

西秦岭印支期高 Sr/Y 花岗岩类的成因及动力学背景 ——以同仁地区舍哈力吉岩体为例*

黄雄飞¹ 莫宣学¹ 喻学惠^{1**} 李小伟¹ 杨梦楚¹ 罗明非¹ 和文言¹ 于峻川²

HUANG XiongFei¹, Mo XuanXue¹, YU XueHui^{1**}, LI XiaoWei¹, YANG MengChu¹, LUO MingFei¹, HE WenYan¹ and YU JunChuan²

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China

2014-02-27 收稿, 2014-06-30 改回.

Huang XF, Mo XX, Yu XH, Li XW, Yang MC, Luo MF, He WY and Yu JC. 2014. Origin and geodynamic settings of the Indosinian high Sr/Y granitoids in the West Qinling: An example from the Shehaliji pluton in Tongren area. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11):3255–3270

Abstract Indosinian granitoids are widespread in the West Qinling and were mainly formed in two stages with ages of 248 ~ 234Ma and 224 ~ 211Ma, respectively. Some samples of the Xiahe pluton (248 ~ 238Ma) and the Wenquan pluton (223 ~ 216Ma) were considered to bear a geochemical resemblance to adakite ($Sr > 400 \times 10^{-6}$, $Yb < 2 \times 10^{-6}$), which pointed to a thickened crust with corresponding depth of > 50 km. In this paper, a detailed study of the zircon U-Pb dating, petrology, geochemistry and Sr-Nd isotopes was made for the Shehaliji pluton in Tongren area, West Qinling. This pluton is predominantly composed of quartz monzonite, associated with abundant mafic microgranular enclaves (MME). The host rocks contain a certain amount of K-feldspar megacrysts, some of which display rapakivi texture. The quartz monzonite show relatively identical compositions that are geochemically similar to adakite, e. g., high SiO_2 (66.07% ~ 67.52%), Al_2O_3 (14.85% ~ 15.95%), Sr (560×10^{-6} ~ 692×10^{-6}), $(La/Yb)_N$ ratios (27.8 ~ 34.3), and low Y (11.4×10^{-6} ~ 12.9×10^{-6}) and Yb (0.99×10^{-6} ~ 1.09×10^{-6}), and weakly negative Eu anomalies ($\delta Eu = 0.77 \sim 0.95$). Zircon U-Pb dating yields an age of 234.1 ± 0.5 Ma for the host, indicative of parts of the Early Indosinian magmatism. They are metaluminous and high potassic calc-alkaline with $K_2O/Na_2O > 1$, and display high $Mg^{\#}$ (59 ~ 60), Cr (69.1×10^{-6} ~ 81.2×10^{-6}) and Ni (31.6×10^{-6} ~ 36.1×10^{-6}). They are also characterized by the enrichment in large-ion lithophile elements (Rb, Ba, Th, U) and relative depletion in high field strength elements (Nb, Ti, P), and have $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ ratios of 0.7075 ~ 0.7077 and $\varepsilon_{Nd}(t)$ values of $-6.3 \sim -6.1$, with depleted mantle model ages ranging from 1.25 ~ 1.33Ga. The Shehaliji quartz monzonite was sourced from partial melting of the garnet amphibolite in the old lower crust, and then mixed with mafic magmas and suffered fractional crystallization mainly of plagioclase. The rapakivi texture and relatively homogeneous geochemical features of the host most likely resulted from the rapid remobilization process of the highly viscous crustal-derived crystal mushes, which had a genetic link with the hot mantle-derived melts. The West Qinling might not experience remarkable crustal thickening process in the Early Indosinian. The Early Indosinian granitoids in the West Qinling were formed in an active continental margin, triggered by local extension that was probably attributed to an abrupt change of the polarity of subduction of the Paleo-Tethyan oceanic crust.

Key words Indosinian; Granitoid; High Sr/Y and La/Yb; Rapakivi texture; Crustal thickness; West Qinling

摘要 西秦岭印支期花岗岩类分布十分广泛, 形成时代集中于 248 ~ 234Ma 和 224 ~ 211Ma 两个阶段。其中, 夏河岩体

* 本文受中国地质调查局工作项目(1212011121260、E90139)、国家自然科学基金项目(41403028)和中国博士后科学基金资助项目(2014M550081)联合资助。

第一作者简介: 黄雄飞, 男, 1989 年生, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: xfh1024@126.com

** 通讯作者: 喻学惠, 女, 1944 年生, 教授, 主要从事火成岩及有关矿产研究, E-mail: xhyu@cugb.edu.cn

(248~238Ma)和温泉岩体(223~216Ma)的部分样品被厘定为埃达克岩($Sr > 400 \times 10^{-6}$, $Yb < 2 \times 10^{-6}$),指示陆壳厚度大于50km。本文对西秦岭同仁地区舍哈力吉岩体进行了锆石U-Pb定年、岩石学、地球化学和Sr-Nd同位素研究。舍哈力吉岩体主要由石英二长岩组成,同时含有许多暗色镁铁质微粒包体(MME)。寄主岩中发育少量的钾长石巨晶,并且部分巨晶具有环斑结构。舍哈力吉石英二长岩化学成分比较均一,而且也显示出类似埃达克岩的一些地球化学特点,如富 SiO_2 (66.07%~67.52%) and Al_2O_3 (14.85%~15.95%),高Sr(560×10^{-6} ~ 692×10^{-6}),低Y(11.4×10^{-6} ~ 12.9×10^{-6})和Yb(0.99×10^{-6} ~ 1.09×10^{-6}),并具有较高的(La/Yb)_N比值(27.8~34.3)和微弱的负Eu异常($\delta Eu = 0.77 \sim 0.95$)。锆石U-Pb测年结果为 234.1 ± 0.5 Ma,表明其形成于印支早期。岩石为偏铝质、高钾钙碱性系列且 $K_2O/Na_2O > 1$,高 $Mg^{\#}$ (59~60)、Cr(69.1×10^{-6} ~ 81.2×10^{-6})和Ni(31.6×10^{-6} ~ 36.1×10^{-6}),以富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Th、U)而相对亏损高场强元素(Nb、Ti、P)为特征, $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7075 \sim 0.7077$, $\epsilon_{Nd}(t) = -6.3 \sim -6.1$,亏损地幔模式年龄为1.25~1.33Ga。舍哈力吉石英二长岩起源于石榴角闪岩相古老地壳的部分熔融,之后经历了壳幔岩浆混合作用和以斜长石为主的分离结晶作用。寄主岩的环斑结构和相对一致的地球化学特征,很可能是高温幔源熔体对壳源富钾高黏度岩浆改造所导致的晶粥快速再活化的结果。西秦岭在印支早期可能并未经历显著的地壳加厚过程。西秦岭印支早期花岗岩类形成于活动大陆边缘局部伸展环境,可能与古特提斯洋壳俯冲极性的改变有关。

关键词 印支期;花岗岩类;高Sr/Y和La/Yb;环斑结构;地壳厚度;西秦岭

中图法分类号 P588.121; P597.3

1 引言

秦岭造山带作为中国大陆中央造山带的重要组成部分,是一条经历了多旋回、多构造格局演化而形成的复合型造山带(Meng and Zhang, 1999; 张国伟等, 2001)。西秦岭属于秦岭造山带的西延部分(图1a),其地质演化历史与华北和扬子地块的长期汇聚以及特提斯构造域的发展演化紧密相关(Meng *et al.*, 2005; 冯益民等, 2003)。西秦岭地区在印支期发育了强烈的高钾钙碱性花岗岩岩浆侵位活动,这些花岗岩主要分布在夏河-临潭-宕昌-凤县断裂带以北地区,并且大致平行于西秦岭北缘的共和-贵德-临夏断裂带,形成时代集中于248~234Ma和224~211Ma两个阶段(图1b)。近十年来,西秦岭印支期花岗岩的基础研究工作获得了许多重要进展(金维浚等, 2005; 张宏飞等, 2006; Zhang *et al.*, 2007a; 张成立等, 2008; Qin *et al.*, 2009; Cao *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011a; Zhu *et al.*, 2011; Luo *et al.*, 2012; 韦萍等, 2013; Li *et al.*, 2014a; 徐学义等, 2014),特别是对该区印支期埃达克岩和加厚地壳(>50km)认识的提出(金维浚等, 2005; 邱庆伦等, 2008; 殷勇和殷先明, 2009; 张旗等, 2009; 徐学义等, 2014),为分析和评价西秦岭地区铜-金-钼矿成矿潜力提供了新的重要思路。

值得注意的是,西秦岭被厘定为埃达克岩的岩体实际上分布非常局限,所报道的样品主要来自印支早期的夏河岩体(248~238Ma, 金维浚等, 2005; 邱庆伦等, 2008; 韦萍等, 2013)和印支晚期的温泉岩体(223~216Ma, Zhang *et al.*, 2007a; Zhu *et al.*, 2011; 徐学义等, 2014),而且目前对两者地球化学特征及形成背景的差异还缺乏深入的讨论。大量研究表明,花岗岩高Sr、Sr/Y和La/Yb而低Y和Yb的特征可以由多种岩浆过程产生,如同化混染和分离结晶(AFC)、壳幔岩浆混合、源区继承等,因此它们并不一定代表了显著

加厚陆壳(>50km)的存在(Moyen, 2009; 黄方和何永胜, 2010; He *et al.*, 2011; Qian and Hermann, 2013)。另外,夏河岩体和温泉岩体均与壳幔岩浆混合作用有关(韦萍等, 2013; Zhu *et al.*, 2011),而且夏河岩体寄主岩中含有大量发育熔蚀结构的早期矿物(韦萍, 未发表资料),暗示混合作用之前的酸性岩浆黏度已经很大(Bachmann and Bergantz, 2006; Ruprecht *et al.*, 2012),而这显然又不利于混合作用的发生。Burgisser and Bergantz(2011)提出,高黏度岩浆的快速再活化过程(unzipping)对于岩浆混合过程和均一化过程的顺利进行具有十分重要作用。这种再活化过程与高温熔体的热扩散、流体和挥发分的加入密切相关(Huber *et al.*, 2009; Burgisser and Bergantz, 2011; Ruprecht *et al.*, 2012; 罗照华等, 2012),尤其是幔源岩浆的加热作用和组分贡献可能导致早期矿物的熔蚀和新矿物的结晶,从而在某些特定条件下形成一些特殊的火成结构,如环斑结构(Baxter and Feely, 2002; Wang *et al.*, 2011b)。

本文对西秦岭北带三叠纪舍哈力吉岩体进行了初步研究。该岩体保留了明显的壳幔岩浆混合印记,其地球化学成分变化非常有限并且也显示高Sr/Y和La/Yb的特点,寄主岩中还发育以钾长石为核、斜长石为幔的环斑结构。结合野外观察及岩石学、全岩主微量和Sr-Nd同位素地球化学数据,对该岩体的岩石成因和源区性质进行了详细分析,为岩浆均一化和环斑结构成因的讨论提供了新的资料,并通过与夏河岩体和温泉岩体的对比,对西秦岭高Sr/Y花岗岩的起源深度和产出背景进行了具体讨论,从而为反演印支期扬子与华北板块在西秦岭地区的汇聚过程及壳、幔相互作用提供新的制约。

2 地质背景及样品描述

西秦岭造山带通常指宝成铁路以西的秦岭山系,向东连

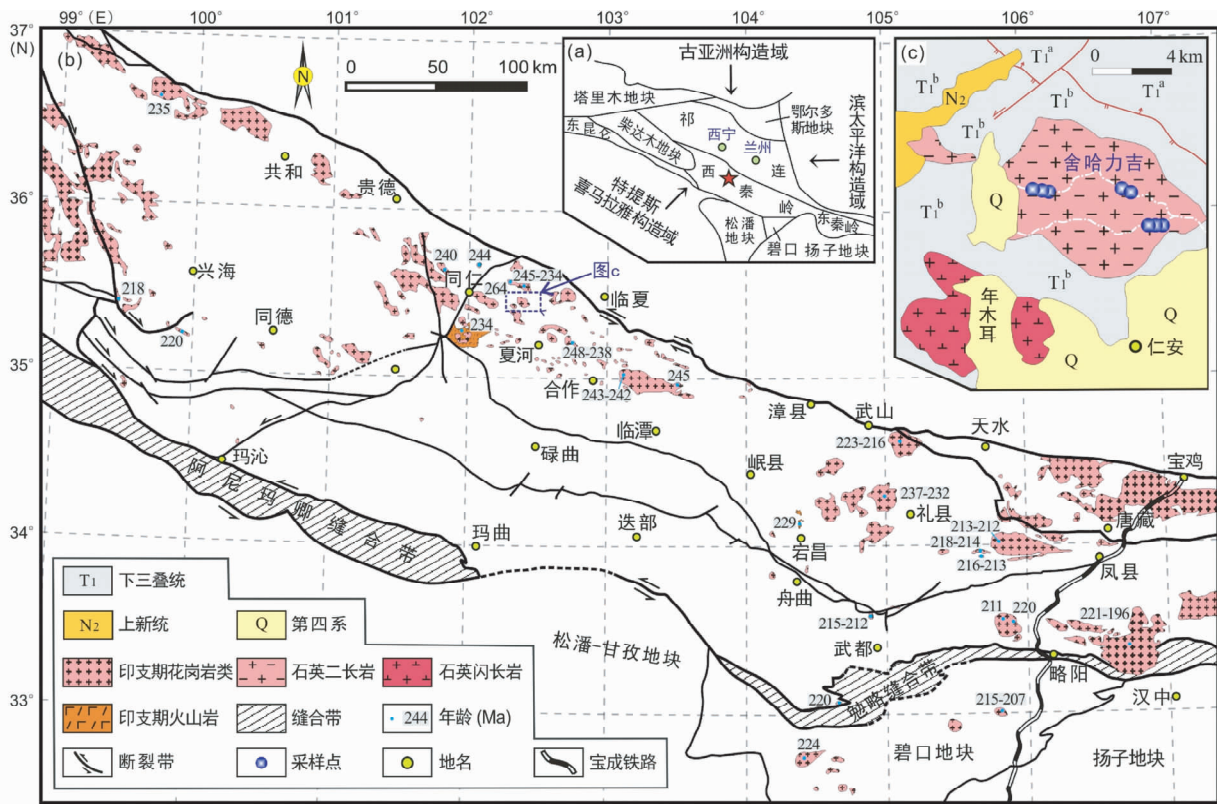


图1 西秦岭造山带构造划分图及研究区地质简图

(a) 西秦岭构造简图(据冯益民等,2003);(b) 西秦岭印支期岩浆岩分布图(据冯益民等,2002);(c) 舍哈力吉岩体地质简图(据甘肃省地质局第一区域地质测量队,1972^①)

Fig. 1 Tectonic subdivision of West Qinling orogenic belt and simplified geological map of the study area

接于南秦岭构造单元,其北部和西部以深大断裂为界分别与祁连地体和柴达木及东昆仑地体相邻,南缘则以阿尼玛卿-勉略缝合带与巴颜喀拉-松潘甘孜-碧口地块相隔(图 1b)(张国伟等, 2001; Zhang *et al.*, 2007a)。西秦岭在区域上以发育大量 NW 向走滑断裂带及拉分盆地为主要特征,出露地层主要为泥盆系-白垩系。西秦岭在印支期发育了大量高钾钙碱性花岗岩类,但这些花岗岩主要侵位于西秦岭北带,空间分布上大致与西秦岭北缘断裂带平行,而西秦岭南带岩浆活动则十分微弱(图 1b)。从侵位时代和共生岩石组合来看,西秦岭西北地区花岗岩主要形成于印支早期,为 264 ~ 234Ma(集中于 248 ~ 234Ma),伴生有基性-超基性岩(250Ma,王绘清等,2010; Li *et al.*, 2014b)和(高镁)安山岩(242 ~ 234Ma, Guo *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2013),而西秦岭南带及东部地区花岗岩的形成时代(237 ~ 211Ma)则明显晚于前者,并且集中于印支晚期(224 ~ 211Ma),由少量英安岩-流纹岩(229Ma,黄雄飞等,2013)与之伴生。此外,张旗等(2009)、殷勇和殷先明(2009)及徐学义等(2014)根据岩石中的 Sr-Yb 含量提出这些花岗岩类多属于埃达克岩或喜马

拉雅型花岗岩,其中,埃达克岩样品主要来自西秦岭西北缘的夏河岩体(248 ~ 238Ma,金维浚等,2005;邱庆伦等,2008;韦萍等,2013;徐学义等,2014)和东部的温泉岩体(223 ~ 216Ma, Zhang *et al.*, 2007a; Zhu *et al.*, 2011; 徐学义等, 2014)。在矿化特征方面,北带与南带也存在显著差别,北带主要发育与花岗岩有关的成矿作用,如斑岩型、矽卡岩型或热液型的铜-金-钼矿床,而南带主要产出卡林型或类卡林型金矿(张旗等,2009;徐学义等,2014)。

本次工作的舍哈力吉岩体位于青海省同仁地区瓜什则乡东部,北邻谢坑矽卡岩型铜金矿体,南邻年木耳斑岩型及矽卡岩型铜金矿体,岩体侵位于早三叠统砂岩、板岩之中,呈近圆形的岩株状产出,出露面积约 40km²(图 1c)。从岩体的边缘到中心,岩性变化不大,主要为石英二长岩,局部地区显示出向花岗闪长岩过渡的特点。岩石整体上十分新鲜,呈灰白色(图 2a),具有全晶质、似斑状结构,由斜长石(45%)、钾长石(40%)、石英(5%)、角闪石和黑云母(<10%)及少量副矿物(<2%)组成。野外常见钾长石粗晶或巨晶(5 ~ 40mm),除少量为近卵球状之外,大多呈不规则短柱状且棱

① 甘肃省地质局第一区域地质测量队. 1972. 1 : 20 万循化幅(9-48-01)地质调查报告

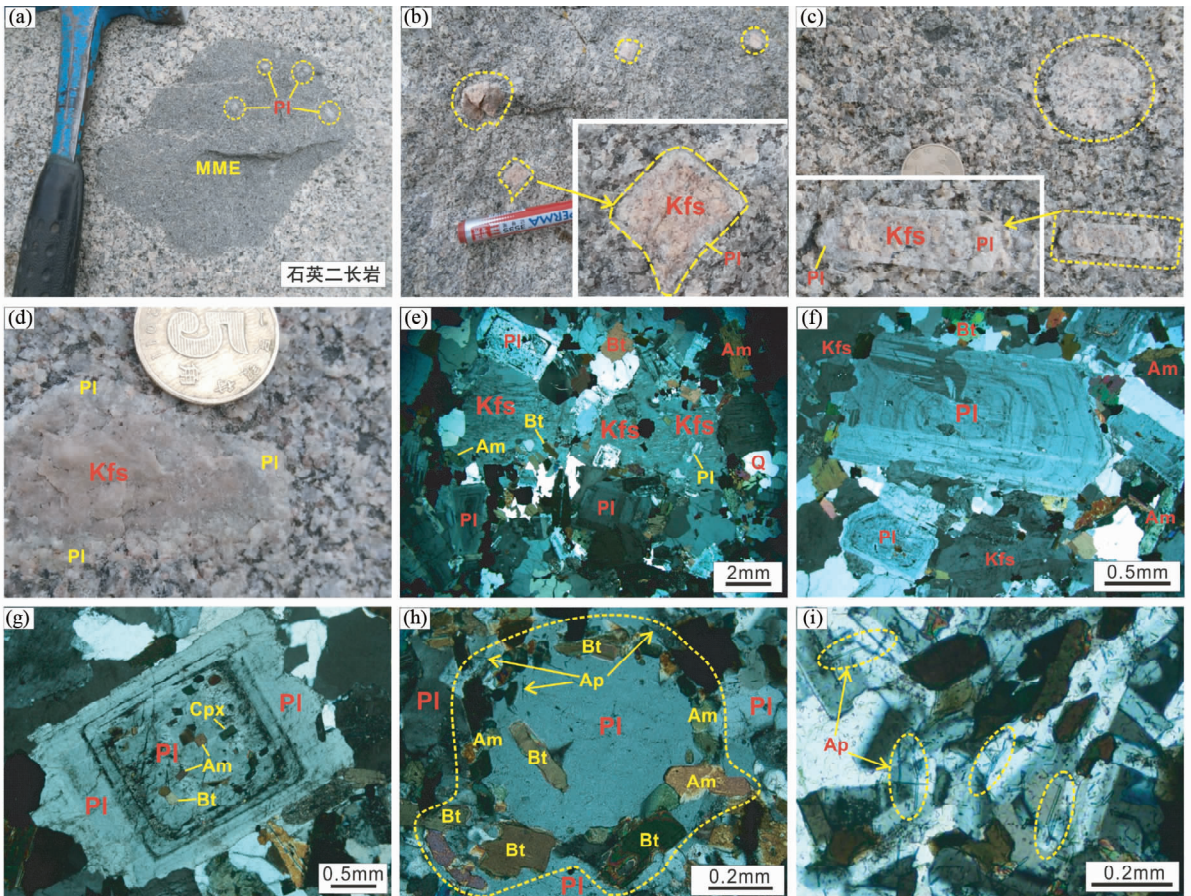


图2 舍哈力吉岩体石英二长岩及MME的野外和镜下照片

PI-斜长石;Kfs-钾长石;Q-石英;Cpx-单斜辉石;Am-角闪石;Bt-黑云母;Ap-磷灰石

Fig. 2 Field and micro-photographs of the host quartz monzonite and MME in the Shehaliji pluton

角存在不同程度的熔蚀,部分巨晶还发育斜长石外壳(1~5mm)构成环斑结构(图2b-d)。粒度较小的自形晶斜长石镶嵌于自形程度较差的碱性长石粗晶中形成较为典型的二长结构(图2e)。斜长石的结晶至少存在两个阶段。其中,早期斜长石粒度较小,具有熔蚀麻点及暗色熔蚀边(图2e, f),内含黑云母、角闪石和单斜辉石等微粒构成嵌晶结构(图2g, h),或边部被微粒角闪石、黑云母环绕形成齿冠结构,并且在暗色矿物周围还发育针状磷灰石(图2h),说明花岗质岩浆结晶早期存在基性物质的注入。晚期斜长石粒度明显增大,或形成具有环带结构的斑晶(图2f),或在早期斜长石或钾长石外围继续生长而构成增生边结构(图2g),并且斑晶内部既不含暗色矿物,也不具有熔蚀结构,暗示了岩浆的自结晶过程。此外,岩体中还常见暗色镁铁质微粒包体(MME),与寄主岩之间多为截然接触关系,内含斜长石及钾长石捕虏晶(图2a)。MME主要呈椭球状,灰黑色-深黑色,长轴介于5~150cm之间。镜下可见MME中发育许多针状磷灰石晶体(图2f),暗示MME为岩浆混合作用的产物(Wyllie *et al.*, 1962)。野外尚未见基性岩墙出露。

3 分析方法

锆石分选在廊坊诚信地质服务有限公司利用单矿物常规分离技术完成,制靶后进行透射光、反射光及阴极发光照相,优选无裂痕、环带发育良好的锆石进行U-Pb同位素定年。测年工作在天津地质矿产研究所同位素实验室利用LA-ICP-MS方法完成,采用质谱仪为美国Thermo Fisher公司制造的Neptune,激光剥蚀系统为ESI公司生产的UP193-FX ArF准分子激光器,激光束斑直径设定为35 μ m。数据处理采用ICPMSDataCal程序(Liu *et al.*, 2008)和Isoplot(Ludwig, 2003)程序进行,采用Andersen(2002)方法对普通铅进行校正,详细测试方法及仪器参数见李怀坤等(2010)。测试结果见表1。

对新鲜岩石样品进行无污染粉碎至200目,用于测定全岩主、微量元素及Sr-Nd同位素。主量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室完成,使用Rigaku RIX 2000型荧光光谱仪(XRF)测定,分析精度优于5%,详细方法参见Goto and Tatsumi(1996)。微

表 1 舍哈力吉石英二长岩 (GSZ12-9) 锆石 U-Pb 定年分析数据

Table 1 U-Pb analytical data of zircons from the quartz monzonite (GSZ12-9) in the Shehaliji pluton

测点号	含量(×10 ⁻⁶)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	Pb	U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	
				1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ				
1	38	965	0.49	0.03717	0.00022	0.28319	0.00351	0.05526	0.00060	235	1	253	3	423	24
2	70	1646	0.44	0.03753	0.00032	0.45524	0.01660	0.08798	0.00268	237	2	381	14	1382	59
3	59	1500	0.70	0.03668	0.00018	0.29711	0.00281	0.05875	0.00053	232	1	264	3	558	20
4	51	1313	0.58	0.03706	0.00020	0.27256	0.00244	0.05334	0.00042	235	1	245	2	343	18
5	76	1918	0.67	0.03494	0.00017	0.44388	0.00405	0.09213	0.00079	221	1	373	3	1470	16
6	46	1192	0.54	0.03695	0.00021	0.27234	0.00232	0.05345	0.00046	234	1	245	2	348	19
7	114	2620	0.61	0.03891	0.00020	0.51932	0.01033	0.09681	0.00184	246	1	425	8	1563	36
8	56	1476	0.63	0.03688	0.00019	0.27188	0.00229	0.05347	0.00043	233	1	244	2	349	18
11	58	1497	0.80	0.03685	0.00021	0.28288	0.00281	0.05568	0.00046	233	1	253	3	439	18
12	57	1467	0.68	0.03718	0.00023	0.30030	0.00355	0.05858	0.00053	235	1	267	3	551	20
13	50	1309	0.63	0.03699	0.00021	0.26291	0.00228	0.05154	0.00039	234	1	237	2	265	17
14	40	1071	0.50	0.03701	0.00020	0.27195	0.00242	0.05329	0.00047	234	1	244	2	341	20
15	54	1397	0.59	0.03709	0.00020	0.28805	0.00259	0.05633	0.00054	235	1	257	2	465	21
16	50	1307	0.55	0.03712	0.00021	0.27943	0.00264	0.05460	0.00044	235	1	250	2	396	18
17	43	1158	0.47	0.03675	0.00020	0.25503	0.00217	0.05033	0.00041	233	1	231	2	210	19
18	45	1207	0.58	0.03661	0.00019	0.26331	0.00224	0.05216	0.00042	232	1	237	2	292	18
21	46	1231	0.64	0.03686	0.00019	0.27681	0.00241	0.05446	0.00045	233	1	248	2	390	18
22	49	1285	0.61	0.03699	0.00021	0.25970	0.00231	0.05092	0.00041	234	1	234	2	237	18
23	54	1386	0.76	0.03716	0.00025	0.33168	0.00538	0.06473	0.00079	235	2	291	5	766	26
24	44	1181	0.52	0.03714	0.00022	0.26952	0.00229	0.05262	0.00042	235	1	242	2	313	18
25	33	900	0.49	0.03666	0.00019	0.26923	0.00321	0.05327	0.00060	232	1	242	3	340	26
26	55	1462	0.55	0.03689	0.00021	0.25190	0.00226	0.04953	0.00040	234	1	228	2	173	19
27	44	1183	0.54	0.03703	0.00020	0.25426	0.00255	0.04979	0.00046	234	1	230	2	185	22
28	66	1866	0.31	0.03709	0.00020	0.25109	0.00229	0.04910	0.00040	235	1	227	2	153	19
31	42	1182	1.95	0.03773	0.00020	0.45303	0.00415	0.08708	0.00075	239	1	379	3	1362	17
32	43	1138	0.55	0.03738	0.00021	0.34008	0.00371	0.06598	0.00061	237	1	297	3	806	19
33	58	1544	0.74	0.03700	0.00020	0.29498	0.00319	0.05782	0.00051	234	1	262	3	523	19
34	40	1103	0.54	0.03711	0.00020	0.25268	0.00351	0.04939	0.00055	235	1	229	3	166	26
35	37	1012	0.47	0.03739	0.00021	0.30174	0.00549	0.05853	0.00091	237	1	268	5	550	34

量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,采用 Agilent7500a 等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,分析精度优于 5%~10%,详细方法及流程参见 Gao *et al.* (2002)。全岩 Rb-Sr、Sm-Nd 的分离提纯在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成,上机测试在天津地质矿产研究所同位素实验室利用 Triton 热电离质谱仪(TIMS)分析完成,测定的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值分别采用⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.1194 和¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 进行质量分馏校

正,分析期间 Sr 国际标准 NBS987 给出⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.710234 ± 0.000008 (2σ, n = 5), Nd 国际标准 LRIG 给出¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512192 ± 0.000005 (2σ, n = 5),提纯流程监控标准 BCR-2 给出⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.704993 ± 0.000006 (2σ, n = 6),¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512632 ± 0.000002 (2σ, n = 6),详细的 Sr-Nd 同位素分析流程见 Li *et al.* (2013)。全岩主、微量元素数据列于表 2, Sr-Nd 同位素数据列于表 3。

表2 舍哈利吉石英二长岩主量元素(wt%)、微量和稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 2 Major element (wt%), trace and REE elements ($\times 10^{-6}$) of the quartz monzonite in the Shehaliji pluton

样品号	GSZ12-5	GSZ12-6	GSZ12-7	GSZ12-9	GSZ12-10	GSZ12-11	GSZ12-16	GSZ12-17
SiO ₂	66.88	67.52	67.42	66.57	66.75	66.87	66.07	66.79
TiO ₂	0.48	0.45	0.44	0.42	0.45	0.43	0.42	0.47
Al ₂ O ₃	15.02	14.85	15.03	15.89	15.38	15.36	15.95	15.09
Fe ₂ O ₃ ^T	3.22	3.04	2.93	2.81	3.01	3.00	2.89	3.20
MnO	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
MgO	2.39	2.20	2.12	2.08	2.28	2.22	2.19	2.37
CaO	3.02	2.78	2.84	3.15	3.01	3.07	3.16	3.11
Na ₂ O	3.53	3.47	3.57	3.74	3.55	3.63	3.76	3.61
K ₂ O	4.08	4.19	4.12	4.00	4.22	4.04	4.18	3.92
P ₂ O ₅	0.18	0.17	0.17	0.16	0.18	0.17	0.17	0.19
LOI	0.65	0.80	0.83	0.65	0.65	0.68	0.68	0.71
Total	99.51	99.52	99.52	99.51	99.52	99.51	99.52	99.51
Mg [#]	60	59	59	59	60	59	60	59
A/CNK	0.96	0.97	0.97	0.98	0.97	0.96	0.97	0.95
Li	67.5	65.4	63.6	56.4	58.7	58.4	52.3	67.5
Be	3.56	3.48	3.63	3.88	3.88	3.82	3.50	3.59
Sc	7.48	6.99	6.70	6.55	7.13	7.14	6.99	7.53
V	53.3	50.5	49.1	49.4	51.6	51.7	50.1	53.7
Cr	79.5	73.5	69.1	69.8	74.4	75.1	74.9	81.2
Co	9.63	9.06	8.80	8.88	9.33	9.43	8.94	9.68
Ni	36.1	33.1	32.0	31.6	34.1	33.9	33.0	35.5
Cu	3.57	3.02	3.23	5.04	5.71	4.44	3.76	4.67
Zn	38.9	35.8	35.3	37.9	40.6	40.2	37.3	39.8
Ga	18.3	18.2	18.1	18.7	18.5	18.6	18.2	18.9
Rb	137	143	140	145	153	146	138	135
Sr	599	560	588	660	613	614	692	602
Y	12.9	12.3	11.5	11.4	12.7	11.7	11.9	12.6
Zr	185	177	163	151	161	164	157	182
Nb	13.5	13.3	12.6	12.8	14.5	13.4	12.4	13.2
Cs	6.75	7.47	7.41	14.2	14.5	14.2	8.98	6.89
Ba	1283	1193	1238	1481	1537	1447	1594	1151
La	48.4	47.9	40.9	42.5	44.1	43.5	38.4	42.4
Ce	85.8	85.5	73.0	74.8	79.6	76.2	72.9	77.0
Pr	8.75	8.62	7.46	7.51	8.27	7.86	7.22	7.90
Nd	29.8	29.0	26.1	25.1	28.1	27.0	25.1	27.9
Sm	4.75	4.66	4.09	3.92	4.53	4.25	4.30	4.45
Eu	1.07	1.00	0.97	1.06	1.04	1.02	1.10	1.04
Gd	3.32	2.94	2.80	2.64	3.22	2.79	2.86	2.95
Tb	0.44	0.41	0.38	0.38	0.42	0.39	0.38	0.42
Dy	2.25	2.25	2.00	2.00	2.21	2.04	2.10	2.20
Ho	0.41	0.39	0.38	0.37	0.40	0.38	0.39	0.39
Er	1.16	1.15	1.04	1.03	1.20	1.06	1.08	1.06
Tm	0.17	0.16	0.15	0.15	0.17	0.15	0.17	0.16
Yb	1.01	1.04	0.99	1.02	1.09	1.06	0.99	1.06
Lu	0.15	0.16	0.14	0.15	0.17	0.15	0.16	0.16
Hf	4.77	4.59	4.32	4.01	4.25	4.28	4.13	4.69
Ta	1.25	1.28	1.19	1.36	1.64	1.45	1.26	1.25
Pb	35.7	35.8	35.4	42.7	42.3	41.3	41.7	34.6
Th	23.6	27.7	23.9	23.5	24.5	22.9	19.0	25.9
U	2.39	2.23	2.20	2.11	2.25	2.00	1.91	2.41
Sr/Y	46.5	45.6	51.3	57.8	48.1	52.3	58.3	47.6
δ Eu	0.78	0.77	0.83	0.95	0.79	0.85	0.90	0.82
(La/Yb) _N	34.3	32.9	29.5	29.9	29.0	29.4	27.8	28.6

注: Fe₂O₃^T 为全铁含量;N 代表球粒隕石标准化

表 3 舍哈利吉石英二长岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr and Nd isotopic compositions of the quartz monzonite in the Shehaliji pluton

样品号	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	ε _{Nd} (t)	t _{DM} (Ga)
GSZ12-7	0.6873	0.710044	27	0.7077	0.0943	0.512155	3	0.512009	-6.3	1.27
GSZ12-9	0.6347	0.709657	14	0.7075	0.0939	0.512168	6	0.512023	-6.1	1.25
GSZ12-10	0.7226	0.709947	9	0.7075	0.0971	0.512167	3	0.512016	-6.2	1.29
GSZ12-16	0.5760	0.709405	7	0.7075	0.1031	0.512182	2	0.512022	-6.1	1.33

注:以 234Ma 进行同位素初始比值校正;⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 及¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 比值采用 ICP-MS 测得的 Rb、Sr、Sm、Nd 含量计算得出;(¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.2137, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.51315, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.1967, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.512638

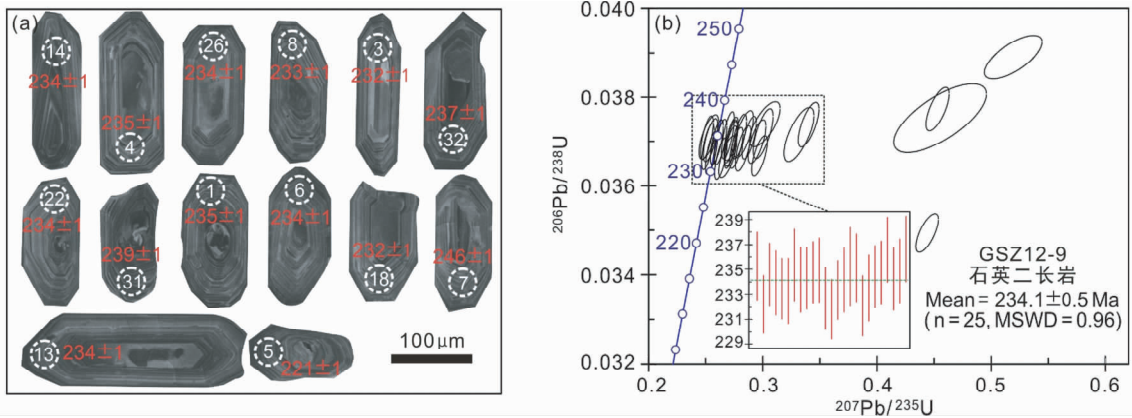


图 3 舍哈利吉石英二长岩锆石阴极发光图像及 U-Pb 年龄协和图

Fig. 3 Cathodoluminescence images and U-Pb concordia diagrams of zircons from the quartz monzonite in the Shehaliji pluton

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

对舍哈利吉石英二长岩(样品号:GSZ12-9,采样位置:35°26'48.2" N,102°25'41" E)分离的锆石进行了 U-Pb 测年。锆石多呈自形-半自形柱状,长度介于 70 ~ 260 μm,长宽比介于 2 : 1 ~ 4 : 1,发育明显的岩浆振荡环带,部分含有古老锆石内核(图 3a)。锆石 Th/U 值变化于 0.31 ~ 1.95,明显不同于 Th/U < 0.1 的变质锆石,属于典型的岩浆锆石(Hoskin and Black, 2000)。29 个测点中,剔除 4 个远离谐和曲线的测点,其余 25 个测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值变化于 232 ~ 237Ma,加权平均为 234.1 ± 0.5Ma (MSWD = 0.96) (图 3b),该年龄与舍哈利吉岩体侵位于下三叠统的产状一致,代表了岩体的侵位时代。

4.2 主量和微量元素特征

8 件石英二长岩样品均具有较高的 SiO₂ (66.07% ~ 67.52%) 和 Al₂O₃ (14.85% ~ 15.95%)。在 TAS 图解(图 4a)中,舍哈利吉岩体样品落到石英二长岩与花岗闪长岩之过渡区,与岩石中暗色矿物含量偏多的特征一致。样品的铝

饱和指数介于 0.95 ~ 0.98, A/NK-A/CNK 图解(图 4b)中显示舍哈利吉石英二长岩属于偏铝质岩石。K₂O-SiO₂ 图上(图 4c),样品均落入高钾钙碱性系列,且其 K₂O/Na₂O 均大于 1 (图 4d)。在微量元素方面,舍哈利吉石英二长岩具有较高的稀土元素含量(ΣREE = 157.1 × 10⁻⁶ ~ 187.4 × 10⁻⁶),并且在球粒陨石标准化的稀土元素配分图上(图 5a),所有样品表现为非常一致的右倾平滑曲线,轻稀土相对富集而重稀土相对亏损, Eu 异常不明显且重稀土分馏程度较低。在原始地幔标准化蛛网图上(图 5b),舍哈利吉石英二长岩以富集 Rb、Th、U、K、Sr 而相对亏损 Nb、Ti、P 为重要特征,与壳源岩石或弧岩浆岩的特点较为一致。哈克图解上(图 6),舍哈利吉石英二长岩整体上成分比较均一,随 SiO₂ 的略微升高,大多数元素均未发生显著变化(如主量元素 SiO₂、TiO₂、TFe₂O₃、MgO、K₂O,大离子亲石元素元素 Rb,高场强元素 Hf 和相容元素 Cr、Ni、Co),而 Al₂O₃、CaO、Na₂O、Sr、Eu、Ba 则显示出不同程度的降低,说明存在一定程度的斜长石分离结晶过程。舍哈利吉岩体较高的 MgO (2.08% ~ 2.39%)、Mg[#] (59 ~ 60) 及 Cr (69.1 × 10⁻⁶ ~ 81.2 × 10⁻⁶) 和 Ni (31.6 × 10⁻⁶ ~ 36.1 × 10⁻⁶),暗示岩浆受到了来自幔源物质的重要贡献。

舍哈利吉石英二长岩具有高 Sr (560 × 10⁻⁶ ~ 692 × 10⁻⁶)、低 Y (11.4 × 10⁻⁶ ~ 12.9 × 10⁻⁶) 和 Yb (0.99 × 10⁻⁶ ~

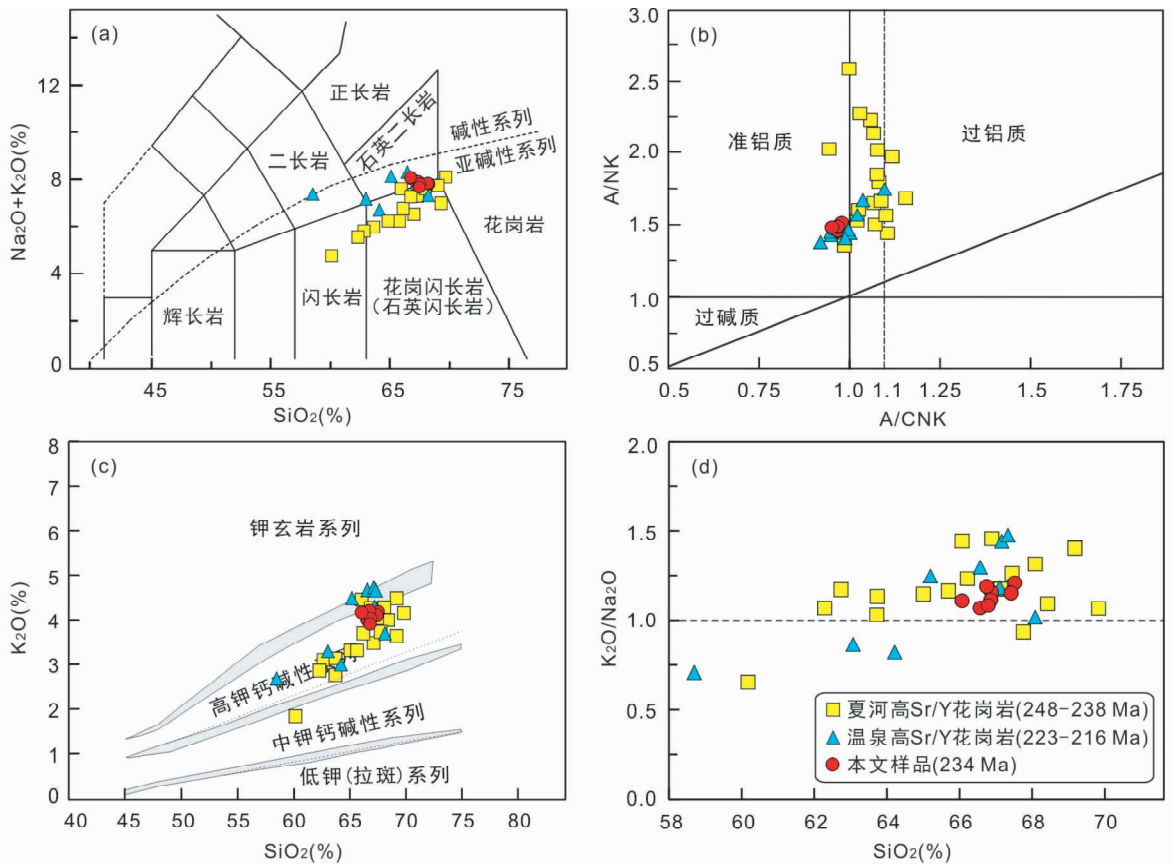


图4 西秦岭印支期高 Sr/Y 花岗岩类岩石分类图解

(a)-TAS 图解(据 Le Bas *et al.*, 1986); (b)-A/NK-A/CNK 图解; (c)-K₂O-SiO₂ 图解(据 Rickwood, 1989); (d)-K₂O/Na₂O-SiO₂ 图解. 数据来源:夏河高 Sr/Y 花岗岩(邱庆伦等,2008; 韦萍等,2013; 徐学义等,2014); 温泉高 Sr/Y 花岗岩(李永军等, 2003; Zhang *et al.*, 2007a; Cao *et al.*, 2011)

Fig. 4 Classification diagrams for the Indosinian high Sr/Y granitoids in the West Qinling

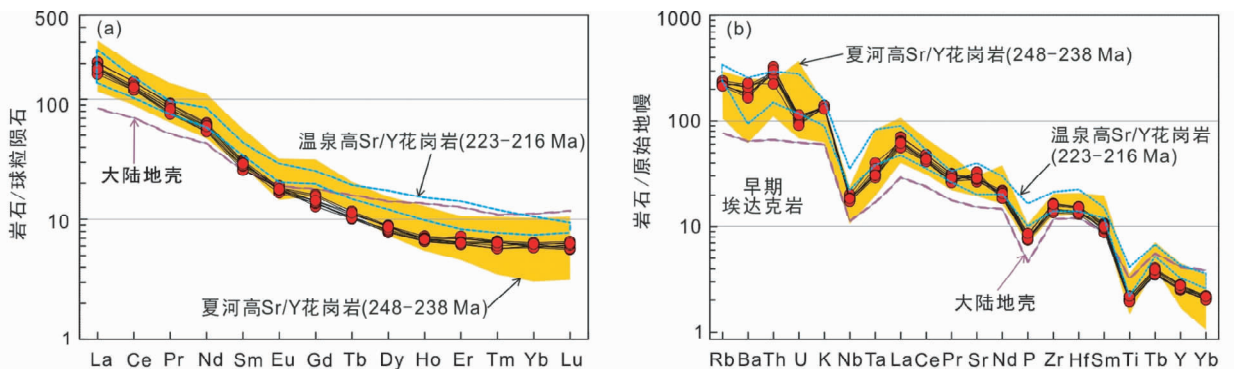


图5 西秦岭印支期高 Sr/Y 花岗岩类稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)与微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

数据来源:球粒陨石及原始地幔标准化值(Sun and McDonough, 1989); 大陆地壳成分(Rudnick and Gao, 2003)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element spider diagram (b) for the Indosinian high Sr/Y granitoids in the West Qinling

1.09×10^{-6} , 以及较高的 $(La/Yb)_N$ 比值(27.8 ~ 34.3) 和微弱的负 Eu 异常($\delta Eu = 0.77 \sim 0.95$), 与典型埃达克岩的地球化学特征(Defant and Drummond, 1990) 较为相似。值得注意的是, 俯冲板片或玄武质下地壳熔融形成的埃达克质熔体通

常富钠(Defant and Drummond, 1990; Atherton and Petford, 1993; Rapp and Watson, 1995), 尽管富钾埃达克岩(如中国东部埃达克岩)的概念早已被提出, 但目前对于其相应的富钾机制仍存在很大争议(葛小月等, 2002; 张旗, 2011)。前人

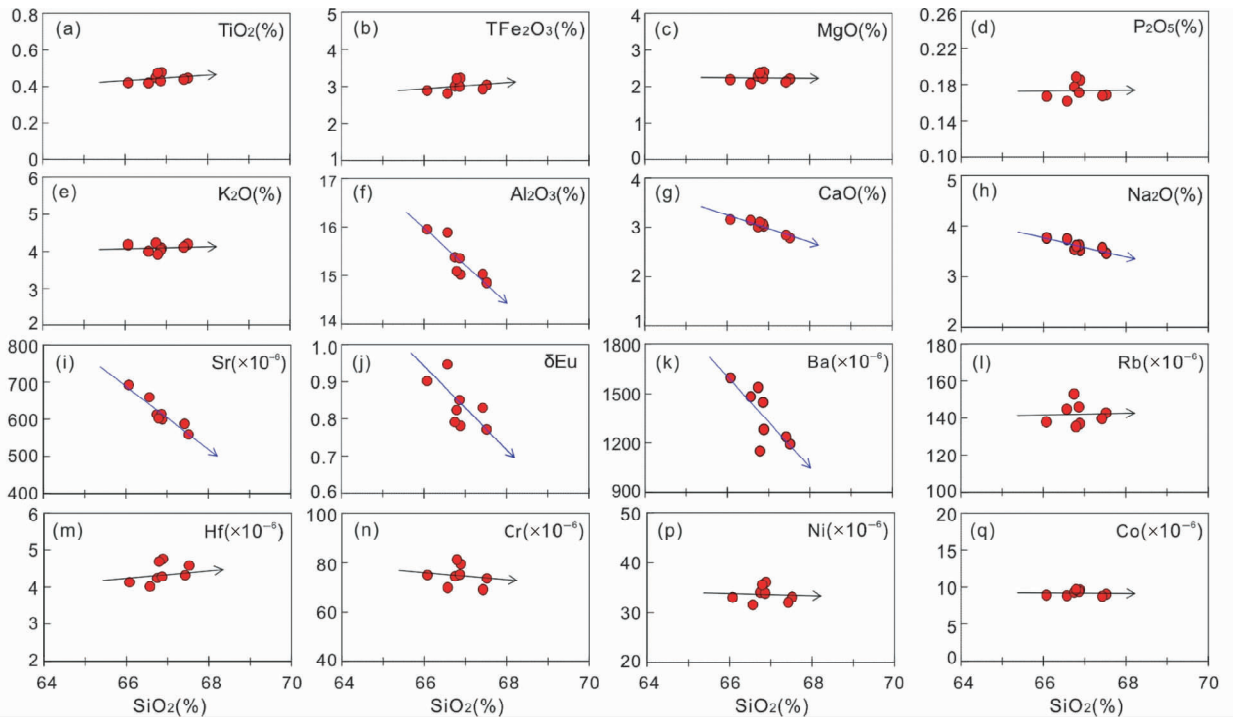


图 6 舍哈利吉石英二长岩选择性元素哈克图解

Fig. 6 Harker diagrams of selected elements for the the quartz monzonite in the Shehaliji pluton

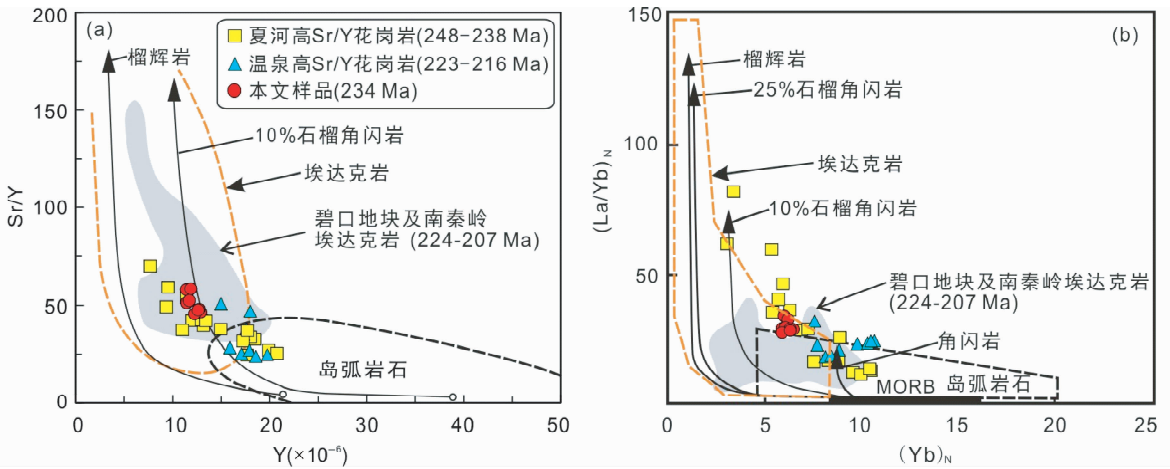


图 7 西秦岭印支期高 Sr/Y 花岗岩类 Sr/Y-Y 图解 (a) 及 $(La/Yb)_N$ - Yb_N 图解 (b) (据 Defant and Drummond, 1990)

数据来源:碧口地块及南秦岭印支晚期埃达克岩 (Zhang *et al.*, 2007b; 李佐臣等, 2010; Qin *et al.*, 2008, 2010)

Fig. 7 Sr/Y vs. Y and $(La/Yb)_N$ vs. Yb_N diagrams for the Indosinian high Sr/Y granitoids in the West Qinling (after Defant and Drummond, 1990)

报道的西秦岭夏河岩体和温泉岩体中的埃达克岩样品以及本文舍哈利吉岩体的 K_2O/Na_2O 多介于 1.1 ~ 1.5 (图 4d), 其富钾程度甚至高于中国东部埃达克岩 (K_2O/Na_2O 多小于 1, 平均为 0.76, 葛小月等, 2002)。另外, 这些被厘定为埃达克岩的样品多是基于 Sr、Yb 含量来识别的 ($Sr > 400 \times 10^{-6}$, $Yb < 2 \times 10^{-6}$), 这可能与传统的 Sr/Y-Y 图解及 $(La/Yb)_N$ - Yb_N 图解所界定的埃达克岩范围有所差别, 考虑到二者均强

调高 Sr/Y、低 Yb(Y) 和高 La/Yb 的特点, 同时为便于对比, 本文暂将其统一称为高 Sr/Y 花岗岩类。在 Sr/Y-Y 图解 (图 7a) 上, 舍哈利吉石英二长岩和夏河高 Sr/Y 花岗岩的大多数样品均落入埃达克岩范围, 而温泉高 Sr/Y 花岗岩却多位于岛弧岩石区域。 $(La/Yb)_N$ - Yb_N 图解 (图 7b) 中, 所有样品均表现出 Yb 含量偏高的特点, 其中, 舍哈利吉石英二长岩仍落入埃达克岩范围, 夏河高 Sr/Y 花岗岩虽具有较高的 $(La/Yb)_N$

$Yb)_N$ 比值却多位于埃达克岩区域之外,而温泉高 Sr/Y 花岗岩则依然落入岛弧岩石范围或边界附近。另外,相比于碧口地块及南秦岭埃达克岩(224 ~ 207Ma, Zhang *et al.*, 2007b; Qin *et al.*, 2008, 2010; 李佐臣等, 2010),温泉高 Sr/Y 花岗岩(223 ~ 216Ma)的 Y 和 Yb 含量明显偏高而 Sr/Y 比值则显著偏低(图 7a, b),说明两者尽管形成时代相近,但在岩石成因或源区特征上可能并不一致。从主元素特征来看(图 4),西秦岭印支期高 Sr/Y 花岗岩的全岩化学成分变化不大,除个别低硅样品落入闪长岩或二长岩区域之外,大多数样品均过渡于石英二长岩与花岗闪长岩之间,总体上属于偏铝质-弱过铝质的高钾钙碱性系列。此外,舍哈力吉石英二长岩的稀土元素和不相容元素含量与夏河高 Sr/Y 花岗岩较为相似,但明显低于温泉高 Sr/Y 花岗岩,尤其表现在中、重稀土上(图 5)。

4.3 Sr-Nd 同位素特征

舍哈力吉石英二长岩的 Sr、Nd 同位素组成也比较均一,4 件样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7075 \sim 0.7077$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -6.3 \sim -6.1$, 亏损地幔模式年龄 (t_{DM}) 为 1.25 ~ 1.33Ga, 表明其源于相对古老的富集物质。在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图中(图 8), 样品的 Sr、Nd 同位素特征与夏河及温泉高 Sr/Y 花岗岩相差不大, 与西秦岭其他花岗岩的低 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 端范围基本重合, 但明显不同于以尖扎基性-超基性岩为代表的西秦岭印支期地幔端元组分, 也与邻区的麦秀高镁安山岩(Li *et al.*, 2013) 不尽相同。舍哈力吉石英二长岩及西秦岭印支期其他花岗质岩体中的 MME 大致处于尖扎基性-超基性岩与基性下地壳的同位素混合曲线上, 暗示其成因可能与壳幔岩浆混合作用密切相关。

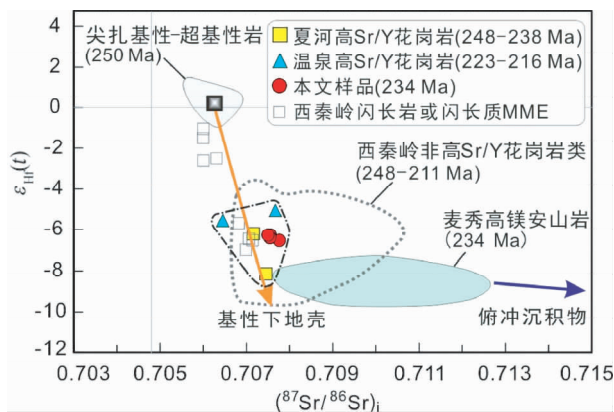


图 8 西秦岭印支期岩浆岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解
数据来源: 尖扎基性-超基性岩(Li *et al.*, 2014b); 麦秀高镁安山岩(Li *et al.*, 2013); 西秦岭闪长岩或闪长质 MME (Qin *et al.*, 2009; Luo *et al.*, 2012; 骆必继等, 2012); 西秦岭非高 Sr/Y 花岗岩类(张宏飞等, 2006; Zhang *et al.*, 2007a; Qin *et al.*, 2009; 骆必继等, 2012; Luo *et al.*, 2012; 韦萍等, 2013)

Fig. 8 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram for the Indosinian igneous rocks in the West Qinling

5 讨论

5.1 岩石成因

舍哈力吉石英二长岩具有高钾钙碱性、偏铝质的特点, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 均大于 1, 以富集 Rb、Th、U、K、Sr 而相对亏损 Nb、Ti、P 为重要特征, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7075 \sim 0.7077$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -6.3 \sim -6.1$, 显示出 I 型花岗岩的特征, 暗示其源于基性下地壳的部分熔融。岩石较老的亏损地幔模式年龄(1.25 ~ 1.33Ga)则进一步表明其原岩为中元古代地壳物质, 一致于西秦岭印支期花岗岩类来自下地壳中-新元古代高钾变玄武岩类脱水熔融的认识(Zhang *et al.*, 2007a; 张成立等, 2008; Zhu *et al.*, 2011; Luo *et al.*, 2012; 黄雄飞等, 2013)。然而在全岩化学成分上, 舍哈力吉石英二长岩具有较高的 MgO ($2.08\% \sim 2.39\%$)、Cr ($69.1 \times 10^{-6} \sim 81.2 \times 10^{-6}$) 和 Ni ($31.6 \times 10^{-6} \sim 36.1 \times 10^{-6}$), 其 $\text{Mg}^\#$ (59 ~ 60) 也明显高于基性岩熔融实验中得到的熔体 ($\text{Mg}^\# < 46$, Rapp and Watson, 1995), 反映其源区还存在幔源组分的加入(图 9a)。在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图中(图 8), 样品的 Sr-Nd 同位素组成靠近以尖扎基性-超基性岩为代表的幔源组分与基性下地壳组分的混合曲线, 该特点吻合于壳幔岩浆混合过程。另外, 岩体中的 MME 呈随机分布, 并且发育细粒冷凝固边(图 2a)、微粒角闪石和黑云母(图 2g, h)及针状磷灰石(图 2i)等淬火产物, 同样说明其成因与岩浆混合事件存在密切联系(Wyllie *et al.*, 1962; Barbarin, 2005)。区域上在印支早期产出有基性-超基性岩(王绘清等, 2010)及闪长岩(Luo *et al.*, 2012), 从而具备了岩浆混合作用的基本条件。由于舍哈力吉寄主岩化学成分变化比较有限, 所以主量元素之间并未能显示出岩浆混合产物常有的线性变化关系(图 6)(Barbarin, 2005; Jiang *et al.*, 2010), 可能反映了岩浆混合比较均匀。

已有研究表明, 高晶体分数长英质岩浆(“晶粥”, crystal mush)通常黏度过大, 只有受到外来高温岩浆的烘烤、流体或挥发气体的注入时才能获得较强的上升侵位能力(Burgisser and Bergantz, 2011; 罗照华等, 2012)。其中, 热扩散作用既能通过熔融晶体而有效降低岩浆黏度, 又能促使岩浆房内部产生强烈的对流翻转, 进而可以实现晶粥的快速再活化(unzipping)和成分均一化(Bachmann and Bergantz, 2006; Huber *et al.*, 2009; Burgisser and Bergantz, 2011)。舍哈力吉寄主岩中圆化的钾长石巨晶(图 2b, c, d)和具有熔蚀麻点的早期斜长石斑晶(图 2e, f)明确指示出这些矿物发生了部分重熔, 尽管其含量(25vol. % ~ 40vol. %)不及流变学锁定点(晶体分数达 50vol. %), 但也足以说明酸性岩浆在基性岩浆注入之前的黏度已经很大(Huber *et al.*, 2009; 罗照华等, 2012)。另一方面, 虽然该岩体出露面积较大(约 40km²), 但从岩体边缘相到中心相, 样品却显示出相对均一的全岩化学成分、一致的 REE 分布型式和 Sr-Nd 同位素组成, 由此也可证明, 舍哈力吉石英二长岩是壳幔岩浆混合及

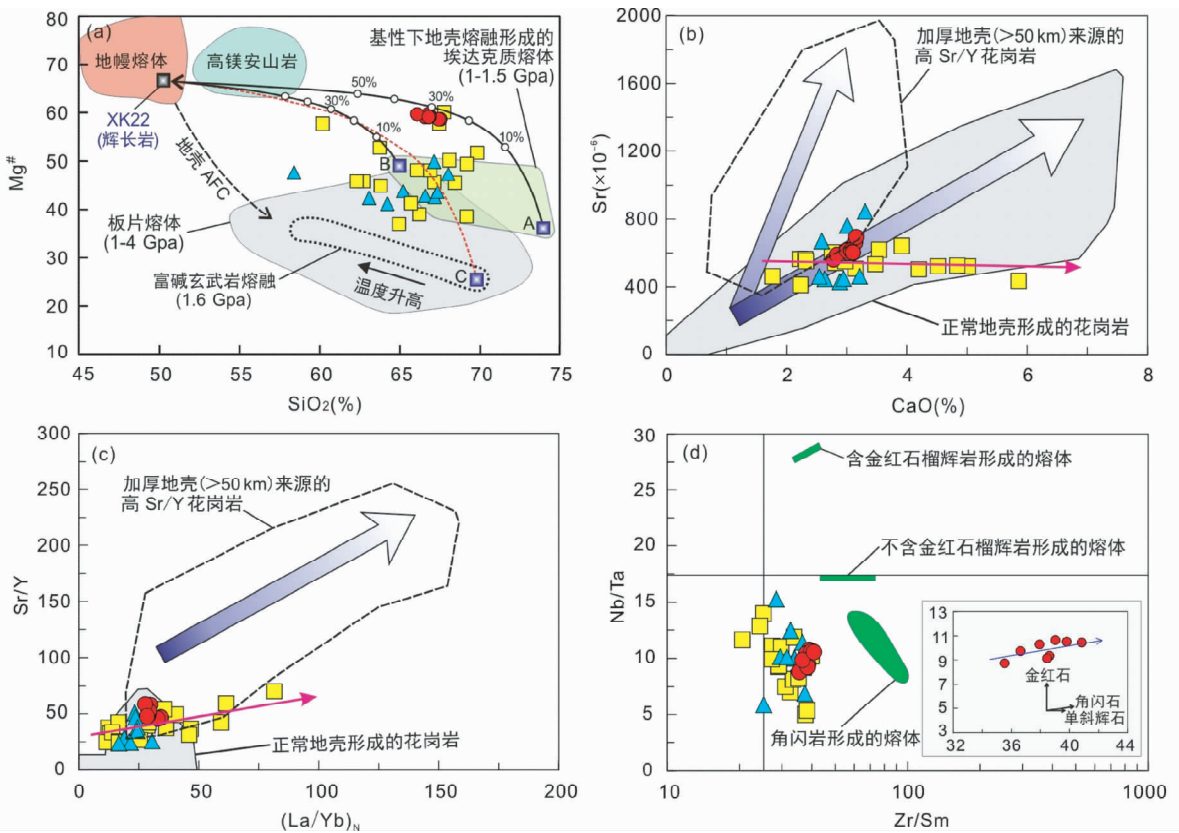


图9 西秦岭印支期高 Sr/Y 花岗岩类 $Mg^{\#}$ - SiO_2 (a, 据 Stern and Kilian, 1996; Rapp *et al.*, 1999)、Sr-CaO (b, 据 He *et al.*, 2011)、Sr/Y- $(La/Yb)_N$ (c, 据 He *et al.*, 2011) 及 Nb/Ta-Zr/Sm (d, 据 Foley *et al.*, 2002) 图解

数据来源:富碱玄武岩在 1.6Gpa, 1000 ~ 1100°C 条件下形成的熔体(Rapp and Watson, 1995);基性下地壳在 1 ~ 1.5Gpa, 800 ~ 900°C 条件下形成的埃达克质熔体(Qian and Hermann, 2013);谢坑辉长岩(XK23)(Guo *et al.*, 2012). 图(a)中熔融温压条件:A-1.25Gpa, 800°C; B-1.25Gpa, 900°C; C-1.6Gpa, 1000°C

Fig. 9 Plots of $Mg^{\#}$ vs. SiO_2 (a, after Stern and Kilian, 1996; Rapp *et al.*, 1999), Sr vs. CaO (b, after He *et al.*, 2011), Sr/Y vs. $(La/Yb)_N$ (c, after He *et al.*, 2011) and Nb/Ta vs. Zr/Sm (d, after Foley *et al.*, 2002) for the Indosinian high Sr/Y granitoids in the West Qinling

快速均一化的产物。

此外,舍哈利吉石英二长岩中发育的环斑结构也很可能是岩浆混合作用的一种间接产物。一些研究指出,底垫于长英质晶粥之下的高温幔源熔体,通过持续加热或直接注入可导致晶粥底部的不稳定层岩浆在向上快速运移过程中处于近等温状态,而该条件恰有利于晶粥内的熔出组分或外来幔源组分以斜长石斑晶或增生边形式(即环斑结构)结晶出来(Nekvasil, 1991; Eklund and Shebanov, 1999; Baxter and Feely, 2002; Wang *et al.*, 2011b),一致于舍哈利吉岩体中的晚期斜长石(增生边或斑晶形式)不具有熔蚀结构或嵌晶结构的岩相观察结果。尽管舍哈利吉寄主岩总体成分变化不大,但从图6仍可看出,随 SiO_2 的略微升高,寄主岩中与斜长石成分相关的 Al_2O_3 、CaO、 Na_2O 、Sr、Eu、Ba 含量均呈现降低趋势,进一步说明岩浆混合之后还发生了一定程度的、以斜长石为主的分离结晶过程。

5.2 西秦岭高 Sr/Y 花岗岩类的源区特征

张成立等(2008)、张旗等(2009)及殷勇和殷先明(2009)研究认为西秦岭印支期大多数花岗岩属于埃达克岩或喜马拉雅型花岗岩,进而提出西秦岭在印支早期经历过明显的地壳加厚过程,如根据夏河阿姨山岩体推断当时地壳最大厚度可达 60km(徐学义等,2014)。然而如图7所示,这些高 Sr/Y 花岗岩与典型埃达克岩、碧口地块和南秦岭的印支期埃达克岩仍存在显著差别,突出表现在 Sr/Y 比值偏低而 Yb 含量偏高,特别是温泉岩体中的样品实际上多与岛弧岩石区域较为吻合。大量研究指出,花岗岩高 Sr/Y 和 La/Yb 比值的形成途径并不具有唯一性,而强烈的中重稀土分异和陡倾的重稀土元素配分模式可能是判别石榴子石的作用以及埃达克岩的更好的指标(葛小月等,2002; Moyer, 2009; 黄方和何永胜,2010)。He *et al.* (2011)通过对大别造山带

后碰撞花岗岩类的总结进一步指出,加厚镁铁质地壳(>50km)形成的花岗岩不但具有较高的Sr/Y、Sr/CaO、(La/Yb)_N、(Dy/Yb)_N和Nb/Ta比值,而且这些比值之间存在显著的正相关关系,这是区别于其他高Sr/Y和La/Yb成因(如同化混染和分离结晶、壳幔岩浆混合、继承源区)及正常地壳来源花岗岩类的重要特征。因此,温泉高Sr/Y花岗岩平坦的重稀土分布型式(图5a)显然不适合作为埃达克岩的特点,而夏河高Sr/Y花岗岩的Sr、CaO含量变化趋势也与加厚下地壳来源的花岗岩大相径庭(图9b),其Sr/Y与(La/Yb)_N比值虽表现出一定的正相关但斜率明显偏小(图9c)。在Nb/Ta-Zr/Sm图解中(图9d),西秦岭所有高Sr/Y花岗岩样品也均靠近角闪岩熔融区域,而远离(含金红石)榴辉岩熔体,这与(La/Yb)_N-Yb_N图解(图5b)中样品靠近(含10%石榴石)角闪岩熔融曲线而远离榴辉岩残留相的熔融曲线也是一致的。结合金红石的稳定压力下限为1.5GPa(Xiong *et al.*, 2011),推测西秦岭印支期高Sr/Y花岗岩起源深度应该不会大于50km,因而其成因也不太可能与榴辉岩相下地壳的熔融或拆沉有关。此外,这些花岗岩类的Sr-Nd同位素组成与同期幔源组分区明显(图8),同样排除了其高Sr/Y特征来自基性岩浆分异的可能性,这与西秦岭印支期高钾钙碱性花岗岩类不可能由玄武质岩浆分离结晶而成的推论(Zhang *et al.*, 2007a)是一致的。

舍哈力吉石英二长岩样品中最高的Sr含量(692×10^{-6})和微弱的负Eu异常($\delta Eu = 0.95$)一致表明源区中斜长石的残留应该较少,变化较大的Zr/Sm比值和偏低但相对均一的Nb/Ta比值(图9d)则暗示角闪石是源区最为重要的组成矿物(Foley *et al.*, 2002),略微右倾的重稀土分布(图7a)、较低的Y($11.4 \times 10^{-6} \sim 12.9 \times 10^{-6}$)和Yb($0.99 \times 10^{-6} \sim 1.09 \times 10^{-6}$)还说明源区熔融过程受到了少量石榴子石的控制(Rapp *et al.*, 1999)。因此,舍哈力吉石英二长岩最有可能来自石榴角闪岩相下地壳的部分熔融。考虑到岩浆混合作用的影响(Zhu *et al.*, 2011; 韦萍等, 2013)(图8),以邻区谢坑辉长岩(XK-23, $Mg^{\#} = 67$, Guo *et al.*, 2012)近似代表同期基性岩浆组分,以富碱玄武岩(Rapp and Watson, 1995)近似代表西秦岭下地壳组分(Zhang *et al.*, 2007a),通过二元混合计算(图9a)表明,富碱玄武岩在1.6Gpa, 1000°C条件下形成的最富硅的埃达克质熔体与地幔熔体(或演化的基性岩浆)发生混合虽然可以解释西秦岭一些高Sr/Y花岗岩的富镁特征,但对于舍哈力吉石英二长岩和其他少量具有高SiO₂和高Mg[#]的夏河岩体样品,则需要异常高Mg[#](~90)的幔源岩浆的参与,而这显然难以实现。Qian and Hermann (2013)最新实验表明,基性下地壳在1~1.5Gpa, 800~900°C的条件下发生10%~40%的部分熔融即可形成埃达克质(高Sr/Y和La/Yb)熔体,暗示了地壳来源的埃达克岩不一定意味着存在非常厚的地壳(>50km)。如图9a所示,以基性下地壳在1.25Gpa, 800~900°C条件下形成的熔体作为酸性端元而计算的混合曲线,则与西秦岭印支期高Sr/Y

花岗岩的高SiO₂、高Mg[#]特征较为吻合。此熔融条件下的残留矿物组合为角闪岩相-石榴麻粒岩相,并且长英质熔体的Yb含量将高于典型埃达克岩(Qian and Hermann, 2013),这些特点均与西秦岭印支期高Sr/Y花岗岩非常一致,据此推测这些花岗岩的起源深度为30~40km(Drummond *et al.*, 1996)。从夏河高Sr/Y花岗岩多具有弱过铝质的特点(图4b)来看,西秦岭下地壳中存在少量变泥质岩也是可能的。此外,西秦岭印支期高Sr/Y花岗岩K₂O/Na₂O多大于1,很可能反映了源岩高钾的属性(Zhang *et al.*, 2007a),不过也不排除其富钾特征可能受到了富钾幔源熔体的一定影响。

5.3 构造环境

尽管对于秦岭造山带印支期构造演化的研究成果十分丰富,但有关华北板块与扬子板块在不同地区发生陆-陆碰撞的时限问题一直没有得到很好的解决,直接影响到对于秦岭印支期花岗岩的成因及形成背景的认识。Zhang *et al.* (2004)、Meng *et al.* (2005)和Li *et al.* (2013)认为华北板块与扬子板块在秦岭地区的初始碰撞可能发生在中三叠世末期,而扬子板块的斜向俯冲和顺时针旋转则可能造成了两大板块自东向西碰撞的穿时性(Liu *et al.*, 2005)。另外一些研究则认为秦岭造山带印支期花岗岩类形成于后碰撞环境,其成因可能与俯冲板片的断离及岩石圈拆沉作用有关(张宏飞等, 2006; 张成立等, 2008; Luo *et al.*, 2012)。最近, Jiang *et al.* (2010)提出南秦岭印支期花岗岩由北向南年轻化的趋势可能与俯冲板片的后撤(roll-back)有关,并推测古特提斯洋的“剪刀式”闭合导致了华北板块与华南海块在秦岭地区的碰撞明显晚于大别地区,可能发生在~211Ma。从已经发表的花岗岩的精确定年结果来看,秦岭造山带花岗岩集中形成于印支晚期(228~200Ma, Dong *et al.*, 2011),主要呈点状或面状分布在东秦岭和西秦岭的东部及南部地区,且与勉略带南侧的碧口地块和松潘-甘孜地块花岗岩的形成时代(224~207Ma, Zhang *et al.*, 2007b; Qin *et al.*, 2008, 2010; Yuan *et al.*, 2010)基本一致(图1b),这暗示它们很可能形成于相同的动力学过程。相比之下,秦岭造山带印支早期花岗岩(264~234Ma,集中于248~234Ma)则主要呈线性分布在西秦岭西北地区,且有基性-超基性岩和(高镁)安山岩(250~234Ma)与之伴生,这一特点明显不同于印支晚期花岗岩,暗示了印支早期花岗岩具有其独特的构造背景,可能与深大尺度的拉张作用密切相关。

需要指出的是,典型的环斑花岗岩通常产于元古宙稳定克拉通地体且多属于A型花岗岩,如芬兰奥长环斑花岗岩(Haapala and Rämö, 1999),而舍哈力吉岩体(234Ma)虽发育环斑结构,但寄主岩为I型花岗岩, Eu异常也并不明显,与形成于岛弧(Wernick *et al.*, 1997)和后碰撞(或后造山)环境(Wang *et al.*, 2011b)的环斑结构花岗岩较为相似。同时,舍哈力吉岩体周围伴生有基性-超基性岩(王绘清等, 2010; Guo *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2014b),这与环斑结构花岗岩常

与幔源岩石(如辉绿岩、煌斑岩)密切共生的现象(Rämö and Haapala, 1995; Eklund and Shebanov, 1999)是一致的,这种岩石组合能否有效地识别某种特定的构造环境仍需慎重考虑,但至少可以明确地指示出区域上强烈拉张作用的存在。目前很多研究认为,西秦岭印支早期花岗岩很可能形成于陆缘弧环境(金维浚等, 2005; 殷勇和殷先明, 2009; Guo *et al.*, 2012; 韦萍等, 2013; Li *et al.*, 2014a, b),而印支晚期花岗岩则记录了大陆碰撞过程(Sun *et al.*, 2002; Qin *et al.*, 2008, 2009, 2010; Cao *et al.*, 2011; Dong *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011a; Zhu *et al.*, 2011),该推论与区域沉积相组合分析结果基本一致(Liu *et al.*, 2005; Meng *et al.*, 2005; 闫臻等, 2012; Li *et al.*, 2014c)。此外,东昆仑发育的大量基性岩墙(251Ma,熊富浩等,2011),以及起源于板片熔体-地幔楔反应的南秦岭何家庄花岗闪长岩(248Ma, Yang *et al.*, 2014)和西秦岭麦秀高镁安山岩(234Ma, Li *et al.*, 2013),也均证明阿尼玛卿-勉略洋盆在早-中三叠世仍未消亡。因此,我们认为,三叠纪早期古特提斯洋壳俯冲极性的骤然改变(如板片后撤, 闫臻等, 2012; Li *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2014c),很可能造成了活动陆缘内平行且远离俯冲带地区的局部伸展,从而导致西秦岭西北缘发育了呈线性分布的、由基性岩-中性岩-酸性岩构成的印支早期火山-侵入岩组合。Li *et al.* (2014c)最近从古水流及沉积环境演化的角度进一步提出,这种伸展作用可能代表了弧后扩张盆地的初步打开。

晚古生代末期-三叠纪早期,古特提斯洋的北向俯冲消减和西秦岭楔的增生造山(闫臻等,2012)可能造成了西秦岭地壳的适当加厚,但如前所述,该厚度可能不会太大。晚三叠世的碰撞造山作用可能导致了勉略带两侧地体的进一步显著加厚(黄雄飞等,2013),集中表现在南秦岭、碧口地块及松潘-甘孜地块广泛发育了加厚地壳来源的埃达克质花岗岩类(224~207Ma),指示当时地壳厚度已经超过50km(Zhang *et al.*, 2007b; 李佐臣等, 2010; 张成立等, 2008; Qin *et al.*, 2008, 2010; Yuan *et al.*, 2010)。从前文分析已经得出,西秦岭印支晚期的温泉岩体(223~216Ma)很可能来自于角闪岩相下地壳的部分熔融,因此,西秦岭在印支晚期是否发育了加厚下地壳来源的埃达克岩也是今后研究值得关注的一个问题。

6 结论

(1)舍哈利吉石英二长岩属于偏铝质高钾钙碱性岩石,形成时代为晚三叠世初期(234.1±0.5Ma)。

(2)舍哈利吉石英二长岩起源于石榴角闪岩相下地壳部分熔融形成的富硅高 Sr/Y 岩浆与幔源玄武质岩浆发生的混合作用,之后经历了一定程度的、以斜长石为主的分离结晶过程。

(3)环斑结构花岗岩反映了区域上强烈的拉张环境,环

斑结构的成因则可能与晶粥的再活化过程存在内在联系。

(4)西秦岭印支早期花岗岩类(248~234Ma)形成于伸展体制下的活动大陆边缘环境。西秦岭在印支晚期是否发育了加厚下地壳来源的埃达克岩尚不明确。

致谢 主量元素分析得到中科院广州地化所刘颖的协助;微量元素分析得到中国地质大学(武汉)陈海红及刘硕的指导;Sr-Nd 同位素前处理得到北京大学朱文萍的指导;Sr-Nd 同位素测试及锆石 U-Pb 测年分别得到天津地质矿产研究所肖志斌、耿建珍和张健的指导;野外工作得到中国地质大学(北京)硕士研究生陈永健的协助;罗照华教授及另外一名匿名审稿人对本文初稿提出了许多宝贵的修改意见;在此一并表示感谢。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79
- Atherton MP and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362(6416): 144-146
- Bachmann O and Bergantz GW. 2006. Gas percolation in upper-crustal silicic crystal mushes as a mechanism for upward heat advection and rejuvenation of near-solidus magma bodies. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 149(1): 85-102
- Barbarin B. 2005. Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: Nature, origin and relations with the hosts. *Lithos*, 80(1-4): 155-177
- Baxter S and Feely M. 2002. Magma mixing and mingling textures in granitoids: Examples from the Galway Granite, Connemara, Ireland. *Mineralogy and Petrology*, 76(1-2): 63-74
- Burgisser A and Bergantz GW. 2011. A rapid mechanism to remobilize and homogenize highly crystalline magma bodies. *Nature*, 471(7337): 212-215
- Cao XF, Lü XB, Yao SZ, Mei W, Zou XY, Chen C, Liu ST, Zhang P, Su YY and Zhang B. 2011. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology, geochemistry and kinetics of the Wenquan ore-bearing granites from West Qinling, China. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 120-131
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665
- Dong YP, Zhang GW, Neubauer F, Liu XM, Genser J and Hauenberger C. 2011. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 213-237
- Drummond MS, Defant MJ and Kepezhinskas PK. 1996. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences*, 87(1-2): 205-216
- Eklund O and Shebanov AD. 1999. The origin of rapakivi texture by sub-isothermal decompression. *Precambrian Research*, 95(1): 129-146
- Feng YM, Cao XD, Zhang EP, Hu YX, Pan XP, Yang JL, Jia QZ and Li WM. 2002. Orogenic Processes and Dynamics of the West Qinling Orogenic Belt. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 1-263 (in Chinese)
- Feng YM, Cao XD, Zhang EP, Hu YX, Pan XP, Yang JL, Jia QZ and Li WM. 2003. Tectonic evolution framework and nature of the West Qinling Orogenic Belt. *Northwestern Geology*, 36(1): 1-10 (in Chinese with English abstract)

- Gao S, Liu XM, Yuan HL, Hattendorf B, Günther D, Chen L and Hu SH. 2002. Determination of forty-two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser ablation-inductively coupled plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards Newsletter-Journal of Geostandards and Geoanalysis*, 26(2): 191–196
- Ge XY, Li XH, Chen ZG and Li WP. 2002. Geochemistry and petrogenesis of Jurassic high Sr and low Y granitoids in eastern China; Constrains on crustal thickness. *Chinese Science Bulletin*, 47(6): 474–480 (in Chinese)
- Goto A and Tatsumi Y. 1996. Quantitative analysis of rock samples by an X-ray fluorescence spectrometer (II). *Rigaku Journal*, 13(2): 20–39
- Guo XQ, Yan Z, Wang ZQ, Wang T, Hou KJ, Fu CL, and Li JL. 2012. Middle Triassic arc magmatism along the northeastern margin of the Tibet; U-Pb and Lu-Hf zircon characterization of the Gangcha complex in the West Qinling terrane, central China. *Journal of the Geological Society*, 169(3): 327–336
- Haapala I and Rämö OT. 1999. Rapakivi granites and related rocks: An introduction. *Precambrian Research*, 95(1–2): 1–7
- He YS, Li SG, Hoefs J, Huang F, Liu SA and Hou ZH. 2011. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen; New evidence for partial melting of a thickened continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(13): 3815–3838
- Hoskin PWO and Black LP. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423–439
- Huang F and He YS. 2010. Partial melting of the dry mafic continental crust: Implications for petrogenesis of C-type adakites. *Chinese Science Bulletin*, 55(13): 1255–1267 (in Chinese)
- Huang XF, Mo XX, Yu XH, Li XW, Ding Y, Wei P and He WY. 2013. Zircon U-Pb chronology, geochemistry of the Late Triassic acid volcanic rocks in Tanchang area, West Qinling and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3968–3980 (in Chinese with English abstract)
- Huber C, Bachmann O and Manga M. 2009. Homogenization processes in silicic magma chambers by stirring and mushification (latent heat buffering). *Earth and Planetary Science Letters*, 283(1–4): 38–47
- Jiang YH, Jin GD, Liao SY, Zhou Q and Zhao P. 2010. Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the origin of Late Triassic granitoids from the Qinling orogen, central China; Implications for a continental arc to continent-continent collision. *Lithos*, 117(1): 183–197
- Jin WJ, Zhang Q, He DF and Jia XQ. 2005. SHRIMP dating of adakites in western Qinling and their implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 959–966 (in Chinese with English abstract)
- Le Bas MJ, LeMaitre RW, Streckeisen A and Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3): 745–750
- Li HK, Zhu SX, Xiang ZQ, Su WB, Lu SN, Zhou HY, Geng JZ, Li S and Yang FJ. 2010. Zircon U-Pb dating on tuff bed from Gaoyuzhuang Formation in Yangqing, Beijing; Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2131–2140 (in Chinese with English abstract)
- Li L, Meng QR, Pullen A, Garzzone CN, Wu G, Wang YL, Ma SX and Duan L. 2014c. Late Permian-early Middle Triassic back-arc basin development in West Qinling, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 87(1): 116–129
- Li XW, Mo XX, Yu XH, Ding Y, Huang XF, Wei P and He WY. 2013. Petrology and geochemistry of the Early Mesozoic pyroxene andesites in the Maixiu area, West Qinling, China; Products of subduction or syn-collision? *Lithos*, 172–173: 158–174
- Li XW, Mo XX, Huang XF, Dong GC, Yu XH, Luo MF and Liu YB. 2014a. U-Pb zircon geochronology, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of the Early Indosinian Tongren Pluton in West Qinling; Petrogenesis and geodynamic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, doi: 10.1016/j.jseas.2014.10.017
- Li XW, Mo XX, Bader T, Scheltens M, Yu XH, Dong GC and Huang XF. 2014b. Petrology, geochemistry and geochronology of the magmatic suite from the Jianzha Complex, central China; Petrogenesis and geodynamic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 95C: 164–181
- Li ZC, Pei XZ, Ding SP, Liu ZQ, Li RB, Sun Y, Feng JF and Zhang YF. 2010. Geochemical features and tectonic setting of the Laogegou granite and the shaiziyan granite in Bikou block in Northwest Sichuan. *Acta Geologica Sinica*, 84(3): 343–356 (in Chinese with English abstract)
- Liu SF, Steel R and Zhang GW. 2005. Mesozoic sedimentary basin development and tectonic implication, northern Yangtze Block, eastern China; Record of continent-continent collision. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(1): 9–27
- Liu YS, Hu ZC, Gao S, Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43
- Ludwig KR. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00; A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center
- Luo BJ, Zhang HF and Lü XB. 2012. U-Pb zircon dating, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of Early Indosinian intrusive rocks in West Qinling, central China; Petrogenesis and tectonic implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 164(4): 551–569
- Luo BJ, Zhang HF and Xiao ZQ. 2012. Petrogenesis and tectonic implications of the Early Indosinian Meiwu pluton in West Qinling, central China. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 199–213 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Chen BH, Jiang XM, Wang ZQ and Wang YH. 2012. A preliminary attempt for targeting prospecting districts using the wide composition-spectrum dike swarms; An example of the South Alatau Mountains, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 1949–1965 (in Chinese with English abstract)
- Meng QR and Zhang GW. 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation. *Geology*, 27(2): 123–126
- Meng QR, Wang E and Hu JM. 2005. Mesozoic sedimentary evolution of the northwest Sichuan basin; Implication for continued clockwise rotation of the South China block. *Geological Society of America Bulletin*, 117(3–4): 396–410
- Moyen JF. 2009. High Sr/Y and La/Yb ratios; The meaning of the “adakitic signature”. *Lithos*, 112(3): 556–574
- Nekvasil H. 1991. Ascent of felsic magmas and formation of rapakivi. *American Mineralogist*, 76(7–8): 1279–1290
- Qian Q and Hermann J. 2013. Partial melting of lower crust at 10–15 kbar: Constraints on adakite and TTG formation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165(6): 1195–1224
- Qin JF, Lai SC and Li YF. 2008. Slab breakoff model for the Triassic post-collisional adakitic granitoids in the Qinling orogen, central China; Zircon U-Pb ages, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. *International Geology Review*, 50(12): 1080–1104
- Qin JF, Lai SC, Rodney G, Diwu CR, Ju YJ and Li YF. 2009. Geochemical evidence for origin of magma mixing for the Triassic monzonitic granite and its enclaves at Mishuling in the Qinling orogen (central China). *Lithos*, 112(3–4): 259–276
- Qin JF, Lai SC, Diwu CR, Ju YJ and Li YF. 2010. Magma mixing origin for the post-collisional adakitic monzogranite of the Triassic Yangba pluton, northwestern margin of the South China block; Geochemistry, Sr-Nd isotopic, zircon U-Pb dating and Hf isotopic evidences. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 159(3): 389–409
- Qiu QL, Gong QS, Lu SW and Liu SX. 2008. Geochemical characteristics and geological significance of adakitic granitoids in Xiahe County of Gansu Province. *Gansu Geology*, 17(3): 6–12 (in Chinese)
- Rämö OT and Haapala I. 1995. One hundred years of rapakivi granite. *Mineralogy and Petrology*, 52(3–4): 129–185

- Rapp RP and Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8 ~ 32kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931
- Rapp RP, Shimizu N, Norman MD and Applegate GS. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335–356
- Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22(4): 247–263
- Rudnick R and Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Rudnick RL (ed.). *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 3: 1–64
- Ruprecht P, Bergantz GW, Cooper KM and Hildreth W. 2012. The crustal magma storage system of Volcán Quizapu, Chile and the effects of magma mixing on magma diversity. *Journal of Petrology*, 53(4): 801–840
- Stern CR and Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 263–281
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basin*. London: Geological Society Special Publications, 42(1): 313–345
- Sun WD, Li SG, Chen YD and Li YJ. 2002. Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, central China: Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie Orogenic Belt. *The Journal of Geology*, 110(4): 457–468
- Wang HQ, Zhu YH, Lin QX, Li YL and Wang K. 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the gabbro from Longwu Gorge ophiolite, Jianzha-Tongren area, Qinghai, China and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 86–92 (in Chinese with English abstract)
- Wang TG, Ni P, Sun WD, Zhao KD and Wang XD. 2011a. Zircon U-Pb ages of granites at Changba and Huangzhuguan in western Qinling and implications for source nature. *Chinese Science Bulletin*, 56(7): 659–669
- Wang XX, Wang T, Castro A, Pedreira R, Lu XX and Xiao QH. 2011b. Triassic granitoids of the Qinling orogen, central China: Genetic relationship of enclaves and rapakivi-textured rocks. *Lithos*, 126(3): 369–387
- Wei P, Mo XX, Yu XH, Huang XF, Ding Y and Li XW. 2013. Geochemistry, chronology and geological significance of the granitoids in Xiahe, West Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3981–3992 (in Chinese with English abstract)
- Wernick E, Galembeck TMB, Godoy AM and Harmann PK. 1997. Geochemical variability of the rapakivi Itu Province, state of Sao Paulo, SE Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 69: 395–413
- Wyllie PJ, Cox KG and Biggar GM. 1962. The habit of apatite in synthetic systems and igneous rocks. *Journal of Petrology*, 3(2): 238–243
- Xiong FH, Ma CQ, Zhang JY and Liu B. 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, elements and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of the Early Mesozoic mafic dyke swarms in East Kunlun orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3350–3364 (in Chinese with English abstract)
- Xu XY, Chen JL, Gao T, Li P and Li T. 2014. Granitoid magmatism and tectonic evolution in northern edge of the western Qinling terrane, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 371–389 (in Chinese with English abstract)
- Yan Z, Wang ZQ, Li JL, Xu ZQ and Deng JF. 2012. Tectonic settings and accretionary orogenesis of the West Qinling Terrane, northeastern margin of the Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1808–1828 (in Chinese with English abstract)
- Yang PT, Liu SW, Li QG, Wang ZQ, Zhang F and Wang W. 2014. Chronology and petrogenesis of the Hejiazhuang granitoid pluton and its constraints on the Early Triassic tectonic evolution of the South Qinling Belt. *Science China (Earth Sciences)*, 57(2): 232–246
- Yin Y and Yin XM. 2009. Porphyry Cu-Mo-Au mineralization related to adakite and Himalayan type granite in the northern margin of West Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1239–1252 (in Chinese with English abstract)
- Yuan C, Zhou MF, Sun M, Zhao YJ, Wilde S, Long XP and Yan DP. 2010. Triassic granitoids in the eastern Songpan-Ganzi Fold Belt, SW China: Magmatic response to geodynamics of the deep lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 290(3–4): 481–492
- Zhang CL, Wang T and Wang XX. 2008. Origin and tectonic setting of the Early Mesozoic granitoids in Qinling orogenic belt. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 304–316 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC and Xiao QH. 2001. *Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics*. Beijing: Science Press, 1–806 (in Chinese)
- Zhang GW, Dong YP, Lai SC, Guo AL, Meng QR, Liu SF, Cheng SY, Yao AP, Zhang ZQ and Pei XZ. 2004. Mianlue tectonic zone and Mianlue suture zone on southern margin of Qinling-Dabie orogenic belt. *Science in China (Series D)*, 47(4): 300–316
- Zhang HF, Chen YL, Xu WC, Liu R, Yuan HL and Liu XM. 2006. Granitoids around Gonghe basin in Qinghai Province: Petrogenesis and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2910–2922 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Jin LL, Zhang L, Nigel H, Zhou L, Hu SC and Zhang BR. 2007a. Geochemical and Pb-Sr-Nd isotopic compositions of granitoids from western Qinling belt: Constraints on basement nature and tectonic affinity. *Science in China (Series D)*, 50(2): 184–196
- Zhang HF, Xiao L, Zhang L, Yuan HL and Jin LL. 2007b. Geochemical and Pb-Sr-Nd isotopic compositions of Indosinian granitoids from the Bikou block, northwest of the Yangtze plate: Constraints on petrogenesis, nature of deep crust and geodynamics. *Science in China (Series D)*, 50(7): 972–983
- Zhang Q, Yin XM, Yin Y, Jin WJ, Wang YL and Zhao YQ. 2009. Issues on metallogenesis and prospecting of gold and copper deposits related to adakite and Himalayan type granite in West Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3103–3122 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q. 2011. Reappraisal of the origin of C-type adakitic rocks from East China. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(4): 739–747 (in Chinese with English abstract)
- Zhu LM, Zhang GW, Chen YJ, Ding ZJ, Guo B, Wang F and Lee B. 2011. Zircon U-Pb ages and geochemistry of the Wenquan Mo-bearing granitoids in West Qinling, China: Constraints on the geodynamic setting for the newly discovered Wenquan Mo deposit. *Ore Geology Reviews*, 39(1–2): 46–62

附中文参考文献

- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 胡云绪, 潘晓萍, 杨军录, 贾群子, 李文明. 2002. 西秦岭造山带结构造造山过程及动力学. 西安: 西安地图出版社, 1–263
- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 胡云绪, 潘晓萍, 杨军录, 贾群子, 李文明. 2003. 西秦岭造山带的演化, 构造格局和性质. 西北地质, 36(1): 1–10
- 葛小月, 李献华, 陈志刚, 李伍平. 2002. 中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约. *科学通报*, 47(6): 474–480
- 黄方, 何永胜. 2010. 干的基性大陆下地壳部分熔融: 对 C 型埃达克岩成因的制约. *科学通报*, 55(13): 1255–1267
- 黄雄飞, 莫宣学, 喻学惠, 李小伟, 丁一, 韦萍, 和文言. 2013. 西

- 秦岭岩昌地区晚三叠世酸性火山岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义. 岩石学报, 29(11): 3968–3980
- 金维浚, 张旗, 何登发, 贾秀勤. 2005. 西秦岭埃达克岩的 SHRIMP 定年及其构造意义. 岩石学报, 21(3): 959–966
- 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 苏文博, 陆松年, 周红英, 耿建珍, 李生, 杨锋杰. 2010. 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束. 岩石学报, 26(7): 2131–2140
- 李佐臣, 裴先治, 丁仁平, 刘战庆, 李瑞保, 孙雨, 冯建费, 张亚峰. 2010. 川西北碧口地块老河沟岩体和筛子岩岩体地球化学特征及其构造环境. 地质学报, 84(3): 343–356
- 骆必继, 张宏飞, 肖尊奇. 2012. 西秦岭印支早期美武岩体的岩石成因及其构造意义. 地学前缘, 19(3): 199–213
- 罗照华, 陈必河, 江秀敏, 王章棋, 王永恒. 2012. 利用宽谱系岩墙群进行勘查靶区预测的初步尝试: 以南阿拉套山为例. 岩石学报, 28(7): 1949–1965
- 邱庆伦, 龚全胜, 卢书伟, 柳生祥. 2008. 甘肃夏河地区印支期埃达克岩的厘定及其意义. 甘肃地质, 17(3): 6–12
- 王绘清, 朱云海, 林启祥, 李益龙, 王坤. 2010. 青海尖扎-同仁地区隆务峡蛇绿岩的形成时代及意义——来自辉长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的证据. 地质通报, 29(1): 86–92
- 韦萍, 莫宣学, 喻学惠, 黄雄飞, 丁一, 李小伟. 2013. 西秦岭夏河花岗岩的地球化学、年代学及地质意义. 岩石学报, 29(11): 3981–3992
- 熊富浩, 马昌前, 张金阳, 刘彬. 2011. 东昆仑造山带早中生代镁铁质岩墙群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、元素和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学. 岩石学报, 27(11): 3350–3364
- 徐学义, 陈隽璐, 高婷, 李平, 李婷. 2014. 西秦岭北缘花岗质岩浆作用及构造演化. 岩石学报, 30(2): 371–389
- 闫臻, 王宗起, 李继亮, 许志琴, 邓晋福. 2012. 西秦岭楔的构造属性及其增生造山过程. 岩石学报, 28(6): 1808–1828
- 殷勇, 殷先明. 2009. 西秦岭北缘与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的斑岩型铜-钼-金成矿作用. 岩石学报, 25(5): 1239–1252
- 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. 高校地质学报, 14(3): 304–316
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1–806
- 张宏飞, 陈岳龙, 徐旺春, 刘荣, 袁洪林, 柳小明. 2006. 青海共和盆地周缘印支期花岗岩类的成因及其构造意义. 岩石学报, 22(12): 2910–2922
- 张旗, 殷先明, 殷勇, 金维浚, 王元龙, 赵彦庆. 2009. 西秦岭与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的金铜成矿及找矿问题. 岩石学报, 25(12): 3103–3122
- 张旗. 2011. 关于 C 型埃达克岩成因的再探讨. 岩石矿物学杂志, 30(4): 739–747