

北秦岭武关岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及岩石成因研究

李平^{1,2}, 陈隽璐¹, 徐学义¹, 王洪亮¹, 李婷¹, 高婷^{1,2}

(1. 中国地质调查局 西安地质调查中心, 西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 武关岩体位于北秦岭武关镇, 侵入于丹凤岩群之中, 主要岩石类型为闪长岩和花岗闪长岩, 属低钾拉斑-中钾钙碱性系列。微量元素地球化学特征为富集大离子亲石元素而亏损高场强元素、具有较高的 LILE/HFSE 比值, 且显示出俯冲沉积物的地球化学信息, 因而其形成与大洋俯冲消减作用有关。稀土元素球粒陨石标准化分配型式为 LREE 富集、HREE 平坦的右倾型且无明显的 Eu 负异常。此外, 其明显富铝、富钠, 有较高的 Sr/Yb 比值和 CaO/Na₂O 比值, 因而极有可能为角闪石作为主要残余条件下玄武质岩石部分熔融的产物。在假定有角闪石为稳定残留的中下地壳压力条件下, 通过对稀土元素的模拟计算表明: 以丹凤岩群中形成于岛弧环境下的斜长角闪岩为源岩在部分熔融程度为 30%~40%, 残余矿物相以角闪石为主并伴有少量的斜长石和单斜辉石(石榴子石极有可能无残余)的条件下, 可以形成该类岩体。经锆石阴极发光 (CL) 研究及 LA-ICPMS 同位素测年技术分析后可知, 武关岩体的锆石 U-Pb 同位素年龄为 438.6 ± 2.2 Ma。该年龄晚于商丹洋的俯冲消减阶段, 但仍明显保留有俯冲消减环境所具有的地球化学特征, 因而其可能继承有俯冲消减源区的地球化学特征。以岛弧成因的斜长角闪岩为源岩进行的稀土元素部分熔融模拟计算, 可以证明武关岩体为北秦岭加里东造山期中下地壳源区岩石在碰撞造山过程中由“滞后的消减源区”部分熔融的产物。

关键词: 武关岩体; 丹凤岩群; 商丹构造带; 俯冲消减作用

中图分类号: P588.12; P597+.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)04-0610-15

Petrogenesis and LA-ICPMS zircon U-Pb dating of the Wuguan intrusive body in North Qinling

LI Ping^{1,2}, CHEN Jun-lu¹, XU Xue-yi¹, WANG Hong-liang¹, LI Ting¹ and GAO Ting^{1,2}

(1. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China;

2. Faculty of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Located in North Qinling, the Wuguan intrusive body intruded into the Danfeng Group and developed gneissosity in some regions. It mainly includes diorites and granodiorites and belongs to low-K tholeiitic and medium-K calc-alkaline series, characterized by enrichment of large ion lithophile elements and depletion of high field strength elements, with a high LILE/HFSE ratio. Geochemical data also suggest the involvement of a subduction sedimentary source. All the evidence indicates that the formation of the rock was associated with the ocean subduction. Chondrite-normalized REE patterns show an enriched LREE distribution and a flat HREE distribution, with no obvious negative Eu anomaly. Moreover, the Wuguan intrusive rocks are rich in sodium and aluminum, and have high Sr/Yb and CaO/Na₂O ratios. These geochemical features suggest that these rocks were formed by the remelting of the basaltic rocks with amphibole as a stable residual phase. The result of simu-

收稿日期: 2010-10-19; 修订日期: 2011-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972150); 中国地质调查局国土资源大调查资助项目(1212010610319)

作者简介: 李平(1983-), 男, 硕士研究生, 矿物岩石学专业, E-mail: gogogis@qq.com.

lation calculation suggests that plagioclase amphibolite produced in an island-arc environment in the Danfeng Group could form the Wuguan intrusive body through partial melting with a degree of 30%~40%. Besides, the residual mineral assemblage is mainly hornblende with a small amount of plagioclase and clinopyroxene, and garnet-bearing residues may be negligible. CL images and LA-ICPMS dating show that zircon U-Pb isotopic age of the Wuguan intrusive body is 438.6 ± 2.2 Ma, and the formation of this intrusive body might be attributed to Caledonian collision event of the North Qinling. This zircon U-Pb isotopic age is later than the period of the subduction of Shangdan Ocean, but the chemical characteristics of this intrusive body are closely related to the island-arc environments. It is therefore inferred that the geochemical characteristics reflected in the Wuguan intrusive body might have inherited some chemical features of its sources in an arc environment. Combined with the REE simulation calculation by the melting of the amphibolites formed in an arc environment, it is proved that the Wuguan intrusive body was formed in a collision orogenic process and it might have been a partial melting product of the pre-existing source in a subduction environment.

Key words: Wuguan intrusive body; Danfeng Group; Shangdan tectonic belt; effect of subduction

秦岭造山带广泛发育不同时代、不同成因类型的中酸性侵入岩,它们分别形成于秦岭造山带的不同构造演化阶段(张成立等,2008;王涛等,2009)。通过对这些中酸性岩体的成因研究,可为探讨秦岭造山带构造演化历史提供基本的地质依据。

商丹构造带是一条具有多期活动和复杂演化过程的强韧性剪切变形带,由不同时代、不同性质、不同物质来源的构造岩片/块拼合而成(裴先治,1997;裴先治等,2001)。在该构造带内广泛出露中酸性侵入体,前人对这些中酸性侵入体的研究多偏重于同位素年代学和岩石大地构造环境的分析,并认为它们形成于秦岭造山带加里东造山期,但相对缺乏从实验岩石学及岩石地球化学模拟计算等方面来研究其成因。本文拟在前人工作的基础上,结合岩石地球化学研究,从实验岩石学对比及岩石地球化学模拟等不同角度上去揭示武关岩体岩浆源区进而约束其大地构造环境,并借助锆石年代学研究探讨了武关岩体岩石学成因同北秦岭古生代洋陆转换的关系。

1 区域地质概况

秦岭造山带为一典型复合型大陆造山带,经历了复杂的裂解拼合过程,其内部被商丹缝合带和勉略缝合带分割为华北地块南缘(北秦岭)、秦岭微地块和扬子地块北缘三部分(张国伟等,1995,2001)。在沉积地层、岩浆作用及岩石地球化学等近些年来研究成果的基础上,亦有学者将秦岭造山带划分为北秦岭弧后-岛弧杂岩带,中秦岭弧前盆地系以及南秦岭增生杂岩带-弧前盆地系-岛弧杂岩带-弧后杂

岩带等(陈隽璐,2008;王宗起等,2009)。其中,位于商丹构造带北侧的北秦岭构造带主要由中新元古代宽坪岩群、古生代二郎坪岩群、古元古代秦岭岩群以及新元古代一早古生代的丹凤岩群构成;商丹构造带的南侧则由古生代刘岭群和武关岩群构成(图1)。

商丹构造带主要由古生代丹凤蛇绿岩、洋岛火山岩、岛弧火山岩、花岗质岩浆侵入杂岩体和秦岭群杂岩体共同构成,其中秦岭群杂岩体表现为构造岩块分布于其中。该套组合经历了强烈的韧性剪切作用,糜棱岩和断层碎裂岩十分发育(张国伟等,2001)。丹凤岩群是商丹构造混杂岩的最主要组成部分,空间上与北侧秦岭群以及南侧武关岩群均以韧性剪切带相接触,区域上呈近东西-北西西向狭长带状展布,向东至商南一带尖灭,向西呈构造透镜体状断续延伸至商州三十里铺、周至黑河、凤县唐藏以及天水李子园、甘谷关子镇一带,为一套强烈变形变质的以火山岩-碎屑岩组合为主的构造岩片体(裴先治,1997;裴先治等,2001)。位于商丹构造带东段的丹凤岩群主要由斜长角闪片岩、云母石英片岩、夹变粒岩、薄层大理岩、硅质岩等组成,在硅质岩中含奥陶纪-志留纪的化石(崔智林等,1995)。最新研究表明代俯冲杂岩系的丹凤群与南侧的武关岩群、罗汉寺岩群及刘岭群共同构成华北南缘的俯冲-增生体系,其中大量分布具有俯冲消减地球化学特征的钙碱性侵入体同位素测年显示华北南缘洋盆消亡上限可能为晚泥盆世末期(Yan *et al.*, 2006a, 2006b; 闫臻等, 2007, 2009)。

加里东-海西期为秦巴地区构造运动史上最活跃的时期,特别是位于研究区附近的许庄岩体、枣

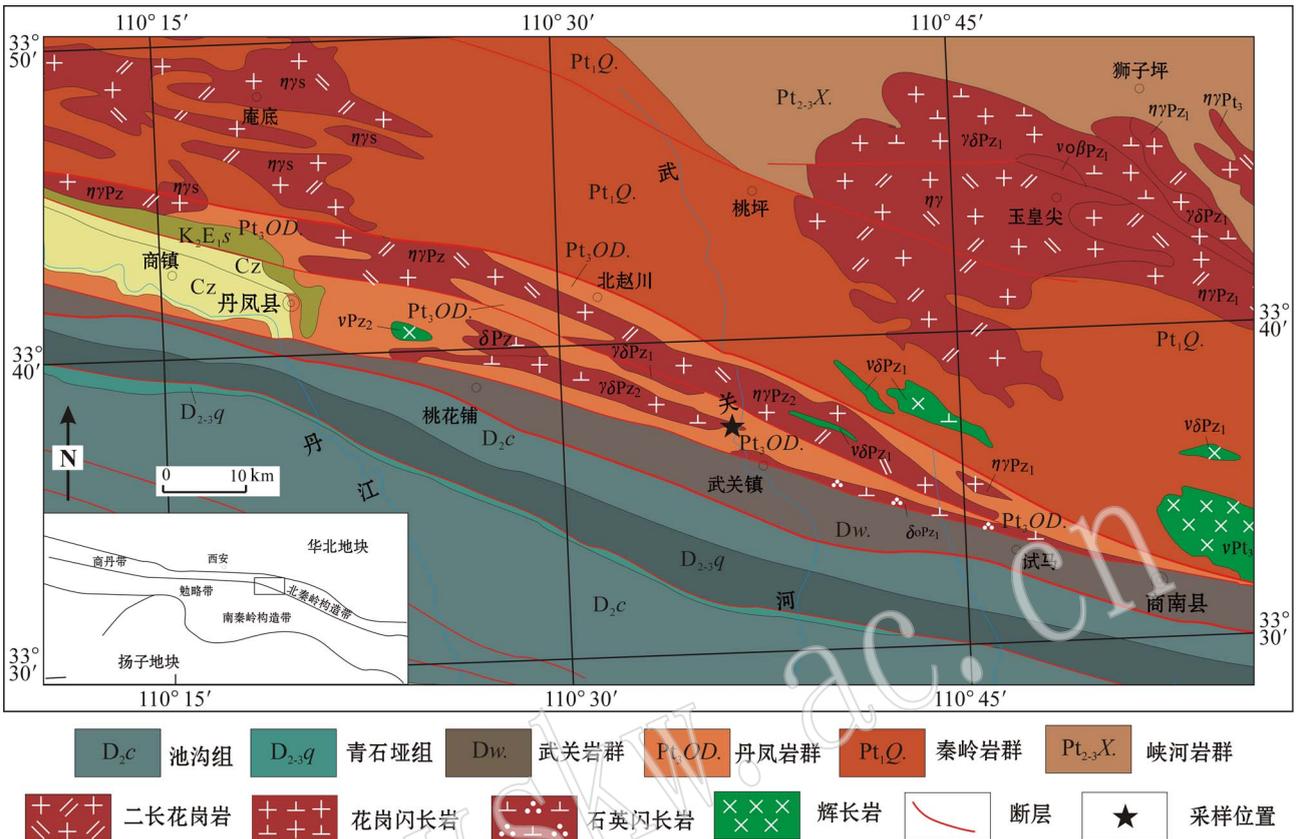


图1 北秦岭武关岩体区域地质简图

Fig. 1 Simplified regional geological map of Wuguan intrusive body in North Qinling

园岩体、灰池子岩体、漂池岩体和宽坪岩体等均形成于此阶段。该阶段内花岗质岩浆活动最为强烈，有一系列碰撞型花岗岩类岩体生成(尚瑞钧等, 1988)。其中，早加里东期花岗岩类和晚加里东-早海西期花岗岩类构成了秦巴地区显生宙第一旋回花岗岩，花岗岩类的成分以早期的石英闪长岩和英云闪长岩为主逐渐演化为花岗闪长岩和二长花岗岩(李先梓等, 1993)。武关岩体同上述岩体在空间展布上均位于商丹构造混杂岩带附近且都是北秦岭早古生代洋陆转换阶段的产物，通过对其进行深入研究可为秦岭大地构造格局恢复提供重要依据。

本文所讨论的武关岩体侵入于北秦岭商丹构造带的丹凤岩群之中(图1)，位于武关镇北西方向(33°36'32.9", 110°37'03.6")，沿武关河路程约4 km。岩体主体宽3~5 km、长可达30 km，呈带状侵入于丹凤岩群的大理岩和斜长角闪岩中，岩体内部无包体残余。该岩体自南向北矿物粒度逐渐变粗，局部地区有片麻理发育。与围岩呈平行接触关系，而且1:20万商南幅认为岩体的片麻理与外围的太古代侵入

体的黑云母片麻理相一致。根据薄片的镜下观察，岩体为花岗闪长岩。呈半自形-他形粒状结构，主要组成矿物为斜长石、石英、角闪石和绿泥石(图2)。

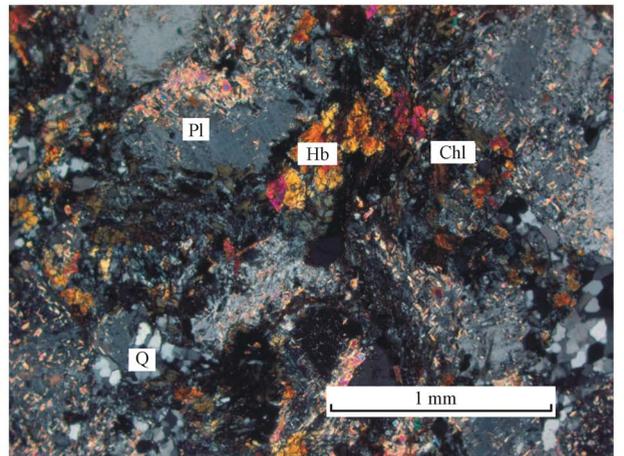


图2 武关岩体显微照片

Fig. 2 Micrograph of Wuguan intrusive body
Q—石英; Pl—斜长石; Hb—角闪石; Chl—绿泥石
Q—quartz; Pl—plagioclase; Hb—hornblende; Chl—chlorite

石英含量近 20% ,具波状消光、有微弱定向性 ,且具有亚颗粒化及动态重结晶等塑性变形现象。斜长石呈自形-半自形板柱状 ,含量为 65% 左右 ,在后期改造作用的影响下发生轻微绢云母化和绿帘石化 ;角闪石含量约为 15% ,多已蚀变为绿泥石 ,局部保留有角闪石的矿物形态。

2 样品采集及分析

本次研究挑选较为新鲜的样品用于锆石分选和岩石地球化学测试分析。测年样品经粗碎、细碎后人工淘洗挑选出锆石 ,然后在双目镜下挑纯。样品粗碎在刚玉鄂式破碎机中进行 ,粗碎样品经缩分后用日本 CMT 公司生产的 T1-100 型钨化细碎机碎至 200 目以下 ,整个样品加工过程无污染。

锆石阴极发光图像以及 LA-ICPMS 定年分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石的阴极发光图像在 FEI 公司的场发射环境扫描电子显微镜 Quanta400 EFG 上完成。锆石 U-Pb 原位定年分析所采用的 ICP-MS 为 Elan 6100DRC ,激光剥蚀系统为德国 Lamda Physik 公司生产的 Geolas 200M 深紫外 (DUV)193nmArF 准分子 (excimer) 激光剥蚀系统 ,该系统相对常规的 266 nm 或 213 nm ND : YAG 剥蚀系统具有较小的元素分馏效应。分析所采用的激光束直径为 30 μm ,剥蚀深度为 20~40 μm 。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气 ,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化调试 ,采样方式为单点剥蚀 ,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式 ,每完成 4~5 个待测样品测定 ,插入测标样一次。在所测锆石样品 15~20 个点前后各测 2 次 NIST610。锆石年龄采用标准锆石 91500 作为外部标准物质 ,元素含量采用 NIST610 作为外标。测试结果通过 Glitter 软件计算得出 ,获得的数据采用 Andersen (2002) 的方法进行同位素比值的校正 ,并采用 Isoplot 3.23v 进行最终的年龄计算和图表的绘制。分析点的同位素比值和同位素年龄的误差 (标准偏差)为 1σ , $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄按 95% 的置信度给出 ,分析结果见表 1 ,详细分析参见文献 (Yuan *et al.* , 2004)。

共选取 5 件样品进行主量、微量元素和稀土元素测试 ,样品分析由中国地质调查局西安地质矿产研究所实验测试中心完成 ,测试结果见表 2。主量元

素含量用荧光光谱仪 (XRF) 测试 ,分析精度和准确度优于 5% ,微量元素和稀土元素含量采用电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS) 完成 ,分析精度和准确度一般也优于 5%。

3 测试结果

3.1 锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年

此次成功测定了 28 颗锆石 ,所挑选的锆石绝大部分呈无色透明的长柱状晶体 ,自形程度较好。根据锆石阴极发光电子图像 (CL) 及其微量元素含量可将其分为两类。

第一类为岩浆结晶锆石 (图 3a) ,共计 21 颗 ,发育有典型岩浆锆石所具有的振荡环带。这些锆石的岩浆环带中等较宽 ,这与岩浆具有较低的锆饱和度有关 (Hoskin and Schaltegger , 2003) 。此类锆石 Th/U 比值变化于 0.23~0.55 ,平均为 0.39 ,位于典型岩浆锆石比值范围内 (Belousova *et al.* , 2002 ; Hoskin and Schaltegger , 2003) 。本类岩浆锆石的测定点在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 图中均位于谐和线上或其附近 (图 4) , $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄 (图 4) 变化于 430~446 Ma 之间 ,加权平均值为 438.6 ± 2.2 Ma (MSWD=2.3) ,该年龄代表了岩体的岩浆结晶年龄 ,即形成年龄。

第二类为变质锆石 (图 3b) ,共 7 颗。本类锆石 Th/U 比值变化于 0.003~0.096 5 之间 ,均小于 0.1 ,而且除 7 号锆石 (Th/U=0.096) 外 ,所有锆石 Th/U 比值均远小于 0.02。一般认为变质锆石的 Th/U 比值小于 0.1 ,而且 Th/U 比值非常低的锆石 (<0.02) 同后期的矿物-流体作用有密切关联 (Carson *et al.* , 2002) 。同前述岩浆锆石相比较 ,此类锆石颗粒 CL 强度较弱、多发育面状环带 ,但部分锆石却仍发育有振荡环带 (7、16、17 号锆石) 。深熔锆石或变质重结晶作用中形成的锆石一般具有规则的外形 ,无分带到呈明显面状分带 ,亦可保留有振荡分带 (吴元保等 , 2004) 。从 CL 图像来看 ,24 与 13、1 与 7、6 与 17、9 与 16 具有相似的结构 ,极有可能反映了岩浆锆石在后期构造事件中经过了一定的改造。在此过程中经历了放射性 Pb 丢失以及 U 含量的积累 ,导致锆石在保持一定形态结构的同时 CL 图像光泽明显变暗。锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄 (图 4) 变化于 335~345 Ma 之间 ,加权平均值为 341.7 ± 3.3 Ma (MSWD=2.9) ,与武关岩群变玄武岩中代表

表 1 武关岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年测试数据
Table 1 Zircon LA-ICPMS U-Pb analytical data of Wuguan intrusive body

样 品	比值										t/Mz				$^{206}Pb/^{238}U \times 10^{-6}$										
	$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{208}Pb/^{232}Th$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{208}Pb/^{232}Th$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{208}Pb/^{232}Th$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{208}Pb/^{232}Th$		
	$\pm 1\sigma$		$\pm 1\sigma$		$\pm 1\sigma$		$\pm 1\sigma$		$\pm 1\sigma$		$\pm 1\sigma$		$\pm 1\sigma$		$\pm 1\sigma$		$\pm 1\sigma$		$\pm 1\sigma$		$\pm 1\sigma$		$\pm 1\sigma$		$\pm 1\sigma$
1	0.052 61	0.001 5	0.520 03	0.013 87	0.071 69	0.022 74	0.000 35	312	48	425	9	446	3	454	7	1.65	53.28	3.05	3.7	77.32	169.64	0.455 789			
2	0.057 13	0.001 58	0.561 77	0.014 46	0.071 32	0.023 63	0.000 52	497	44	453	9	444	3	472	10	<0.95	42.53	2.64	1.801	36.21	136.09	0.266 074			
3	0.059 01	0.001 44	0.580 07	0.013 01	0.071 29	0.022 19	0.000 32	567	57	465	8	444	3	444	6	1.11	40.69	2.64	3	63.8	130.93	0.487 283			
4	0.054 18	0.000 64	0.402 73	0.004 36	0.053 91	0.000 26	0.016 85	0.000 12	379	27	344	3	338	2	338	2	1.03	183.73	10.92	0.299	5.42	776.91	0.006 976		
5	0.061 51	0.002 79	0.588 81	0.025 83	0.069 43	0.000 74	0.031 72	0.001 12	657	76	470	17	433	4	631	22	0.92	18.87	1.263	0.948	14.17	61.95	0.228 733		
6	0.058 18	0.001 95	0.564 39	0.017 98	0.070 36	0.000 58	0.022 38	0.000 53	537	55	454	12	438	3	447	10	<0.94	25.91	1.641	1.443	30.58	83.92	0.364 395		
7	0.053 46	0.000 85	0.401 55	0.006 05	0.054 48	0.000 28	0.017 06	0.000 09	348	37	343	4	342	2	342	2	<0.88	95.64	5.9	1.769	38.46	398.41	0.096 534		
8	0.058 59	0.001 65	0.567 78	0.014 93	0.070 29	0.000 53	0.022 46	0.000 41	552	44	457	10	438	3	449	8	8.92	44.71	2.85	2.746	57.93	144.91	0.399 765		
9	0.057 2	0.001 9	0.551 57	0.017 8	0.069 94	0.000 53	0.021 72	0.000 13	499	75	446	12	436	3	434	2	1.19	39.81	2.77	2.767	52.99	128.54	0.412 245		
10	0.057	0.001 32	0.555 44	0.011 69	0.070 68	0.000 46	0.024 37	0.000 31	492	35	449	8	440	3	487	6	<0.89	51.04	3.17	3.82	74.19	164.25	0.451 689		
11	0.058 24	0.002 27	0.553 76	0.021 05	0.068 96	0.000 61	0.021 37	0.000 14	539	87	447	14	430	4	427	3	<0.83	32.73	2.203	2.314	48.06	107.49	0.447 111		
12	0.054 42	0.001 02	0.400 67	0.007 15	0.053 39	0.000 32	0.016 68	0.000 27	389	43	342	5	335	2	334	5	<2.78	113.49	6.95	0.41	4.68	482.2	0.009 706		
13	0.054 31	0.001 07	0.411 5	0.007 1	0.054 95	0.000 33	0.050 69	0.010 43	384	28	350	5	345	2	999	201	<0.95	97.46	5.78	0.116	1.083	403.12	0.002 687		
14	0.056 3	0.001 66	0.551 64	0.015 29	0.071 06	0.000 55	0.021 61	0.000 48	464	48	446	10	443	3	432	9	0.95	38.86	2.391	1.742	38.08	124.25	0.306 479		
15	0.060 58	0.001 85	0.577 53	0.016 6	0.069 14	0.000 56	0.026 24	0.000 46	624	48	463	11	431	3	524	9	1.03	33.57	2.222	2.578	46.41	110.27	0.420 876		
16	0.055 77	0.001 94	0.422 5	0.013 99	0.054 94	0.000 48	0.050 21	0.005 97	443	58	358	10	345	3	990	115	<0.87	37.33	2.28	0.227	2.135	154.27	0.013 839		
17	0.053 66	0.001 2	0.401 34	0.008 07	0.054 24	0.000 34	0.134 85	0.014 67	357	34	343	6	341	2	2 557	261	<1.02	76.17	4.47	0.254	0.888	318.79	0.002 786		
18	0.059 2	0.001 78	0.577 18	0.016 33	0.070 72	0.000 57	0.022 35	0.000 47	574	47	463	11	440	3	447	9	<0.81	31.96	2.069	1.726	36.44	102.57	0.355 27		
19	0.055 98	0.002 42	0.544 75	0.022 75	0.070 58	0.000 69	0.022 37	0.000 86	52	76	442	15	440	4	447	17	<0.92	20.44	1.247	0.812	16.98	65.29	0.260 07		
20	0.058 7	0.001 73	0.561 43	0.015 57	0.069 37	0.000 55	0.011 35	0.000 49	556	47	452	10	432	3	228	10	<0.86	33.94	2.182	1.039	43.12	110.93	0.388 714		
21	0.052 21	0.000 91	0.395 27	0.005 84	0.054 91	0.000 3	0.027 48	0.004 69	295	24	338	4	345	2	548	92	<0.92	159.44	9.12	0.146	2.5	658.04	0.003 799		
22	0.056 33	0.001 74	0.553 62	0.016 16	0.071 28	0.000 58	0.021 69	0.000 42	465	50	447	11	444	3	434	8	<0.75	32.25	1.99	2.037	44.23	102.5	0.431 512		
23	0.056 92	0.002	0.553 84	0.018 57	0.070 57	0.000 61	0.021 59	0.000 4	488	59	448	12	440	4	432	8	<0.74	26.66	1.664	2.156	46.97	85.52	0.549 228		
24	0.062 35	0.002 65	0.613 6	0.025 13	0.071 37	0.000 72	0.018 52	0.000 67	686	70	486	16	444	4	371	13	<0.75	16.24	1.111	0.875	22.23	51.51	0.431 567		
25	0.056 34	0.002 5	0.544 68	0.023 32	0.070 12	0.000 74	0.021 09	0.000 65	466	76	442	15	437	4	422	13	<0.88	20.05	1.281	1.141	24.81	64.8	0.382 87		
26	0.056 66	0.001 49	0.547 75	0.013 32	0.070 11	0.000 49	0.021 29	0.000 29	478	41	444	9	437	3	426	6	<1.05	45.74	2.84	3.7	81.76	147.57	0.554 042		
27	0.057 23	0.002 14	0.545 9	0.019 59	0.069 19	0.000 65	0.020 95	0.000 57	500	63	442	13	431	4	419	11	<0.84	27.58	1.743	1.533	35	90.96	0.384 785		
28	0.063 62	0.001 88	0.604 93	0.017 29	0.068 96	0.000 5	0.021 15	0.000 12	729	64	480	11	430	3	423	2	<0.77	30.95	2.293	1.511	30.17	100.83	0.299 217		

表 2 武关岩体主量元素 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$)

Table 2 Major elements ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) compositions of Wuguan intrusive body

样品	180-1	180-2	180-3	180-4	180-5
SiO ₂	60.35	60.95	64.14	63.79	57.79
Al ₂ O ₃	17.70	16.62	16.58	16.50	18.65
Fe ₂ O ₃	2.74	3.92	2.51	2.31	2.92
FeO	2.68	1.98	2.13	2.30	2.82
CaO	5.54	5.40	5.19	5.24	5.73
MgO	2.28	1.88	1.78	1.78	2.04
K ₂ O	1.06	0.81	0.90	0.83	1.15
Na ₂ O	3.87	4.05	4.12	4.13	4.72
TiO ₂	0.482	0.523	0.394	0.417	0.515
P ₂ O ₅	0.162	0.145	0.144	0.142	0.153
MnO	0.108	0.108	0.114	0.117	0.128
H ₂ O ⁺	1.99	1.94	1.12	1.31	1.83
H ₂ O ⁻	0.0400	0.13	0.05	0.10	0.07
CO ₂	0.880	1.39	0.620	0.400	1.10
Na ₂ O/K ₂ O	3.65	5.02	4.59	4.99	4.10
A/CNK	1.01	0.96	0.97	0.96	0.96
Mg [#]	44.36	38.06	42.18	42.23	40.28
Li	10.00	6.86	9.03	11.60	14.20
Be	0.79	0.92	0.83	0.85	0.93
Sc	10.10	10.00	9.00	10.70	13.10
V	93.30	94.00	82.70	82.40	99.00
Cr	10.20	9.33	12.70	8.93	7.57
Co	12.00	11.90	10.30	9.92	11.00
Ni	7.14	4.70	8.06	4.95	4.08
Cu	39.20	46.80	49.40	6.75	12.30
Zn	75.70	49.40	68.80	71.90	79.10
Ga	17.10	17.50	16.90	17.20	19.60
Rb	28.20	22.60	26.70	19.40	25.40
Sr	423.00	373.00	398.00	407.00	444.00
Zr	102.00	143.00	94.70	68.90	114.00
Nb	5.23	8.33	4.73	5.42	6.61
Ba	568.00	387.00	575.00	580.00	513.00
Hf	2.50	3.47	2.50	1.79	2.93
Ta	0.25	0.46	0.24	0.26	0.50
Pb	6.62	5.14	6.73	6.52	6.79
Th	2.34	2.28	2.61	2.42	2.49
La	10.70	12.00	11.20	12.80	12.80
Ce	23.20	27.70	23.90	25.10	26.40
Pr	2.68	2.99	2.64	2.95	3.23
Nd	11.10	12.40	10.50	11.70	13.40
Sm	2.59	3.04	2.31	2.58	3.16
Eu	0.81	0.92	0.73	0.81	0.99
Gd	2.59	3.19	2.31	2.47	3.19
Tb	0.39	0.50	0.35	0.38	0.50
Dy	2.52	3.29	2.34	2.46	3.27
Ho	0.53	0.73	0.52	0.54	0.72
Er	1.40	2.02	1.47	1.52	1.98
Tm	0.21	0.32	0.23	0.23	0.30
Yb	1.37	2.10	1.58	1.58	1.97
Lu	0.21	0.34	0.26	0.26	0.31
Y	15.60	21.60	14.70	15.40	20.50
δEu	0.95	0.90	0.96	0.97	0.94
(La/Yb) _N	5.28	3.86	4.79	5.47	4.39
(La/Sm) _N	2.60	2.48	3.05	3.12	2.55
(Gd/Yb) _N	1.53	1.23	1.18	1.27	1.31
ΣREE	60.09	71.20	60.08	65.12	71.91

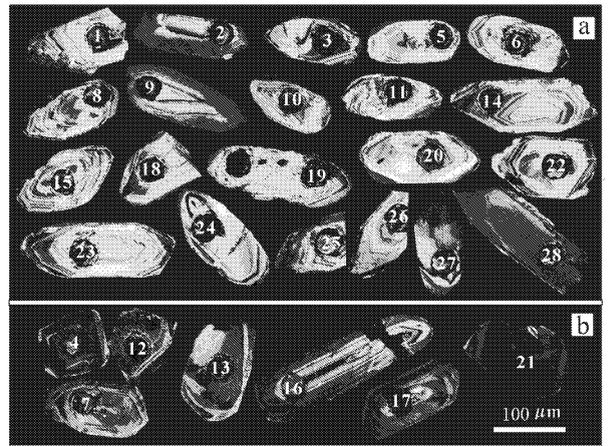


图 3 锆石阴极发光 (CL) 照片

Fig. 3 Zircon CL images

受后期作用改造的锆石 U-Pb 同位素年龄 (348 ± 18 / - 12 Ma) 在误差范围内一致 (陈能松等 2009), 反映了在 438 Ma 之后研究区内存在一期构造热事件。

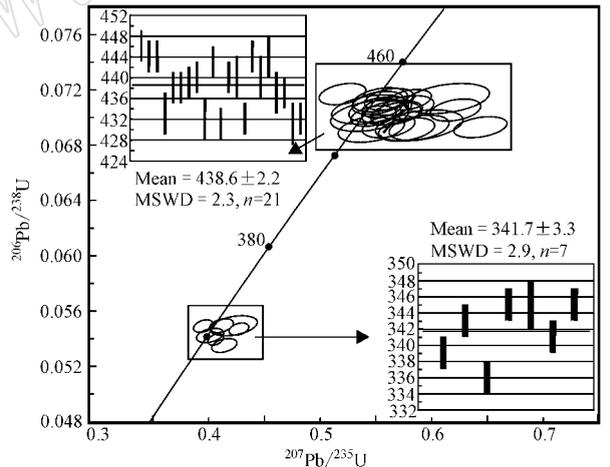


图 4 锆石 LA-ICPMS U-Pb 同位素年龄谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb age concordia diagram

3.2 武关岩体岩石地球化学特征

由图 5a 和图 5b 可知,武关岩体常量元素地球化学特征显示其属亚碱性低钾拉斑-中钾钙碱性岩石系列。据表 2,其 SiO₂ 含量介于 57.79% ~ 64.14% 之间, MgO 含量较低 (介于 1.78% ~ 2.28% 之间), Mg[#] 为 38.06 ~ 44.36, Na₂O + K₂O 为 4.86% ~ 5.87%, Na₂O/K₂O 为 3.65 ~ 5.02; Al₂O₃ 含量高 (介于 16.50% ~ 18.65% 之间), A/CNK = 0.96 ~ 1.01, 属于准铝质-弱过铝质。

岩体的稀土元素的总含量较低, ΣREE 间于 $60.08 \times 10^{-6} \sim 71.91 \times 10^{-6}$ 之间。在稀土元素球粒陨石标准化图上(图 6a)总体显示具有中等分馏的稀土元素分配型式,呈右倾型分布 (La/Yb)_N = 3.86 ~ 5.28。LREE 中等略微富集 (La/Sm)_N = 2.48 ~

3.12]; HREE 接近平坦 (Gd/Yb)_N = 1.18 ~ 1.53], 具有十分微弱负铕异常 ($\delta \text{Eu} = 0.90 \sim 0.97$)。该岩体明显富集 Rb、Ba、Sr、K 等大离子亲石元素 (LILE), 而 Ti 和 Nb、Ta 等高场强元素 (HFSE) 具有明显的亏损 (图 6b)。

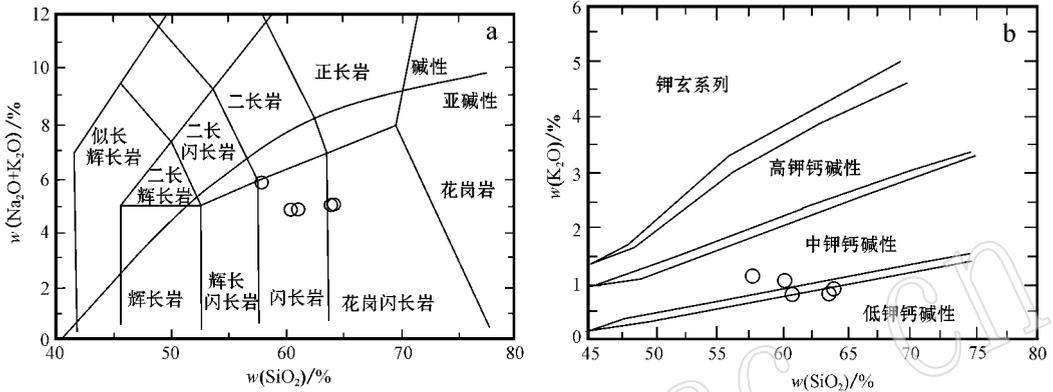


图 5 武关岩体 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ 图 (a, 据 Middlemost, 1994; Irvine and Baragar, 1971) 和 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图 (b, 据 RichWood, 1989)

Fig. 5 Diagram of $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ versus SiO_2 (a, after Middlemost, 1994; Irvine and Baragar, 1971) and diagram of K_2O versus SiO_2 for Wuguan intrusive body (b, after RichWood, 1989)

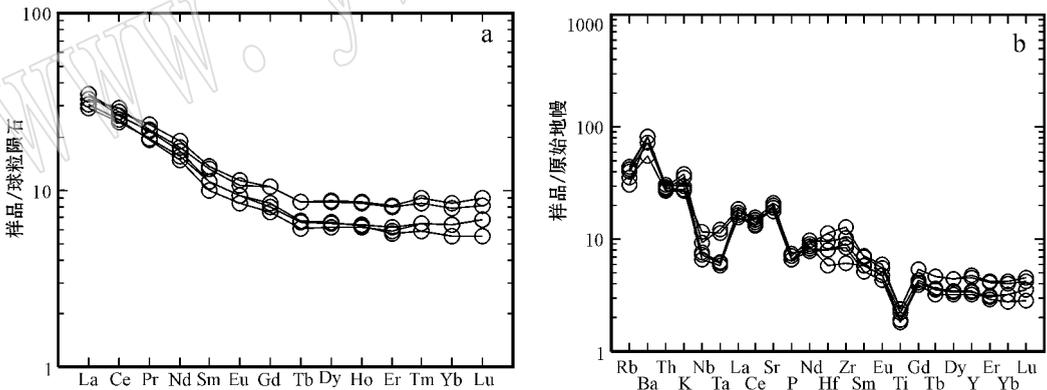


图 6 武关岩体稀土元素球粒陨石标准化图解 (a, 球粒陨石标准化数据自 Taylor and McLennan, 1985) 及微量元素原始地幔标准化图解 (b, 原始地幔标准化数据自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalization values of REE after Taylor and McLennan, 1985) and primitive mantle-normalized trace elements spider diagram (b, normalization values of trace after Sun and McDonough, 1989)

4 讨论

4.1 岩石形成构造环境分析

武关岩体为低钾拉斑-中钾钙碱性的花岗闪长岩和闪长岩系列, 前人认为低钾系列的英云闪长岩、奥长花岗岩和花岗闪长岩是大洋盆地和大洋岛弧环

境中最为发育的中酸性侵入岩类 (Beard and Lofgren, 1991), 而且钙碱性和岛弧“拉斑玄武质”花岗岩类总体定位于俯冲带上 (Barbarin, 1999)。本岩体明显富集 Rb、Ba、Sr、K 等大离子亲石元素 (LILE), 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素 (HFSE), 并具有较高的 LILE/HFSE 比值。该特征为消减板片变质脱水后释放的富含 LILE 的流体进入楔形地幔, 诱发地幔源

区发生部分熔融的缘故(Wilson, 1989),或与俯冲板片自身的部分熔融及与地幔交代作用有关(Martin, 1999; Moyen *et al.*, 2003; Martin *et al.*, 2005)亦或是与俯冲背景下软流圈上涌诱发的玄武质地壳重

熔有关(Guo *et al.*, 2007)。在 Nb-Y 和 Rb-(Y+Nb)图解中(图 7a, 7b)该岩体均落入岩浆弧区,亦反映了其所处于俯冲消减带的构造环境。

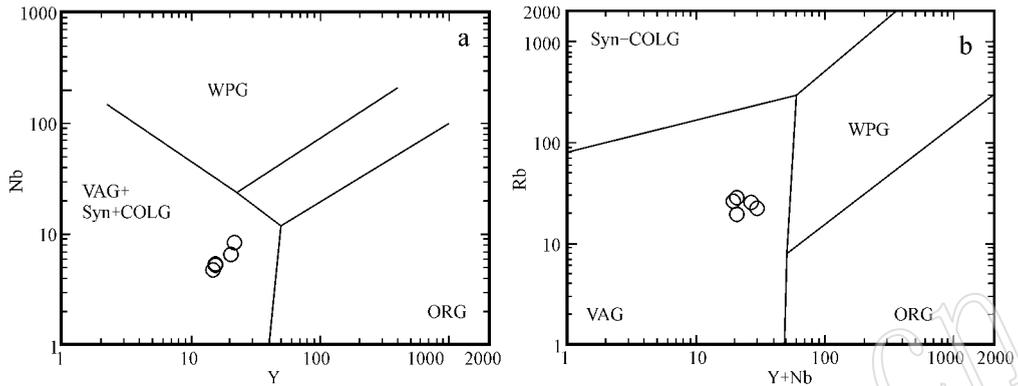


图 7 武关岩体 Nb-Y 图解(a)与 Rb-(Y+Nb)图解(b)(Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 7 Diagram of Nb versus Y(a) and diagram of Rb versus Y+Nb(b) for Wuguan intrusive body(after Pearce *et al.*, 1984)

WPG—板内花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; Syn-COLG—同碰撞花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩

WPG—intraplate granite; VAG—volcanic arc granite; Syn-COLG—syn-collision granite; ORG—oceanic ridge granite

经研究表明,受沉积物混染的上覆地幔部分熔融生成的弧岩浆岩和弧前沉积体系在岩石地球化学特征上存在密切的联系(Plank and Langmuir, 1993; Tani *et al.*, 2010)。极易受俯冲沉积物影响的 Cs、Rb、Ba、Th、U 和 K 等元素可以很大程度上反映俯冲沉积物的地球化学特征(Bailey *et al.*, 2009)。陆源沉积物通常具有明显的 Ba_N 异常,以小安的列斯群岛(Lesser Antilles, Plank and Langmuir, 1998)和上地壳地球化学组分(UCC, Rudnick and Gao, 2003)为例,它们均具有 $Ba_N < Rb_N$ 且 $Ba_N < Th_N$ 的地球化学特征,而本岩体均具有 $Ba_N > Rb_N > Th_N$ 的地球化学特征,与全球大洋俯冲沉积物平均组分(GLOSS)的地球化学特征相符合(Plank and Langmuir, 1998),具有典型远洋沉积物混入的岩石化学特征,此亦从一定程度上反映了岩体与大洋俯冲汇聚作用有密切关联。

4.2 岩石形成压力条件及源岩分析

在俯冲消减环境中的下地壳或壳幔结合部,辉石、角闪石、斜长石等均为典型的拉斑-钙碱系列岛弧岩浆岩的重要组成矿物(Davidson *et al.*, 2007);而且,它们作为残余相可以明显影响到那些源自下地壳或俯冲板片部分熔融而成的岩体的地球化学特征(Perez *et al.*, 2009)。研究表明,残余矿物组合与

硅酸盐熔体的含水量及温度和其所处的压力条件有紧密联系(Barker and Arth, 1976; Rushmer, 1991; Schmidt, 1992; Wolf and Wyllie, 1994; Rapp *et al.*, 1991; Patiño Douce and Beard, 1995; Patiño Douce, 1996; Watkins *et al.*, 2007; Perez *et al.*, 2009)。因此,可以通过一定温压条件下石榴子石、角闪石、斜长石等矿物的组成情况来约束岩浆过程,进而反映成熟岛弧和典型的大陆活动边缘的岩浆作用及岩石形成的物理环境。

武关岩体的稀土元素分配曲线(图 6a)均较为相似,反映了源区物质构成具有一定的均一性。以往的研究表明无负铕异常的中酸性火成岩可能指示有一个加厚陆壳的存在或者具有山根的造山带环境(邓晋福等, 1996, 2004)。武关岩体无显著的 Eu 负异常,其 δEu 值($\delta Eu = 0.94 \pm 0.4$)均大于华北角闪岩的平均值($\delta Eu = 0.84$; Gao *et al.*, 1992),说明武关岩体形成于相对较大的深度和压力环境之下。虽然本文并未直接计算出岩浆就位时所处的具体压力环境,但岩体中 Al_2O_3 的含量往往在一定程度上与成岩过程中施加在岩浆中的压力值成正相关(Barker and Arth, 1976)。武关岩体具有较高的 Al_2O_3 含量,所采集样品的 Al_2O_3 含量均大于 16.50%。中酸性侵入体中 Al_2O_3 含量的差异可以很大程度上体现

残余或堆积矿物的变化:低 Al 的花岗质岩浆反映了富斜长石、无角闪石(或无石榴子石)的残余矿物组合,而高 Al 的花岗岩类则形成于角闪石(或石榴子石)为主要残余相的环境中(Barker and Arth, 1976; Rapp and Watson, 1995)。

中酸性岩浆岩(包括 $\text{SiO}_2 > 56\%$ 的中酸性火山岩和侵入岩)的 Sr 和 Yb 含量是两个非常有意义的地球化学指标,高 Sr 低 Yb 型($\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$ 和 $\text{Yb} < 2 \times 10^{-6}$, 无 Eu 负异常或有弱的 Eu 负异常或正异常)中酸性侵入体的地球化学特征指示的岩石学意义是花岗岩类源区熔融的残留物由石榴子石、辉石、角闪石组成(张旗等, 2006, 2008)。而未分异的 HREE 分布形态则指示源区有角闪石作为主要的稳定残留,岩体形成的压力环境低于石榴子石稳定残余区(Rapp and Watson, 1995; Zhang *et al.*, 2009)。通常情况下当压力小于 1 GPa 时,石榴子石不会出

现在角闪岩熔融的残余相中(Patiño Douce and Beard, 1995; Watkins *et al.*, 2007)。本岩体为富钠、高铝、具有较高 Sr/Yb 比值的中酸性侵入体,其 LREE 富集、HREE 分布形态为平坦型且无明显的 Eu 负异常,反映出武关岩体可能形成于角闪石(石榴子石极少或无残余)作为主要稳定残余的压力环境下。

实验岩石学表明, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 的比值可以用来推断中酸性岩浆的源区特征。当 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} < 0.5$ 时暗示源区为泥质岩,当 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值介于 0.3 ~ 1.5 之间时中酸性的花岗质岩石则源于变杂砂岩或火成岩,而且角闪岩部分熔融而成的偏中性熔体(花岗闪长岩、石英闪长岩等)会具有略高的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值(Jung and Pfänder, 2007)。本岩体的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值介于 1.21 ~ 1.43 之间,具有较高的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值,结合图 8 可以推断武关岩体极有可能源自角闪岩相的(变)玄武岩的部分熔融。

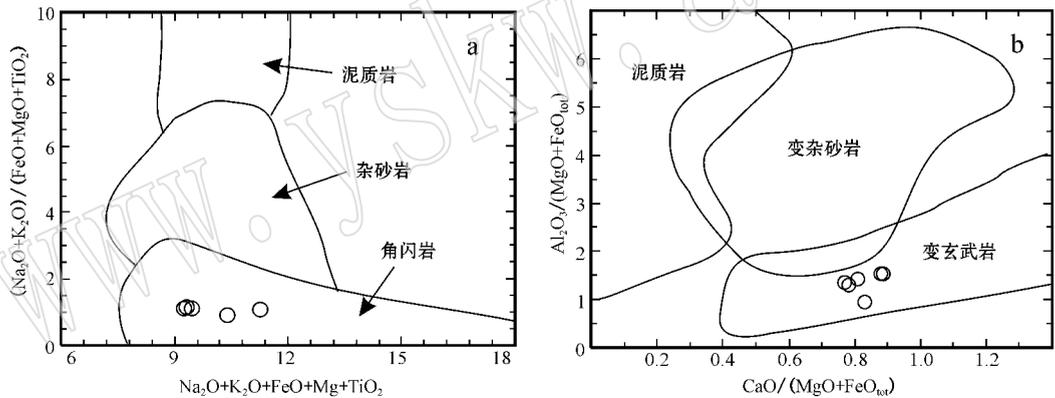


图 8 武关岩体 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/(\text{FeO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2) - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{FeO} + \text{Mg} + \text{TiO}_2$ 图(a) 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO} + \text{FeO}_{\text{tot}}) - \text{CaO}/(\text{MgO} + \text{FeO}_{\text{tot}})$ 图(b) 据 Patiño Douce, 1999)

Fig. 8 Diagram of $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/(\text{FeO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2) - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{FeO} + \text{Mg} + \text{TiO}_2$ (a) and diagram of $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO} + \text{FeO}_{\text{tot}}) - \text{CaO}/(\text{MgO} + \text{FeO}_{\text{tot}})$ (b) for Wuguan intrusive body (after Patiño Douce, 1999)

武关岩体明显富钠,一方面与源区的岩石组分有关,另一方面也与形成时所处的压力环境有关。因为压力升高时斜长石开始消耗,斜长石的分解会促使岩浆中的 Na_2O 含量升高(Patiño Douce and Beard, 1995; Patiño Douce, 1996; Petford and Atherton, 1996)。在角闪石作为主要稳定残余相的环境下,伴随着斜长石的分解消耗,会导致源区岩石具有较高的角闪石/斜长石比值。残余相中较高的角闪石/斜长石比值则在一定程度上可以反映源自下地壳熔融的中酸性岩浆形成于较高 $f(\text{H}_2\text{O})$ 条件中(Borg and Clyne, 1998)。因此可以推测源自下地壳玄武

岩质岩石部分熔融的富钠的武关岩体形成于较高的 $f(\text{H}_2\text{O})$ 条件中,而当含水的玄武质岩浆底侵于角闪岩相下地壳环境时极有利于中酸性岩浆的生成(Annen *et al.*, 2006)。此外, Jung 等(2009)通过对非洲西南部纳米比亚石英闪长岩-花岗闪长岩-淡色花岗岩组合进行系统研究后发现,具有低 SiO_2 , 高铝,微弱的负 Eu 异常及 LREE 富集、HREE 略微亏损的岩石化学特征的石英闪长岩和花岗闪长岩源于角闪岩相下地壳的部分熔融。武关岩体具有同其十分类似的地球化学特征,同时还具有较高的 Sr/Yb 比值且无明显的 Eu 负异常,进一步表明:武关岩体为中下地

壳角闪岩相压力条件下(<1 GPa)含水的玄武质岩石部分熔融的产物。

4.3 岩浆源区稀土元素模拟

由于岩体所处的研究区曾遭受过多期次的构造演化,致使那些性质活泼的主量元素和大离子亲石元素极容易在后期的地质运动中发生活化。尤其是广泛发生于自然界的非实比熔融过程,伴随着矿物相比比例的变化,相容元素在熔体和残余相中会发生强烈的迁移和变化(许继峰等,1996)而不利岩石地球化学的模拟研究。但是稀土元素具有极为相似的晶体化学性质和地球化学性质,所以将稀土元素的分配样式作为一个整体来进行研究可以更准确的反映岩石的形成机制和构造环境。

本文拟采用批式熔融的方法(Shaw,1970)对稀土元素分配样式进行模拟计算来论证武关岩体的岩石学成因及形成过程。残余矿物组成比例采用 Wolf 和 Wyllie(1994)中的 Pl、Hb、Grt、Cpx 和 Opx 的含量组成,Wolf 和 Wyllie(1994)采用 $\text{SiO}_2 \approx 48.4\%$ 的角闪岩所进行的部分熔融实验可以得到 SiO_2 含量介于 $51.77\% \sim 66.34\%$ 之间的钠质中酸性熔体,而本样品为 SiO_2 含量介于 $57.79\% \sim 64.14\%$ 之间的富钠的花岗岩类。如前文所述本岩体的形成与大洋俯冲消减环境有密切联系,且围岩为研究区内广泛分布的斜长角闪岩,因而笔者采用分布于武关地区丹凤岩群中与岛弧环境有成因关系的斜长角闪岩(样品 07WG5 闫臻等,2009)为物源对武关岩体的岩石学成因进行论证。

从图 9 中可以观察到 Mode 1 模式由于斜长石残余含量较高,因而在不同程度熔融的 REE 模拟分配样式图中均有较为微弱的 Eu 负异常;Model 3 模式由于少量石榴子石的残留会导致重稀土发生相对亏损,因而这两种残余矿物组合均同研究样品有一定的差距。在 Model 2 模式中,当 $F = 20\%$ 时(图 9a),LREE 富集,相对于本次分析的样品含量均较高; $F = 50\%$ 时(图 9d),LREE 仍为富集状态,但相对于研究样品含量均略低;在 $F = 30\% \sim 40\%$ 的状态下(图 9b,9c),模拟计算所取得的 REE 分配样式同研究样品的 REE 分配样式基本一致。

稀土元素的模拟计算结果表明:以丹凤群中形成于岛弧环境下的斜长角闪岩为源岩在 $30\% \sim 40\%$ 的熔融条件下可以形成武关岩体。而且,矿物的残余相以角闪石为主并伴有少量的斜长石和单斜辉石,石榴子石极有可能无残余,此种残余矿物组合对

前述的角闪岩相中下地壳的压力范围作了进一步的限定。

4.4 岩石成因与地球动力学机制

秦岭古洋盆沿现今的商丹断裂带一线于早奥陶世开始了俯冲和板块汇聚的过程,期间伴有洋盆消减产物的增生和各类岩浆杂岩的侵入,同时俯冲的动力、热力和流体作用促进了该地区拉斑质及大量深成钙碱系列侵入体的生成,最终形成了消减火山杂岩和岛弧杂岩共同构成的俯冲消减岩浆岩带(周鼎武等,1995)。通过近年来的研究,秦岭造山带中逐渐发现一些具有埃达克岩岩石地球化学特征的岩体(李伍平等,2001;裴先治等,2003;陈隽璐等,2008;王婧等,2008)。这类具有一定指示意义的岩石的发现对于秦岭造山带构造岩浆作用的研究具有十分重要的意义。其中位于商丹带西段、侵入于早古生代丹凤群中的唐藏石英闪长岩(454 ± 1.7 Ma)具有 O 型埃达克岩岩石地球化学特征,是与早古生代岛弧火山岩系有共生关系的侵入体,它的形成同早古生代秦岭主洋盆的俯冲消减作用有密切关联,是古洋壳的俯冲板片部分熔融后与上覆地幔橄榄岩反应的产物(陈隽璐等,2008)。而处于商丹带东段的灰池子花岗质复式岩体的 U-Pb 同位素年龄为 437 Ma,其形成与秦岭古洋壳俯冲造成北秦岭地体的斜向抬升有关,由此诱发的地壳加厚和玄武质岩浆的底侵促使下地壳玄武质岩石发生部分熔融,从而形成了此类具有埃达克岩岩石学特征复式岩体(李伍平等,2000,2001)。此外,在丹凤岩群北侧商南松树沟地区发现有指示高压-超高压变质作用存在的高压基性麻粒岩,通过对其锆石微量元素和形态学研究后认为峰期变质事件的 U-Pb 同位素年龄为 485 ± 3.3 Ma(陈丹玲等,2004),其形成与早古生代北秦岭构造体制转化有密切关联。以上均说明了加里东期商丹带板块片俯冲消减作用与商丹构造混杂岩带的物质组成在地球动力学成因上有紧密联系。

在对锆石阴极发光(CL)显微结构分析和微区原位微量元素分析的基础上,通过激光探针等离子体质谱(LA-ICP-MS)对武关岩体进行定年后认为:武关岩体的形成时代为 438.6 Ma。此年龄和同样位于北秦岭的灰池子岩体的形成年龄在误差范围内基本一致,因而二者极有可能为同一构造事件的产物。早古生代是秦岭岩浆岩带在板块体制下主要的中酸性岩浆活动期,在该阶段形成的岩体多,且规模大(徐学义等,2008a,2008b),特别是北秦岭商丹构造

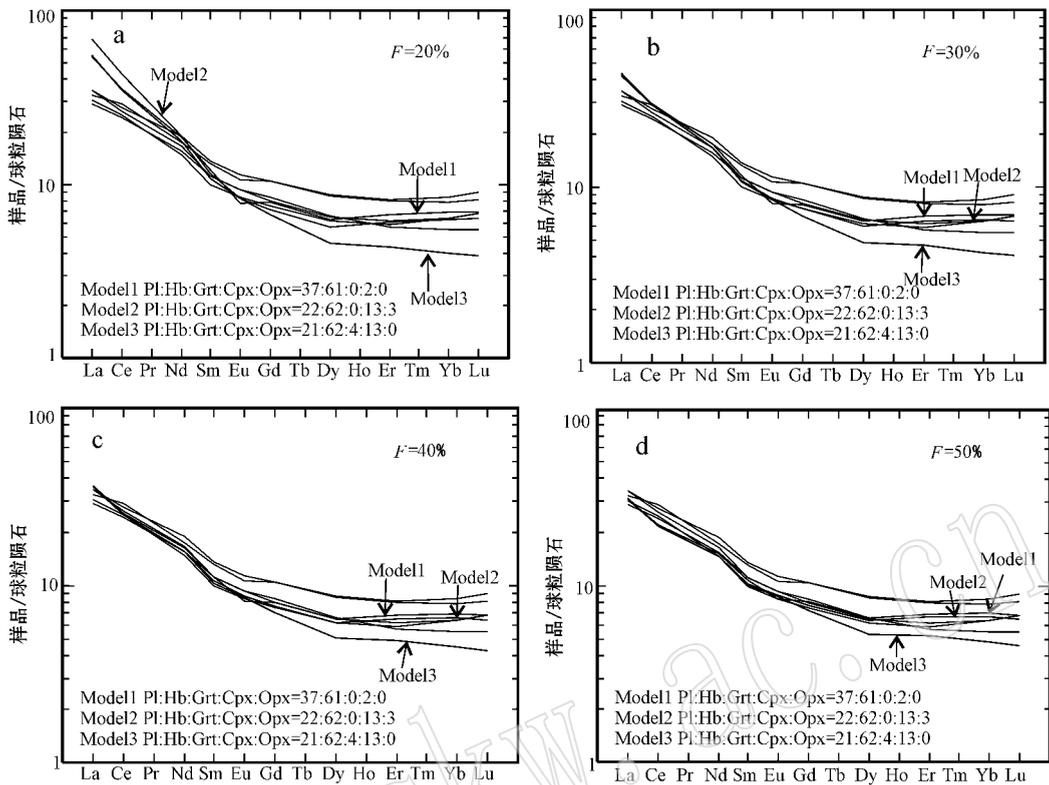


图9 丹凤岩群斜长角闪岩在不同残余矿物相和熔融程度下生成熔体的稀土元素球粒陨石标准化图解

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns of melts generated by partial melting of amphibolite in the Danfeng Group with different mineral phases

源岩数据(样品 07WG5 参见文献闫臻等(2009))残余矿物组分参见文献 Wolf 和 Wyllie(1994)稀土元素在斜长石、角闪石、石榴子石中的分配系数参见文献 Martin(1987)稀土元素在单斜辉石(Cpx)中的分配系数参见文献 Kamei 等(2009)

Calculated melt based on residual mineral assemblage from Wolf and Wyllie(1994); data of the source for the Wuguan intrusive body from Yan *et al.* (2009); Kd of REE in Pl, Hb, Grt from Martin(1987); Kd of REE in Cpx from Kamei *et al.* (2009)

带内出露的大量加里东期花岗岩,多形成于板块俯冲结束后的碰撞造山过程(田伟等,2005)。研究表明在晚奥陶世—中志留世(450~422 Ma),秦岭地块发生了碰撞挤出、抬升,在此过程中,在北秦岭造山带根部就位的大量早期岛弧或弧后盆地的基性岩作为幔源物源同下地壳共同发生减压熔融而形成大规模的低温I型花岗岩(王涛等,2009)。此外,武关岩体中含有 341.7 ± 3.3 Ma 的锆石年代学信息,很可能为商丹构造带南侧古生代持续的俯冲增生作用在该处的响应(Yan *et al.*, 2006a, 2006b; 闫臻等, 2009)。

形成于中下地壳压力环境中的武关岩体呈现有明显的俯冲消减带岩石地球化学特征,但锆石 U-Pb 同位素年龄显示其形成略晚于商丹洋的俯冲事件,因而极有可能为商丹带滞后的消减源区在碰撞造山过程中再次熔融的产物。中酸性侵入体(特别是与

俯冲消减环境有成因关系的侵入体)的岩石地球化学特征所反映的大地构造环境有时会同实际的区域地质构造演化过程存有一定的差异(Payne *et al.*, 2010)。实际上,花岗岩类的形成不仅仅受大地构造环境的影响,而且其源区的继承性和熔融与分异程度最终都会直接影响到花岗岩类的物质组成(Frost *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2007; 吴福元等, 2007; 张旗等, 2007)。因此,武关岩体的形成极有可能为碰撞造山过程中,由岛弧环境下形成的基性岩或变基性岩在中下地壳压力条件下(< 1 GPa)进一步发生熔融而形成的继承有俯冲消减带岩石地球化学特征的一类岩体。

5 结论

在碰撞造山过程中,区域上挤压抬升的减压环

境可以促使造山带内部含水的基性岩或变基性岩在中下地壳压力环境下发生部分熔融;同时,形成于这种大地构造环境下的中酸性岩体所继承的岩石地球化学特征往往在很大程度上反映的是源区岩石在前期形成过程中所具有的地质构造背景。武关岩体便是在此种大地构造机制下形成的。处于秦岭造山带的商丹洋在早古生代发生了自南而北的俯冲汇聚,同时促使该地区生成了大量的具有俯冲消减带岩石地球化学特征的增生杂岩。后续的挤压碰撞会致使地壳加厚,并随着碰撞作用的逐步加深北秦岭地体存有发生斜向抬升以及玄武质岩浆底侵的可能,继而诱发地壳发生部分熔融以生成广泛分布于研究区内的继承有俯冲消减作用地球化学特征的一类岩体。

武关岩体锆石阴极发光(CL)显微结构和 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年结果共同表明,本岩体形成年龄为 438.6 ± 2.2 Ma,反映其形成于北秦岭早古生代板块俯冲结束后的碰撞造山过程中。该类发育于北秦岭商丹构造混杂岩带内的富钠、高铝,具有较高 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值, LREE 富集、HREE 分布形态为平坦型且无明显 Eu 负异常的“高 Sr 低 Yb”型的中酸性岩体,为加里东造山过程中,广泛分布于北秦岭丹凤岩群的具有俯冲消减带地球化学特征的斜长角闪岩在中下地壳压力条件下发生较大程度部分熔融的产物。

致谢 感谢西安地质矿产研究所何世平研究员在论文撰写过程中给予的帮助;同时,感谢审稿专家的细致评审及宝贵的修改建议。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59~79.
- Annen C, Blundy J D and Sparks R S. 2006. The Genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones [J]. *J. Petrology*, 47: 505~539.
- Bailey J C, Jensen E S and Hansen A. 2009. Formation of heterogeneous magmatic series beneath North Santorini, South Aegean island arc [J]. *Lithos*, 110: 20~36.
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments [J]. *Lithos*, 46: 605~626.
- Barker D R and Arth J G. 1976. Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archean bimodal trondhjemite-basalt suites [J]. *Geology*, 10(4): 596~600.
- Beard J S and Lofgren G E. 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1.3, and 6.9 kbar [J]. *J. Petrology*, 32(2): 365~401.
- Belousova E, Suzanne G W and Fisher Y. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143: 602~622.
- Borg L E and Clyne M A. 1998. The Petrogenesis of Felsic Calc-alkaline Magmas from the Southernmost Cascades, California: Origin by Partial Melting of Basaltic Lower Crust [J]. *J. Petrology*, 39: 1197~1222.
- Carson C J, Ague J J, Grove M *et al.* 2002. U-Pb isotopic behaviors of zircon during upper-amphibolite fluid infiltration in the Napier Complex, East Antarctica [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 199: 287~310.
- Chen Danling, Liu Liang, Sun Yong *et al.* 2004. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for high-pressure basic granulite from North Qinling and its geological significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(21): 2296~2304.
- Chen Junlu. 2008. Petrogenesis and orogenic process of early-Paleozoic volcanic rocks in the western segment of the North Qinling orogenic belt, Central China [D]. China University of Geoscience (in Chinese).
- Chen Junlu, Xu Xueyi, Wang Hongliang *et al.* 2008. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of Early Paleozoic Adakitic Rock in the West Segment of North Qinling [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 475~484 (in Chinese with English abstract).
- Chen Nengsong, Ba Jin, Zhang Lu *et al.* 2009. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the Wuguan Group, Shangdan fault zone, eastern Qinling, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 28(5): 556~560 (in Chinese with English abstract).
- Cui Zhilin, Sun Yong and Wang Xueren. 1995. Discovery of Radiolarians from Danfeng Group ophiolite in Qinling Mountains and its geological significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 40(18): 1686~1688 (in Chinese).
- Davidson J, Turner S, Handley H *et al.* 2007. Amphibole "Sponge" in arc crust? [J]. *Geology*, 35: 787~790.
- Deng Jinfu, Luo Zhaohua, Su Shangguo *et al.* 2004. Petrogenesis, Tectonic Setting and Mineralization [M]. Beijing: Geological Publishing House, 130~145 (in Chinese).
- Deng Jinfu, Zhao Hailin and Mo Xuanxue. 1996. Continental Roots-plume Tectonics of China-key to the Continental Dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 20~21 (in Chinese).
- Frost B R, Barnes C, Collins *et al.* 2001. A geochemical classification for granitic rocks [J]. *J. Petrology*, 42: 2033~2048.
- Gao S, Zhang B R, Luo T C *et al.* 1992. Chemical composition of the continental crust in the Qinling Orogenic Belt and its adjacent North China and Yangtze cratons [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56: 3933~3950.
- Guo Z F, Wilson M and Liu J Q. 2007. Post-collisional adakites in south Tibet: Products of partial melting of subduction-modified lower crust [J]. *Lithos*, 96: 205~224.

- Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53 : 27~55.
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canad. J. Earth Sci.*, 8 : 523~548.
- Jung S and Pfänder J A. 2007. Source composition and melting temperatures of orogenic granitoid : constraints from CaO/Na₂O, Al₂O₃/TiO₂ and accessory mineral saturation thermometry [J]. *European Journal of Mineralogy*, 19 : 859~870.
- Jung S, Masberg P and Mihm D. 2009. Partial melting of diverse crustal sources-constraints from Sr-Nd-O isotope compositions of quartz diorite-granodiorite-leucogranite associations (Kaoko belt Belt, Namibia) [J]. *Lithos*, 111 : 236~251.
- Kamei A, Miyake Y, Owadam, *et al.* 2009. A pseudo adakite derived from partial melting of tonalitic to granodioritic crust, Kyushu, southwest Japan and [J]. *Lithos*, 112 : 615~625.
- Li Wuping, Wang Tao, Wang Xiaoxia, *et al.* 2000. Single zircon dating of the Huichizi complex, north Qinling : its geological significance [J]. *Regional Geology of China*, 19(2) : 172~174 (in Chinese with English abstract).
- Li Wuping, Wang Tao and Wang Xiaoxia. 2001. Source of Huichizi granitoid complex pluton in northern Qinling, Central China : constrained in element and isotopic geochemistry [J]. *Earth Science*, 23(3) : 269~278 (in Chinese with English abstract).
- Li X H, Li Z X, Sinclair J A, *et al.* 2007. Replay to the comment by Zhou *et al.* on " Revisiting the " Yanbian Terrane " : Implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China [J]. *Precambrian Res.*, 155 : 318~323.
- Li XianZi, Yan Zhen and Lu Xinxiang. 1993. Granite in Qinling-Dabie Mountains [M]. Beijing : Geological Publishing House, 104~109 (in Chinese).
- Martin H. 1987. Petrogenesis of Archaean Trondhjemites, Tonalites and Granodiorites from Eastern Finland : Major and Trace Element Geochemistry [J]. *J. Petrology*, 28(5) : 921~953.
- Martin H. 1999. Adakitic magmas : Modern analogues of Archaean granitoid [J]. *Lithos*, 46 : 411~429.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, *et al.* 2005. An over view of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid : relationships and some implications for crustal evolution [J]. *Lithos*, 79 : 1~24.
- Middlemost E A H. 1994. Naming materials in magma-igneous rock system [J]. *Earth. Sci. Rev.*, 7 : 215~224.
- Moyen J F, Martin H and Jayananda M. 2003. Late Archaean granites : a typology based on the Dharwar Craton (India) [J]. *Precambrian Res.*, 127 : 103~123.
- Patiño Douce A E. 1996. Effects of pressure and H₂O content on the compositions of primary crustal melts [J]. *GSA Special Paper*, 315 : 11~21.
- Patiño Douce A E. 1999. What do experiments tell us about the relative contribution of crust and mantle to the origins of granitic magma [A]? Castro A, Fernandez C and Vigneresse J L. Understanding Granites : Integrating New and Classical Techniques [C]. Geological Society of London, Special Publication, 168, 55~75.
- Patiño Douce A E and Beard J S. 1995. Dehydration-melting of Biotite Gneiss and Quartz Amphibolite from 3 to 15 kbar [J]. *J. Petrology*, 36(3) : 707~738.
- Payne J L, Ferris G, Barovich K M, *et al.* 2010. Pitfalls of classifying ancient magmatic suites with tectonic discrimination diagrams : An example from the Paleoproterozoic Tunkillia Suite, southern Australia [J]. *Precambrian Res*, 177 : 227~240.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *J. Petrology*, 25 : 956~983.
- Pei Xianzhi. 1997. Composition and tectonic evolution of Shangdan Fault, Eastern Qinling [M]. Xi 'an : Xi 'an Cartographic Publishing House, 5~6 (in Chinese).
- Pei Xianzhi, Li Houmin and Li Guoguang. 2001. A Study of formation epoch and tectonic attribute of the Danfeng Group Complex in East Qinling Mountains [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(2) : 180~189 (in Chinese with English abstract).
- Pei Xianzhi, Wang Tao, Ding Sanping, *et al.* 2003. Geochemical characteristics and geological significance of NeoProterozoic granitoids on north side of the Shangdan Zone in the East Qinling [J]. *Geology in China*, 30(4) : 372~381 (in Chinese with English abstract).
- Perez R A, Müntener and Ulmer P. 2009. Igneous garnet and amphibole fractionation in the roots of island arcs : experimental constraints on andesitic liquid [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 157 : 541~558.
- Petford N and Atherton M. 1996. Na-rich partial melts from newly Underplated basaltic crust : the Cordillera blanca batholith [J]. *J. Petrology*, 37 : 1491~1521.
- Plank T and Langmuir C H. 1993. Tracing trace element from sediment input to volcanic output at subduction zones [J]. *Nature*, 362 : 739~742.
- Plank T and Langmuir C H. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle [J]. *Chemical Geology*, 145 : 325~394.
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar : Implication for the continental growth and crust-mantle recycling [J]. *J. Petrology*, 36(4) : 891~931.
- Rapp R P, Watson E B and Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archaean trondhjemites and tonalites [J]. *Precambrian Res*, 51 : 1~25.
- Richwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. *Lithos*, 22 : 247~263.
- Rudnick R L and Gao S. 2003. Composition of the continental crust [A]. *Treatise on Geochemistry*, vol3. Elsevier, Amsterdam, 1~64.
- Rushmer T. 1991. Partial melting of two amphibolites : contrasting experimental results under fluid-absent conditions [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 107 : 41~59.
- Schmidt M W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of

- pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 110 : 304 ~ 310.
- Shang Ruijun and Yan Zhen. 1998. Granitic Rocks in the Qinba Area, China [M]. Wuhan : China University Geoscience Press, 168 ~ 195 (in Chinese).
- Shaw D M. 1970. Trace element fractionation during anatexis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34 (2): 237 ~ 240.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts : implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basin* [C]. Geological Society, London, Special Publications, 42 : 313 ~ 345.
- Tani K, Dunkley D J, Kimura J I, *et al.* 2010. Syncollisional rapid granitic magma formation in an arc-arc collision zone: Evidence from the Tanzawa plutonic complex, Japan [J]. *Geology*, 38 : 215 ~ 218.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crusts: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford : Blackwell Scientific Publications, 1 ~ 312.
- Tian Wei and Wei Jingchun. 2005. Caledonian low Al-TTG series rocks in North Qinling : the characters, petrology and geological significance [J]. *Science in China Series D : Earth Sciences*, 35 (3): 215 ~ 224 (in Chinese).
- Wang Jing Zhang Hongfei, Xu Wangchun, *et al.* 2008. Petrogenesis of granites from Dangchuan area in West Qinling orogenic belt and its tectonic implication [J]. *Earth Science*, 33 (4): 474 ~ 486 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Wang Xiaoxia, Tian Wei, *et al.* 2009. North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time : Implications for orogenic processes in the orogens of central China [J]. *Science in China Series D : Earth Sciences*, 52 (9): 1359 ~ 1384.
- Wang Zongqi, Yan Quanren, Yan Zhen, *et al.* 2009. New division of the Main Tectonic Units of Qinlin orogenic belt, Central China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83 (11): 1527 ~ 1546 (in Chinese with English abstract).
- Watkins J M, Clemens J D and Treloar P J. 2007. Archaean TTGs as sources of younger granitic magmas : melting of sodic metatonalites at 0.6 ~ 1.2 GPa [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 154 : 91 ~ 110.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis* [M]. London : Unwin Hyman Ltd, 188 ~ 190.
- Wolf B M and Wyllie P J. 1994. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar : the effects of temperature and time [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 115 : 369 ~ 383.
- Wu Fuyan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (6): 1217 ~ 1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49 (15): 1554 ~ 1569.
- Xu Jifeng and Zhang Benren. 1996. A discussion on effects of P values on chemical composition of melts formed by nonmodal partial melting [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15 (2): 138 ~ 145 (in Chinese with English abstract).
- Xue Xueyi, He Shiping, Wang Hongliang, *et al.* 2008a. A review of geology in Northwest China, including Qinling, Qilian and Tianshan [M]. Beijing : Science Press, 126 ~ 131 (in Chinese).
- Xu Xueyi, He Shiping, Wang Hongliang, *et al.* 2008b. Tectonic framework of North Qinling Mountain and North Qilian Mountain conjunction area in Early Paleozoic : A study of the evidences from strata and tectonic-magmatic events [J]. *Northwestern Geology*, 41 (1): 1 ~ 21 (in Chinese with English abstract).
- Yan Z, Wang Z, Yan Q, *et al.* 2006a. Devonian sedimentary environments and provenances of the Qinling orogen : Constraints on Late Paleozoic southward accretion of the North China craton [J]. *International Geology Review*, 48 : 585 ~ 618.
- Yan Z, Wang Z, Wang T, *et al.* 2006b. Provenance analysis and tectonic setting of the clastic deposits of the Xicheng Basin in the Qinling orogen, central China [J]. *Journal of Sedimentary research*, 76 : 557 ~ 574.
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Chen Junlu, *et al.* 2009. Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb dating of amphibolites from the Danfeng Group in the Wuguan area, North Qinling terrane and their tectonic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83 (11): 1633 ~ 1646 (in Chinese with English abstract).
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Wang Tao, *et al.* 2007. Tectonic setting of Devonian sediments in the Qinling orogen : Constraints from detrital modes and geochemistry of clastic rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (5): 1023 ~ 1042 (in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, *et al.* 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasmas mass spectrometry [J]. *Geostandard and Geoanalytical Research*, 28 : 353 ~ 370.
- Zhang Chengli, Wang Tao and Wang Xiaoxia. 2008. Origin and tectonic setting of the Early Mesozoic granitoids in Qinling orogenic belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 14 (3): 304 ~ 316 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, *et al.* 2001. *Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics* [M]. Beijing : Science Press, 117 ~ 118 (in Chinese).
- Zhang Guowei, Zhang Zongqing and Dong Yunpeng. 1995. Nature of main tectono-lithostratigraphic units of the Qinling orogen : Implications for the tectonic evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11 (2): 101 ~ 114 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, *et al.* 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (9): 2249 ~ 2269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chengdong, *et al.* 2007. Are discrimination diagrams indicative of correct tectonic settings of granites? Some crucial questions on granite study (3) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (11): 2683 ~ 2698 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yuanlong, Jin Weijun, *et al.* 2008. Criteria for the recognition the pre-, syn- and post-orogenic granitic rocks [J]. *Geo-*

- logical Bulletin of China, 27(1): 1~18(in Chinese with English abstract).
- Zhang S B, Zheng Y F, Zhao Z F, *et al.*. 2009. Origin of TTG-like rocks from anatexis of ancient lower crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic granitoids in South China[J]. Lithos, 133: 347~368.
- Zhou Dingwu, Zhang Chengli, Han Song, *et al.*. 1995. Tectonic setting on the two different tectonics magma complex of the East Qinling in Early Paleozoic[J]. Acta Petrologica Sinica, 11(2): 115~126(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈丹玲, 刘良, 孙勇, 等. 2004. 北秦岭松树沟高压基性麻粒岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. 科学通报, 49(18): 1901~1908.
- 陈隽璐. 2008. 北秦岭造山带西段古生代火山岩成因环境与造山作用过程[D]. 中国地质大学(武汉)博士学位论文.
- 陈隽璐, 徐学义, 王洪亮, 等. 2008. 北秦岭西段早古生代埃达克岩地球化学特征及岩石成因[J]. 地质学报, 82(4): 475~484.
- 陈能松, 巴金, 张璐. 2009. 东秦岭商丹断裂带南侧武关岩群的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 28(5): 556~560.
- 崔智林, 孙勇, 王学仁. 1995. 秦岭丹凤群蛇绿岩带放射虫的发现及地质意义[J]. 科学通报, 40(18): 1686~1686.
- 邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 等. 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 130~145.
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 1996. 中国大陆根-柱构造: 大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社, 20~21.
- 李伍平, 王涛, 王晓霞. 2001. 北秦岭灰池子花岗岩复式岩体的源岩讨论——元素-同位素地球化学制约[J]. 地球科学, 23(3): 269~278.
- 李伍平, 王涛, 王晓霞, 等. 2000. 北秦岭灰池子复式岩体单颗粒锆石年龄[J]. 中国区域地质, 19(2): 172~174.
- 李先梓, 严阵, 卢欣祥. 1993. 秦岭-大别山花岗岩[M]. 北京: 地质出版社, 104~109.
- 裴先治. 1997. 东秦岭商丹构造带的组成与构造演化[M]. 西安: 西安地图出版社, 5~6.
- 裴先治, 李厚民, 李国光. 2001. 东秦岭丹凤群的形成时代和构造属性[J]. 岩石矿物学杂志, 20(2): 180~189.
- 裴先治, 王涛, 丁仁平, 等. 2003. 东秦岭商丹带北侧新元古代埃达克质花岗岩及其地质意义[J]. 中国地质, 30(4): 372~381.
- 尚瑞钧, 严阵. 1988. 秦巴花岗岩[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 168~195.
- 田伟, 魏景春. 2005. 北秦岭造山带加里东期低 Al-TTG 系列岩石特征、成因模拟及地质意义[J]. 中国科学(D), 35(3): 215~224.
- 王婧, 张宏飞, 徐旺春, 等. 2008. 西秦岭党川地区花岗岩的成因及其构造意义[J]. 地球科学, 33(4): 474~486.
- 王涛, 王晓霞, 田伟, 等. 2009. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示[J]. 地球科学, 39(7): 949~971.
- 王宗起, 闫全人, 闫臻, 等. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分[J]. 地质学报, 83(11): 1527~1546.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(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[J]. 科学通报, 49(16): 1589~1604.
- 许继峰, 张本仁. 1996. 非实比熔融中 P 值对熔融产物影响的讨论[J]. 岩石矿物学杂志, 15(2): 138~145.
- 徐学义, 何世平, 王洪亮, 等. 2008a. 中国西北部地质概论-秦岭、祁连、天山地区[M]. 北京: 科学出版社, 126~131.
- 徐学义, 何世平, 王洪亮, 等. 2008b. 早古生代北秦岭-北祁连结合部构造格局的地层及构造岩浆事件约束[J]. 西北地质, 41(1): 1~21.
- 闫臻, 王宗起, 陈隽璐, 等. 2009. 北秦岭武关地区丹凤斜长角闪岩地球化学特征、锆石 SHRIMP 测年及其构造意义[J]. 地质学报, 83(11): 1633~1646.
- 闫臻, 王宗起, 王涛, 等. 2007. 秦岭造山带泥盆系形成构造环境——来自碎屑岩组成和地球化学方面的约束[J]. 岩石学报, 23(5): 1023~1042.
- 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, 14(3): 304~316.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 117~118.
- 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属性及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 11(2): 101~114.
- 张旗, 潘国强, 李承东, 等. 2007. 花岗岩构造环境问题: 关于花岗岩研究的思考之三[J]. 岩石学报, 23(11): 2683~2698.
- 张旗, 王焰, 李承东, 等. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(9): 2249~2269.
- 张旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 2008. 造山前、造山和造山后花岗岩的识别[J]. 地质通报, 27(1): 1~18.
- 周鼎武, 张成立, 韩松, 等. 1995. 东秦岭早古生代两条不同构造-岩浆杂岩带的形成与构造环境[J]. 岩石学报, 11(2): 115~126.