

西秦岭新生代高钾质玄武岩流体组成及其地幔动力学意义^{*}

汤庆艳¹ 张铭杰^{1**} 李晓亚¹ 李立武² 何佩佩¹ 林瑶¹

TANG QingYan¹, ZHANG MingJie^{1**}, LI XiaoYa¹, LI LiWu², HE PeiPei¹ and LIN Yao¹

1. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

2. 中国科学院地质与地球物理研究所油气资源重点实验室, 兰州 730000

1. Key Lab of Western China's Environmental Systems, MOE, School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2. Key Lab of Petroleum Resource Research, Institute of Geology and Geophysics, CAS, Lanzhou 730000, China

2011-12-03 收稿, 2012-02-27 改回.

Tang QY, Zhang MJ, Li XY, Li LW, He PP and Lin Y. 2012. The chemical and carbon isotopic compositions of volatiles in Cenozoic high-potassic basalts in western Qinling, China and their mantle geodynamic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4):1251–1260

Abstract India-Asia continental plate subduction and collision lead to widespread Cenozoic potassic-ultrapotassic magmatism in the Tibet which provides a valuable indicator of the composition and nature of the deep mantle beneath the Tibet. The Cenozoic mantle xenolith bearing high-potassic basalts (7.1 ~ 23Ma) distributed in western Qinling, western China are a window to probe the mantle composition and geodynamics beneath north-eastern margin of Tibet Plateau. The chemical and carbon isotopic compositions of volatiles in olivine(Olv) and plagioclase(Pl) phenocrysts and matrix(Mtx) of Cenozoic high-potassic basalts in western Qinling have been determined by stepwise heating mass spectrometer to reveal volatile sources and geodynamic implications under the system of continental plate subduction and collision. The results showed that the volatiles in high-potassic basalts were released by stage at temperature intervals of 200 ~ 400°C, 400 ~ 800°C and 800 ~ 1200°C, and are characterized by dominant H₂O with minor CO₂ and SO₂, as well as detectable He. The olivine phenocrysts show higher release temperature interval(900 ~ 1200°C) of main volatiles than those in mantle xenoliths in eastern China and ultramafic intrusion (400 ~ 800°C) in other regions, and are mainly composed of SO₂ (68.72mm³/g) and CO₂ (59.46mm³/g) etc. oxidized volatiles. The contents of H₂O and CO₂ increased gradually from olivine phenocrysts to plagioclase phenocryst and matrix. Olivine phenocrysts display relatively lighter $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ (-26.21‰ ~ -20.85‰, av. -23.32‰) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ (-42.35‰ ~ -38.17‰, av. -40.03‰) than matrix(-16.43‰ ~ -11.67‰, av. -13.22‰ for CO₂, -44.22‰ ~ -34.03‰, av. -39.70‰ for CH₄), which show the $\delta^{13}\text{C}$ features of crust with thermal cracking component of organic matters. The volatiles in primary magma are mainly composed of SO₂, N₂ and CO₂, and could be derived from a deep mixed mantle reservoir and developed in high f_{O_2} environment. They could be mixed by coexisting carbonatite magma or assimilated by the local Carboniferous carbonate which magma penetrated, and had been added by a large quantity of H₂O and CO₂ during magma ascent and evolution. The chemical and carbon isotopic compositions of volatiles suggested that a recycled crustal component derived from the devolatilization of subducted oceanic plate or sedimentary rocks, which could be related to paleo-Tethyan oceanic plate or Northern China plate with Yangtze plate subduction and collision under the system of India-Asia collision.

Key words Mantle dynamics; Carbon isotope; Chemical composition; Volatile; High-potassic basalts; Western Qinling

摘要 西秦岭新生代高钾质玄武岩是认识大陆碰撞俯冲体制下地幔流体组成及深部动力学的岩石探针。本文采用分步加热质谱法测定了西秦岭高钾质玄武岩中斑晶及基质的流体化学组成和碳同位素组成, 结果表明流体组分在 200 ~ 400°C、

* 本文受国家自然科学基金项目(41072056、40772058、91014003、40873005)、国家深部探测技术与实验研究专项(201011058)、973计划(2012CB214701)、教育部科学与技术研究重大项目(311010)和中国地质调查局地质调查工作项目(1212011121092)联合资助。

第一作者简介: 汤庆艳, 女, 1986年生, 博士生, 地球化学专业, E-mail: tangqy07@lzu.edu.cn

** 通讯作者: 张铭杰, 男, 1965年生, 教授, 博导, 地球化学专业, E-mail: mjzhang@lzu.edu.cn

400~800℃和800~1200℃阶段性释出,以H₂O为主,其次为CO₂和SO₂,并含有相对较高的He含量。从橄榄石斑晶到斜长石斑晶和基质H₂O和CO₂逐步升高。橄榄石斑晶流体挥发份主要释气峰温度(900~1200℃)明显高于中国东部地幔捕虏体及其它地区超镁铁质岩体中的橄榄石,流体组份以SO₂和CO₂等氧化性组份为主,其CO₂的δ¹³C值(-26.21‰~-20.85‰,平均-23.32‰)和CH₄的δ¹³C值(-42.35‰~-38.17‰,平均-40.03‰)低于基质的δ¹³C_{CO₂}值(-16.43‰~-11.67‰,平均-13.22‰)和δ¹³C_{CH₄}值(-44.22‰~-34.03‰,平均-39.70‰)。基质中CO₂和CH₄碳同位素组成具有有机质热裂解特征。原始岩浆的流体挥发份主要为SO₂、N₂和CO₂,可能起源于较深的混杂地幔源区、演化于高f_{O₂}的环境。流体挥发份化学和同位素组成表明高钾质玄武岩挥发份中存在地幔和地壳来源组份,幔源岩浆上升演化过程中可能加入了大量的H₂O和CO₂等,可能存在碳酸岩岩浆的混合或岩浆穿透区域碳酸盐地层的混染;其中的再循环壳源组份可能为古特提斯洋闭合俯冲或其后华北克拉通与扬子克拉通碰撞相关的再循环壳源沉积物脱出的流体组份。

关键词 地幔动力学;碳同位素;化学组成;流体挥发份;高钾质玄武岩;西秦岭

中图法分类号 P588.145;P593

1 引言

青藏高原东缘的西秦岭一带发育的新生代高钾质玄武岩是认识地幔深部地球化学信息的岩石探针(Zhang *et al.*, 1999, 2007; Su *et al.*, 2009, 2010a, b, 2011; Zou and Fan, 2010; 喻学惠等, 2001, 2004, 2005, 2009), 主要为分布在甘肃省礼县白关乡(8.7~18.3Ma, 喻学惠, 1994)、宕昌县好梯乡(7.1~23Ma, 喻学惠和张春福, 1998; 喻学惠等, 2005)和西和县等地的几十个超基性火山岩管。岩石类型主要为全球出露稀少的钾霞橄黄长岩和碳酸岩组合以及钾质粗面玄武岩(钾玄岩)(Lavecchia *et al.*, 2006; Gaeta *et al.*, 2011; 喻学惠等, 2003, 2004), 是印度-欧亚大陆强烈碰撞俯冲、软流圈地幔沿400km界面北东向侧向流动诱发形成的(Xia *et al.*, 2011; 喻学惠等, 2009), 对于认识碰撞俯冲体制下该区地幔组成、性质及深部动力学具有重要意义(Su *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2010; Gaeta *et al.*, 2011)。

西秦岭高钾质火山岩具有高的Cr、Ni和Co含量(喻学惠和张春福, 1998), 富集不相容元素和轻稀土, 亏损高场强元素, 具有显著的Pb负异常(喻学惠等, 2009), 源区具有EMI和EMII的特征, 可能是地幔低程度部分熔融的产物, 其源区具有高的f_{O₂}和CO₂含量(Foley *et al.*, 1986; Dunworth and Wilson, 1998; 喻学惠等, 2001), 是较厚的印度和欧亚大陆板块俯冲碰撞诱发软流圈地幔流“通道”的产物(莫宣学等, 2007)。高钾质玄武岩可能源自地壳、岩石圈地幔、软流圈或更深部的地幔(Stoppa and Lavecchia, 1992; Carlson *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2010; Nikogosian and van Bergen, 2010)。流体挥发份组成是认识高钾质玄武岩岩浆特征、地幔组成和深部动力学的重要手段(Zhang *et al.*, 1999; Scordari *et al.*, 2012; 樊祺诚等, 1992, 1996; 王永磊等, 2007), 可进一步约束其源区性质和演化条件。

本文采用分步加热质谱法测定了西秦岭新生代高钾质玄武岩中斑晶和基质流体挥发份的化学组成及碳同位素组成, 以探讨印度-欧亚大陆强烈俯冲碰撞体制下青藏高原东北缘深部地幔源区的流体组成特征及其动力学意义。

2 地质概况

西秦岭造山带为侏罗纪早期闭合的古特提斯洋的一部分, 是祁连-秦岭褶皱带、松潘-甘孜褶皱带和扬子古陆三大构造体系交汇的部位, 大地构造位置位于青藏高原东北缘、华北和扬子两大陆块之间。新生代以来印度板块向欧亚大陆俯冲碰撞作用的加强导致了青藏高原的快速隆升及新生代火山岩从高原腹地向周缘展布(Zhao *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2010; Xia *et al.*, 2011; 喻学惠和张春福, 1998; 喻学惠等, 2001; 莫宣学等, 2007)。在西秦岭一带发育有大量新生代高钾质玄武岩(图1)。

西秦岭新生代高钾质火山岩包括钾霞橄黄长岩和钾玄岩两类岩石, 其中钾霞橄黄长岩常与碳酸岩相伴生, 玄武岩浆喷出过程中穿透不同时代的千枚岩、砂岩、页岩和灰岩, 被第三系沉积物所覆盖。岩石的结晶程度差, 斑晶主要由橄榄石和单斜辉石组成, 包含部分捕虏晶, 部分岩筒中含有少量的钛金云母斑晶。玄武岩基质常见间粒结构和间隐结构, 含有丰富的深源捕虏体, 部分岩筒中(如分水岭、红崖山和百草山)可见尖晶石二辉橄榄岩、尖晶石方辉橄榄岩和纯橄岩捕虏体(Su *et al.*, 2009, 2011; 苏本勋等, 2006, 2007)。

3 样品与实验方法

3.1 样品及处理

高钾质玄武岩研究样品主要为甘肃省礼县白关乡分水岭的钾霞橄黄长岩和钾玄岩, 以及上杜家和红花湾岩筒的钾霞橄黄长岩, 具斑状结构、气孔构造和致密块状构造等, 赋存有地幔捕虏体。相关岩石学及地球化学特征见喻学惠(1994)和喻学惠等(2001, 2005, 2009)。

通过薄片显微岩石学观察, 选择新鲜的样品去除表层部分后, 把样品破碎至60~80目, 在双目显微镜下手工挑选出新鲜纯净的橄榄石(Olv)和斜长石(Pl)斑晶单矿物以及基质(Mtx)。依次用0.3mol/L的HCl浸泡样品24h以除去可能

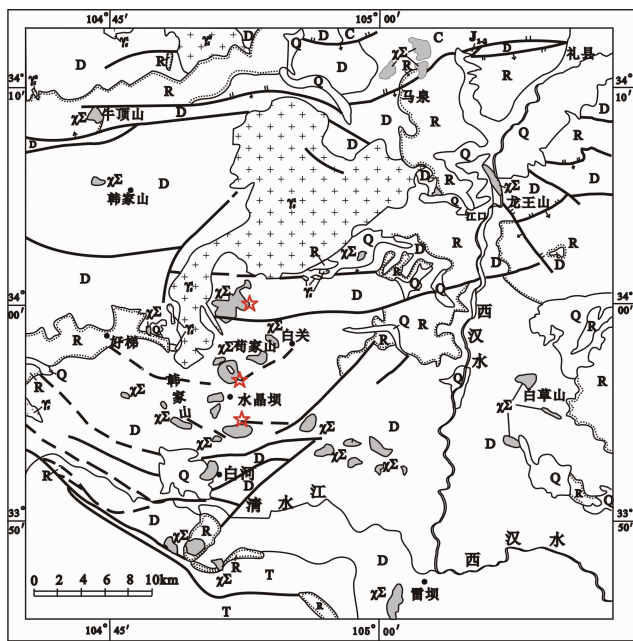


图1 西秦岭新生代高钾质火山岩地质分布图(据喻学惠等,2004)

1-第四系;2-新生代火山岩;3-第三系砂岩、页岩和砾岩;4-燕山期花岗岩;5-印支期花岗岩;6-不同时代地层:J₁₋₂-中-下侏罗统砂页岩和砂砾岩,T-三叠系砂岩、板岩和灰岩,C-石炭系灰岩、页岩和砂岩,D-泥盆系板岩、粉砂岩和千枚岩;7-断层;8-地质界线;9-地层不整合界线;10-河流;11-采样点

Fig. 1 Geological map of Cenozoic high-potassic basalts in western Qinling, China(after Yu et al., 2004)

1-Quaternary;2-Cenozoic volcanic rocks;3-Tertiary sandstone, shale and conglomerate;4-granite in Yanshanian period;5-granite in Indosinian period;6-strata of different stages: J₁₋₂-Middle-lower Jurassic sandy shale and glutenite, T-Triassic sandstone, slate and limestone, C-Carboniferous limestone, shale and sandstone, D-Devonian slate, siltite and phyllite; 7-faults; 8-geological boundary; 9-stratigraphic unconformity boundary;10-river;11-sampling location

存在的次生碳酸盐或蚀变部分。用蒸馏水反复冲洗至中性后,依次用分析纯级 CH₂Cl₂ 和丙酮超声波清洗以除去表面吸附的有机质,在 100℃ 条件下烘干。详细的样品处理方法见 Zhang et al. (2007)。

3.2 实验方法

流体化学组成分析采用改进的在线真空分步加热质谱法完成。该方法克服了样品释出流体组分间相互反应对测试数据的影响(张铭杰等,2000;Zhang et al., 2004, 2007),通过控制加热温度有效地分离岩浆矿物中不同赋存状态的流体挥发份,并可恢复高温条件下与岩浆平衡的流体挥发份组成,并对含 C、H、O、S 和 N 的挥发份进行精确测定(Javoy and Pineau, 1991; Zhang et al., 2009)。分步加热装置由一个石英

样品管和液氮冷阱组成。从 200℃ 开始升温,以 100℃ 为升温段,每个温度点恒温 1h,最高加热温度为 1200℃,样品加热过程中采用液氮冷阱冷冻分离样品释出的低冰点流体挥发份,如 CO₂ 和 H₂O 等,有效地阻止了释出流体挥发份间高温反应形成新的流体挥发份相(Zhang et al., 2007, 2009)。流体组分提取装置和详细的实验步骤见 Zhang et al. (2004, 2007) 描述。CO₂ 和 H₂ 等主要挥发份测量的相对误差小于 1%, H₂O 的测量误差小于 5% (张铭杰等,2002)。

碳同位素以 CO₂ 和 CH₄ 为测试对象,采用分步加热-氦载气-分子筛-GC-C-稳定同位素质谱计系统测定,CO₂ 和 CH₄ 提取装置由一个石英样品管和分子筛吸附阱组成。分子筛预先在 400℃ 加热、氦载气驱赶净化,样品在不同温度段释出的 CO₂ 和 CH₄ 组分用分子筛-液氮冷冻吸附收集,每一温度点恒温 1h 后采用加热分子筛(~96℃)解吸 CO₂ 和 CH₄ 组分,用氦载气载入在线 GC-C-MS 系统,通过 25m 长的 C-2000 毛细管柱分离 CO₂ 和 CH₄ 组分,He 载气流速 12mL/min,柱升温范围为 30~200℃,升温速率 10℃/min。分离的组分经燃烧系统转化为 CO₂,进入 Delta-plus XP 稳定同位素质谱计测量碳同位素组成。δ¹³C 值采用 PDB 标准,系统误差小于 1.6‰。详细分析步骤见 Zhang et al. (2007)。

4 结果

4.1 流体挥发份释出特征

在分步加热过程中,西秦岭新生代高钾质玄武岩中橄榄石和斜长石斑晶及基质的流体挥发份阶段性释出,不同矿物相斑晶和基质中流体挥发份的释出特征、化学组成、含量和碳同位素组成有所不同(表 1、图 2)。

根据分步加热过程中高钾质玄武岩中橄榄石和斜长石斑晶及基质中流体组分的释放特征(图 2),在 200~400℃、400~800℃ 和 800~1200℃ 释出的流体挥发份可能来源不同,并具有不同的地球化学意义(Zhang et al., 2007, 2009):

- (1) 橄榄石斑晶流体挥发份释出温度范围高,主要在 900~1200℃ 释出(图 2a, b),水主要在 400~600℃ 释出(图 2a);
- (2) 斜长石斑晶和基质流体组分含量高,在 200~400℃、400~800℃ 和 800~1200℃ 三个温度段释出,释出温度范围低(图 2c, d),主释气峰分别在 200~400℃ (斜长石)和 400~800℃ (基质),水主要在 200~400℃ 释出(图 2c)。

橄榄石斑晶流体挥发份在 200~600℃、600~900℃ 和 900~1200℃ 三个温度段释出(图 2a, b),与地幔捕虏体及超镁铁质岩侵入体的橄榄石流体组分释出特征及组成明显不同。主释气峰温度(900~1200℃)明显高于地幔捕虏体及超镁铁质岩体中的橄榄石(400~800℃)(Zhang et al., 2004, 2007, 2010)。

4.2 流体挥发份化学组成

西秦岭新生代高钾质玄武岩流体组分化学组成平均以

表 1 西秦岭高钾质玄武岩不同温度段释出流体组分的含量 ($\text{mm}^3 \cdot \text{STP/g}$) 及碳同位素组成 ($\text{vPDB}\%$)Table 1 The chemical ($\text{mm}^3 \cdot \text{STP/g}$) and carbon isotopic ($\text{vPDB}\%$) compositions of volatiles at different temperatures in Cenozoic high-potassic basalts in western Qinling, China

样品号	地点	矿物	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	含量 ($\text{mm}^3 \cdot \text{STP/g}$)												$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ($\%$)		
				H_2	He	CH_4	N_2	CO	C_2H_6	H_2S	CO_2	C_3H_8	C_4H_{10}	SO_2	H_2O	CO_2	CH_4	
BG3-1	分水岭	Mtx	200 ~ 400	4.12	0.05	0.17	2.52	1.48	0.11	0.16	69.86	0.27	0.18	7833.95	-13.64	-43.24		
			400 ~ 800	0.53	0.05	2.03	3.21	1.06	0.13	1.51	318.96	0.01	0.03	22.93	8927.73	-13.92	-34.03	
			800 ~ 1200	0.22	0.05	3.32	0.73	2.33	0.06	0.64	277.44	0.03	0.03	131.70	559.31	-12.13	-34.29	
BG3-2	分水岭	Olv	200 ~ 600	0.29	0.09	0.08	19.31	0.02	0.03	0.21	14.58	0.02	0.40	81.81	-23.27	-42.35		
			600 ~ 900	0.03	0.09	0.19	12.86	0.41	0.06	0.16	16.98	0.02	0.02	4.27	17.20	-23.28	-39.25	
			900 ~ 1200	0.04	0.09	1.99	14.40	0.02	0.02	0.28	14.41	0.11	0.11	85.61	6.13	-22.63		
BG4-1	上杜家	Mtx	200 ~ 400	1.43	0.10	0.11	2.35	2.35	0.04	0.06	19.54	0.03	3.17	1331.20	-12.86	-44.22		
			400 ~ 800	0.41	0.10	1.56	2.81	2.81	0.14	0.54	56.51	0.03	0.09	63.82	4112.69	-13.19	-36.61	
			800 ~ 1200	0.42	0.18	3.57	3.08	3.08	0.06	0.54	22.65	0.11	0.11	158.97	37.83	-12.82	-34.05	
BG4-2	上杜家	Olv	200 ~ 600	3.93	0.14	0.43	31.46	1.35	0.12	0.18	15.40	0.06	0.10	2.00	-26.21	-39.95		
			600 ~ 900	0.87	0.22	0.25	30.35	17.52	0.36	0.25	19.37	0.22	0.22	0.06	2.00	-25.26	-38.27	
			900 ~ 1200	0.21	0.09	0.21	26.02	14.38	0.25	2.52	19.70	0.05	0.05	0.05	0.05	-25.85	-38.17	
BG5-1	分水岭	Mtx	200 ~ 400	0.36	0.03	0.03	10.48	0.14	0.14	0.02	54.13	0.04	0.03	10441.01	-12.27	-43.91		
			400 ~ 800	0.05	0.52	0.52	12.99	0.11	0.69	482.61	0.04	0.02	1.90	8789.03	-12.65	-39.85		
			800 ~ 1200	0.02	0.74	0.74	17.10	0.02	0.09	171.84	0.02	0.02	25.33	21.08	-12.79	-41.54		
BG5-2	分水岭	Pl	200 ~ 400	1.42	0.21	0.21	22.82	1.30	0.13	0.02	3.58	0.12	0.02	13611.72				
			400 ~ 800	0.61	27.15	27.15	49.85	1.06	0.36	1.01	193.26	0.11	0.11	5237.09				
			800 ~ 1200	0.10	0.35	0.58	26.65	0.32	1.31	53.75	0.05	0.15	19.05	229.35				
BG6-1	红花湾	Mtx	200 ~ 400	1.88	0.03	0.03	12.69	0.01	0.01	30.69	0.01	0.06	396.86	-16.43	-43.21			
			400 ~ 800	1.02	0.22	0.22	15.17	0.11	0.11	54.28	0.04	0.04	1.81	842.13	-14.32	-39.59		
			800 ~ 1200	0.07	1.80	1.80	17.77	0.07	0.59	137.66	0.07	0.07	66.57	65.26	-11.67	-41.81		
BG6-2	红花湾	Olv	200 ~ 600	0.31	0.09	0.14	28.63	0.37	0.10	19.18	0.10	1.24	39.64	-21.12	-39.48			
			600 ~ 900	0.10	0.13	0.36	20.54	0.92	0.14	38.89	0.13	0.13	8.22	7.57	-21.38	-41.26		
			900 ~ 1200	0.06	2.47	2.47	19.65	0.11	0.36	19.87	0.14	0.14	106.19	15.09	-20.85	-41.49		

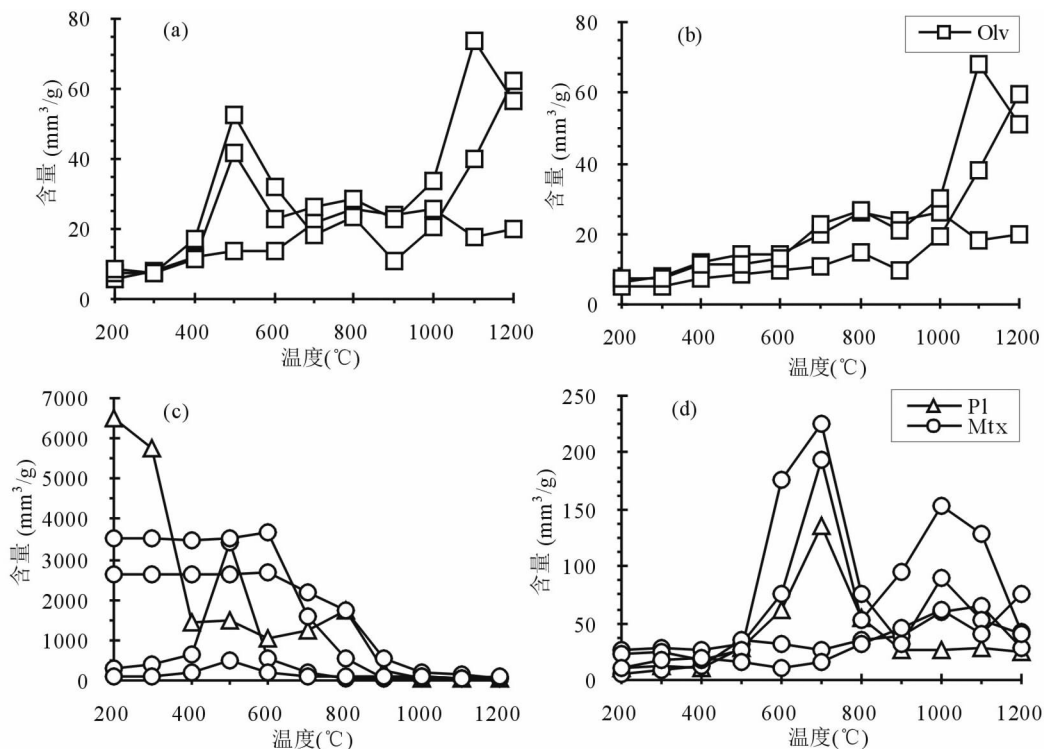


图2 高钾质玄武岩中橄榄石斑晶(Olv)(a、b)和斜长石斑晶(Pl)和基质(Mtx)(c、d)不同温度段释出流体组分的含量(mm³/g)

(a、c)为总流体组成;(b、d)为除水外的流体组成

Fig.2 The contents of volatiles (mm³/g) released at different temperatures from olivine (Olv) (a, b) and plagioclase (Pl) phenocrysts and matrix (Mtx) (c, d) in high-potassic basalts

(a, c) are total volatiles, (b, d) are the rest volatiles except for H₂O

H₂O (7825.71 mm³·STP/g, STP - 标准温度压力条件) 为主, 其次为 CO₂ (265.64 mm³/g) 和 SO₂ (87.73 mm³/g)。不同矿物相斑晶和基质中流体组分化学组成不同。橄榄石斑晶流体组分平均含量低(271.69 mm³/g), 以 SO₂ (平均 68.72 mm³/g)、N₂ (67.74 mm³/g)、CO₂ (59.46 mm³/g) 和 H₂O (56.48 mm³/g) 为主。橄榄石斑晶主释气峰 900 ~ 1200°C 释出流体组成以 SO₂ (63.95 mm³/g) 为主, 其次为 N₂ (20.02 mm³/g) 和 CO₂ (17.99 mm³/g)。

斜长石斑晶和基质流体挥发份含量较高, 均以 H₂O 为主, 平均分别为 19078.16 mm³/g 和 10839.52 mm³/g。斜长石斑晶的主释气峰 (200 ~ 400°C) 流体组成以 H₂O (13611.72 mm³/g) 为主, 其次为 N₂ (22.82 mm³/g); 基质的主释气峰 (400 ~ 800°C) 流体组成主要为 H₂O (5667.89 mm³/g), 其次为 CO₂ (228.09 mm³/g) 和 SO₂ (22.62 mm³/g)。

西秦岭新生代高钾质玄武岩流体挥发份组成的一个显著特征是从橄榄石斑晶、基质到斜长石斑晶, 流体挥发份主要释出温度范围逐渐降低, H₂O 含量逐步升高 (56.48 mm³/g、10839.52 mm³/g 和 19078.16 mm³/g)。另外一个显著特征是流体组分中具有一定含量的 He (0 ~ 0.45 mm³/g), 与古老的西伯利亚地幔柱成因的大火成岩省 (250 Ma) 相似 (Tang et al., 2011)。

4.3 流体挥发份碳同位素组成

橄榄石斑晶在 200 ~ 600°C、600 ~ 900°C 和 900 ~ 1200°C 释出 CO₂ 的 δ¹³C_{CO₂} 值较轻, 平均分别为 -23.53‰、-23.30‰ 和 -23.11‰ (图 3a), δ¹³C_{CH₄} 平均分别为 -40.59‰、-39.59‰ 和 -39.83‰。基质在 200 ~ 400°C、400 ~ 800°C 和 800 ~ 1200°C 释出 CO₂ 的 δ¹³C 值相对较重, 平均分别为 -13.80‰、-13.52‰ 和 -12.35‰, δ¹³C_{CH₄} 平均值分别为 -43.65‰、-37.52‰ 和 -37.92‰, 介于地幔与地壳的碳同位素值之间 (图 3b)。

橄榄石斑晶多为玄武岩浆深部岩浆房中早期结晶的矿物, 其 CO₂ 的 δ¹³C_{CO₂} 值 (-26.21‰ ~ -20.85‰, 平均 -23.32‰) 低于喷发脱气的基质中的 δ¹³C_{CO₂} 值 (-16.43‰ ~ -11.67‰, 平均 -13.22‰)。随加热温度的升高, CH₄ 含量增加, δ¹³C_{CH₄} 逐步变重。

5 讨论

5.1 流体挥发份的类型

由于严格的样品前处理去除了样品表面吸附的大气来

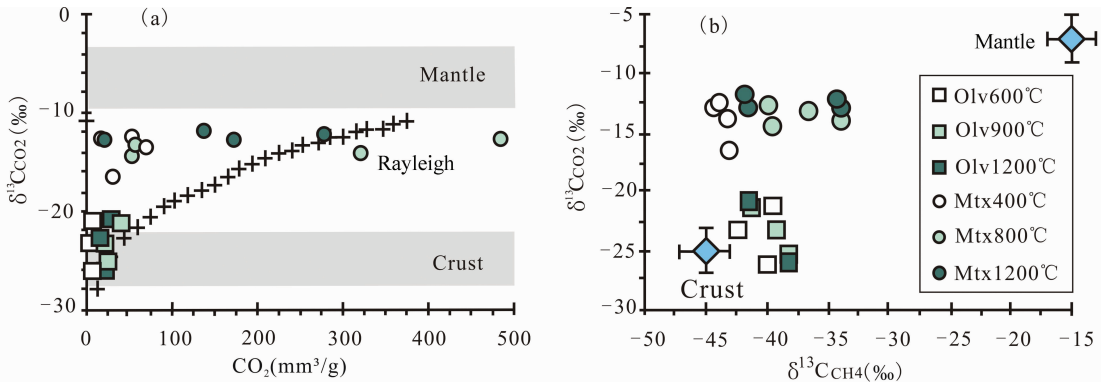


图3 高钾质玄武岩中橄榄石斑晶和基质中 CO_2 碳同位素与含量 (mm^3/g) (a) 和 CH_4 碳同位素 (b) 的相关图

Rayleigh-瑞利分馏脱气曲线(碳同位素初始值为 -11‰ , $1000\ln\alpha = -4.6\text{‰}$)

Fig. 3 Plots showing variations of $\delta^{13}\text{C}$ (‰ vs. PDB) of CO_2 vs. CO_2 contents (mm^3/g) (a) and $\delta^{13}\text{C}$ (‰ vs. PDB) of CH_4 (b) in high-potassic basalts

Rayleigh-Rayleigh degassing curve of carbon isotope (initial value of $\delta^{13}\text{C}$ is -11‰ , $1000\ln\alpha = -4.6\text{‰}$)

源挥发份及次生碳酸盐等,样品加热过程中采用液氮冷阱阻止了样品释出挥发份在高温条件下相互反应,因此分步加热过程中样品释出的流体挥发份主要来源于矿物结晶时捕获的岩浆挥发份,以及后期作用过程中捕获的后期流体挥发份,如后期交代作用流体或蚀变作用流体(樊祺诚等,1992,1993;张铭杰等,2002;胡沛青等,2010),二者可能分别保存于矿物原始流体包裹体、矿物晶格缺陷与空隙和次生流体包裹体中。

(1)原始岩浆流体挥发份:高钾质玄武岩浆起源于交代地幔。橄榄石斑晶大多是深部岩浆房中玄武岩浆早期结晶的矿物,没有经过后期改造的橄榄石斑晶中的流体组分可反映初始玄武岩浆的流体介质组成(Nikogosian and van Bergen, 2010; Su *et al.*, 2010a, 2011; Gaeta *et al.*, 2011)。已有研究表明橄榄石 900 ~ 1200°C 温度段释出的流体组分主要来源于矿物晶格缺陷和空隙中的流体,以及部分纳米级流体包裹体,可代表原始岩浆的流体组成(Zhang *et al.*, 2009, 2010),流体挥发份主要为 SO_2 ($63.95\text{mm}^3/\text{g}$)、 N_2 ($20.02\text{mm}^3/\text{g}$) 和 CO_2 ($17.99\text{mm}^3/\text{g}$)。600 ~ 900°C 释出的流体组分主要来自原始流体包裹体的爆裂释气,可代表玄武质岩浆橄榄石结晶过程中的挥发份,主要为 CO_2 ($25.08\text{mm}^3/\text{g}$) 和 N_2 ($21.25\text{mm}^3/\text{g}$) 以及少量的 H_2O ($8.92\text{mm}^3/\text{g}$)、 CO ($6.29\text{mm}^3/\text{g}$) 和 SO_2 ($4.18\text{mm}^3/\text{g}$)。 CO_2 和 CH_4 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较轻。

(2)演化岩浆流体挥发份:斜长石斑晶可能是玄武岩浆深部岩浆房晚期结晶或上升过程中结晶的矿物,其中的流体组分可代表玄武岩浆演化的流体介质;而基质中的流体组分则代表岩浆演化、脱气后的残余挥发份。二者在 400 ~ 800°C 释出的流体组分化学组成相似,主要为 H_2O (分别为 $5667.89\text{mm}^3/\text{g}$ 和 $5237.09\text{mm}^3/\text{g}$),其次为 CO_2 ($228.09\text{mm}^3/\text{g}$ 和 $193.26\text{mm}^3/\text{g}$),以及少量的 SO_2 ($22.62\text{mm}^3/\text{g}$ 和 $0.11\text{mm}^3/\text{g}$) 和 N_2 ($8.74\text{mm}^3/\text{g}$ 和 $49.85\text{mm}^3/\text{g}$); CO_2 和 CH_4

的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较重。橄榄石 200 ~ 600°C 释出的流体组分与之相似,以 H_2O ($40.48\text{mm}^3/\text{g}$) 为主,其次为 N_2 ($26.47\text{mm}^3/\text{g}$) 和 CO_2 ($16.39\text{mm}^3/\text{g}$),但绝对含量较低,可能为橄榄石斑晶与玄武岩熔体达到平衡时的流体挥发份。

与原始岩浆流体挥发份化学组成相比,演化岩浆流体挥发份中 H_2O 和 CO_2 明显增高,根据 H_2O 和 CO_2 等流体挥发份在玄武岩浆与矿物中的溶解度和分配系数(Newman and Lowenstern, 2002; Hauri *et al.*, 2006; Wade *et al.*, 2006)推断玄武岩浆演化上升过程中加入了大量的 H_2O 和 CO_2 。

(3)后期流体挥发份:斜长石斑晶主释气峰与基质 200 ~ 400°C 释出的流体组分相似,斜长石以 H_2O ($13611.72\text{mm}^3/\text{g}$) 为主,其次为 N_2 ($22.82\text{mm}^3/\text{g}$);基质以 H_2O ($5000.76\text{mm}^3/\text{g}$) 为主,其次为 CO_2 ($43.55\text{mm}^3/\text{g}$),与岩浆流体挥发份的组成明显不同,可能为后期交代作用过程中捕获的流体挥发份。

5.2 流体挥发份的来源

西秦岭新生代高钾质玄武岩流体挥发份碳同位素组成表明,流体挥发份可能来源于地幔与地壳端元组分的混合(图3,4)。

与华北克拉通新生代碱性玄武岩及其地幔捕虏体等相比(Zhang *et al.*, 1999, 2004, 2007),西秦岭高钾质玄武岩流体挥发份中具有相对较高含量的 He,与西伯利亚二叠纪地幔柱成因大火成岩省(250Ma)相似,含有一定数量可检测的 He(Tang *et al.*, 2011),表明其可能起源于较深的地幔。因为新生代高钾质玄武岩形成时间短,含量较低的 U 和 Th 等放射性元素形成的放射性成因 He 的贡献极低,因此斑晶矿物和基质流体组分较高含量的 He 可能来源于未脱气深部地幔。另一方面,高钾质玄武岩浆温度较高(Stoppa and Sharygin, 2009),橄榄石斑晶流体组分主释气峰温度(900 ~ 1200°C)明显高于中国东部地幔捕虏体、祁连山带蛇绿岩

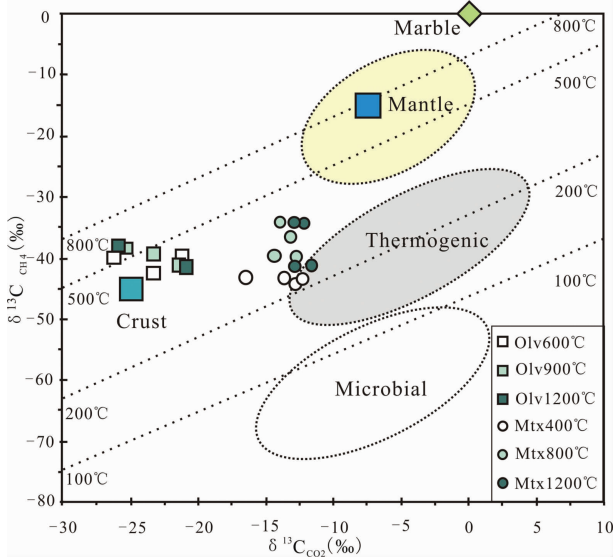


图4 CO₂与CH₄碳同位素图(据Ueno *et al.*, 2006修改)

Microbial-微生物成因组分; Thermogenic-有机质热裂解成因组分; Marble-大理岩来源组分; Mantle-地幔来源组分; Crust-地壳来源组分

Fig. 4 Plot of $\delta^{13}\text{C}$ of CO₂ and CH₄ (after Ueno *et al.*, 2006)

Microbial-microbial component; Thermogenic-thermal cracking component of organic matters; Marble-marble-derived component; Mantle-mantle-derived component; Crust-crust-derived component

套超镁铁质岩及金川超镁铁质岩体中橄榄石的主释气峰(400 ~ 800°C)(Zhang *et al.*, 2004, 2007, 2010; Hu *et al.*, 2007),表明在一定地热梯度下橄榄石捕获流体挥发份的平衡压力较高,即岩浆可能起源于较深的地幔。地质温压计和地球物理方法确定西秦岭软流圈的埋深80 ~ 120km,新生代高钾质玄武岩岩浆起源深度 > 90 ~ 130km(赖绍聪等,1996;喻学惠等,2001,2009;史兰斌等,2003;苏本勋等,2007)也支持这一推断。

橄榄石斑晶中CO₂的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-26.21‰ ~ -20.85‰,平均为-23.32‰)低于基质中CO₂的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-16.43‰ ~ -11.67‰,平均为-13.22‰),CO₂的碳同位素组成与含量的变化特征表明其不可能是脱气作用造成的(图3a)。随加热温度的升高,CH₄含量增加, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 具有变重的趋势,基质中CO₂和CH₄碳同位素组成具有有机质热裂解特征(图4),即CO₂和CH₄来源于岩浆上升过程捕获的沉积有机质。该区伴生的新生代碳酸岩的碳同位素组成平均为-5.62‰(喻学惠等,2003),因而推测碳同位素值从橄榄石斑晶到基质逐渐变重的趋势可能是岩浆演化过程中碳酸岩岩浆的混入,或高钾玄武岩岩浆穿透区域碳酸盐地层时混染造成的。

橄榄石斑晶在600 ~ 900°C和900 ~ 1200°C释出的CO₂的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(平均分别为-23.30‰和-23.11‰)明显轻于地

幔CO₂的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-7 ± 2‰),接近于夏威夷Hualalai二辉岩中CO₂的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-22‰ ~ -26‰,Deines,1989)、中国东部地幔捕虏体CO₂的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(Zhang *et al.*, 2007;樊祺诚等,1996)和沉积有机质CO₂的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-25‰,Deines,2002),揭示源区可能存在再循环地壳组分,但微量元素Nb/U和Nb/Ta比值揭示地壳物质混染程度极低(喻学惠等,2009),结合较高的水含量及CO₂和CH₄碳同位素组成有机质热裂解特征推断,相关的再循环壳源流体组分可能为俯冲洋壳或沉积物板片脱挥发份作用形成的壳源流体挥发份(Gao *et al.*, 2010;Fu *et al.*, 2012;苏本勋等,2006,2007),与古特提斯洋闭合或其后华北板块与扬子板块碰撞有关(Gao *et al.*, 2007)。

5.3 流体挥发份的地幔动力学意义

西秦岭高钾质玄武岩中橄榄石斑晶900 ~ 1200°C释出流体组分以氧化性组分为主,CO₂的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较轻。与华北克拉通岩石圈地幔流体组成(主要为CO和H₂)相比,SO₂含量较高,与比利牛斯山构造岩中高硫橄榄岩(Chaussidon and Lorand,1990)、祁连造山带蛇绿岩套超镁铁质岩(Hu *et al.*, 2007)和苏鲁大陆俯冲地区岩石圈地幔(Zhang *et al.*, 2004, 2007)类似。揭示其形成于造山带、高 f_{O_2} 的混染地幔源区环境(Dunworth and Wilson,1998;Nikogosian and van Bergen, 2010;喻学惠等,2001)。

西秦岭经历多次板块俯冲-碰撞作用的影响,特殊的构造演化环境造成了地幔组成混杂程度和 f_{O_2} 较高。高钾质玄武岩橄榄石和斜长石斑晶及基质在400 ~ 800°C释出流体组成以H₂O为主,表明水在高钾质玄武岩浆演化过程中逐步增加。高钾质玄武岩基质有机质热裂解特征的CO₂和CH₄碳同位素组成表明,俯冲洋壳板片或沉积物脱挥发份作用形成的相关壳源流体在岩浆演化过程中加入到高钾质玄武岩浆中(Avanzinelli *et al.*, 2009;Gao *et al.*, 2010),岩石地球化学资料也支持高钾质玄武岩中存在沉积物的混入(Avanzinelli *et al.*, 2009;Gao *et al.*, 2010)。西秦岭高钾质玄武岩是在印度板块向欧亚大陆俯冲-碰撞、青藏高原强烈隆升引发的拉张环境下,深部地幔流动上涌促使岩石圈部分熔融形成的(Su *et al.*, 2009;苏本勋等,2006;喻学惠等,2009),其深部地幔源区存在俯冲再循环地壳组分,指示该区域可能为相关地幔流动的通道。

6 结论

西秦岭新生代高钾质玄武岩中斑晶和基质流体挥发份化学组成与碳同位素组成研究初步表明:

(1)西秦岭高钾质玄武岩原始岩浆的流体挥发份主要为SO₂、N₂和CO₂。上升过程中加入了大量的H₂O和CO₂。

(2)橄榄石斑晶的流体组份以SO₂和CO₂等氧化性组

份为主,流体挥发份中具有相对较高可检测的 He 与橄榄石斑晶主释气峰温度较高,表明其可能起源于较深的地幔,演化于造山带、高 f_{O_2} 环境。

(3)碳同位素组成揭示其幔源岩浆挥发份中存在俯冲沉积物脱挥发份作用形成的相关壳源流体,高钾玄武质岩浆演化过程中混入碳酸岩岩浆或区域碳酸盐地层组分。

致谢 样品采集和分析过程中喻学惠、胡沛青、刘晓林、任立业、苏本勋和王沪文给予了大力的帮助;樊祺诚和郭正府研究员对文稿的修改提供了建设性的建议和意见;在此表示衷心的感谢。

References

- Avanzinelli R, Lustrino M, Mattei M, Melluso L and Conticelli S. 2009. Potassic and ultrapotassic magmatism in the circum-Tyrrhenian region: Significance of carbonated pelitic vs. pelitic sediment recycling at destructive plate margins. *Lithos*, 113 (1 - 2): 213 - 227
- Carlson RW, Araujo ALN, Junqueira-Brod TC, Gaspar JC, Brod JA, Petrinoic IA, Hollanda MHBM, Pimentel MM and Sichel S. 2007. Chemical and isotopic relationships between peridotite xenoliths and mafic-ultrapotassic rocks from Southern Brazil. *Chemical Geology*, 242(3 - 4): 415 - 434
- Chaussidon M and Lorand JP. 1990. Sulphur isotope composition of orogenic spinel lherzolite massifs from Ariege (North-Eastern Pyrenees, France). *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54(10): 2835 - 2846
- Chen JL, Xu JF, Wang BD, Kang ZQ and Jie L. 2010. Origin of Cenozoic alkaline potassic volcanic rocks at Konglongxiang, Lhasa terrane, Tibetan Plateau: Products of partial melting of a mafic lower-crustal source? *Chemical Geology*, 273(3 - 4): 286 - 299
- Deines P. 1989. Stable isotope variations in carbonatites. In: Bell K (ed.). *Carbonatites: Genesis and Evolution*. London: Unwin Hyman, 301 - 359
- Deines P. 2002. The carbon isotope geochemistry of mantle xenoliths. *Earth Science Reviews*, 58: 247 - 278
- Dunworth EA and Wilson M. 1998. Olivine melilitites of the SW German Tertiary volcanic province: Mineralogy and petrogenesis. *J. Petrol.*, 39: 1805 - 1836
- Fan QC, Liu RX and Peng LG. 1992. The nature of the mantle fluid and its significance in southeast China. *Chinese Science Bulletin*, 17: 1584 - 1587 (in Chinese)
- Fan QC, Liu RX and Yang RY. 1993. LREE-rich CO₂ fluid inclusions in mantle minerals in eastern China and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 9(4): 411 - 417 (in Chinese with English abstract)
- Fan QC, Liu RX, Lin ZR, Chu XL, Zhao R and Huo WG. 1996. Preliminary study of carbon isotope in mantle CO₂ fluid inclusion from eastern China. *Geochimica*. 25(3): 264 - 269 (in Chinese with English abstract)
- Foley SF, Taylor WR and Green DH. 1986. The role of fluorine and oxygen fugacity in the petrogenesis of ultra-potassic rock. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 94: 183 - 192
- Fu PE, Tang QY, Zhang MJ, Zhang ZW, Li LW and Li WY. 2012. The ore genesis of Kalatongke Cu-Ni sulfide deposit, West China: Constrains from volatile chemical and carbon isotopic compositions. *Acta Geologica Sinica*, in press
- Gaeta M, Freda C, Marra F, Di Rocco T, Gozzi F, Arienzo I, Giacio B and Scarlato P. 2011. Petrology of the most recent ultrapotassic magmas from the Roman Province (Central Italy). *Lithos*, 127: 298 - 308
- Gao YF, Hou ZQ, Kamber BS, Wei RH, Meng XJ and Zhao RS. 2007. Lamproitic rocks from a continental collision zone: Evidence for recycling of subduction Tethyan oceanic sediments in the mantle beneath southern Tibet. *Journal of Petrology*, 48: 729 - 752
- Gao YF, Yang ZS, Hou ZQ, Wei RH, Meng XJ and Tian SH. 2010. Eocene potassic and ultrapotassic volcanism in south Tibet: New constraints on mantle source characteristics and geodynamic processes. *Lithos*, 117: 20 - 32
- Hauri EH, Gaetani GA and Green TH. 2006. Partitioning of water during melting of the Earth's upper mantle at H₂O-undersaturated conditions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 248: 715 - 734
- Hu PQ, Zhang MJ, Tang ZL, Li C and Wang JZ. 2007. Chemical and stable isotopic compositions of volatiles in mantle peridotites of the Yushigou ophiolite in Qilian orogenic belt, western China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(1): 169 - 176
- Hu PQ, Zhang MJ, Tang QY, Ye XR, Tang ZL and Li WY. 2010. Noble gas isotopic constrains on mineralization of the Jinchuan Cu-Ni-PGE sulfide deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3375 - 3386 (in Chinese with English abstract)
- Javoy M and Pineau F. 1991. The volatiles record of a "popping" rock from the Mid-Atlantic Ridge at 14°N: Chemical and composition of gas trapped in the vesicles. *Earth and Planetary Science Letters*, 107: 598 - 611
- Lai SC, Deng JF and Zhao HL. 1996. *Volcanism and Tectonic Evolution in North Rim of Tibet Plateau*. Xi' An: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 1 - 138 (in Chinese)
- Lavecchia G, Stoppa F and Creati N. 2006. Carbonatites and kamafugites in Italy: Mantle-derived rocks that challenge subduction. *Annals of Geophysics*, 49(1): 389 - 402
- Mo XX, Zhao ZD, Deng JF, Yu XH, Luo ZH and Dong GC. 2007. Migration of the Tibetan Cenozoic potassic volcanism and its transition to eastern basaltic province: Implications for crustal and mantle flow. *Geoscience*, 21(2): 255 - 264 (in Chinese with English abstract)
- Newman S and Lowenstern JB. 2002. VolatileCalc: A silicate melt H₂O-CO₂ solution model written in visual basic for excel. *Computers and Geosciences*, 28: 597 - 604
- Nikogosian IK and van Bergen MJ. 2010. Heterogeneous mantle sources of potassium-rich magmas in central- southern Italy: Melt inclusion evidence from Roccamonfina and Ernici (Mid Latina Valley). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 197: 279 - 302
- Scordari F, Schingaro E, Lacalamera M and Mesto E. 2012. Crystal chemistry of trioctahedral micas-2M1 from Bunyaruguru kamafugite (southwest Uganda). *American Mineralogist*, 97(2 - 3): 430 - 439
- 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. *Seismol. Geol.*, 4: 525 - 542 (in Chinese with English abstract)
- Stoppa F and Lavecchia G. 1992. Late-Pleistocene ultra-alkaline magmatic activity in the Umbria-Latium Region (Italy): An overview. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 52: 277 - 293
- Stoppa F and Sharygin VV. 2009. Melilitolite intrusion and pelite digestion by high temperature kamafugitic magma at Colle Fabbri, Spoleto, Italy. *Lithos*, 112(3 - 4): 306 - 320
- Su BX, Zhang HF, Xiao Y and Zhao XM. 2006. Characteristics and geological significance of olivine xenocrysts in Cenozoic volcanic rocks from western Qinling. *Progress in Natural Science*, 16(11): 1428 - 1435 (in Chinese with English abstract)
- Su BX, Zhang HF, Wang QY, Sun H, Xiao Y and Ying JF. 2007.

- Spinel garnet phase transition zone of Cenozoic lithospheric mantle beneath the eastern China and western Qinling and its T-P conditions. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (6): 1313 - 1320 (in Chinese with English abstract)
- Su BX, Zhang HF, Ying JF, Xiao Y and Zhao XM. 2009. Nature and processes of the lithospheric mantle beneath the western Qinling: Evidence from deformed peridotite xenoliths in Cenozoic kamafugite from Haoti, Gansu Province, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34: 258 - 274
- Su BX, Zhang HF, Sakyi PA, Ying JF, Tang YJ, Yang YH, Qin KZ, Xiao Y and Zhao XM. 2010a. Compositionally stratified lithosphere and carbonatite metasomatism recorded in mantle xenoliths from the Western Qinling (Central China). *Lithos*, 116: 111 - 128
- Su BX, Zhang HF, Sakyi PA, Qin KZ, Liu PP, Ying JF, Tang YJ, Malaviarachchi SPK, Xiao Y, Zhao XM, Mao Q and Ma YG. 2010b. Formation of melt pocket in mantle peridotite xenolith from western Qinling, Central China: Partial melting and metasomatism. *Journal of Earth Science*, 21 (5): 641 - 668
- Su BX, Zhang HF, Sakyi PA, Yang XY, Ying JF, Tang YJ, Qin KZ, Xiao Y, Zhao XM, Mao WQ and Ma YG. 2011. The origin of spongy texture in minerals of mantle xenoliths from the western Qinling, central China. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 161 (3): 465 - 482
- Tang QY, Zhang MJ, Li C, Zhang MC, Li LW and Cong YN. 2011. The chemical compositions of volatiles in the Siberian large igneous province and its environmental effects. The 11th International Conference of Gas Geochemistry (ICGG11). USA, 110 - 111
- Ueno Y, Yamada K, Yoshida N, Maruyama S and Isozaki Y. 2006. Evidence from fluid inclusions for microbial methanogenesis in the early Archaean era. *Nature*, 440: 516 - 519
- Wade JA, Plank T, Melson WG, Soto GJ and Hauri E. 2006. The volatile content of magmas from Arenal volcano, Costa Rica. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 157: 94 - 120
- Wang YL, Yu XH, Wei YF and Zhu DQ. 2007. The globule segregations in the Cenozoic kamafugite and an inversion of mantle fluid, western Qinling, Gansu Province. *Geoscience*, 21 (2): 307 - 316 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Li XM, Ma ZP, Xu XY and Xia ZC. 2011. Cenozoic volcanism and tectonic evolution of the Tibetan plateau. *Gondwana Research*, 19 (4): 850 - 866
- Yu XH. 1994. Cenozoic potassic ultrabasic volcanic rocks and its genesis in Lixian and Dangchang area, Gansu Province. *Tethyan Geology*, 18: 114 - 129 (in Chinese with English abstract)
- Yu XH and Zhang CF. 1998. Sr, Nd isotope and trace elements geochemical features of the Cenozoic volcanic rocks from west Qinling, Gansu Province. *Earth Science Frontiers*, 5 (4): 314 - 325 (in Chinese with English abstract)
- Yu XH, Mo XX, Flower M, Su SG and Zhao X. 2001. Cenozoic kamafugite volcanism and tectonic meaning in west Qinling area, Gansu Province. *Acta Petrologica Sinica*, 17 (3): 366 - 377 (in Chinese with English abstract)
- Yu XH, Mo XX, Su SG, Dong FL, Zhao X and Wang C. 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, Wang YL, Xiao Z and Zhu DQ. 2004. Trace element, REE and Sr, Nd, Pb isotopic geochemistry of Cenozoic kamafugites and carbonatite from west Qinling, Gansu Province: Implication of plume-lithosphere interaction. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 483 - 494 (in Chinese with English abstract)
- Yu XH, Zhao ZD, Mo XX, Zhou S, Zhu DQ and Wang YL. 2005. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating for Cenozoic kamafugites from western Qinling in Gansu Province. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2638 - 2643 (in Chinese)
- Yu XH, Mo XX, Zhao ZD, Huang XK, Li Y, Chen YF and Wei YF. 2009. Two types of Cenozoic potassic volcanic rocks in West Qinling, Gansu Province: Their petrology, geochemistry and petrogenesis. *Earth Science Frontiers*, 16 (2): 79 - 89 (in Chinese with English abstract)
- Zhang MJ, Wang XB, Liu G, Wen QB, Li LW. 1999. Fluid compositions and carbon & oxygen isotope geochemistry of Cenozoic alkali basalts in eastern China. *Chinese J. Geochemistry*, 18 (3): 276 - 282
- Zhang MJ, Wang XB and Li LW. 2000. Composition of mantle fluid. *Earth Science Frontiers*, 7 (2): 401 - 412 (in Chinese with English abstract)
- Zhang MJ, Wang XB, Li LW and Wang YL. 2002. Mode of occurrence of H₂ in mantle-derived minerals. *Acta Geologica Sinica*, 76 (1): 39 - 44 (in Chinese with English abstract)
- Zhang MJ, Wang XB, Liu G, Zhang TW and Bo WR. 2004. The compositions of upper mantle fluids beneath Eastern China: Implications for mantle evolution. *Acta Geologica Sinica*, 78 (1): 125 - 130
- Zhang MJ, Hu PQ, Niu YL and Su SG. 2007. Chemical and stable isotopic constraints on the nature and origin of volatiles in the subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China. *Lithos*, 96: 55 - 66
- Zhang MJ, Niu YL and Hu PQ. 2009. Volatiles in the mantle lithosphere. In: Anderson JE and Coates RW (eds.). *The Lithosphere*. New York: Nova Science Publishers, 171 - 212
- Zhang MJ, Shen HF, Tang QY, Hu PQ and Fu PE. 2010. Volatile composition and carbon isotope constraints on ore genesis of the Jinchuan Cu-Ni deposit, western China. 11th International Platinum Symposium. Ontario, Canada, Ontario Geological Survey, Miscellaneous Release-Data, 269
- Zhao ZD, Mo XX, Dilek Y, Niu Y, DePaolo DJ, Robinson P, Zhu DC, Sun CG, Dong GC, Zhou S, Luo ZH and Hou ZQ. 2009. Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic compositions of the post-collisional ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and implications for India intra-continental subduction beneath southern Tibet. *Lithos*, 113 (1 - 2): 190 - 212
- Zou HB and Fan QC. 2010. U-Th isotopes in Hainan basalts: Implications for sub-asthenospheric origin of EM2 mantle endmember and the dynamics of melting beneath Hainan Island. *Lithos*, 116: 145 - 152

附中文参考文献

- 樊祺诚, 刘若新, 彭礼贵. 1992. 我国东南沿海地区地幔流体性质及其意义. *科学通报*, 17: 1584 - 1587
- 樊祺诚, 刘若新, 杨瑞瑛. 1993. 地幔橄榄岩矿物中富稀土元素的 CO₂ 流体包裹体及其地球化学意义. *岩石学报*, 9 (4): 411 - 417
- 樊祺诚, 刘若新, 林卓然, 储雪蕾, 赵瑞, 霍卫国. 1996. 中国东部地幔 CO₂ 流体包裹体的碳同位素初步研究. *地球化学*, 25 (3): 264 - 269
- 胡沛青, 张铭杰, 汤庆艳, 叶先仁, 汤中立, 李文渊. 2010. 金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿过程稀有气体同位素组成示踪. *岩石学报*, 26 (11): 3375 - 3386
- 赖绍聪, 邓晋福, 赵海玲. 1996. 青藏高原北缘火山作用与构造演化. 西安: 陕西科学技术出版社, 1 - 138
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 喻学惠, 罗照华, 董国臣. 2007. 青藏高原新生代钾质火山活动的时空迁移及向东部玄武岩省的过渡: 壳幔深部物质流的暗示. *现代地质*, 21 (2): 255 - 264

- 史兰斌, 林传勇, 陈孝德. 2003. 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, 4: 525 - 542
- 苏本勋, 张宏福, 肖燕, 赵新苗. 2006. 西秦岭宕昌好梯新生代火山岩中橄榄石捕虏晶的特征及其地质意义. 自然科学进展, 16(11): 1428 - 1435
- 苏本勋, 张宏福, 王巧云, 孙赫, 肖燕, 英基丰. 2007. 中国东部及西秦岭地区新生代岩石圈地幔中的相转变带及其温压条件. 岩石学报, 23(6): 1313 - 1320
- 王永磊, 喻学惠, 韦玉芳, 朱德勤. 2007. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩中的球状分凝体及地幔流体反演. 现代地质, 21(2): 307 - 316
- 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: 114 - 129
- 喻学惠, 张春福. 1998. 甘肃西秦岭新生代碱性火山岩的 Sr, Nd 同位素及微量元素地球化学特征. 地学前缘, 5(4): 314 - 325
- 喻学惠, 莫宣学, Flower M, 苏尚国, 赵欣. 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): 366 - 377
- 喻学惠, 莫宣学, 苏尚国, 董方浏, 赵欣, 王晨. 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(1): 105 - 112
- 喻学惠, 赵志丹, 莫宣学, 王永磊, 肖振, 朱德勤. 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. 岩石学报, 20: 483 - 494
- 喻学惠, 赵志丹, 莫宣学, 周肃, 朱德勤, 王永磊. 2005. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素定年及其地质意义. 科学通报, 50: 2638 - 2643
- 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
- 张铭杰, 王先彬, 李立武. 2000. 地幔流体组成. 地学前缘, 7(2): 401 - 412
- 张铭杰, 王先彬, 李立武, 王永莉. 2002. 幔源矿物中 H₂ 赋存状态的初步研究. 地质学报, 76(1): 39 - 44