

# 西秦岭新生代双峰式火山作用及南北构造带成因初探<sup>\*</sup>

喻学惠 莫宣学 赵志丹 和文言 李勇

YU XueHui, MO XuanXue, ZHAO ZhiDan, HE WenYan and LI Yong

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2011-04-15 收稿, 2011-06-01 改回.

Yu XX, Mo XX, Zhao ZD, He WY and Li Y. 2011. Cenozoic bimodal volcanic rocks of the West Qinling: Implication for the genesis and nature of the rifting of north-south tectonic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 2195–2202

**Abstract** Presenting the analysis data of whole rock chemistry, REE and trace element and Sr, Nd, Pb isotopes of the rhyolite, and 27 isotopic dating of the Cenozoic bimodal volcanic rocks from West Qinling. The studies showed that the Cenozoic bimodal volcanic rocks like to East Africa rift, consisted of kamafugite, carbonatite, shoshonite, rhyolite and/or trachyte. The age of the bimodal volcanic rocks is from 23Ma to 7.1Ma determined by isotopic dating of K/Ar and  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ . The  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.704031 \sim 0.70525$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  is 18.408 ~ 19.062, 15.476 ~ 15.677 and 38.061 ~ 39.414 respectively,  $\epsilon_{\text{Nd}} = 0.3 \sim 5.3$  of the kamafugite and shoshonite in the bimodal volcanic rocks. All of these are similar to the feature of Neo-Tethyan mantle geochemical domain, the magma originated from depleted mantle resources like Onto Java and FOZO mantle plum, suggest the origin and genesis of Cenozoic bimodal volcanic rocks related to northeastward migration and upwelling of the India-Asia collision-deduced mantle flow, and also responses to eastward expanding of the Tibetan plateau. Cenozoic bimodal volcanic rocks in West Qinling providing ideal lithoprobes for understanding N-S trending tectonic belt and support for the N-S trending tectonic belt is a continental rift. However, the rifting of N-S trending tectonic belt is not similar to Baikal rift, and is also not like East Africa rift formed in typical Craton, comparing geological setting, deep-geophysics and thermal-structure of mantle in West Qinling with the mantle beneath Baikal rift and East Africa rift. The genesis of the rift of N-S trending tectonic belt related to northeastward migration and upwelling of the India-Asia collision-deduced asthenosphere flow, the characteristics of the rift may have restrained by East Kunlun faults-north boundary of West Qinling and the move velocity and direction between the blocks. We suggest that the N-S trending tectonic belt is complex tectonic belt and is a developing boundary of plates.

**Key words** Cenozoic; Bimodal volcanic rocks; North-south tectonic belt; Continental rift; West Qinling

**摘要** 本文提供了西秦岭新生代流纹岩的全岩化学、稀土微量元素和 Pb、Sr、Nd 同位素分析数据, 以及新生代双峰式火山岩 27 个同位素定年结果。研究表明, 西秦岭新生代双峰式火山岩具有与东非裂谷完全相同的岩石组合。K/Ar 和  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  同位素定年确定新生代双峰式火山岩的年龄从 23 ~ 7.1Ma。双峰式火山岩中的钾霞橄黄长岩与钾玄岩的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  在 0.704031 ~ 0.70525 之间,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 18.408 ~ 19.062,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 15.476 ~ 15.677,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 38.061 ~ 39.414,  $\epsilon_{\text{Nd}} = 0.3 \sim 5.3$ , 几乎全部为正值, 与新特提斯地幔端元地球化学域非常相似。岩浆起源于与 Ontong Java 和 FOZO 地幔柱相似的亏损地幔源区。由此推测, 火山岩的成因与印-亚大陆碰撞诱发的软流圈地幔流向东移动和上涌有关, 也是青藏高原向东扩展的一种响应。西秦岭新生代双峰式火山岩的厘定为查明南北构造带的性质提供了岩石探针, 它证明南北构造带是一条大陆裂谷。但是, 将西秦岭的双峰式火山岩产出的大地构造背景、深部地球物理以及地幔热结构与贝加尔裂谷和东非裂谷的地幔相比较可以看出, 南北构造带的裂谷特征不同于东非大陆裂谷, 也与贝加尔裂谷不尽相同。南北构造带的裂谷成因与印-亚大陆碰撞诱发的软流圈物质向东的移动和上涌有关, 其特征受西秦岭周边各个小块体间相对运动速度与方向以及东昆仑断裂-西秦岭

<sup>\*</sup> 本文受国家自然科学基金项目(40972049、40572046)和国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403102、2009CB421002)联合资助。

第一作者简介: 喻学惠, 女, 1944 年生, 教授, 博士生导师, 岩石学专业, 主要从事火成岩与矿产资源研究与教学, E-mail: xhyu@cugb.edu.cn

北缘断裂运动性质的联合制约。由此推测,南北构造带是一条复杂的裂谷带,也可能是一个发展中的板块边界。

关键词 新生代; 双峰式火山岩; 南北构造带; 大陆裂谷; 西秦岭

中图法分类号 P588.14

西秦岭-松潘构造结位于中国主要大陆地块与造山带汇聚交接转换的重要部位,是青藏高原向东部大陆扩展的前缘,也是中国东西部地质地貌转换过度的关键地区。该构造结以东西宽 600 余千米,南北长近 3000 千米的南北构造带与东秦岭分野,是我国现今东、西部地质构造、地理及生态环境的一级界限所在,也是青藏高原东北缘深部地球物理综合异常梯度带(马杏垣,1987;丁国渝,1991;张国伟等,2006)。有关研究表明,该南北构造带横穿秦岭造山带的部分,地壳表层为近东西向构造,而深部地球物理显示了近南北向构造特征(张国伟等,2001)。这种立交桥式的地质结构特征是自中新生代以来青藏高原隆升及向中国东部大陆扩展的结果,也是秦岭造山带与贺兰-川滇南北构造带共同作用的反映,蕴含了大量深部地质作用信息。本文提供了西秦岭新生代火山岩 K/Ar 和 <sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar 定年数据,以及双峰式火山岩套中

的酸性火山岩的全岩化学、稀土微量和同位素地球化学分析资料,结合作者以往对本区超钾质与钾质火山岩起源条件与成因的研究成果,综合分析并论证了西秦岭新生代双峰式火山岩的时空分布、岩浆成因及源区特征,并对南北构造带的性质进行了初步探讨。

1 西秦岭新生带双峰式火山岩的时空分布及同位素定年

西秦岭新生代双峰式火山岩分布在青藏高原东北缘的西秦岭-松潘构造结之东段(图 1)。火山岩的空间分布明显受 NE 向武都-凤县大型剪切带和 NNE 向(近南北向)隐伏深断裂控制,主要出露在该剪切带和隐伏深断裂以西的天水、礼县、宕昌等地。新生代火山岩主要以火山颈相的和/或侵

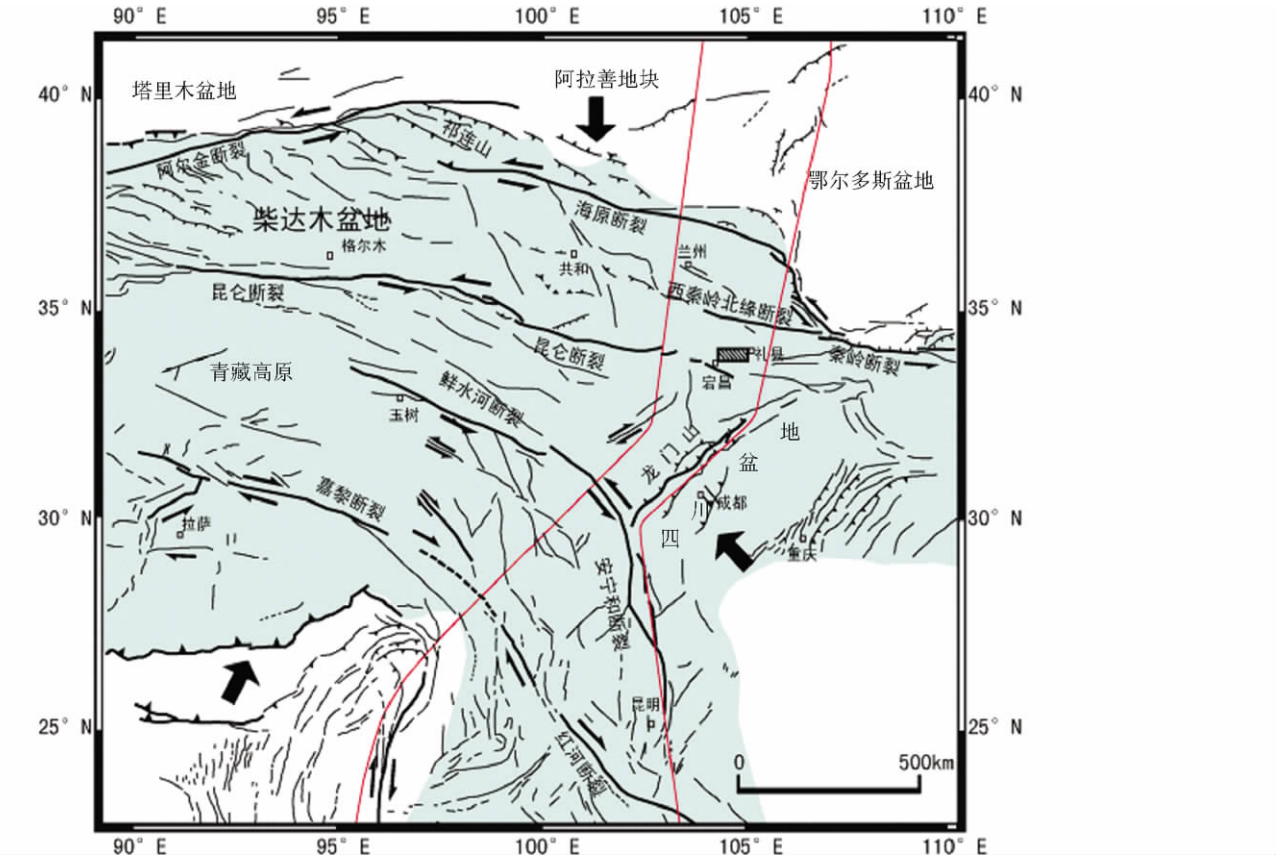


图 1 西秦岭双峰式火山岩分布区的大地构造背景及南北构造带

图中红线位置为南北构造带

Fig. 1 Sketch map of tectonic background of Cenozoic bimodal volcanic rocks distribution in West Qinling and N-S trending tectonic belt

Red lines are N-S trending tectonic belt

表 1 西秦岭双峰式火山岩的同位素定年结果

Table 1 Isotopic dating of the Cenozoic bimodal volcanic rocks in West Qinling

序号	样品号	岩石类型	测年方法	测年结果	采样位置	备注
1	HT92-1	黄长质煌斑岩的球状火山集块	全岩 K/Ar 定年	7.1Ma	好梯	喻学惠,1994
2	HT92-2	黄长质煌斑岩的层状熔岩		7.9Ma	好梯	喻学惠,1994
3	HT92-3	侵入相致密块状黄长质煌斑岩		18.9Ma	好梯	喻学惠,1994
4	FSL92-4	含气孔层状黄长质煌斑岩熔岩		18.3Ma	分水岭	喻学惠,1994
5	WP92-5	黄长质煌斑岩的球状火山砾		8.7Ma	王坪	喻学惠,1994
6	WP92-6	侵入相致密块状黄长质煌斑岩		13.8Ma	王坪	喻学惠,1994
7	NDS92-7	含气孔的层状黄长质煌斑岩熔岩		8.4Ma	牛顶山	喻学惠,1994
8	XDS-8	侵入相致密块状黄长质煌斑岩		15.1Ma	小顶山	本文
9	XDS-9	黄长质煌斑岩的球状火山砾		18.3Ma	小顶山	本文
10	SWJ92-10	黄长质煌斑岩中球状火山集块		13.1Ma	上文家	喻学惠,1994
11	SWJ92-11	含气孔的黄长质煌斑岩熔岩		14.6Ma	上文家	喻学惠,1994
12	XDS01-01	黄长质煌斑岩的球状火山集块		15.7Ma	小顶山	本文
13	STJ01-02	黄长质煌斑岩的球状火山集块		14.7Ma	上杜家	本文
14	STJ01-03	黄长质煌斑岩的岩球		14.9Ma	上杜家	本文
15	BCS01-04	含少量气孔的黄长质煌斑岩熔岩		19.1Ma	白草山	本文
16	YGP01-05	黄长质煌斑岩的岩球		15.9Ma	硬各坪	本文
17	ND02-01	浅粉红色流纹质晶屑凝灰岩		11.7Ma	牛顶山	本文
18	ND02-02	浅粉红色流纹质晶屑凝灰熔岩		13.6Ma	牛顶山	本文
19	DHB92-12	致密块状钾玄岩	全岩 <sup>39</sup> Ar/ <sup>40</sup> Ar 定年	11.1Ma(坪年龄)	大河坝	本文
20	GJZ92-13	致密块状钾玄岩		10.8Ma(坪年龄)	管界	本文
21	MJG0402	致密块状钾玄岩		9.63Ma(坪年龄)	马圈沟	本文
22	XD04-1	致密块状含金云母黄长质煌斑岩	金云母 <sup>39</sup> Ar/ <sup>40</sup> Ar 定年	23.17Ma(坪年龄)	小顶山	Yu <i>et al.</i> , 2006
23	XD04-2	致密块状含金云母黄长质煌斑岩		22.64Ma(坪年龄)	小顶山	Yu <i>et al.</i> , 2006
24	LSS0302	含气孔的黄长质煌斑岩熔岩		23.09Ma(坪年龄)	上杜家	Yu <i>et al.</i> , 2006
25	HT0309	含气孔的黄长质煌斑岩熔岩		17.82Ma(坪年龄)	好梯	Yu <i>et al.</i> , 2006
26	CZ0303	含气孔的黄长质煌斑岩熔岩		22.31Ma(坪年龄)	龙王山	Yu <i>et al.</i> , 2006
27	ZJS0304	含气孔的黄长质煌斑岩熔岩		22.8Ma(坪年龄)	龙王山	Yu <i>et al.</i> , 2006

说明：样品 1~18 由国土资源部宜昌同位素实验室完成；样品 19~21 由中国地质科学院地质所同位素年代学实验室测定；22, 23 由中国地震局地质研究所同位素年代学实验室测定；样品 24~27 由中国地质大学(北京)同位素年代学实验室测定

出相的岩筒、岩墙或穹丘状产出。已经查明的火山岩岩筒(岩墙)近 50 余个,分散出露在水、礼县城关以南和西南方向近 4000km<sup>2</sup> 范围内,火山岩整体分布呈近 NNE 向(近 SN 向)。单个岩筒(或岩墙)出露面积很小,均不足 1km<sup>2</sup>。

新生代火山岩具有双峰式岩石组合,其中碱性超基性岩在礼县县城以南及西南近 4000km<sup>2</sup> 范围内均有出露,以火山通道相和/或侵入相的致密块状熔岩为主,也见大量含气孔的熔岩、集块熔岩、角砾熔岩以及溢流作用形成的层状熔岩流,还有少量岩墙状火山岩出露。碳酸岩主要呈层状,空间上与碱性超基性岩共生,在礼县西南部地区可见巨厚(3~5m 甚至更厚)的层状碳酸岩角砾熔岩或角砾岩或夹于层状碱性超基性岩的熔岩流(层)中,或复于其上。在其它碱性超基性岩筒附近,也可见到经强烈风化的碳酸岩质集块熔岩、凝灰熔岩和角砾熔岩以及无根的火成碳酸岩岩块(如王坪)。碱性基性火山岩与超基性岩空间分布有所重叠,但出露面积很小,目前仅零星见于宕昌县境内及与礼县接壤的西部地区。基性岩也以岩筒(或火山颈)相和/或侵入相致密块状熔岩为主,偶见少量含气孔的熔岩(喻学惠,1991,1994;喻学惠等,2001,2003,2004,2009)。

西秦岭地区新生代酸性火山岩有 2 处出露：一处位于天水北道以东、渭河断裂北侧的伯阳-葡萄园地区。流纹质含晶屑岩屑的凝灰熔岩和含角砾的凝灰熔岩不整合赋存于新近纪甘肃群陆相红色砾岩、砂岩和泥岩之下,出露面积 37km 左右(赖绍聪等,2006)。另一处由本文作者发现于礼县牛顶山一带,浅粉红色含晶屑岩屑的流纹质凝灰熔岩夹于碱性超基性熔岩层中,此外还有少量粗面质的凝灰熔岩或凝灰岩。其出露范围和厚度不详。

新生代火山岩的同位素定年结果列于表 1。由表可见,双峰式火山岩中 16 个不同产状的碱性超基性岩的全岩 K/Ar 法定年结果落在 19.1~7.1Ma 范围,3 个碱性基性岩的全岩 <sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar 定年结果分别为 11.1Ma、10.8Ma 和 9.65Ma。2 个流纹岩的全岩 K/Ar 定年结果分别为 13.6Ma 和 11.7Ma。由此可见几种火山岩的形成时代基本完全重叠。6 个单矿物金云母的 <sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar 定年结果,有 5 个样品为 23~22Ma,另一个样品为 17.82Ma,与全岩 K/Ar 和 <sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar 定年结果略有差别,但也都属于中新世,并落在莫宣学等(2009)确定的青藏高原后碰撞岩浆作用的时限范围。天水伯阳-葡萄园地区的流纹岩缺乏同位素定年,根据野外地质关系初步定为古

表2 西秦岭礼县牛顶山酸性火山岩的全岩化学 (wt%)、稀土微量元素 ( $\times 10^{-6}$ ) 及 Pb、Sr、Nd 同位素  
Table 2 Chemical composition (wt%), REE and trace ( $\times 10^{-6}$ ) elements and isotopes of Pb, Sr, Nd of whole acidic volcanic rocks in Niuding mountain, West Qinling

样品号	岩石类型	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	CO <sub>2</sub>	Total		
ND2019	流纹岩	72.15	0.35	13.93	0.44	1.5	0.05	0.75	1.36	4.58	3.5	0.13	0.74	0.09	99.57		
ND2014	流纹岩	71.49	0.35	12.33	1.27	0.37	0.04	0.52	2.31	3.52	2.12	0.14	4.14	1.37	99.97		
ND2022	粗面岩	57.24	0.77	15.28	1.29	5.53	0.19	3.92	5.63	4.86	3.25	0.38	1.16	0.23	99.73		
样品号	岩石类型	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE
ND2019	流纹岩	46.42	82.46	9.71	32.92	6.07	0.6	4.54	0.72	3.47	0.65	1.75	0.29	1.8	0.26	18.8	210.5
ND2022	粗面岩	46.63	89.65	11.45	45	9.07	1.71	7.18	1.07	5.43	0.05	2.59	0.38	2.24	0.33	27.1	249.9
样品号	岩石类型	Rb	Sr	Ba	Zr	Hf	Nb	Ta	Th	U	Pb	Cs					
ND2019	流纹岩	827	291	179	576	184	28.7	4.1	35.4	4.7	46.8	32					
ND2022	粗面岩	150	381	1550	211	6.1	20	0.5	12.1	4.1	29.7	18					
样品号	岩石类型	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	ε <sub>Nd</sub>										
ND2019	流纹岩	0.73635	0.512688	18.832	15.699	39.255	0.98										

注: 全岩化学与稀土微量由湖北省地质实验中心测定; Sr、Nd、Pb 同位素由中国地质科学院地质所同位素室测定

近纪(赖绍聪等 2006) 能否归为该区双峰式火山岩组合,尚待进一步研究。

2 新生代双峰式火山岩的岩石组合及特征

西秦岭新生代双峰式火山岩组合的岩石类型及各端元火山岩的岩石学特征概括如下:

(1) 碱性超基性岩(钾霞橄黄长岩,后同) 具有原生岩浆的各种特征(喻学惠,1991)。化学成分以强烈亏损 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,富 TiO<sub>2</sub>、CaO、MgO、K<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>O 为特征。SiO<sub>2</sub> 通常小于 40%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 通常小于 10%,CaO 通常高于 15%,MgO 通常大于 11%,K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O 在 3% ~ 5% 左右。根据 Foley *et al.* (1987) 有关超钾质岩石的分类,确定为钾霞橄黄长岩。岩石具斑状结构,斑晶矿物有橄榄石、单斜辉石和金云母,基质中含大量单斜辉石/白榴石/黄长石/霞石的微晶或微斑晶,不含任何长石类矿物。岩石中含有丰富的地幔包体、橄榄石捕虏晶以及单斜辉石、金云母巨晶,还含有大量碳酸岩的分凝体(喻学惠等 2001,2004)。

(2) 碳酸岩 空间上与钾霞橄黄长岩密切共生。化学成分 CaO 含量达 50% 以上, SiO<sub>2</sub> 小于 2%。矿物成分中出现大量(50% 以上) 方解石,在碳酸岩中有时可见单斜辉石、磷灰石和霞石的微晶。此外,碳酸岩中还含有大量钾霞橄黄长岩的岩屑(或火山粒),偶见强烈风化的橄榄岩包体(喻学惠等 2003,2004)。

(3) 基性岩(钾玄岩) SiO<sub>2</sub> > 45%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 10%,CaO < 10%,通常在 7% ~ 8%,MgO < 10%,通常在 5% ~ 8%,K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O 通常在 5% 左右。在 Foley *et al.* (1987) 有关超钾质岩石的分类中,落到Ⅲ类造山带钾质火山岩区(喻学惠等 2009)。岩石具斑状结构,斑晶矿物具橄榄石 + 单斜辉石 + 斜长石组合以及橄榄石捕虏晶。基质中含有大量斜长石微晶/微斑晶,无单斜辉石微晶/微斑晶,也不含白榴石、霞石和黄长石。钾玄岩石中偶见橄榄岩包体或橄榄石捕虏晶(喻学惠等 2009)。

(4) 中酸性端元主要是流纹岩及少量粗面岩 酸性岩为浅粉红色,斑状结构,略显层状构造,偶见气孔构造,薄片可见石英斑晶/晶屑以及岩屑。基质为隐晶质/玻璃质。化学成分具有高的 SiO<sub>2</sub> (达 70%) 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (在 13% ~ 15% 左右),但 CaO 和 MgO 很低,小于 2% ~ 3%。2 个流纹岩样品的 K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O 含量相差较大,分别为 9.08% 和 5.64%。为此综合确定为含晶屑岩屑的流纹质凝灰熔岩。中性火山岩样品产状不详,薄片下可见斑状结构,斑晶量少为正长石,偶见黑云母和石英斑晶/晶屑。基质部分为隐晶质/玻璃质。化学成分为: SiO<sub>2</sub> 57.24%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15.28%,CaO 3.29%,MgO 5.63%,K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O 达 8.11%,初步确定为粗面岩。

有关钾霞橄黄长岩、钾玄岩和碳酸岩的化学成分见喻学惠等(2001,2003,2004,2009),本文不再赘述。礼县牛顶山新生代中酸性火山岩的全岩化学及稀土微量元素分析结果见表 2,从该区新生代火山岩的 TAS 图(图 2) 中可以清楚地看出新生代双峰式火山岩组合特征。

3 双峰式火山岩的 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学

新生代双峰式火山岩套中酸性火山岩的 Sr、Nd、Pb 同位素分析结果及计算的 ε<sub>Nd</sub> 值见表 2,钾霞橄黄长岩、钾玄岩与碳酸岩的 Sr、Nd、Pb 同位素特征参见喻学惠等(2001,2003,2004,2009)。将本区火山岩与青藏高原同时代的后碰撞钾质火山岩的地球化学特征进行对比发现,本区新生代双峰式火山岩中的钾霞橄黄长岩、钾玄岩和部分碳酸岩的初始 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 在 0.704031 ~ 0.70525 之间,<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 为 18.408 ~ 19.062,<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 为 15.476 ~ 15.677,<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 为 38.061 ~ 39.414,且 ε<sub>Nd</sub> = 0.3 ~ 5.3,全部为正值,与赵志丹和莫宣学(2009) 确定的新特提斯地幔端元地球化学省十分相似(图 3),也与地幔柱成因的 Ontong Java 和 FOZO 火山岩的地球化学特征相似(图 4)。由此证明该双峰式火山岩具有

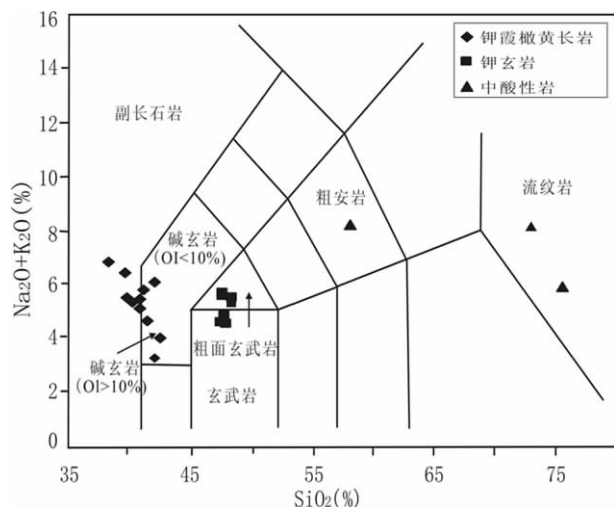


图2 双峰式火山岩的 TAS 图

Fig. 2 TAS diagram for the Cenozoic bimodal volcanic rocks in West Qinling

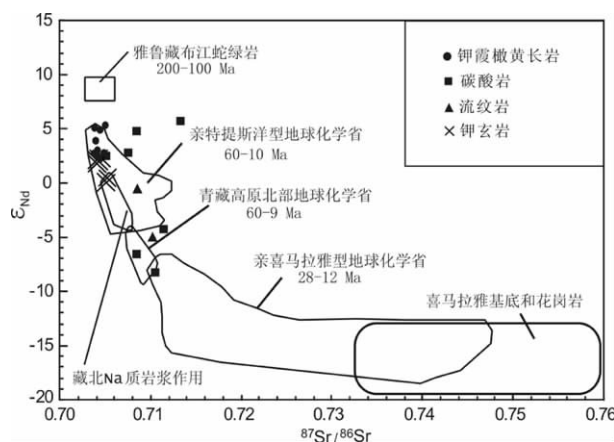
图3 西秦岭双峰式火山岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\epsilon_{\text{Nd}}$ 关系图

Fig. 3 The diagram of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\epsilon_{\text{Nd}}$  of the Cenozoic bimodal volcanic rocks in West Qinling

印度洋地幔域的地球化学特征,岩浆来自亏损的地幔源区,其成因与地幔柱活动有关。

酸性端元流纹岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值高于超基性和基性端元岩石, $\epsilon_{\text{Nd}} = -1.02 \sim -0.98$ ,其它 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 以及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 也与钾霞橄黄长岩相近,显示了亏损的软流圈地幔与地壳混合的特征。由此推测流纹岩可能是在软流圈地幔上涌的条件下,由地壳的部分熔融作用形成的。

#### 4 讨论:双峰式火山岩的成因及南北构造带的裂谷性质

以 $\text{SiO}_2$ 为主要标志具有显著成分间断(Daly间断)的2

套火山岩组合,被定义为双峰式岩石组合。大量研究表明,双峰式火山岩组合可以产于大陆裂谷、大陆拉张(Duncan *et al.*, 1984; Pin and Marini, 1993; Garland *et al.*, 1995)、弧后盆地(Hochstaedter *et al.*, 1990a, b)、洋岛(Geist *et al.*, 1995)、造山后拉张(Coulon *et al.*, 1986)以及成熟岛弧(Frey *et al.*, 1984; Pin *et al.*, 1997)等各种构造环境。因为大陆裂谷是双峰式火山岩产出最普遍最典型的地区,也是研究最深入的双峰式岩石-构造组合之一,因而备受地学界关注。

东非裂谷是双峰式火山岩最具代表性的产区之一,以出现富碱的基性岩(碱性玄武岩), $\text{SiO}_2$ 强烈不饱和的过碱性超钾质岩,如霞石岩,黄长质煌斑岩类或钾霞橄黄长岩及碳酸岩等,偏碱性的粗面岩、响岩以及(碱性)流纹岩组合为特征(Wilson, 1989)。特别是钾霞橄黄长岩和火山喷发碳酸岩,长期以来被认为是东非裂谷最具代表性的岩石,也是大陆裂谷双峰式火成岩组合的典型代表。甘肃西秦岭新生代火山岩出露在贺兰-川滇南北构造带北段之鄂尔多斯地块西缘,地理坐标大致为 $\text{E}104^\circ30' \sim 105^\circ36'$ , $\text{N}33^\circ35' \sim 34^\circ40'$ 。火山岩分布区总体呈NNE近SN向展布,与本区深部构造线方向一致。新生代火山岩中出现大量钾霞橄黄长岩与碳酸岩以及基性的钾玄岩类,是否可以将西秦岭新生代火山岩归为大陆裂谷火山岩?南北构造带是否具有大陆裂谷性质?长期以来一直困扰着作者。该区新生代流纹岩类的发现和同位素定年,为确定西秦岭新生代大陆裂谷双峰式火山岩组合提供了地质依据,也为探讨南北构造带的成因和性质提供了条件。

双峰式火山岩中的基性与超基性端元来自地幔岩石的低度部分熔融,已为研究者们公认。但对其中的酸性岩(流纹岩)的成因一直存在不同的认识。一种解释认为流纹岩是由基性-超基性岩浆作用的热诱发地壳熔融形成的(Christiansen, 1984);而另一种解释基于流纹岩中仅含极少量或更本不含任何地壳物质,认为流纹岩是基性-超基性岩浆分离结晶作用的产物(MacDonald and Sun, 1987; Bacon and Drit, 1988)。西秦岭新生代具有钾霞橄黄长岩,碳酸岩,钾玄岩和流纹岩,粗面岩组合,与东非裂谷双峰式火山岩组合几乎完全相同。火山岩的Sr、Nd、Pb同位素地球化学证明超基性-基性端元直接导源于亏损的软流圈地幔,火山作用的深部动力学机制与印度-欧亚大陆的碰撞引发的软流圈物质向东的移动有关,也是青藏高原向东扩展的响应(喻学惠等, 2009)。该区酸性火山岩来自何处?是地壳熔融作用的产物?还是来自超基性-基性岩浆的分离结晶作用?根据礼县-宕昌地区新生代酸性岩火山岩具有较高的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,但具有与同时代的钾霞橄黄长岩和钾玄岩相似的稀土、微量元素以及Nd、Pb同位素地球化学特征,因此我们初步推测,酸性火山岩的成因与软流圈地幔上涌诱发的地壳物质的部分熔融有关。

有关裂谷成因问题自20世纪30年代以来就有“拉涨说”与“挤压说”之争(车自成等, 1987)。20世纪70年代以



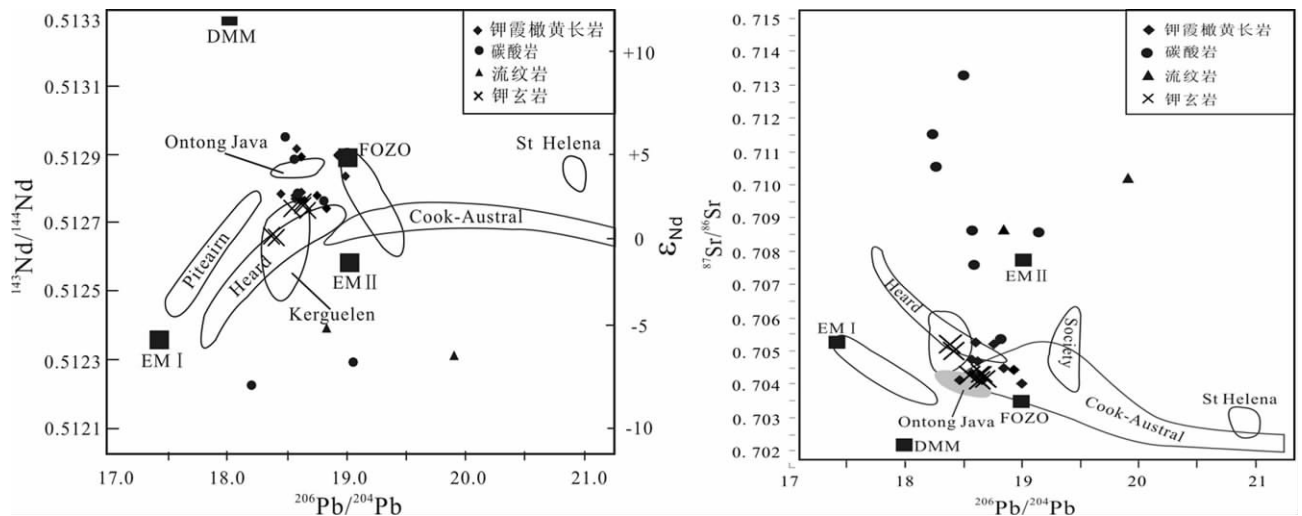


图4 西秦岭双峰式火山岩的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图

Fig. 4 The diagram of  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  of the Cenozoic bimodal volcanic rocks in West Qinling

来 随着对东非裂谷、贝加尔裂谷等研究的深入,大量的地质构造、火山岩以及地球物理资料证明,地幔底辟上涌是裂谷形成的深部动力学机制,也是最根本原因。为此,一些研究者依据裂谷形成的动力学机制,将裂谷的成因类型分为主动裂谷和被动裂谷两个大类。前者以东非裂谷为代表,大陆岩石圈最初的拉张(裂谷作用)主要是由软流圈物质上涌引起的,而在被动裂谷中,岩石圈最初的张裂主要是由岩石圈板块相互运动所产生的差异应力引起的。然而,随后的大量研究表明,无论是主动裂谷还是被动裂谷,其形成的动力因素都要比理想模式复杂得多。有如曾经被认为是被动裂谷典型代表的贝加尔裂谷,深入的研究进一步揭示贝加尔裂谷与东非裂谷一样同属主动裂谷,二者的差异可能与地幔热柱上升的深部过程有关,也与软流圈和区域应力场联合作用的情况有关(杨巍然等,1995;邓晋福等,1996)。因此,深部地质作用(特别是地幔柱)是制约大陆裂谷最重要的因素(杨巍然等,1995)。

贺兰-川滇南北构造带横跨中国大陆几个不同的地质构造单元,是中国大陆现今东、西部从深部到浅层地质构造、地球物理、地表地理-环境气候系统的综合分界,是中国大陆中生代东、西部从地表系统到深部构造反转演变及其动力学过程的转换带,也是一个地震多发带(张国伟等,2006),与世界很多大陆裂谷的活动特征十分相似,为此,张国伟等(2008)推测南北构造带可能是贝加尔-印度洋90°线全球性南北构造的组成部分(图5)。但是,冯锐等(2007)在对天山-贝加尔活动构造带的研究中指出,贝加尔裂谷系沿巴基斯坦-兴都库什-天山-阿尔泰-萨彦岭-贝加尔湖一线呈NE向展布,它将欧亚大陆分隔成南北两个部分,是欧亚大陆内部一条巨型地震活动带,也是一条发展中的板块边界(图5)。贝加尔裂谷系之西段,即兴都库什-天山-阿尔泰-萨彦岭段属于滨特提斯洋陆缘活化带的北界,其成因与印度-欧亚板块

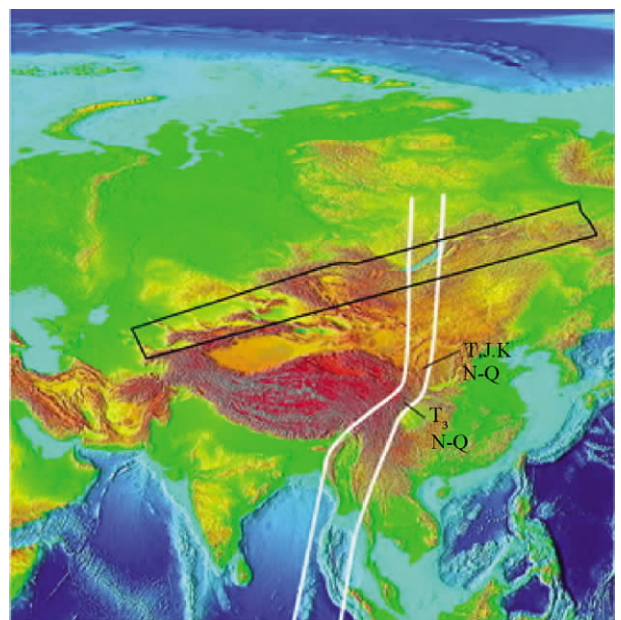


图5 南北地震带和贝加尔-天山地震带在欧亚大陆中的位置示意图(原图引自张国伟等,2008)

图中白线为南北地震(构造)带,据张国伟等,2008;图中黑线为贝加尔-天山地震带,据冯锐等,2007

Fig. 5 The locations of N-S seismic belt and Baikal-Tianshan seismic belt in Eurasia Continental (after Zhang *et al.*, 2008)

White lines are N-S seismic (i.e. N-S trending tectonic) belt, after Zhang *et al.*, 2008; black lines are Baikal-Tianshan seismic belt, after Feng *et al.*, 2007

碰撞有关的挤压作用有关;而贝加尔裂谷系之东段属滨太平洋陆缘活化带之西北界,其成因与亚洲东缘的裂解和拉张有关(任继舜等,1999)。此外,根据深部地球物理资料显示,该

南北构造带北段的西秦岭地区地壳厚度达 52km, 岩石圈底界埋深在 120km 以上, 明显不同于华北、东非等典型克拉通地区(林长佑等, 1995); 采用地幔包体反演的西秦岭地区地温线也明显高于华北克拉通地温线, 而更靠近大洋地温线(史兰斌等, 2003), 这证明南北构造带北段的西秦岭不具备典型克拉通的岩石圈特征, 而更像是一个造山带岩石圈。邓晋福等(1996)在对我国新生代以来岩石圈尺度的构造分区中, 提出西秦岭是一个由造山带与其周边多个较小的克拉通块体共同组成的“块体群”。正是因为南北构造带岩石圈的这种特殊性决定了其裂谷性质与东非大陆裂谷有所差异, 也与贝加尔裂谷不尽相同。

综合分析西秦岭新生代双峰式裂谷火山岩产出的构造背景, 火山岩的时空分布及地球化学特征, 结合 Liu *et al.* (2004) 和 Flower (2004) 对与印度-欧亚大陆碰撞引发的软流圈地幔流的运动学特征的分析, 我们认为, 南北构造带裂谷的成因主要受制于印度-欧亚大陆碰撞诱发的高原下软流圈物质向东的移动和上涌, 但裂谷的特征与西秦岭特殊的岩石圈结构有关, 也与周边各个块体间相对运动速度与方向及东昆仑断裂-西秦岭北缘断裂的活动特征等有关。总之, 南北构造带是一条复杂的裂谷带, 也可能是一个发展中的板块边界。

## 5 结论

(1) 西秦岭新生代双峰式火山岩由基性端元的钾霞橄黄长岩、钾玄岩、碳酸岩和酸性端元的流纹岩组成。火山作用的时代在 23 ~ 7.1 Ma 之间, 落在青藏高原后碰撞岩浆作用时限范围。推测火山作用的成因与印度-欧亚大陆碰撞引发的高原下软流圈物质向东移动有关, 也是青藏高原向东扩展的记录;

(2) 西秦岭新生代双峰式火山岩的 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学显示, 基性端元的钾霞橄黄长岩、钾玄岩及部分碳酸岩具有与新特提斯地幔域相似的地球化学特征, 也与地幔柱成因的 Ontong Java 和 FOZO 火山岩相似, 推测基性端元的钾霞橄黄长岩、钾玄岩和碳酸岩来自亏损的软流圈地幔的部分熔融, 其成因与印度-欧亚大陆碰撞引发的高原下软流圈物质向东移动有关。而酸性端元流纹岩的成因可能与软流圈上涌引发的地壳物质的部分熔融有关;

(3) 西秦岭新生代双峰式火山岩的厘定, 为探讨南北构造带的性质提供了火山岩约束, 并证明南北构造带是一条大陆裂谷。但是, 南北构造带的裂谷性质既不同于贝加尔裂谷, 也不同于东非裂谷, 其成因与特征受印度-欧亚大陆碰撞引发的高原下软流圈物质向东移动的约束, 也与西秦岭特殊的岩石圈结构以及周边小块体之间的相对运动特征与昆仑断裂-西秦岭北缘断裂的运动性质等有关。

## References

- Bacon CR and Drit TH. 1988. Compositional evolution of the zoned calc-alkaline magma chamber of mantle magma, Crater lake, Oregon. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 98: 224 - 256
- Che ZC, Jiang HX *et al.* 1987. *Geotectonics*. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 235 - 259 (in Chinese)
- Christiansen RL. 1984. Yellowstone magmatic evolution: Its bearing on understanding large-volume explosive volcanism. In: *Explosives Volcanism: Inception, Evolution and Hazards*. Washington DC: National Academy Press, 84 - 95
- Coulon C, Maluski H, Bollinger C and Wang S. 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet:  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$  dating, petrological characteristics and geodynamic significance. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 79: 281 - 302
- Deng JF, Zhao HL, Mo XX, Wu ZX and Luo ZH. 1996. Continental Roots-Plume Tectonics of China: Key to the Continental Dynamics. Beijing: Geological Publishing House, 3 - 87 (in Chinese)
- Ding GY. 1991. A Summary for the Lithosphere Dynamics of China. Beijing: Seismological Press, 1 - 584 (in Chinese)
- Duncan AR, Erlank AJ and Marsh JS. 1984. Regional geochemistry of the Karoo igneous province. *Spec. Publ. Geol. Soc. Afr.*, 13: 355 - 388
- Feng R, Ma ZJ, Fang J *et al.* 2007. A developing plate boundary: Tianshan-Baykal active tectonic belt. *Earth Science Frontiers*, 14 (4): 1 - 17 (in Chinese with English abstract)
- Flower MFJ. 2004. Asthenosphere-lithosphere dynamic responses to Tethyan plate collisions (IGCP-430). *Tectonophysics*, 393: 1 - 7
- Foley SF, Venturelli G, Green DH *et al.* 1987. The ultrapotassic rocks: Characteristics, classification and constraints for petrogenetic models. *Earth Science Reviews*, 24: 81 - 134
- Frey FA, Gerlach DC, Hickey RL, Escobar LL and Villavicencio FM. 1984. Petrogenesis of the Laguna et Maule volcanic complex, Chile (360S). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 88: 133 - 149
- Garland F, Hawkesworth CJ and Mantovani MSM. 1995. Description and petrogenesis of the Parana rhyolites, Southern Brazil. *J. Petrol.*, 36: 1193 - 1127
- Geist D, Howard KA and Larson P. 1995. The generation of oceanic rhyolites by crystal fractionation: The basalt-rhyolite association at Volcan Alcedo, Galapagos Archipelago. *J. Petrol.*, 36: 965 - 982
- Hochstaedter AG, Gill JB, Kusakabe M, Newman S, Pringle M, Taylor B and Pryer P. 1990a. Volcanism in the Sumisu Rift, I: Element, volatile and asable geochemistry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 100: 179 - 194
- Hochstaedter AG, Gill JB and Morris J. 1990b. Volcanism in the Sumisu Rift, II: Subduction and non-subduction related comments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 100: 195 - 209
- Lai SC, Zhang GW, Qin JF *et al.* 2006. Geochemistry and petrogenesis of the Tertiary rhyolite from the Boyang area, northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 13 (4): 212 - 220 (in Chinese with English abstract)
- Lin CY, Wu YX and Yang CF. 1995. High-conduction layer and crust-mantle transitional belt near to Moho in Tianshui area. *Acta Seismologica Sinica*, 17: 230 - 236 (in Chinese with English abstract)
- Liu M, Cui XJ and Liu FT. 2004. Cenozoic rifting and volcanism in eastern China: A mantle dynamic link to the Indo-Asian collision. *Tectonophysics*, 393: 29 - 42
- Ma XY. 1987. *An Outline for Lithosphere Dynamics of China*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- MacDonald WF and Sun SS. 1995. The composition of Earth. *Chem. Geol.*, 120: 223 - 253
- Mo XX, Zhao ZD, Yu XH *et al.* 2009. *Cenozoic Collision and Post-Collision Igneous in Tibetan Plateau*. Beijing: Geological Publishing House, 367 - 378 (in Chinese with English abstract)

- Pin C and Marini F. 1993. Early Ordovician continental break-up in Variscan Europe: Nd-Sr isotope and trace element evidence from bimodal igneous association of the southern Massif Central, France. *Lithos*, 29: 177–196
- Pin C and Paguette JL. 1997. A mantle-derived bimodal suite in the Hercynian belt: Nd isotope and trace element evidence for a subduction-related rift origin of the Late Devonian Brevenne metavolcanics, Massif Central (France). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 129: 222–238
- Ren JS, Wang ZX and Chen BW *et al.* 1999. Chinese Geotectonics from World: A Simple Illustration for Geotectonics Map of China and Adjacent Area. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Shi LB, Lin CY and Chen XD. 2003. Composition, thermal structures and rheology of the upper mantle inferred from mantle xenoliths from Haoti, Dangchang, Gansu Province, western China. *Seismology and Geology*, 25(4): 525–542 (in Chinese with English abstract)
- Wilson W. 1989. *Igneous Petrogenesis*. London: Unwin Hyman, 327–373
- Yang WR, Ji KC, Sun JY and Xing JS. 1995. Some frontier problems in the study of continental rift. *Earth Science Frontiers*, 2(1–2): 93–102 (in Chinese with English abstract)
- Yu XH. 1991. The Haoti alkaline ultrabasic volcanic rocks from Dachang, Gansu Province: A potassic ultramafic lamprophyre containing the upper mantle-derived xenoliths and megacrysts. *Geological Review*, 37(2): 144–153 (in Chinese with English abstract)
- Yu XH. 1994. Cenozoic potassic alkaline ultrabasic volcanic rocks and its genesis in Lixian-Dangchang area, Gansu Province. *Tethyan Geology*, 18: 114–129 (in Chinese with English abstract)
- Yu XH, Mo XX, Flower M *et al.* 2001. Cenozoic kamafugite volcanism and tectonic meaning in west Qinling area, Gansu Province. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 367–376 (in Chinese with English abstract)
- Yu XH, Mo XX, Su SG *et al.* 2003. Discovery and significance of Cenozoic volcanic carbonatite in Lixian, Gansu Province. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 105–112 (in Chinese with English abstract)
- Yu XH, Zhao ZD, Mo XX *et al.* 2004. Trace elements, REE and Sr, Nd, Pb isotopic geochemistry of Cenozoic kamafugite and carbonatite from west Qinling, Gansu Province: Implication of plume-lithosphere interaction. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 483–494 (in Chinese with English abstract)
- Yu XH, Zhao ZD, Zhou S, Mo XX, Zhu DQ and Wang YL. 2006.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating for Cenozoic kamafugite from western Qinling in Gansu Province. *Chinese Science Bulletin*, 51: 1621–1627
- Yu XH, Mo XX, Zhao ZD, Huang XK, Li Y and Wei YF. 2009. Two types of Cenozoic potassic volcanic rocks in Western Qinling, Gansu Province: Their petrology, geochemistry and petrogenesis. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 79–89 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC *et al.* 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press, 117–417 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Guo AL and Yao AP. 2006. Western Qinling-Songpan continental tectonic node in China's continental tectonic. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 23–32 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Dong YP, Guo AL, Chen YS *et al.* 2008. The different evolution and deep processes between east and west of Chinese continent since Mesozoic to Cenozoic. In: N-S Trending Tectonic Belt Workshop. Xian: Northwest University, 2008
- Zhao ZD and Mo XX. 2009. Inhomogeneity in geochemistry of the lithosphere in the Tibetan Plateau. In: Mo XX *et al.* (eds.). *Cenozoic Collision and Post-Collision Igneous in Tibetan Plateau*. Beijing: Geological Publishing House, 354–366 (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 车自成, 姜洪训等. 1987. 大地构造学. 西安: 陕西科学技术出版社, 235–259
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学等. 1996. 中国大陆地幔根-柱构造——大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社
- 丁国瑜. 1991. 中国岩石圈动力学概论. 北京: 地震出版社, 584
- 冯锐, 马宗晋, 方剑, 吴宣. 2007. 发展中的板块边界: 天山-贝加尔活动构造带. *地学前缘*, 14(4): 1–17
- 赖绍聪, 张国伟, 秦江峰等. 2006. 青藏高原东北缘伯阳地区第三系流纹岩地球化学及岩石成因. *地学前缘*, 13(4): 212–220
- 林长佑, 武玉霞, 杨长福. 1995. 天水地区莫霍面附近的高层及壳幔过渡带. *地震学报*, 17(2): 230–236
- 马杏垣. 1987. 中国岩石圈动力学纲要. 北京: 地质出版社
- 莫宣学, 赵志丹, 喻学惠等. 2009. 青藏高原新生代碰撞-后碰撞火成岩. 北京: 地质出版社, 367–378
- 任继舜, 王作勋, 陈炳蔚等. 1999. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明. 北京: 地质出版社
- 史兰斌, 林传勇, 陈孝德. 2003. 由甘肃宕昌好梯幔源包体推导的上地幔物质组成、热结构和流变学特征. *地震地质*, 25(4): 525–542
- 杨巍然, 纪克诚, 孙继源, 邢集善等. 1995. 大陆裂谷研究中的几个前缘问题. *地学前缘*, 2(1–2): 93–102
- 喻学惠. 1991. 甘肃宕昌好梯碱性超基性火山岩: 一种含上地幔包体的钾质超镁铁煌斑岩. *地质论评*, 37(2): 144–153
- 喻学惠. 1994. 甘肃礼县-宕昌地区新生代钾质碱性超基性火山岩的特征及成因. *特提斯地质*, 18号: 114–129
- 喻学惠, 莫宣学, Flower M 等. 2001. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩火山作用及其构造含义. *岩石学报*, 17(3): 367–376
- 喻学惠, 莫宣学, 苏尚国, 董芳洲, 赵欣, 王辰. 2003. 甘肃礼县新生代火山喷发碳酸岩的发现及意义. *岩石学报*, 19: 105–112
- 喻学惠, 赵志丹, 莫宣学等. 2004. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩和碳酸岩的微量 稀土和 Sr, Nd, Pb 同位素地球化学: 地幔柱-岩石圈交换的证据. *岩石学报*, 20(3): 483–494
- 喻学惠, 莫宣学, 赵志丹, 黄行凯, 李勇, 陈延芳, 韦玉芳. 2009. 甘肃西秦岭两类新生代钾质火山岩: 岩石地球化学与成因. *地学前缘*, 16(2): 79–89
- 张国伟, 张国伟, 袁学诚, 肖庆辉等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 117–417
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 2006. 中国大陆构造中的西秦岭-松潘大陆构造结. *地学前缘*, 11(3): 23–32
- 张国伟, 董云鹏, 郭安林, 程顺有等. 2008. 中生代中国大陆东、西部构造差异演化与深部过程. 南北构造带学术研讨会. 西安: 西北大学, 2008
- 赵志丹, 莫宣学. 2009. 青藏高原岩石圈的化学不均一性. 见: 莫宣学等著. 青藏高原新生代碰撞-后碰撞火成岩. 北京: 地质出版社, 354–365