. 导师: 赵子福, 戴立群. 合肥: 中国科学技术大学博士学位论文: 1~137.
- 郑懋公, 朱杰辰. 1984. 我国中酸性岩浆岩锆石铀含量变化及其地质意义. 放射性地质, 23(3): 17~23.
- 邹先武, 段其发, 汤朝阳, 曹亮, 崔森, 赵武强, 夏杰, 王磊. 2011. 北大巴山镇坪地区辉绿岩锆石 SHRIMP U—Pb 定年和岩石地球化学特征. 中国地质, 38(2): 282~291.
- 左文乾, 沙亚洲, 陈冰, 罗忠成, 张展适. 2010. 丹凤地区光石沟铀矿床大毛沟岩株锆石 U—Pb 同位素定年及其地质意义. 铀矿地质, 26(4): 222~227.
- Anderson D L. 1975. Chemical plumes in the mantle. Geological Society of America Bulletin, 86: 1593~1600.
- Bao Xuezao, Zhang Ali. 1998&. Geochemistry of U and Th and its influence on the origin and evolution of the earth's crust and the biological evolution. Acta Petrologica et Mineralogica, 17(2): 160~172.
- Bao Xuezao. 1999&. Distribution of U and Th and their nuclear fission in the outer core of the earth and their effects on the geodynamics. Geological Review, 45(S1): 82~92.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, Fisher N I. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143: 602~622.
- Cao Liang, Zhang Quanxu, Hu Shangjun, Duan Qifa, Zhou Yun, Yu Yushuai, Zou Xianwu, Gan Jimmu. 2015&. LA—ICP—MS zircon U—Pb age of diabase porphyry from the Donghe area, Fangxian in South Daba Mountain and its tectonic significance. Acta Geologica Sinica, 89(12): 2314~2322.
- Cao Qiang, Liu Jiajun, Li Longyin, Sun Yiwei, Yang Mingyin, Li Shutao, Yang Shangsong. 2015&. Zircon U—Pb age of ore-bearing rock in the Qiaomaichong gold deposits on the southern margin of the Qinling orogenic belt and its geological significance. Geology in China, 42(5): 1303~1323.
- Chen Chao, Yuan Jinling, Kong Lingyao, Ye Zhujun, Yang Qingxiang, Yang Chen, Zhou Feng. 2018&. Documentation of Early Paleozoic mafic dykes in the Dahongshan region, Northern Yangze block and its geological significance. Earth Science, 43(7): 2370~2388.
- Chen Hong, Tian Mi, Wu Guoli, Hu Jianmin. 2014&. The Early Paleozoic alkaline and mafic magmatic events in Southern Qinling belt, Central China: Evidences for the break-up of the Paleo-tethyan Ocean. Geological Review, 60(6): 1437~1452.
- Chen Juanlu, He Shiping, Wang Hongliang, Xu Xueyi, Zeng Zuoxun, Wang Zongqi, Yan Quanren. 2006&. Zircon LA—ICP MS U—Pb age of mafic dykes in the area between the Qinling and the Qilian orogenic belts and its geological implications. Acta Petrologica et Mineralogica, 25(6): 455~462.
- Chen Juanlu, Li Haobin, Wang Hongliang, He Shipin, Zeng Zuoxun, Xu Xueyi, Li Xiangmin. 2007&. LA—ICPMS Zircon U—Pb dating of a quartz diorite pluton from Wangjiacha, the junction area between the Qinling and Qilian orogenic belts and its tectonic significance. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 37(3): 423~431.

- Chen Juanlu, Xu Xueyi, Wang Zongqi, Yan Quanren, Wang Hongliang, Zeng Zuoxun, Li Ping. 2008a&. Geological features and SHRIMP U-Pb zircon age of the Yanwan– Yinggezui ophiolitic mélange in the Taibai area, West Qinling, China. *Geologica Bulletin of China*, 27 (4) : 500~509.
- Chen Juanlu, Xu Xueyi, Wang Hongliang, Wang Zongqi, Zeng Zuoxun, Wang Chao, Li Ping. 2008b&. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Tangzang quartz-diorite pluton in the west segment of North Qinling Mountains and its tectonic significance. *Geoscience*, 22 (1) : 45~52.
- Chen Ling, Wang Xu, Liang Xiaofeng, Wan Bo, Liu Lijun. 2020. Subduction tectonics vs. Plume tectonics—Discussion on driving forces for plate motion. *Science China Earth Sciences*, 63: 315~328.
- Chen Zhihong, Lu Songnian, Li Huaikun, Zhou Hongying, Xiang Zhenqun, Guo Jinjing. 2004&. Age of the Fushui intermediate-intrusive complex in the Qinling orogen: New zircon U-Pb and whole-rock Sm and Nd isotope chronological evidence. *Geological Bulletin of China*, 23(4) : 322~328.
- Claiborne L L, Miller C F, Wooden J L. 2010. Trace element composition of igneous zircon: a thermal and compositional record of the accumulation and evolution of a large silicic batholith, Spirit Mountain, Nevada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160: 511~513.
- Defferys K S. 1972. Plume convection with a upper mantle temperature inversion. *Nature*, 240: 539~544.
- Department of Geology, Nanjing University. 1979 #. *Geochemistry* (revised edition). Beijing: Science Press; 47.
- Dong Yunpeng, Neubauer F, Genser J, Sun Shengsi, Yang Zhao, Zhang Feifei, Cheng Bin, Liu Xiaoming, Zhang Guowei. 2018. Timing of orogenic exhumation processes of the Qinling Orogen: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. *Tectonics*; 1~31.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Neubauer F, Liu XiaoMing, Genser J, Hauzenberger C. 2011a. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*. 41 (3) : 213~237.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Hauzenberger C, Neubauer F, Yang Zhao, Liu Xiaoming. 2011b. Palaeozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: Evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks. *Lithos*, 122(1 ~2) : 39~56.
- Du Jianguo, Wu Ketian, Sun Fengxia. 2018&. Earthquake generation: a review. *Earth Science Frontiers*, 25(4) : 255~267.
- Elsasser W M. 1950. The Earth's interior and geomagnetism. *Review of Modern Physics*, 22: 1~35.
- Faure P, Bouhifd M A, Boyet M, Manthilake G, Clesi V, Devidal J L. 2020. Uranium and thorium partitioning in the bulk silicate Earth and the oxygen content of Earth's core. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 275: 83~98.
- Feber R C, Wallace T C, Libby L M. 1984. Uranium in the Earth's core. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 65 (44) : 785.
- Goldschmidt V M. 1959#. *Geochemistry*. Beijing: Science Press; 1 ~566.
- Griffiths R W. 1986. Dynamics of mantle thermals with constant buoyancy or anomalous internal heating. *Earth and Planetary Science Letters*, 78: 435~446.
- Gu Hao. 2017&. Genesis of Taoyuan intrusion in Chenzhuang-Magutian area, Biyang County, Henan Province: Evidence from geochemistry and zircon U-Pb geochronology. *Geology and Mineral Resources of South China*, 33(2) : 111~126.
- Guo Cailian, Chen Danling, Fan Wei, Wang Aiguo. 2010&. Geochemical and zircon U-Pb chronological studies of the Manziying granite in Erlangping area, western Henan Province, *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(1) : 15~22.
- Guo Cailian, Chen Danling. 2011&. Identification of O-type Adakitic Rocks in Erlangping area, Western of Henan Province, and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 85 (12) : 1994~2002.
- Harley S L, Kelly N M, Moller A. 2007. Zircons behaviour and the thermal histories of mountain chains. *Elements*, 3(1) : 25~30.
- He Shiping, Wang Hongliang, Xu Xueyi, Zhang Hongfei, Ren Guangming. 2007&. LA-ICP-MS U-Pb chronological study of zircons from Hongtubu basic volcanic rocks and Its geological significance in the east segment of North Qilian orogenic belt. *Advances in Earth Sciences*, 22(2) : 143~151.
- Herndon J M. 1993. Feasibility of a nuclear fission reactor at the centre of the earth as the energy source for the geomagnetic field. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 45(5) : 423~437.
- Herndon J M. 2006. Solar system processes underlying planetary formation, geodynamics, and the georeactor. *Earth, Moon, and Planets*, 99: 53~89.
- Herndon J M. 2014. Terracentric nuclear fission georeactor: background, basis, feasibility, structure, evidenceand geophysical implications. *Current Science*, 106(4) : 528~541.
- Herndon J M. 2016a. New concept for the origin of fjords and submarine canyons: Consequence of whole-Earth decompression dynamics. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 7(4) : 1~10.
- Herndon J M. 2016b. Fictitious supercontinent cycles. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 7(1) : 1~7.
- Herndon J M. 2017. New concept on the origin of petroleum and natural gas deposits. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 7: 341~352.
- Hou Defeng, Ouyang Ziyuan, Yu Jinsheng. 1974 #. *Nuclear Transformation Energy and the Evolution of Earth's Material*. Beijing: Science Press; 1~91.
- Hsu K J, Wang Qingchen, Li Jiliang, Zhou Da, Sun Shu. 1987. Tectonic evolution of Qinling Mountains, China. *Elogiae Geologicae Helvetiae*, 80(3) : 735~752.
- Jia Chen. 2016&. Geochemical features and tectonic environment of gabbro complex rock of Sanshilipu in Qinling orogenic belt. Supervisor: Liu Junfeng. Xi'an: Master Dissertation of the Chang'an University; 1~51.
- Jiang Sihong, Nie Fengjun, Fang Donghui, Liu Yifei. 2009&. Geochronoloy and geochemical features of the main intrusive rocks in the Weishancheng area, Tongbai County, Henan. *Acta Geologica Sinica*, 83(7) : 1011~1029.
- Jiang Yongquan. 1998#. New understanding of the Qinling orogenic belt and its implications. *Marine Origin Petroleum Geology*, 3 (3) : 1~5.
- Lai Shaocong, Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Pei Xianzhi, Chen Liang. 2003#. The ophiolites and related volcanic rocks in the Qinling-Dabie-Mianlue tectonic belt and their spatial and temporal distribution. *Science in China (series D)*, 33(12) : 1174~1183.

- Lei Min. 2010&. Petrogenesis of granites and their relation to tectonic evolution of orogen in the East part of Qinling orogenic belt. Supervisor: Wu Cailai. Beijing: Doctoral Dissertation of the Chinese Academy of Geological Sciences: 1~162.
- Lei Weiyuan, Shi Guanghai, Liu Yingxin. 2013&. Research progress on trace element characteristics of zircons of different origins. *Earth Science Frontiers*, 20(4): 273~284.
- Li Ben, Zhu Laiming, Zhang Guowei, Guo Bo, Gong Hujun, Yao Anping. 2010 #. Geological characteristics, metallogenetic background, and genesis of the Tongyu VHMS copper deposit in the west part of the North Qinling, Shanxi Province. *Science China Earth Sciences*, 40(8): 970~995.
- Li Chunyu, Wang Quan, Liu Xueya, Tang Yaoqing. 1982&. Exploratory Notes to the Tectonic Map of Asia. Beijing: Cartographic Publishing House; 1~49.
- Li Huiming, Chen Zihong, Xiang Zhenqun, Li Huaikun, Lu Songnian, Zhou Hongying, Song Biao. 2006&. Difference in U-Pb isotope ages between baddeleyite and zirconin metagabbro from the Fusgui complex in the Shangnan-Xiaarea, Qinling orogen. *Geological Bulletin of China*, 25(6): 653~659.
- Li Kaiwen, Fang Huaibin, Liu Kun, Guo Jungong, Zhao Huan, Wang Xiaojuan. 2019a&. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and geological significance of Early Paleozoic granitoids in the Nanzhao-Zhenping area, eastern Qinling orogenic belt. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 38(6): 1091~1099.
- Li Kaiwen, Fang Huaibin, Guo Jungong, Liu Kun, Zhao Huan, Wang Xiaojuan. 2019b&. Petrogeochemistry, zircon U-Pb dating and geological significance of Two-mica granites from Wuduoshan granite in Nanzhao county, Eastern Qinling Mountains. *Earth Science*, 44(1): 123~134.
- Li Mingze, Wu Cailai, Lei Min, Qin Haipeng, Liu Chunhua. 2014&. Petrological characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of granitoid in Nanzhao area, Eastern Qinling Mountains. *Geological Review*, 60(2): 427~442.
- Li Ping, Chen Juanlu, Xu Xueyi, Wang Hongliang, Li Ting, Gao Ting. 2011&. Petrogenesis and LA-ICPMS zircon U-Pb dating of the Wuguan intrusive body in North Qinling. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(4): 610~624.
- Li Tong. 2017&. Geochronology and geochemistry of Late Paleozoic granites in the Danfeng area, North Qinling belt. Supervisor: Qing Jiangfeng. Xi'an: Master Dissertation of the Northwest University: 1~63.
- Li Tong. 1976&. Chemical element abundances in the earth and its major shells. *Geochimica*, (3): 167~174.
- Li Wangye, Li Shuguang, Pei Xianzhi, Zhang Guowei. 2007&. Geochimistry and zircon SHRIMP U-Pb ages of the Guanzizhen ophiolite complex, the Western Qinling orogen, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2836~2844.
- Li Wangye. 2008&. Geochronological and geochemistry of the ophiolites and island-arc-type igneous rocks in the Western Qinling and the Eastern Kunlun orogen: Implication for the evolution of the Tethyan Ocean. Supervisor: Chen Fukun. Hefei: Doctoral Dissertation of the University of Science and Technology of China: 1~154.
- Li Yundong, Zhang Pan, He Xiaoliang, Zhang Sa. 2018&. Zircon U-Pb dating, geochemical characteristics of the gneissic granite from North Qinling terrain in Tongbai area and their geological significance. *Northwestern Geology*, 51(4): 82~96.
- Li Yaosong, Zhu Jiechen, Xia Yuliang. 1995&. The significance of zircon characteristic and its uranium concentration in evaluation of uranium metallogenetic prospect. *China Nuclear Science and Technology Report*: 1~14.
- Li Ziying. 2009#. *Science and Technology Papers of Nuclear Geology: Celebrating the 50th Anniversary of Beijing Geological Research Institute of Nuclear Industry*. Beijing: Geological Press: 1~404.
- Li Ziying, Huang Zhixing, Li Xiuzhen, He Jianguo. 2010&. *Guidong Magmatite and Uranium Mineralization in Nanling Area*. Beijing: Geological Press: 1~277.
- Li Ziying, Li Xiuzhen, Lin Jinrong. 1999&. On the Meso-Cenozoic mantle plume tectonics, its relationship to uranium metallogenesis and prospecting directions in South China. *Uranium Geology*, 15(1): 9~17.
- Li Ziying, Huang Zhizhang, Li Xiuzhen, Guo Jian, Fan Chou. 2015. The discovery of natural native uranium and its significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(5): 1561~1567.
- Li Ziying. 2006&. Hostspot uranium metallogenesis in South China. *Uranium Geology*, 22(2): 65~69, 82.
- Liu Bingxiang. 2014&. Magmatism and crustal evolution in the eastern North Qinling Terrain. Supervisor: Chen Fukun. Hefei: Doctoral Dissertation of the University of Science and Technology of China: 1~244.
- Liu Chengdomg, Liang Liang. 2017&. The progress in the study of pitchblende of hydrothermal uranium deposit. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(2): 339~344.
- Liu Chengdong, Li Zhiwen, Liu Jianghao, Liang Liang. 2016&. Research progress in mantle fluids involved uranium metallization: A case study of granite type uranium deposit cluster area, Northern Guangdong. *Uranium Geology*, 32(4): 193~199.
- Liu Chengjun, Pei Xianzhi, Li Zuochen, Li Ruibao, Pei Lei, Chen Youxin, Wei Fanghui, Gao Jingming, Wu Shukuan, Wang Yinshuan, Wei Bo, Xu Xiaochun. 2014&. Moshigou meta-basalt in the Tianshui area in the conjunction of the Qinling orogens: Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 88(3): 347~360.
- Liu Decheng. 1991&. Isotopic geochronology characteristics of uranium deposit from Chenjiazhuang. *Mineralogy and Petrology*, 11(1): 73~79.
- Liu Chunhua, Wu Cailai, Gao Yuanhong, Lei Min, Qin Haipeng, Li Mingze. 2013&. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Lu-Hf isotopic system of machihe country and Shahewan granitoid rock masses, South Qinling belt, central China. *Earth Science Frontiers*, 20(5): 36~56.
- Liu Junfeng, Sun Yong, Sun Weidong. 2009&. LA-ICP-MS Zircon dating from the Lajimiao mafic complex in the Qinling orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 320~330.
- Liu Junfeng, Sun Yong, Zhang Hong. 2007&. Zircon age of Luohansi group in the Northern Qinling and their geological significance. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 37(6): 907~911.
- Liu Junfeng, Sun Yong, Li Hongying, Yang Lei. 2012&. LA-ICP-MS zircon dating of Sifangtai mafic-ultramafic complex in the North Qinling orogenic belt. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 524~530.
- Long Jingshan, Zhang Guishan, Han Wenhua, Sheng Xuecheng, Zhao Kaiqiang. 2016&. Geochemical characteristics and zircon U-Pb dating of the syenite porphyry dike swarms in the zi yang area in the Northern Daba Mountains. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and*

- Geochemistry, 35(4): 681~691.
- Lu Songnian, Li Huaikun, Chen Zihong, Hao Guojie, Zhou Hongying, Guo Jingjing, Niu Guanghua, Xiang Zhenqun. 2003#. Qinling Middle – Neoproterozoic Geological Evolution and Response to Rodinia Supercontinent Event. Beijing: Geological Publishing House: 1~194.
- Lu Xiansong, Huang Jingmeng, Xiong Yilin, Zhong Shiyu, Nie Yuming, Li Zhigang, Zhu Zhengyong. 2019&. Geochemistry and zircon U–Pb geochronology of the volcanic rocks in the Tuding Nb – ta deposit, south Qinling orogenic belt, and its geological implications. Geological Science and Technology Information, 38(3): 40~51.
- Liu Xingqiu, Wang Xiaoxia, Ke Changhui, Li Jinbao, Yang Yang, Meng Xuyang, Nie Zhenrong, Zhang Peichun. 2014&. LA – ICP – MS zircon U–Pb dating of Taibai pluton in North Qinling Mountains and its geological significance. Mineral Deposits, 33(1): 37~52.
- Ma Changqian, She Zhenbing, Xu Pin, Wang Linyan. 2004#. Silurian A – type granites in the southern margin of Tongbai – Dabie Mountains: SHRIMP zircon chronology and geochemical evidence. Science in China (Series D: Earth Sciences), 34 (12): 1100~1110.
- Ma Xuechang. 2016&. Discussion on the driving force of crustal movement: Nuclear energy and earth evolution. Acta Geologica Sinica, 90(1): 24~36.
- Meng Xiangshu, He Yanhong, Chen Liang, Wu Lei. 2017&. The Discovery of the Early Paleozoic Adakitic Rocks in the Conjunction of the Qinling and Qilian Orogenic Belts and Its Implications on the Orogenic Processes. Acta Geologica Sinica, 91 (12): 2679~2696.
- Mohammed Ishag Mohammed Abdalla Samed. 2018. Tracking the genesis of Paleozoic granites from Qinling Orogen, Central China by zircon U–Pb geochronological, geochemical and isotopic data. Supervisor: Wu Yuanbao. Wuhan: Doctoral Dissertation of the China University of Geosciences: 1~82.
- Mojzsis S J, Harrison T M. 2002. Establishment of a 3.83-Ga magmatic age for the Akilia tonalite (southern West Greenland). Earth and Planetary Science Letters, 202: 563~576.
- Morgan W J. 1972. Deep mantle convection plumes and plate motions. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 56: 203~213.
- Murrell M T, Burnett D S. 1986. Partitioning of K, U, and Th between sulfide and silicate liquids – Implications for radioactive heating of planetary cores. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 91 (B8): 8126~8136.
- Niu Yaoling. 2009. Some basic concepts and problems on the petrogenesis of intra – plate ocean island basalts. Chinese Science Bulletin, 54: 4148~4160.
- Nozhkin A D, Turkina O M. 1995. Radiogeochimistry of the charnockite – granulite complex, Sharyzhalgay Window, Siberian Platform. Geochemistry International, 32: 62~78.
- Pei Xianzhi, Ding Sanping, Li Zuochen, Liu Zhanqing, Li Gaoyang, Li Ruibao, Wang Fei, Li Fujie. 2007a&. LA – ICP – MS zircon U–Pb dating of the gabbro from the Guanzizhen ophiolite in the Northern margin of the Western Qinling and its geological significance. Acta Geologica Sinica, 81 (11): 1550~1561.
- Pei Xianzhi, Li Yong, Lu Songnian, Chen Zihong, Ding Sanping, Hu Bo, Li Zuochen, Liu Huibin. 2005&. Zircons U–Pb ages of the Guanzizhen inter–mediate–basic igneous complex in Tianshui area, West Qinling, and their geological significance. Geological Bulletin of China, 24(1): 23~29.
- Pei Xianzhi, Liu Zhanqing, Ding Sanping, Li Zuochen, Li Gaoyang, Li Ruibao, Wang Fei, Li Fujie. 2007b&. Zircon LA – ICP – MS U–Pb dating of the gabbro from the Baihua igneous complex in Tianshui area, Eastern Gansu, and its geological significance. Advances in Earth Sciences, 22(8): 818~827.
- Pei Xianzhi, Sun Renqi, Ding Sanping, Liu Huibin, Li Zuochen, Liu Zhanqing, Meng Yong. 2007c&. LA – ICP – MS zircon U – Pb dating of the Yanjiadian diorite in the eastern Qilian Mountains and its geological significance. Geology in China, 34(1): 8~16.
- Qin Zhengwei, Wu Yuanbao, Wang Hao, Gao Shan, Zhu Liuqin, Zhou Lian, Yang Saihong. 2014. Geochronology, geochemistry, and isotope compositions of Piaochi S – type granitic intrusion in the Qinling orogen, central China: Petrogenesis and tectonic significance. Lithos, 202~203: 347~362.
- Qiu Jiansheng, Xiao E, Hu Jian, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong, Li Zhen. 2008&. Petrogenesis of highly fractionated I type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constraints from zircon U – Pb geochronology, geochemistry and Nd – Hf isotopes. Acta Petrologica Sinica, 24(11): 2468~2484.
- Ren Long. 2019&. The Caledonian and Indosian magmatism in the Tangzang area of the Western Qinling orogenic belt and their tectonic implications. Supervisor: Liang Huaying. Beijing: Doctoral Dissertation of the University of Chinese Academy of Sciences: 1~172.
- Reid H F. 1910. The Mechanism of the Earthquake. Washington, D. C: Carnegie Institution, 1~192.
- Rollinson H R, Windley B F. 1980. Selective elemental depletion during metamorphism of Archean granulites. Contributions to Mineralogy and Petrology, 72: 257~263.
- Rouse G, Bisque R. 1988#. The surface of the Earth's core and seismic activity: A new theory of seismogenesis. Seismic Geological Translation, (1): 38~41.
- Rowley D B, Xue Feng, Tucker R D. 1997. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U/Ph zircon geochronology. Earth and Planet Science Letters, 151: 191~203.
- Shi Wei, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Hua Jianmin, Wiesinger M, Ratschbacher, L, Jonckheere R, Li Jianhua, Tian Mi, Chen Hong, Wu Guoli, Ma Licheng, Li Hailong. 2012. Intra – continental Dabashan orocline, southwestern Qinling, central China. Journal of Asian Earth Sciences. 46: 20~38.
- Shi Wei, Wu Hongling, Dong Shuwen, Tian Mi. 2013. Oil/gas migration and aggregation in Intra – Continental Orogen based on numerical simulation: a case study from the Dabashan orocline, central China. Journal of Earth Science. 24(2): 254~261.
- Su Li, Song Shuguang, Song Biao, Zhou Dingwu, Hao Jianrong. 2004#. SHRIMP zircon U–Pb ages of garnet pyroxites and Fusgui complexes in Songshugou area and their constraints on tectonic evolution of the Qinling orogenic belt. Science Bulletin of China, 49(12): 1209~1211.
- Sun Renqi. 2011&. Geochronological characteristics and tectonic significance of the metamorphic basic volcanic rocks in the Hulu River in the Eastern part of Qilian. Supervisor: Pei Xianzhi. Xi'an: Master Dissertation of the Chang'an University: 1~61.
- Tang Huan. 2017&. Early Paleozoic metamorphism and magmatism of the North Qinling orogeny in the baiji areas. Supervisor: Zhang Hongfu. Xi'an: Master Dissertation of the Northwest University: 1~71.
- Tao Yan, Ma Yansheng, Miao Laicheng, Zhu Feilin. 2008#. SHRIMP

- U-Pb Zircon dating of ultramafic rock mass in Jinbaoshan, Yunnan. Chinese Science Bulletin, 53(22): 2828~2832.
- Taylor S R, McLennan M C. 1985. The continental crust: its composition and Evolution. Oxford: Blackwell Scientific Publications: 57~114, 143~209~230, 372.
- Thomas J A. 1987. 6. Shock wave techniques for geophysics and planetary physics. Methods in Experimental Physics, 24: 185~235.
- Turekian K K, Wedepohl K H. 1961. Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. Geological Society of America Bulletin, 72: 175~192.
- Voitkevich. 1958 #. Radioactive Geology and Its Significance in Understanding the History of the Earth. Beijing: Geological Press: 1~277.
- Vinogradov A P. 1962. Average content of chemical elements in the major types of igneous rocks of the earth's crust. Geochemistry, 7: 641~664.
- Wan Jun, Liu Chengxin, Yang Cheng, Liu Wanliang, Li Xiongwei, Fu Xiaojuan, Liu Hongxian. 2016&. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the trachytic volcanic rocks in Zhushan area of Southern Qinling Mountains and their significance. Geological Bulletin of China, 35(7): 1134~1143.
- Wang Di, Wang XiaoLei, Cai Yue, Goldstein S L, Yang Tao. 2018. Do Hf isotopes in magmatic zircons represent those of their host rocks? Journal of Asian Earth Sciences, 154: 202~212.
- Wang Hongliang, Chen Liang, Sun Yong, Liu Xiaoming, Xu xueyi, Chen Juanlu, Zhang Hong, Diwu Chunrong. 2007. ~4.1 Ga xenocrystal zircon from Ordovician volcanic rocks in western part of North Qinling Orogenic Belt. Chinese Science Bulletin, 21: 3002~3010.
- Wang Jin, Diwu Chunrong, Sun Yong, Liu Ye, Wang Wei. 2012&. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and Hf isotope analysis of the Qinggangping granodiorite in Xixia area of western Henan Province and their geological significance. Geological Bulletin of China, 31(6): 884~895.
- Wang Jing, Zhang Hongfei, Xu Wangchun, Cai Hongming. 2008&. Petrogenesis of granites from Dangchuan area in West Qinling orogenic belt and its tectonic implication. Earth Science, 33(4): 474~486.
- Wang Jiangbo, Hou Xiaohua, Li Wanhua, Zhang Liang, Zhao Youdong, Chen Hongbing, Li Weihong. 2020&. Metallogenetic characteristics and metallogenetic model of the pegmatite type uranium deposit in Danfeng area, eastern Qinling Mountains. Earth Science, 45(1): 61~71.
- Wang Jiangbo, Qin Jiangfeng, Hu Peng, Zhang Liang, Zhao Youdong, Zhang Zexhong. 2018&. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the two-stage granitic magmatism from the Kuaping pluton in the Northern Qinling Mountains: Petrogenesis and tectonic implication. Geological Review, 64(1): 127~140.
- Wang Kunming. 2014&. Research on the petrogenesis, tectonic and metallogeny for mafic rocks in the Ziyang-Langao area, Shaanxi province. Supervisor: Wang Zongqi. Beijing: Doctoral Dissertation of the Chinese Academy of Geological Sciences: 1~175.
- Wang Tao. 2008&. Tectonic-lithological assemblages of Southern Qinling accretionary complex and their formation process. Supervisor: Wang Zongqi. Beijing: Doctoral Dissertation of the Chinese Academy of Geological Sciences: 1~108.
- Wang Tao, Wang Zongqi, Yan Zhen, Yan Quanren, Zhang Yingli, Xiang Zhongjin. 2009a&. Identification of the Ordovician ocean Island basalt and their tectonic significance of the Dabao Formation in the south Qinling: Constraints from geochemistry and chronology of ocean Island basalt. Acta Petrologica Sinica, 25(12): 3241~3250.
- Wang Tao, Wang Xiaoxia, Tian Wei, Zhang Chengli, Li Wuping, Li Shan. 2009b #. North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time: Implications for orogenic processes in the orogens of central China. Science in China (Series D: Earth Sciences), 39(7): 949~971.
- Wang Zongqi, Yan Quanren, Yan Zhen, Wang Tao, Jiang Chunfa, Gao Lianda, Li Qiugen, Chen Juanlu, Zhang Yingli, Liu Ping, Xie Chunlin, Xiang Zhongjin. 2009&. New division of the main tectonic units of the Qinling orogenic belt, central China. Acta Geologica Sinica, 83(11): 1527~1546.
- Wang Zhengqi, Li Ziying. 2007&. Discussion on mantle-derived uranium mineralization. Geological Review, 53(5): 608~615.
- Wang Zhengqi, Li Ziying. 2016&. Mesozoic Magmatism and Deep Dynamic Process of Uranium Mineralization in Xinlu Basin, Western Zhejiang Province. Beijing: Geological Press: 1~132.
- Wang Zhengqi, Li Ziying, Wu Lieqin, Chen Guosheng. 2010&. Geochemical evidences for mantle-derived uranium metallogenesis: A case study of Xiaoshui intersection-type uranium deposit in Xiazhuang area. Uranium Geology, 26(1): 24~34.
- Wei Fanghui, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li Zuochen, Pei Lei, Gao Jingming, Wang YinChuan, Liu Chengjun, Wu Shukuan, Chen Youxin. 2012&. Zircon U-Pb dating of Early Paleozoic Huangmenchuan granodiorite in Tianshui area of Gansu Province and its tectonic significance. Geological Bulletin of China, 31(9): 1496~1509.
- Wilson J T. 1963. A possible origin of the Hawaiian islands. Canadian Journal of Physics, 41: 863~870.
- Wilson J T. 1973. Mantle plumes and plate motions. Tectonophysics, 19(2): 149~164.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007&. Discussions on the petrogenesis of granites. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1217~1238.
- Wu Hao, Xia Yu, Zhou Kenken, Zhang Jianjun. 2020&. Highly fractionated granite magmas maybe the main uranium source of granite-type uranium deposits in south China: Evidence from the uranium content of zircon in southern Zhuguangshan granitic composite. Acta Petrologica Sinica, 36(2): 589~600.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004#. Mineralogical studies of zircon origin and constraints on the interpretation of U-Pb age. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1589~1604.
- Xiang Zhongjin, Yan Quanren, Song Bo, Wang Zongqi. 2016&. New evidence for the ages of ultramafic to mafic dikes and alkaline volcanic complexes in the North Daba Mountain and its geological implication. Acta Geologica Sinica, 5: 896~916.
- Xiong Xiao. 2017&. Geology and geochemistry of typical deposits from the Qinling orogenic and their indications for the key orogenic events: Case studies of Tongyu copper deposit, Wenquan molybdenum deposit and Xiaohekou copper deposit. Supervisor: Zhu Laiming. Xi'an: Doctoral Dissertation of the Northwest University: 1~261.
- Xu Cheng, Campbell L H, Charlotte M A, Chen Yanjing, Huang Zhilong, Qi Liang, Zhang Guishan, Yan Zaifei. 2008. U-Pb zircon age, geochemical and isotopic characteristics of carbonatite and

- syenite complexes from the Shaxiongdong, China. *Lithos*, 105: 118~128.
- Xu Guang, Wang Kunming, Wang Zongqi, Zhang Yingli, Wang Gang, Wu Yudong. 2018a&. Geochemistry and geochronology of Hualicun mafic rocks in North Daba Mountain and tectonic control. *Geological Bulletin of China*, 37(7): 1279~1290.
- Xu Guang, Wang Gang, Wang Zongqi, Wu Yudong, Wang Dongsheng, Wang Jiawei. 2018b&. Petrogenesis of the Early Paleozoic mafic rock in Fangxian area on the Southern Margin of Wudang Mountain, Hubei province, and its tectonic significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 39(3): 306~318.
- Xu Shizhao. 2017&. The study of chronology and geochemistry of gabbros in east of Shangdan structural belt. Supervisor: Li Wei. Xi'an: Master Dissertation of the Northwest University: 1~54.
- Xu Tong, Guo Qiming, Chen Qingming, Wang Qiang, Zhang Shanhou, Zuo Wenqian, Ren Cangzhi. 2018&. Age and geochemical Features of the Early Silurian Jiguanya highly fractionated Syn-collisional granites in the Baoji area of North Qinling orogeny and their geological significance. *Geological Science and Technology Information*, 37(1): 79~87.
- Xu Xueyi, Xia Linqi, Xia Zuchun, Huang Yuehua. 2001&. Geochemical characteristics and petrogenesis of the early paleozoic alkali lamprophyre complex from Langao County. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(1): 55~60.
- Xu Zhiqin, Lu Yilun, Tang Yaoqing, Mattauer M, Matte P H, Malavieille J, Tappognier P, Maluski H. 1986&. Deformation characteristics and tecetonic evolution of the Qinling orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, (3): 237~247.
- Xue Feng, Lerch M F, Kröner A, Reischmann T. 1996. Tectonic evolution of the East Qinling Mountains, China, in the Palaeozoic: A review and new tectonic model. *Tectonophysics*, 253(3~4): 271~284.
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Chen Juanlu, Yan Zhen, Wang Tao, Li Qiugen, Jiang Chunfa, Zhang Zongqing. 2007&. Tectonic setting and SHRIMP age of volcanic rocks in the Xieyuguan and Caotangou Groups: Implications for the North Qinling orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 81(4): 488~500.
- Yan Quanren, Chen Junlu, Wang Zongqi, Yan Zhen, Wang Tao, Li Qiugen, Zhang Zongqing, Jiang Chunfa. 2008. Zircon U-Pb and geochemical analyses for leucocratic intrusive rocks in pillow lavas in the Danfeng Group, north Qinling Mountains, China. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 51(2): 249~262.
- Yang Shijie, Chen Danling, Gong Xiangkuan, Zhao Jiao. 2015&. The geochemistry, chronology and its geological implications of leucosomes in the basic volcanics of Erlangping Group in eastern segment of the North Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 2009~2022.
- Yang Yang. 2017&. Spatial - temporal distribution and sources of granitoids in the middle Qinling orogenic belt, central China: Implications for the nature of deep crustal basement. Supervisor: Wang Xiaoxia. Beijing: Doctoral Dissertation of the Chinese Academy of Geological Sciences: 1~185.
- Yang Zhao, Dong Yunpeng, Liu Xiaoming, Zhang Jinhai. 2006&. LA-ICP-MS zircon U - Pb dating of gabbro in the Guanzizhen ophiolite, Tianshui, West Qinling, China. *Geological Bulletin of China*, 25 (11): 1321~1325.
- Yang Zhihua, Guo Junfeng, Su Shengrui, Li Yong, Su Chunqian, Zhang Chuanling, Hei Aizhi, Liang Yun. 2002&. New advances in the geological study of the Qinling orogen. *Geology in China*. 29 (3): 246~256.
- Yi Zhiqiang, Wen Jing, Lai Qunsheng, Xie Ke, Yan Helong, Wang Zhongjian, Li Shuai. 2017&. Zircon U-Pb age of Wudu mountain compound batholith and its geological significance. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 32(4): 594~603.
- Yin Hongfu, Huang Dinghua. 1995&. The early palaeozoic Zhen'an-Xichuan block and the evolution of the small Qinling archipelagic ocean basin. *Acta Geologica Sinica*, 69(3): 193~204.
- Ying Yuancan. 2018&. Geochronology and geochemistry of the Miaoya Carbonatite complex (Hubei province): Implications for petrogenesis and metallogenesis. Supervisor: Chen wei. Wuhan: Masteral Dissertation of the China University of Geosciences: 1~119.
- Yu Dagan. 2001&. Prospecting ideas for Mesozoic granite - type, volcanics-type and exocontact-type uranium deposits in South China (I). *Uranium Geology*, 17(5): 257~265.
- Yuan Feng, Liu Jiajun, Lv Guxian, Sha Yazhou, Zhang Shuai, Zhai Degao, Wang Gongwen, Zhang Hongyuan, Liu Gang, Yang Shangsong, Wang Juchan, Ren Wangrui. 2017&. Zircon U - Pb geochronology, geochemistry and petrogenesis of the granites and pegmatites from the Guangshigou uranium deposit in the northern Qinling orogeny, China. *Earth Science Frontiers*, 24(6): 25~45.
- Zhang Chengli, Gao Shan, Yuan HongLin, Zhang Guowei, Yan Yunxiang, Luo Jinglan, Luo Jinhai. 2007#. Early Paleozoic mantle properties of the southern Qinling orogen: Evidence from Sr-Nd-Pb isotopic of ultramafic, mafic dike and volcanic rocks. *Science China Earth Sciences*, 37(7): 857~865.
- Zhang Chengli, Gao Shan, Zhang Guowei, Liu Xiaoming, Yu Zaiping. 2002#. Geochemistry and geological significance of early Paleozoic alkaline rock wall group in southern Qinling orogen. *Science in China (series D)*, 32(10): 819~829.
- Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Lai Shaocong, Guo Anlin, Meng Qingren, Liu Shaofeng, Chen Shunyou, Yao Anping, Zhang Zongqing, Pei Xianzhi, Li Sanzhong. 2003#. Mianlue tectonic belt and Mianlue suture zone on the southern margin of the Qinling-Dabie orogenic belt. *Science in China (series D)*, 33(12): 1121~1134.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Dong Yunpeng, Yao Anping. 2019&. Rethinking of the Qinling orogen. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 746~768.
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, Xiao Qinghui, et al. 2001#. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press: 1~863.
- Zhang Guowei, Zhang Zongqing, Dong Yunpeng. 1995&. Nature of main tectono - lithostratigraphic units of the Qinling Orogen: Implications for the tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 11 (2): 101~114.
- Zhang Guowei, Yu Zaiping, Sun Yong, Chen Shunyou, Li Taohong, Xue Feng, Zhang Chengli. 1989. The major suture zone of the Qinling orogenic belt. *Journal of Southeast Asian Earth Science*, 3 (1~4): 63~76.
- Zhang Hongfei, Zhang Benren, Nigel H, Zhang Li, Chen Yuelong, Chen Nengsong, Zhao Zhidan. 2006. U-Pb zircon SHRIMP ages, geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of intrusive rocks from the Longshan - Tianshui area in the southeast corner of the Qilian orogenic belt, China: Constraints on petrogenesis and tectonic affinity. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27: 751~764.

- Zhang Shuai, Liu Jiajun, Yuan Feng, Liu Gang, Wang Gongwen, Zhang Hongyuan, Zhang hongyu. 2019&. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of granites pegmatites, and metallogenesis of related uranium from the Chenjiazhuang deposit, Shaanxi Province. *Earth Science Frontiers*, 26(5) : 270~289.
- Zhang Yuanshuo. 2019&. Magmatism of Phanerozoic granitoids in North Qinling terrane, China and its evolution regularity. Supervisor: Chen Fukun, Zhang He. Hefei: Doctoral Dissertation of the University of Science and Technology of China; 1~158.
- Zhao Jiao, Chen Danling, Tan Qinghai, Chen Yao, Zhu Xiaohui, Guo Cailan, Liu Liang. 2012&. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of basic volcanics from Erlangping Group of the North Qinling, eastern Qinling Mountains and its geological implications. *Earth Science Frontiers*, 19(4) : 118~125.
- Zhao Ruyi, Li Weihong, Jiang Changyi, Wang Jiangbo, Wang Bangyao, Hui Zhenpu. 2014&. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, petro - geochemical characteristics of Huanglongmiao monzogranite in Danfeng area in Eastern Qingling Mts. and their geological significance. *Geological Review*, 60(5) : 1123~1132.
- Zhao Zhenhua. 2016 #. Principles of Trace Element Geochemistry. Second edition. Beijing: Science Press; 496~511.
- Zhen Fei. 2019&. A geochemical study of Early Paleozoic mafic igneous rocks from the Qinling-Tongbai. Supervisor: Zhao Zifu, Dai Liqun. Hefei: Doctoral Dissertation of the University of Science and Technology of China; 1~137.
- Zheng Maogong, Zhu Jiechen. 1984#. Changes of uranium content in medium-acidic magmatite zircon and its geological significance in China. *Radioactivity Geology*, 23(3) : 17~23.
- Zhu Jiang, Wang Lianxun, Peng Sanguo, Peng Lianhong, Wu Changxiomg, Qiu Xiaofei. 2017. U-Pb zircon age, geochemical and isotopic characteristics of the Miaoya syenite and carbonatite complex, central China. *Geological Journal*, 52: 938~954.
- Zou Xianwu, Duan Qifa, Tang Chaoyang, Cao Liang, Cui Seng, Zhao Wuqiang, Xia Jie, Wang Lei. 2011&. SHRIMP zircon U-Pb dating and lithogeochemical characteristics of diabase from Zhenping area in North Daba Mountain. *Geology in China*, 38(2) : 282~291.
- Zuo Wenqian, Sha Yazhou, Chen Bing, Luo Zhongshu, Zhang Zhanshi. 2010&. Geochemical and chronological characteristics of Xiangcaoping granite pluton in Miaoershan area. *Uranium Geology*, 26(4) : 222~227.

Uranium and thorium elements are loss in the deep inside the earth? —Discussion from the uranium and thorium contents of zircon minerals from the Caledonian igneous plutons in the Qinling Orogen

WU Hao¹⁾, LI Xiaogang²⁾, WU Chen³⁾, XIA Yu¹⁾, ZHOU Kenken¹⁾, XIONG Guoqing¹⁾, YAO Xueting²⁾

1) Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu, 610081;

2) Chongqing Key Laboratory of Complex Oil & Gas Exploration and Development, Chongqing University of
Science & Technology, Chongqing, 401331;

3) State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System Science (LATPES), Institute of Tibetan Plateau Research,
Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101

Abstract: In an attempt to use zircon to preliminarily explore the abundance of uranium and thorium in the earth's interior, 3 ultramafic samples, 52 mafic samples, 46 intermediate igneous samples, and 90 acid igneous samples, totaling 191 samples with 6,979 zircon dating data (3,552 for U and 3,427 for Th), were mastered by collecting the U-Th-Pb isotopic dating in the literature involved about Caledonian igneous zircons from the Qinling Orogen. The data results indicate that the U content in zircon in the same type igneous samples are quite different, as well as the Th, and both can be enriched or lost in different types of magmatic zircons, without the overall increasing trend from ultramafic, mafic, intermediate, to acid rocks. In addition, in all samples, 45 highly enriched samples with an average U and Th contents more than 2 times, 34 of which exhibit the characteristics of "local long-term" distributions as follows: ten 451.0~422.1 Ma mainly of OIB type mafic and intermediate igneous samples from Daba Shan area of the southern Qiling Orogen, most of which show the magma were derived from mantle magma source of HIMU, EMII and EMI; twenty-four 495.9~413.6 Ma mainly of I-type and S-I type acid igneous samples collected from the northern Qinling Shangdan (Shangnan-Danfeng) area, most of which show the magma were derived from mantle, crust-mantle and crustal source areas. Combined with the discovery of U metal (0 valence) in South China and other previous researches, it is preliminary believed that a mantle plume and a continental hot spot exist in Daba Shan and Shangdan area during Caledonian period, respectively, and a large amount of U and Th in the earth's core rise along the mantle plume and continental hot spots, resulting in long-

term enrichment of U and Th in the local melts of mantle and crust, the ultrahigh contents of which are partly recorded by zircons in the melting, this process of element migration may be the main reason for producing high zircon U and Th samples in these two areas, and the reason for generating U deposits in Shangdan area. Our results possibly support the hypothesis that U and Th could be enriched both in the core and mantle plumes.

Keywords: Qinling orogen; caledonian igneous plutons; uranium and thorium contents in zircon minerals; Earth's core; mantle plumes; continental hot spots

Acknowledgements: This study was jointly supported by the China Geological Survey (No. DD20190122), Natural Science Foundation of Chongqing, China (Nos. cstc2013jcyjA90017, cstc2017jcyjA1300 and No. cstc2020jcyj-msxmX0487) and Science and Technology Innovation Training Program for College Students, CQUST (Nos. 2019042, 2020006).

First author: WU Hao, male, born in 1984, master, senior engineer, mainly engaged in uranium sedimentology and mineralization mechanism. Email: wuhaoocgs@sohu.com

Corresponding author: LI Xiaogang, male, born in 1983, doctor, associate professor, mainly engaged in tectonics and energy mineral exploration research; Email: xg_lee@cqu.edu.cn

Manuscript received on: 2020-12-08; **Accepted on:** 2021-04-30; **Network published on:** 2021-05-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 04. 00 *

Edited by: LIU Zhiqiang

