

青藏高原南部地幔包体的发现及其意义*

赵志丹¹ 莫宣学^{1**} 孙晨光¹ 朱弟成¹ 牛耀龄² 董国臣¹ 周肃¹ 董昕¹ 刘勇胜³

ZHAO ZhiDan¹, MO XuanXue^{1**}, SUN ChenGuang¹, ZHU DiCheng¹, NIU YaoLing², DONG GuoChen¹, ZHOU Su¹, DONG Xin¹ and LIU YongSheng³

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

2. 杜伦大学地球科学系, 杜伦 DH1 3LE, 英国

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

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

2. Department of Earth Sciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2007-12-18 收稿, 2008-01-30 改回.

Zhao ZD, Mo XX, Sun CG, Zhu DC, Niu YL, Dong GC, Zhou S, Dong X and Liu YS. 2008. Mantle xenoliths in southern Tibet: geochemistry and constraints for the nature of the mantle. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2):193–202

Abstract The nature of the subcontinental mantle of Tibetan Plateau is not well-known, although lots of postcollisional volcanic rocks in Tibet have been inferred to be generated by low degrees of partial melting from the upper mantle. The key problem is that mantle-derived xenoliths and megacrysts hosted in potassic and ultrapotassic volcanic rocks are rarely found in the hinterland of Tibetan plateau. Here we report our major element data of minerals of the mantle xenoliths hosted in the Sailipu volcanic rocks (trachyandesite, with an age of ~17Ma, have typical ultrapotassic features that similar to that found in southern Tibet). The xenoliths, ranging in size from 0.5cm to 1.5cm in diameter, can be divided into two groups. The first group is pyroxenites (Opx + Cpx), and the second is lherzolite (Ol + Opx + Cpx ± Phl ± Sp). The compositions of olivine ($Mg^{\#} = 89 \sim 90$, $CaO = 0.05\% \sim 0.12\%$, $TiO_2 < 0.03\%$, $NiO = 0.29\% \sim 0.80\%$), Cpx ($Mg^{\#} = 88 \sim 91$, $Al_2O_3 = 5.5\% \sim 7\%$), Opx ($TiO_2 = 0.05\% \sim 0.15\%$, $Al_2O_3 = 2\% \sim 5\%$) and spinel ($Mg^{\#} = 58 \sim 76$, $Cr^{\#} = 10 \sim 44$, $Cr_2O_3 = 9\% \sim 35\%$, $MnO = 0.09\% \sim 0.24\%$, $FeO = 11\% \sim 18\%$, $Al_2O_3 = 29\% \sim 57\%$, $MgO = 16\% \sim 21\%$) show similar features to that in the Cenozoic mantle xenoliths in eastern China. The calculated temperatures of the xenoliths are 990 ~ 1140°C at the given pressures of 16 ~ 20kb. The geotherm suggested by this P-T conditions is similar to that in eastern China, Kenya and other rift-related upper mantle regimes, implying that the regional extension beneath southern Tibet in Miocene, although India were colliding with Asia during that time. Multi-stage metasomatic processes could be found in the samples, including water-bearing phlogopite, quartz in pyroxenites, and the rim-core composition variation in spinel. The secondary spinels along with neighboring phlogopite suggest that a potassic, host-rock like metasomatic agent that enriched in K, Si and H₂O, should have played an important role in modifying the upper mantle beneath southern Tibet. Further study on the Sailipu mantle xenoliths will be helpful in revealing the composition, regime, and processes of the upper mantle beneath southern Tibet, and in discussing the origin of the orogenic ultrapotassic rocks.

Key words Mantle xenoliths; Ultrapotassic rocks; Major elements; Sailipu; Tibetan Plateau

摘要 尽管青藏高原碰撞后超钾质岩石代表了上地幔低度部分熔融的产物,增加了 对地幔的了解,但是对青藏高原陆下岩石圈地幔的性质依然缺乏清楚认识,其中一个最主要的问题是高原腹地的超钾质岩石中一直缺少幔源包体和巨晶。本文报导了青藏高原南部赛利普粗面安山岩(具有典型的超钾质岩石特征,年龄约为 17Ma)中产出的地幔包体的矿物主量元素

* 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412603)、国家自然科学基金(40473020,40503005,40572048,40672044)、中国地调局综合研究项目、高等学校学科创新引智计划(B07011)、中科院广州地化所同位素开放实验室基金和教育留学回国人员科研启动基金资助。

第一作者简介: 赵志丹, 男, 1968 年生, 博士, 教授, 岩石学和地球化学专业, E-mail: zdzhao@cugb.edu.cn

** 通讯作者: 莫宣学, E-mail: moxx@cugb.edu.cn

成分。包体大小为 0.5cm ~ 1.5cm, 主要为两类, 一类是辉石岩 (Opx + Cpx), 另一类为二辉橄榄岩 (Ol + Opx + Cpx ± Phl ± Sp)。包体中橄榄石 ($Mg^{\#} = 89 \sim 90$, $CaO = 0.05\% \sim 0.12\%$, $TiO_2 < 0.03\%$, $NiO = 0.29\% \sim 0.80\%$), 单斜辉石 ($Mg^{\#} = 88 \sim 91$, $Al_2O_3 = 5.5\% \sim 7\%$), 斜方辉石 ($TiO_2 = 0.05\% \sim 0.15\%$, $Al_2O_3 = 2\% \sim 5\%$) 和尖晶石 ($Mg^{\#} = 58 \sim 76$, $Cr^{\#} = 10 \sim 44$, $Cr_2O_3 = 9\% \sim 35\%$, $MnO = 0.09\% \sim 0.24\%$, $FeO = 11\% \sim 18\%$, $Al_2O_3 = 29\% \sim 57\%$, $MgO = 16\% \sim 21\%$) 的成分与中国东部新生代玄武岩中的地幔包体特征一致。包体的温度为 990 ~ 1140°C、压力为 16 ~ 20kb, 显示的地温曲线与中国东部、东非肯尼亚等世界典型裂谷区的上地幔特征一致, 表明青藏高原南部在中新世尽管处于印度与亚洲大陆的挤压汇聚状态, 但是仍具有区域性伸展作用存在, 这与藏南广泛发育的南北向裂谷和地表高热流是吻合的。包体中含水金云母与石英的出现以及尖晶石成分不均一性等揭示了包体中多期交代作用过程。与金云母共生的尖晶石后期改造作用表明导致藏南上地幔改造的交代流体应是与寄主火山岩成分接近的富 K, Si 和 H₂O 的流体。藏南地幔包体的深入研究将对揭示青藏高原地幔的成分、状态与深部作用过程以及为更好解释超钾质岩石的成因提供更多的证据。

关键词 地幔包体; 超钾质岩石; 主量元素; 赛利普; 青藏高原

中图法分类号 P588.125; P588.144

青藏高原以其面积 55 万 km²、平均海拔 5023m、占全球平均海拔 4000m 以上陆地的 82% 而成为世界上规模最大、海拔最高的造山带 (Fielding *et al.*, 1994), 是我国研究年轻造山带得天独厚的天然实验室, 有关青藏高原岩石圈演化与高原隆升的研究一直得到国内外学者的重视。印度与亚洲大陆碰撞之后发育的岩浆作用是揭示高原岩石圈性质和浅部隆升过程等构造事件的真实记录 (Yin and Harrison, 2000; Tapponnier *et al.*, 2001; Chung *et al.*, 2005; Mo *et al.*, 2006), 尤其是近年来不断发现的碰撞后幔源超钾质岩石, 对揭示高原岩石圈地幔的性质提供了重要的信息 (Turner *et al.*, 1993, 1996; Miller *et al.*, 1999; Williams *et al.*, 2001, 2004; Ding *et al.*, 2003; Nomade *et al.*, 2004; Gao *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2006; 陈建林等, 2006; 赵志丹等, 2006; 孙晨光等, 2007, 2008)。但是长期以来, 在高原腹地一直没有发现地幔包体, 无法更好限制高原岩石圈地幔的成分、性质和状态, 这成为制约深入探讨大陆碰撞背景下高原陆下岩石圈地幔特征的关键。

已知在青藏高原发现的地幔包体主要集中在高原周边地区, 如在高原东缘的云南“三江”和马关地区的富钾岩石 (喻学惠等, 2006; 魏启荣和王江海, 2004a, b; 魏启荣等, 2006; 刘显凡等, 1999; 王建等, 2002) 和高原东北缘礼县地区钾霞橄黄长岩中 (喻学惠等, 2001; Zhao *et al.*, 2006; 苏本勋等, 2007) 都发现了幔源包体; 在青藏高原西北缘的康西瓦玄武岩中发现了地幔橄榄岩包体 (罗照华等, 2000, 2006), 从青藏高原向北, 在新疆西南天山托木盆地玄武岩中也有地幔包体和巨晶产出 (郑建平等, 2001; 吕勇军等, 2006)。高原北部的羌塘地块曾发现多种下地壳包体 (Hacker *et al.*, 2000)。而在青藏高原的腹地, 幔源包体产出的实例则很少, 目前已经报道的仅有 1 处, 即丁林等人在南羌塘地区的富钠钙碱性—碱性岩中发现了含有橄榄石的包体, 并推断其可能源于壳幔过渡带 (Ding *et al.*, 2007)。在高原南部地区长期以来一直没有发现地幔包体, 直到中国地调局第二轮的 1:25 万地质填图中, 成都理工大学 (2006) ①在拉萨地块西部革吉县赛利普超钾质岩石中发现了幔源

包体, 这是目前高原腹地首次在超钾质岩石中获得典型的幔源包体。

本文依据上述区调成果的线索, 对赛利普超钾质岩石中的地幔包体进行了野外和室内研究, 对橄榄石、辉石等矿物进行了主量元素分析, 初步研究了矿物成分特征、估算了包体形成的温压条件, 初步分析了矿物结构与成分所揭示的地幔交代过程, 并对包体发现的重要意义进行了探讨。

1 地质背景、样品和分析方法

1.1 地质背景与寄主超钾质岩石特征

青藏高原南部的拉萨地块在约 30Ma 以来出露钾质和超钾质岩石, 尽管总体出露面积不大, 但是分布区域却比较广泛。从拉萨地块总体看, 超钾质岩石分布在大约东经 87 度以西地区, 主要年龄范围是 8Ma ~ 25Ma; 钾质岩石在东部和西部都有产出, 年龄约为 9Ma ~ 24Ma。超钾质和钾质岩石在野外产出的构造背景上, 明显与南北向裂谷、新生代盆地、南北延长的湖泊等的分布密切相关。拉萨地块碰撞后岩浆作用的时间与裂谷发育、岩脉侵入、埃达克岩形成等岩浆—构造事件的时间相互重叠, 意味着高原南部岩石圈地幔的减薄作用可能是统一的深部作用机制, 具体表现出了上述的各种作用过程 (赵志丹等, 2006)。

赛利普地区的超钾质岩石主要分布在拉萨地块西部革吉县南北向展布的赛利普盆地内, 填图成果表明赛利普火山岩主要分布于盆地及其周边大约 2000km² 范围内, 出露总面积约为 188 km², 构造上受近东西向的昂拉仁错断裂带和北东向仁多断褶带控制。区调工作获得粗面岩中全岩 K-Ar 和全岩 Ar-Ar 同位素年龄为 17.80 ~ 15.47Ma^①, 王宝弟等 (2008) 获得超钾质岩石中金云母 Ar-Ar 坪年龄为 17.58 ± 0.19Ma; 孙晨光等 (2008) 挑选了超钾质岩石中的锆石, 得到了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 17.7 ± 0.3Ma。岩石为粗面

① 成都理工大学. 2006. 中华人民共和国 1:25 万赛利普幅区域地质调查报告.

安山岩,高 K_2O 、 MgO 、 Cr 、 Ni 含量和 K_2O/Na_2O 比值和 $Mg^\#$, 具有强烈富集大离子亲石元素和轻稀土元素、亏损高场强元素 Nb 、 Ta 、 Ti 特征,岩石的富集放射性成因 Sr 、 Pb 和 Nd 同位素、锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 $-7.6 \sim 3.9$, 都显示了岩石应来源于富集地幔源区(孙晨光等, 2007, 2008)。

1.2 包体类型

赛利普超钾质岩石中的地幔包体大小介于 $0.5\text{cm} \sim 1.5\text{cm}$ 。已经识别出的包体岩石类型主要有 2 类, 第一类为辉石岩, 主要矿物为斜方辉石 (Opx) 和单斜辉石 (Cpx), 第 2 类为尖晶石相二辉橄榄岩, 主要矿物为橄榄石 (Ol) + $Opx + Cpx \pm$ 金云母 (Phl) \pm 尖晶石 (Sp)。此外, 该地区还发现了多种地壳包体, 例如花岗岩、片麻岩等包体。

1.3 分析方法

主量元素电子探针分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成。仪器型号为 JXA-8100; 分析的加速电压为 15KV ; 束流 $1 \times 10^{-8}\text{A}$; 束斑为 $1\mu\text{m}$; 修正方法为 PRZ; 标准样品为美国 SPI 公司 53 种矿物。

2 包体成分和形成温压条件

赛利普地幔包体各类矿物代表性主量元素成分见表 1。

2.1 矿物成分

各样品中橄榄石的成分比较均一, $Mg^\#$ 为 $89 \sim 90$ (除 1 个橄榄石的 $Mg^\#$ 为 87), CaO 为 $0.05\% \sim 0.12\%$, TiO_2 均小于 0.03% , NiO 介于 $0.29\% \sim 0.80\%$ 。与寄主的超钾质岩石中斑晶橄榄石 ($Mg^\# = 79 \sim 87$) 比较, 包体的橄榄石具有明显低的 CaO 和高的镁橄榄石 (Fo) 组分, 表明赛利普地幔包体的橄榄石不是岩浆熔体中结晶的, 而是属于典型的地幔来源橄榄石(图 1)。

尖晶石依据成分特征可以分为 2 类, 第一类为高 Al_2O_3 ($44\% \sim 57\%$)、低 TiO_2 ($0.17\% \sim 0.32\%$)、低 Cr_2O_3 ($9\% \sim 21\%$) 尖晶石, 同时具有相对低 FeO ($11\% \sim 16\%$)、高 MgO ($18\% \sim 21\%$)、高 $Mg^\#$ ($0.67 \sim 0.76$)、低 $Cr^\#$ ($0.10 \sim 0.24$) 特征; 第二类为低 Al_2O_3 ($9\% \sim 37\%$)、高 TiO_2 ($0.56\% \sim 2.09\%$)、高 Cr_2O_3 ($26\% \sim 46\%$) 尖晶石, 同时具有高 FeO ($17\% \sim 30\%$)、低 MgO ($9\% \sim 17\%$)、低 $Mg^\#$ ($0.36 \sim 0.63$) 和高 $Cr^\#$ ($0.32 \sim 0.77$) 特征。这两种尖晶石可以同时出现在一个尖晶石矿物颗粒, 例如在样品 SL0650 中(图 2a), 其主体为灰白色 ($Sp-1$), 显示高 Al 低 Cr 特征, 而边部亮白色尖晶石 ($Sp-2$) 显示低 Al 高 Cr 特征, 由于整个矿物颗粒显示了较好的尖晶石晶形, 可能代表了原有的一个整体尖晶石颗粒分解后形成成分不均一的两部分, 或者亮白色 Sp 为流体交代后再结晶的部分; 若将亮白色尖晶石作为后期流体交代

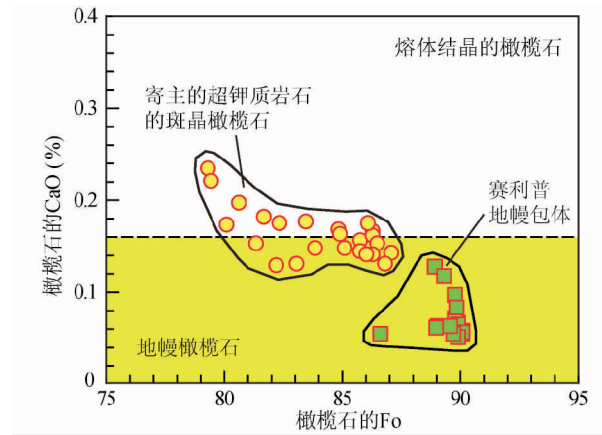


图 1 地幔橄榄岩包体的 CaO 与 Fo 相关图(划分的区域引自 Thompson & Gibson, 2000)。数据来源: 包体 Ol 成分为本文; 寄主超钾质岩石据赵志丹未发表数据

Fig. 1 Plots of CaO with Fo in olivine in Sailipu mantle xenoliths and host rock (After Thompson and Gibson, 2000). Ol in Sailipu mantle xenoliths from this work, Ol in the host rocks from Zhao *et al.*, unpublished data

导致, 则流体—尖晶石平衡过程中, 更多的不相容元素 Cr 留在尖晶石中, 形成高 Cr 尖晶石, 类似的反应在其他地区也有(于宋月等, 2007; Gregoire *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2008)。图 2b 则显示了样品 SL0650 中 Sp 与 Cpx 矿物之间互呈蠕虫状生长的交生结构, 这种结构容易使人想到石榴石相地幔过渡到尖晶石相地幔过程中石榴石减压分解为 Cpx 和高铝 Sp 的变压熔融过程(徐义刚等, 2001), 但是这里与 Cpx 共生的 Sp 不具有高铝特征, 而前述的其他具有高铝特征的 Sp 则尚未发现这样的交生结构, 因此该样品中 Cpx 和 Sp 不是石榴石分解的产物。

单斜辉石和斜方辉石普遍存在于各样品中。主要为富 CaO ($18.1\% \sim 21.4\%$) 的顽透辉石, 显示了高 TiO_2 ($0.16\% \sim 0.64\%$) 特征, Al_2O_3 ($1.55\% \sim 6.82\%$) 变化较大、 MgO 为 $14.9\% \sim 18.6\%$, $Mg^\#$ 为 ($0.85 \sim 0.91$) 低于橄榄石。如前所述, 在样品 SL0650 中 Cpx 和 Sp 显示了蠕虫状交生特征, 若假设这 2 种矿物原为一个矿物分解形成的, 则按照两矿物比例估算出的矿物既不是辉石也不是尖晶石, 最可能的过程不是矿物分解, 更可能是后期交代流体介入。斜方辉石成分主要是靠近富 Mg 端元的。 Opx 的 Al_2O_3 变化较大 ($1.6\% \sim 4.9\%$)、 Cr_2O_3 为 $0.14\% \sim 0.54\%$, $Mg^\#$ 为 $0.82 \sim 0.90$, 具有较低的 TiO_2 ($0.04\% \sim 0.2\%$), 与中国东部尖晶石二辉橄榄岩中 Opx 的成分相似。在样品 SL0651 中, Cpx 和 Opx 矿物组合中, 出现了石英, 表明富 Si 流体的加入(图 2c)。

金云母具有较高的 $Mg^\#$ ($0.89 \sim 0.90$)、较高的 TiO_2 ($2.2\% \sim 3.3\%$) 和 Al_2O_3 ($14.5\% \sim 16.7\%$); 金云母具有比较均一的 FeO ($4.2\% \sim 4.6\%$)、 MgO ($20\% \sim 22\%$) 和 K_2O

表1 赛利普地幔尖晶石二辉橄榄岩矿物主量元素代表性成分(%)

Table 1 Representative major element compositions of the minerals in Sailipu mantle xenoliths(%)

样品	矿物	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	NiO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Mg [#]	Cr [#]
SL0646	Ol	41.36	0.02	0.00	0.02	10.54	0.37	0.15	48.10	0.06	0.03	0.00	100.65	0.89	
	Ol	41.40	0.05	0.02	0.08	10.66	0.29	0.21	48.03	0.13	0.01	0.01	100.90	0.89	
	Opx	55.37	0.09	4.93	0.41	6.64	0.12	0.10	31.95	0.73	0.26	0.01	100.60	0.90	
	Opx	55.75	0.10	4.89	0.39	6.56	0.18	0.14	32.14	0.78	0.14	0.00	101.08	0.90	
	Cpx	52.34	0.59	3.35	1.28	3.27	0.01	0.12	17.26	21.10	0.27	0.00	99.58	0.90	
	Cpx	52.99	0.63	2.74	0.96	3.33	0.03	0.12	17.45	21.38	0.24	0.02	99.88	0.90	
SL0650	Cpx	52.04	0.55	6.57	0.78	3.27	0.03	0.08	14.88	18.92	1.85	0.01	98.99	0.89	
	Cpx	52.94	0.27	3.45	1.07	4.15	0.01	0.15	18.09	18.29	0.53	0.00	98.93	0.89	
	Ol	41.30	0.00	0.02	0.04	9.60	0.36	0.08	49.08	0.06	0.03	0.00	100.56	0.90	
	Ol	41.19	0.04	0.00	0.03	9.53	0.43	0.09	48.84	0.05	0.00	0.00	100.19	0.90	
	Sp	0.10	0.17	52.75	11.95	14.02	0.33	0.15	19.39	0.00	0.00	0.00	98.85	0.71	0.13
	Sp	0.07	0.23	52.83	11.77	12.81	0.42	0.10	19.94	0.02	0.08	0.03	98.29	0.74	0.13
	Sp	0.05	0.61	36.63	26.71	17.60	0.32	0.18	16.76	0.00	0.07	0.00	98.91	0.63	0.33
	Sp	0.06	0.60	36.73	26.56	17.88	0.31	0.18	16.77	0.00	0.00	0.00	99.09	0.63	0.33
	Ph	39.09	2.38	14.50	0.66	4.27	0.11	0.00	21.91	0.03	0.44	9.72	93.10	0.90	
	Ph	39.26	2.29	15.26	0.75	4.38	0.11	0.06	22.20	0.03	0.51	9.75	94.59	0.90	
SL0651	Ol	41.21	0.01	0.04	0.02	9.90	0.37	0.20	48.96	0.07	0.00	0.00	100.77	0.90	
	Ol	41.42	0.00	0.01	0.00	9.91	0.36	0.15	49.00	0.10	0.04	0.00	100.99	0.90	
	Cpx	51.59	0.35	6.53	0.60	3.83	0.10	0.14	17.25	19.28	0.52	0.00	100.19	0.89	
	Cpx	51.27	0.50	6.28	0.85	3.58	0.05	0.09	17.10	19.37	0.39	0.00	99.48	0.89	
	Opx	55.51	0.06	2.23	0.14	11.04	0.20	0.36	29.98	0.70	0.08	0.01	100.30	0.83	
	Opx	55.66	0.04	2.19	0.19	10.96	0.15	0.31	29.98	0.76	0.04	0.00	100.27	0.83	
	Opx	55.93	0.06	2.14	0.16	11.32	0.16	0.32	29.76	0.81	0.07	0.00	100.72	0.82	
SL0647	Ol	41.23	0.00	0.00	0.05	9.61	0.39	0.17	49.19	0.05	0.01	0.00	100.71	0.90	
	Ol	40.79	0.00	0.02	0.03	9.75	0.30	0.19	48.68	0.05	0.02	0.00	99.81	0.90	
	Sp	0.10	0.17	56.39	9.51	11.84	0.45	0.09	20.87	0.00	0.04	0.00	99.46	0.76	0.10
	Sp	0.06	0.25	47.80	17.32	14.44	0.41	0.19	18.82	0.00	0.00	0.00	99.28	0.70	0.20
	Phl	38.99	2.28	16.71	1.46	4.41	0.10	0.07	21.63	0.03	0.41	9.33	95.41	0.90	
	Phl	37.82	3.29	15.77	1.32	4.48	0.20	0.02	20.27	0.10	0.45	9.15	92.87	0.89	
SL0641	Ol	40.89	0.00	0.03	0.05	9.85	0.70	0.08	48.19	0.05	0.00	0.00	99.84	0.90	
	Ol	40.60	0.02	0.00	0.07	10.04	0.80	0.10	48.48	0.06	0.02	0.01	100.21	0.90	
	Cpx	51.41	0.38	6.22	1.03	2.75	0.05	0.07	15.23	19.96	1.53	0.00	98.65	0.91	
	Cpx	51.54	0.45	6.26	1.04	2.68	0.17	0.09	15.39	19.90	1.53	0.00	99.06	0.91	
	Sp	0.05	0.16	51.52	12.93	11.44	0.71	0.13	20.08	0.00	0.02	0.00	97.03	0.76	0.14

注: Mg[#] = Mg / (Mg + Fe); Cr[#] = Cr / (Cr + Al)

(9.2% ~ 9.8%), 该富 Al 贫 Fe 特征与中国东部类似 (赵新苗等, 2007)。由于电子探针分析获得的总量为 92 ~ 96%, 金云母中应含有 F 和 H₂O 等挥发性组分。将包体与寄主的火山岩中金云母斑晶比较, 后者的 Mg[#] (0.73 ~ 0.89)、Al₂O₃ (12% ~ 13%) 相对较低, 而 TiO₂ (2.3% ~ 3.3%)、K₂O (9% ~ 10%) 和 MgO (20% ~ 22%) 等未显示成分差异。包体中金云母产出多与尖晶石共生, 且金云母出现的位置多与玻璃质成分的交代物质出现有关 (图 2a, d)。若金云母出现是富 K 流体加入到地幔的直接矿物证据 (徐义刚, 1998), 则金云母—尖晶石—玻璃质的组合表明赛利普岩石圈地幔已经受到交代作用的影响, 且这种交代流体与寄主岩石的成分相似, 属于富 K、富 Ti 和 H₂O 流体。

将上述的 Ol、Cpx、Opx 和 Sp 的代表性主量元素成分与中国东部地区典型样品 (Rudnick *et al.*, 2004) 进行对比

(图 3), 赛利普的矿物成分与中国东部新生代玄武岩中的地幔包体相似, 都是非克拉通区的特征, 而与产于典型克拉通地区包体不同, 这与青藏高原在印度—亚洲大陆碰撞后的挤压造山—局部伸展的构造背景是吻合的。

2.2 包体形成温压条件

应用矿物二辉石温度计 (Wells, 1977), 获得了样品 SL0646 温度为 1082°C, SL0650 为 1105°C, SL0651 为 985°C ~ 1138°C。将尖晶石相稳定存在的范围 (16kb ~ 20kb) 做为压力范围, 获得赛利普地幔二辉橄榄岩的平衡温压条件 (图 4)。

Foley *et al.* (2006) 对南极洲 Jetty 半岛裂谷型岩浆作用中的地幔包体的研究揭示了该地区古地温变化过程, 对比了伸展型的裂谷环境与典型克拉通地区迥异的温压特征, 显示裂谷地区具有很高的地温梯度 (图 4)。图中也显示了东非

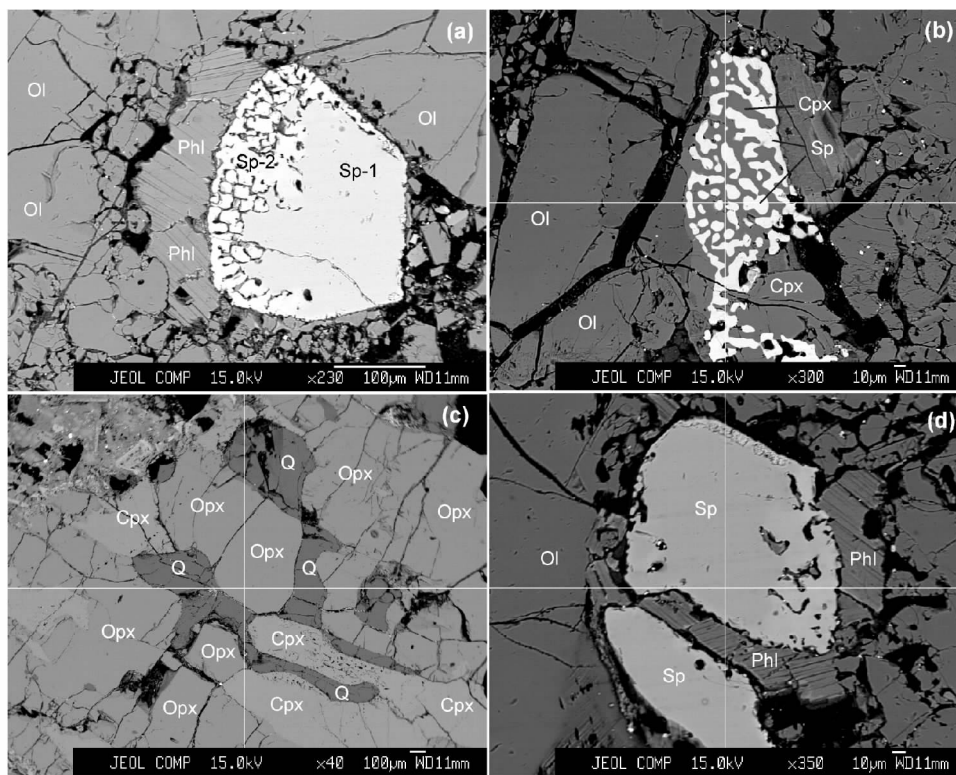


图2 赛利普地幔包体矿物结构背散射照片. (a) 样品 SL0650 中 Ol + Phl + Sp 的矿物组合照片, 其中尖晶石具有 2 种矿物相, 灰白色 (Sp-1) 为高 Al 低 Cr, 亮白色 (Sp-2) 为低 Al 高 Cr. (b) 样品 SL0650 视域中为 Ol + Cpx + Sp 组合, 其中 Cpx 和 Sp 具有蠕虫状交生特征. (c) 样品 SL0651 中 Opx + Cpx + Q 的组合, 石英为后期富 Si 流体交代作用产物. (d) 样品 SL0650 中 Ol + Sp + Phl 矿物组合和结构, 从晶形看, 图中 Sp 的两部分似为被交代流体/熔体分裂为两部分, 金云母为交代矿物

Fig. 2 Back-scatter electron (BSE) image of the Sailipu mantle xenolith. (a) In sample SL0650, the minerals Ol + Phl + Sp, in which the Sp showing 2 phases. The grey white (Sp-1) has high Al and low Cr, the bright white part has low Al and high Cr. (b) In samples SL0650 with Ol + Cpx + Sp assemblage, two minerals (Cpx and Sp) showing intergrowth texture. (c) In sample SL0651 with Opx + Cpx + Q. (d) In sample SL0650 with Ol + Sp + Phl, the Sp should have be one crystal and cut by metasomatic melt

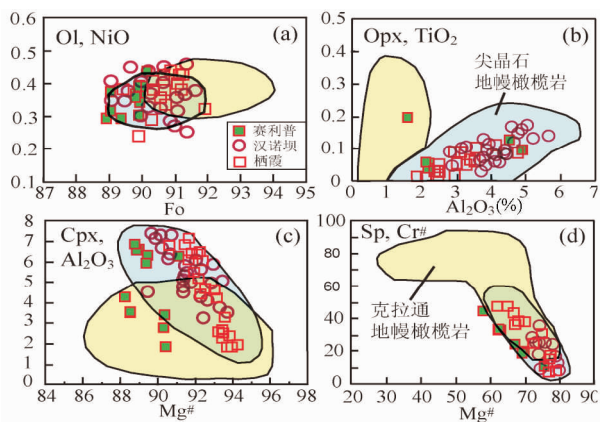


图3 赛利普地幔包体主要矿物成分特征. 赛利普为本文结果, 汉诺坝和栖霞引自 Rudnick *et al.* (2004)

Fig. 3 Major element composition of the Sailipu mantle xenolith. Sailipu from this work, Hannuoba and Qixia from Rudnick *et al.* (2004)

裂谷发展中的 2 期地温变化以及西伯利亚东部贝加尔裂谷地区的地温特征。中国东部地区大量研究成果 (Xu *et al.*, 1998; Xu *et al.*, 1999; Huang *et al.*, 2004) 也建立了地温梯度曲线 (图 4), 认为中国东部是类似于澳大利亚东南部的高地表热流、高地温梯度地区, 中国东部整体具有拉张性质的岩石圈地幔。

赛利普尖晶石相地幔二辉橄榄岩包体平衡温度为 985°C ~ 1138°C, 反映一个接近于大洋地温梯度的高热流地区的特征, 同时兼具裂谷型地幔性质, 若结合寄主的赛利普超钾质岩石在青藏高原南部的产出与南北向伸展构造密切相关的事实 (赵志丹等, 2006), 则包体温压条件反映的地幔伸展减压属性与印度与亚洲大陆碰撞后超钾质岩石产出的区域构造背景是极其吻合的。另外, 青藏高原南部拉萨地块具有异常高热流特征 (Shen, 1996) 也与本文地幔地温梯度一致。

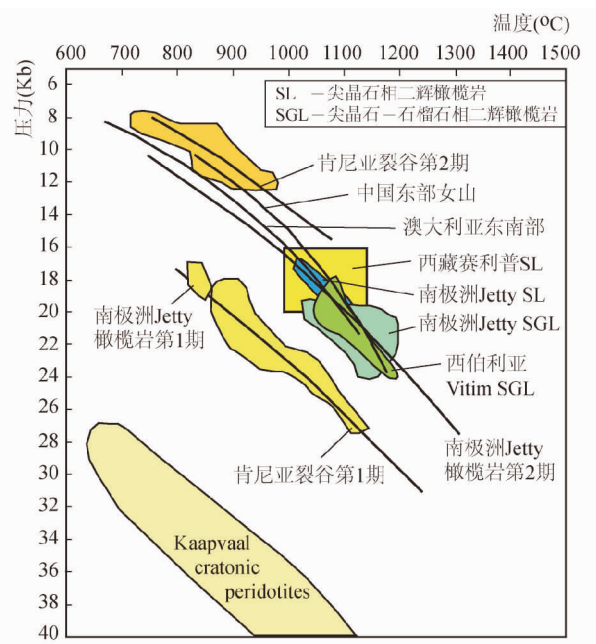


图4 赛利普地幔包体形成温压条件与世界典型裂谷区地幔包体对比。中国东部资料引自 Xu *et al.* (1998)、Xu *et al.* (1999) 和 Huang *et al.* (2004); 其余引自 Foley *et al.* (2006)

Fig. 4 Thermobarometry of Sailipu lherzolite compared to other regions in typical rift settings. Sailipu samples from this work, eastern China from Xu *et al.* (1998), Xu *et al.* (1999) and Huang *et al.* (2004); others from Foley *et al.* (2006)

3 讨论

3.1 拉萨地块超钾质岩石中发现地幔包体的重要意义

超钾质岩石是广义的钾质岩石中的一类, Foley 等 (1987) 依据全岩化学成分, 将超钾质岩石定义为全岩 $K_2O/Na_2O > 2$ 、 $K_2O > 3\%$ 和 $MgO > 3\%$, 并进一步划分为 3 种主要类型(钾镁煌斑岩类、钾霞橄黄长岩和造山带超钾质岩石)。从产出地幔包体情况来看, 第一类钾镁煌斑岩类中有不少报导, 第二类钾霞橄黄长岩中, 在巴西南部地区和我国西秦岭礼县等地都产出了尖晶石和石榴石相地幔包体和巨晶(例如 Carlson *et al.*, 2007; 喻学惠等, 2001; 史兰斌等, 2003; Zhao *et al.*, 2006; 苏本勋等, 2007)。这里的第一类和第二类在化学成分上主要是超基性的, 但是在造山带地区, 典型的如太平洋板块与南美板块边界的安第斯地区、与北美板块边界的北美洲科迪勒拉地区, 非洲板块与欧亚板块边界的欧洲南部滨地中海地区(如希腊爱琴岛和意大利罗马岩省)、阿尔卑斯的不同地段均有超钾质岩石产出(Müller and Groves, 2000), 但是这些超钾质岩石主要是中性成分为主的, 地幔包体产出实例较少。

在全球范围内的克拉通地区、类克拉通地区、造山带、裂谷和具有伸展构造背景的地区(东非), 地幔包体的岩石类型、结构构造、全岩和矿物成分具有不同的特征, 反映了与构造背景相吻合的深部岩石圈特征(Pearson *et al.*, 2004)。对于青藏高原这一年轻的造山带, 作为碰撞后挤压造山、陆内俯冲为主的构造体制之下的局部伸展构造环境(超钾质岩石分布与南北向伸展构造有关), 其地幔性质和状态如何呢? 对赛利普地幔包体的深入研究将具有尤其重要的意义, 一是有利于揭示青藏高原南部岩石圈地幔的化学成分和状态与地幔动力学过程; 二是将为青藏高原超钾质岩石的幔源成因提供更多证据; 三是将青藏高原构造域的地幔属性与中国东部地区以及国外类似地区进行系统对比研究, 进一步揭示高原地幔的特征, 为高原隆升和演化提供深部作用过程的约束。

3.2 地幔包体揭示了青藏高原南部岩石圈地幔性质与地幔交代作用

上述包体形成的温压条件所揭示的包体来源深度和青藏高原南部岩石圈地幔的地温梯度表明, 青藏高原这一活动造山带的地幔具有与我国东部、东非裂谷、贝加尔裂谷等世界典型的裂谷地区相似的特征, 该结果进一步支持了地表显示的南北向伸展构造是具有深源特征的, 表明区域性的伸展特征在垂向上可以延伸到岩石圈地幔。

地幔包体除了代表原位地幔的成分、结构、状态等信息外, 更多地被用来揭示不同性质流体为主的交代物质对地幔的改造作用。于宋月等(2007)很好地归纳总结了碳酸盐、硅酸盐和 H_2O-CO_2 流体等不同成分熔体/流体对地幔产生的交代作用的全岩和矿物成分鉴别标志, 可以揭示软流圈—岩石圈相互作用过程。含水矿物(例如金云母、角闪石等)的存在也作为地幔遭受流体交代作用的直接证据(徐义刚, 1998; 赵新苗等, 2007)。此外还有其他各种交代作用, 例如富硅流体交代(陈立辉和周新华, 2001)等。

上述对赛利普地幔包体中发现了多种交代作用的信息, 显示了青藏高原南部富集交代地幔存在的证据。例如出现石英(Si 交代)、金云母(流体和 K 交代)等, 这些值得进一步研究。含水矿物金云母的存在是地幔经过流体交代而含水的直接证据, 不论流体是地幔原位存在的交代作用, 还是地幔包体上升过程中超钾质岩浆的侵入导致的, 都表明地幔包体中可以发生这种反应。陈立辉和周新华(2001)认为如果没有发生熔体交代作用, 橄榄石的 $Mg^{#}$ 和 Ni 含量之间存在正比关系, 而赛利普包体橄榄石的 $Mg^{#}$ 和 Ni 含量显示反相关关系, 表明存在地幔交代导致的 OI 成分变化。此外矿物微量元素分析(另文发表)也显示单斜辉石 LREE 的富集。

3.3 地幔包体将为解释超钾质岩石成因提供重要约束

从全球研究看, 超钾质岩石具有特殊的地球化学特征, 一是富集轻稀土元素(LREE)和大离子亲石元素 Rb、Cs、Ba、

Th 等、亏损高场强元素 Ti、Nb、Ta 等,二是显示较高的 Sr 和较低的 Nd 同位素比值,富集放射性成因 Pb,向着 EMI 或 EMI 富集地幔端元靠近,意味着大陆地壳物质参与了岩浆作用过程,并发生再循环 (Davis *et al.*, 1996; Conticelli *et al.*, 1997, 2002; Conticelli and Peccerillo, 1992; Conticelli, 1998; Battistini *et al.*, 1998, 2001; Farmer *et al.*, 2002)。解释超钾质岩石成因的关键是解释超钾质岩石在显示地幔成因(如高 Mg[#]值、Ni、Cr)的同时,亦显示了地壳成因岩石的特征。多种成因模型试图解释这种既有“地幔”又有“地壳”双重属性的原因,如地壳同化混染、巨厚地幔的“精炼”机制、含金云母地幔橄辉岩的部分熔融,携带 H₂O 和 K₂O 的高压单斜辉石形成富钾岩浆,其中先存富集地幔源区的部分熔融是比较合理的成因解释 (Foley *et al.*, 1987; Foley and Peccerillo, 1992; 朱永峰, 2003)。实验岩石学也揭示了岩浆与碳酸盐相互作用可能是形成超钾质岩石的重要机制 (Misiti *et al.*, 2006; Freda *et al.*, 2008)。总体看,虽然地壳物质对地幔源区混染程度、方式、途径和场所依然不十分明朗,但是超钾质岩石代表了陆壳或者洋壳的深俯冲作用已经成为多数学者接受的认识。其中的一些重要问题,如地壳物质通过深俯冲进入深部地幔释放富 K、富 CO₂ 的流体、陆壳物质交代地幔的古俯冲事件的时间、存留长短,等等,还有待进一步的研究。青藏高原的超钾质岩石也具有上述的属性 (Zhao *et al.*, 2003; 孙晨光等, 2007, 2008; 陈建林等, 2006; 王宝弟等, 2008),在赛利普发现的地幔包体进一步支持青藏高原的超钾质岩石源于地幔部分熔融的结论。对包体的深入研究将为超钾质岩石成因提供更多的证据。

4 结论

(1) 青藏高原西南部赛利普盆地发现的地幔包体主要是尖晶石-二辉橄辉岩,属于典型的尖晶石相地幔岩样品。主要矿物的成分与中国东部地幔包体相似,显示了非克拉通地区地幔包体的特征。对包体矿物组合与结构的研究揭示了包体中具有多期尖晶石、出现石英、交代的含水矿物金云母等特征,交代的流体具有类似于寄主岩石的富 Si、富 K 特征。

(2) 包体形成温度为 985℃ ~ 1138℃,压力为 16kb ~ 20kb,显示的青藏高原南部地温梯度与中国东部以及东非、贝加尔等世界典型裂谷地区相同,表明青藏高原的上地幔具有裂谷型高温地幔特征,与寄主的超钾质岩石产出与高原南北向伸展构造密切相关、青藏高原南部具有很高的地表热流等特征是吻合的。

(3) 初步的研究显示,赛利普地幔包体对于揭示青藏高原南部岩石圈地幔的化学成分和状态与地幔动力学过程、寄主的超钾质岩石的幔源成因等具有重要意义。丰富的矿物组合与结构将为深入了解地幔交代作用提供重要证据。

References

- Battistini GD, Montanini A, Vernia L, Bargossi GM and Castorina F. 1998. Petrology and geochemistry of ultrapotassic rocks from the Montefiascone Volcanic Complex (Central Italy): Magmatic evolution and petrogenesis. *Lithos*, 43(3): 169–195
- Battistini GD, Montanini A, Vernia L, Venturelli G and Tonarini S. 2001. Petrology of melilite-bearing rocks from the Montefiascone Volcanic Complex (Roman Magmatic Province): New insights into the ultrapotassic volcanism of Central Italy. *Lithos*, 59: 1–24
- Carlson RW, Araujo ALN, Junqueira-Brod TC, Gaspar JC, Brod JA, Petrinovic 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
- Chen JL, Xu JF, Kang ZQ and Wang BD. 2006. Origin of the Miocene Bugasi Group volcanic rock in the Cuoqin County, Western Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 585–594 (in Chinese with English abstract)
- Chen LH and Zhou XH. 2001. Silica enrichment of mantle and the evolution of continental lithosphere. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 141–146 (in Chinese with English abstract)
- Chung SL, Chu MF, Zhang Y, Xie Y, Lo CH, Lee TY, Lan CY, Li X, Zhang Q and Wang Y. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth Science Reviews*, 68(3-4): 173–196
- Conticelli S, D'Antonio M, Pinarelli L and Civetta L. 2002. Source contamination and mantle heterogeneity in the genesis of Italian potassic and ultrapotassic volcanic rocks: Sr-Nd-Pb isotope data from Roman Province and Southern Tuscany. *Mineralogy and Petrology*, 74: 189–222
- Conticelli S, Francalanci, Manetti P, Cioni R and Sbrana A. 1997. Petrology and geochemistry of the ultrapotassic rocks from the Sabatini Volcanic District, central Italy: The role of evolutionary processes in the genesis of variably enriched alkaline magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 75(1-2): 107–136
- Conticelli S and Peccerillo A. 1992. Petrology and geochemistry of potassic and ultrapotassic volcanism in central Italy: Petrogenesis and inferences on the evolution of the mantle sources. *Lithos*, 28(3-6): 221–240
- Conticelli S. 1998. The effect of crustal contamination on ultrapotassic magmas with lamproitic affinity: Mineralogical, geochemical and isotope data from the Torre Alfina lavas and xenoliths, Central Italy. *Chemical Geology*, 149(1-2): 51–81
- Davis LL, Smith D, McDowell FW, Walker NW and Borg LE. 1996. Eocene potassic Magmatism at Two Buttes, Colorado, with implications for Cenozoic tectonics and magma generation in the western United States. *GSA Bulletin*, 108(12): 1567–1579
- Ding L, Kapp P, Yue Y and Lai Q. 2007. Postcollisional calc-alkaline lavas and xenoliths from the southern Qiangtang terrane, central Tibet. *Earth Planet Sci. Lett.*, 254: 28–38
- Ding L, Kapp P, Zhong D and Deng W. 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction. *Journal of Petrology*, 44(10): 1833–1865
- Farmer GL, Glazner AF and Manley CR. 2002. Did lithospheric delamination trigger late Cenozoic potassic volcanism in the southern Sierra Nevada, California? *GSA Bulletin*, 114(6): 754–768
- Fielding E, Isacks B, Barazangi M and Duncan CC. 1994. How flat is Tibet. *Geology*, 22: 163–167
- Foley S and Peccerillo A. 1992. Potassic and ultrapotassic magmas and

- their origin. *Lithos*, 28(3-6): 181–185
- Foley SF, Venturelli G, Green DH and Toscani L. 1987. The ultrapotassic rocks: Characteristics, classification and constraints for petrogenetic models. *Earth Science Review*, 24: 81–134
- Foley SF, Andronikov AV, Jacob DE and Melzer S. 2006. Evidence from Antarctic mantle peridotite xenoliths for changes in mineralogy, geochemistry and geothermal gradients beneath a developing rift. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 3096–3120
- Freda C, Gaeta M, Misiiti V, Mollo S, Dolfi D and Scarlato P. 2008. Magma carbonate interaction: An experimental study on ultrapotassic rocks from Alban Hills (Central Italy). *Lithos*, 101(3-4): 397–415
- Gregoire M, Jago S, Maury RC, Polve M, Payot B, Tamayo Jr RA and Yumul Jr GP. 2007. Metasomatic interactions between slab-derived melts and depleted mantle: Insights from xenoliths within Monglo adakite (Luzon arc, Philippines). *Lithos*, doi:10.1016/j.lithos.2007.10.013
- Gao Y, Hou Z, Kamber BS, Wei R, Meng X and Zhao R. 2007. Lamproitic rocks from a continental collision zone: Evidence for recycling of subducted tethyan oceanic sediments in the mantle beneath southern Tibet. *J. Petrol.*, 48(4): 729–752
- Guo Z, Wilson M, Liu J and Mao Q. 2006. Post-collisional, potassic and ultrapotassic magmatism of the northern Tibetan Plateau: Constraints on characteristics of the mantle source, geodynamic setting and uplift mechanisms. *J. Petrol.*, 47(6): 1177–1220
- Hacker BR, Gnos E, Ratschbacher L, Grove M, McWilliams M, Sobolev SV, Wang J and Zhen HW. 2000. Hot and dry deep crustal xenoliths from Tibet. *Science*, 287: 2463–2466
- Huang XL, Xu YG and Liu DY. 2004. Geochronology, petrology and geochemistry of the granulite xenoliths from Nushan, east China: Implication for a heterogeneous lower crust beneath the Sino-Korean Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(1): 127–149
- Liu XF, Zhan XZ, Gao ZM, Liu JJ, Li CY and Su WC. 1999. Deep xenoliths in alkalic porphyry, Liuhe, Yunnan, and implications for petrogenesis of alkalic porphyry and associated mineralizations. *Science in China (Series D)*, 42(6): 627–635
- Lv YJ, Luo ZH, Ren ZB, Liang T and Ke S. 2007. Megacrysts in the Cenozoic basalt of the Tuoyun Basin, Southwest Tianshan. *Science in China (Series D)*, 50(1): 55–66
- Luo ZH, Mo XX, Wan YS, Li L and Wei Y. 2006. Geological implications of the youngest SHRIMP U-Pb age of the alkaline basalt in the Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 578–584 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Zhang WH, Deng JF, Zheng JP and Su SG. 2000. Characteristics and geological significance of the deep-seated xenoliths in Cenozoic basalt in Kangxiwa, western Kunlun mountains, China. *Earth Science Frontiers*, 7(1): 295–298 (in Chinese with English abstract)
- Miller C, Schuster R, Klotzli U, Frank W and Grasemann B. 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis. *J. Petrol.*, 40(9): 1399–1424
- Misiiti V, Freda C, Taddeucci J, Romano C, Scarlato P, Longo A, Papale P and Poe BT. 2006. The effect of H₂O on the viscosity of K-trachytic melts at magmatic temperatures. *Chemical Geology*, 235(1-2): 124–137
- Mo X, Zhao Z, Deng J, Fower M, Yu X, Luo Z, Li Y, Zhou S, Dong G, Zhu D and Wang L. 2006. Petrology and geochemistry of postcollisional volcanic rocks from the Tibetan plateau: Implications for lithosphere heterogeneity and collision-induced asthenospheric mantle flow. In: Dilek Y and Pavlides S (eds). *Postcollisional tectonics and magmatism in the Mediterranean region and Asia*. Geological Society of America Special Paper 409; 507–530, doi: 10.1130/2006.2409(24)
- Müller D and Groves DI. 2000. *Potassic Igneous Rocks and Associated Gold-Copper Mineralization*. Springer, 252
- Nomade S, Renne PR, Mo X, Zhao Z and Zhou S. 2004. Miocene volcanism in the Lhasa block, Tibet: Spatial trends and geodynamic implications. *Earth Planet Science Letters*, 221: 227–243
- Pearson DG, Calil D and Shiray SB. 2004. Mantle souches included in volcanic rocks: Xenoliths and diamonds. In: Carlson RW (ed). *The mantle and core, Vol. I*. In: Holland HD and Turekian KK (eds.). Oxford: Elsevier Pergamon, 171–275
- Rudnicka RL, Gao S, Ling W, Liu Y and McDonough WF. 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton. *Lithos*, 77: 609–637
- Shen XJ. 1996. *Crustal-mantle Thermal Structure and Tectonothermal Evolution of the Tibetan Plateau*. Beijing: Seismological Press, 224 (in Chinese with English abstract)
- Shi LB, Lin CY and Chen XD. 2003. Composition, thermal structures and rheology of the upper mantle inferred from mantle xenolith from Haoti, Dangchan, Gansu Province, western China. *Seimology and Geology*, 25(4): 525–542 (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 condition. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1313–1320 (in Chinese with English abstract)
- Sun CG, Zhao ZD, Mo XX, Zhu DC, Dong GC, Zhou S, Chen HH, Xie LW, Yang YH, Sun JF and Yu F. 2008. Enriched mantle source and petrogenesis of Sailipu ultrapotassic rocks in southwestern Tibetan Plateau: constraints from zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 249–264 (in Chinese with English abstract)
- Sun CG, Zhao ZD, Mo XX, Zhu DC, Dong GC, Zhou S, Dong X and Xie GG. 2007. Geochemistry and Origin of the Miocene Sailipu ultrapotassic rocks in western Lhasa block, Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2715–2726 (in Chinese with English abstract)
- Tapponnier P, Xu Z, Rogers F, Meyer B, Arnaud N and Wittlinger G. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science*, 294: 1671–1677
- Thompson RN and Gibson SA. 2000. Transient high temperatures in mantle plume heads inferred from magnesian olivines in Phanerozoic picrites. *Nature*, 407: 502–506
- Turner S, Arnaud N, Liu J, Rogers N, Hawkesworth C, Harris N, Kelley S, Calsteren VP and Deng W. 1996. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. *J. Petrol.*, 37(1): 45–71
- Turner S, Hawkesworth C, Liu J, Rogers N, Kelley S and Calsteren P. 1993. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks. *Nature*, 364: 50–53
- Wang BD, Xu JF, Zhang XG, Chen JL, Kang ZQ and Dong YH. 2008. Petrogenesis of Miocene volcanic rocks in the Sailipu area, Western Tibetan Plateau: Geochemical and Sr-Nd isotopic constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 265–278 (in Chinese with English abstract)
- Wang J, Li JP, Wang JH and Ma ZH. 2002. Geological implications for the mafic enclaves of deep derivation from Cenozoic shoshonitic rocks in Jianchuan, Dali area, western Yunnan. *Acta Mineralogica Sinica*, 22(2): 113–125 (in Chinese with English abstract)
- Wei QR, Li DW, Zheng JP and Wang JH. 2006. Study on petrology and mineralogy of pyrolyte xenolith in Maguan area, eastern Tibet. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 26(1): 20–28 (in Chinese with English abstract)
- Wei QR and Wang JH. 2004a. Study on petrology and mineralogy of mafic deep-derived enclaves in Liuhe-Xiangduo area, eastern Tibet.

- Journal of Mineralogy and Petrology, 24 (1): 17–28 (in Chinese with English abstract)
- Wei QR and Wang JH. 2004b. Equilibrium P-T conditions of spinel lherzolite xenoliths and their significance in the Maguan area, Yunnan Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(3): 278–284 (in Chinese with English abstract)
- Wells PRA. 1977. Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 62: 129–139
- Williams H, Turner S, Kelley S and Harris N. 2001. Age and composition of dikes in Southern Tibet: New constraints on the timing of east-west extension and its relationship to postcollisional volcanism. *Geology*, 29: 339–342
- Williams HM, Turner SP, Pearce JA, Kelley SP and Harris NBW. 2004. Nature of the source regions for post-collisional, potassic magmatism in southern and northern Tibet from geochemical variations and Inverse trace element modelling. *Journal of Petrology*, 45 (3): 555–607
- Xu W, Hergt JM, Gao S, Pei F, Wang W and Yang D. 2008. Interaction of adakitic melt-peridotite: Implications for the high-Mg[#] signature of Mesozoic adakitic rocks in the eastern North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 265: 123–137
- Xu XS, O'Reilly SY, Griffin WL, Zhou XM and Huang XL. 1998. The nature of the Cenozoic lithosphere beneath Nushan, East Central China. In: Flower MFJ, Chung SL, Lo CH and Lee TY (eds.). *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. AGU Geodynamics Series, 27: 167–196
- Xu Y, Lin C and Shi L. 1999. The geotherm of the lithosphere beneath Qilin, SE China: A re-appraisal and implications for P T estimation of Fe-rich pyroxenites. *Lithos*, 47: 181–193
- Xu Y. 1998. Melt-rock interaction in the upper mantle and the evolution of continental mantle. *Earth Science Frontiers*, 5(Supp.): 76–85 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG, Yan W, Sun M, Liu Y and He ZC and Shi LB. 2001. Melting in changing pressure beneath continental mantle: Evidence from the mantle xenoliths in Qilin, Guangdong. *Chinese Science Bulletin*, 46 (11): 943–947 (in Chinese)
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan Tibetan orogen. In: Jeanloz R, Albee A L and Burke K C (Eds.), *Annual Reviews of Earth and Planet Sci*, 28: 211–280
- Yu S, Xu Y, Huang X, Ge W and Ma J. 2007. Characteristics of melt-rock reaction in Shuangliao peridotite xenolith and their implications to mantle metasomatism. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(3): 213–222 (in Chinese with English abstract)
- Yu XH, Mo XX, Liao ZL, Zhao X and Su Q. 2001. Temperature and pressure condition of garnet lherzolite and websterite from west Qinling, China. *Science in China (Series D)*: 44(Supp.): 155–161
- Yu XH, Mo XX, Zeng PS, Zhu DQ and Xiao XN. 2006. A study on the mantle xenoliths in the Cenozoic volcanic rocks from Maguan area, Yunnan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 621–630 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XM, Zhang HF, Zhu XK, Zhang WH, Yang YH and Tang YJ. 2007. Metasomatism of Mesozoic and Cenozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: Evidence from phlogopite-bearing mantle xenolith. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1281–1293 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZD, Mo XX, Nomade S, Renne PR, Zhou S, Dong GC, Wang LL, Zhu DC and Liao ZL. 2006. Post-collisional ultrapotassic rocks in Lhasa Block, Tibetan Plateau: Spatial and temporal distribution and its' implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (4): 787–794 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZD, Gautheron C, Farley K, Zhang H, Yu X and Mo X. 2006. Subcontinental lithospheric mantle origin of the Cenozoic kamafugite in western Qinling, China: Evidence from helium isotopes in mantle-derived xenoliths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 18 (Supp.), A743
- Zheng J, Lu F, O'Reilly SY and Luo Z. 2001. Trace-element of Tuoyun clinopyroxene: Implication for the deep processes of lithospheric mantle beneath the Tianshan, west China. *Chinese Science Bulletin*, 46(14): 1206–1211
- Zhu Y. 2003. Deep recycling of H₂O and K in subduction zone: Implications for the genesis of post-collisional K-rich magmatism. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 171–177 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈建林, 许继峰, 康志强, 王宝弟. 2006. 青藏高原西部措勤县中新世布嘎寺组钾质火山岩成因. *岩石学报*, 22(3): 585–594
- 陈立辉, 周新华. 2001. 地幔富硅交代与大陆岩石圈的演化. *地学前缘*, 8(3): 141–146
- 刘显凡, 战新志, 高振敏, 刘家军, 李朝阳, 苏文超. 1999. 云南六合深源包体与富碱斑岩成岩成矿的关系, *中国科学(D)*, 29(5): 413–420
- 吕勇军, 罗照华, 任忠宝, 梁涛, 柯珊. 2006. 西南天山托逊盆地新生代玄武岩中巨晶的研究. *中国科学(D)*, 36(2): 154–166
- 罗照华, 莫宣学, 王渝生, 李莉, 魏阳. 2006. 青藏高原最年轻碱性玄武岩 SHRIMP 年龄的地质意义. *岩石学报*, 22(3): 578–584
- 罗照华, 张文会, 邓晋福, 郑建平, 苏尚国. 2000. 西昆仑地区新生代火山岩中的深源包体. *地学前缘*, 7(1): 295–298
- 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
- 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
- 孙晨光, 赵志丹, 莫宣学, 朱弟成, 董国臣, 周肃, 董昕, 谢国刚. 2007. 青藏高原拉萨地块西部中新世赛利普超钾质岩石的地球化学与岩石成因. *岩石学报*, 23(11): 2715–2726
- 孙晨光, 赵志丹, 莫宣学, 朱弟成, 董国臣, 周肃, 陈海红, 谢烈文, 杨岳衡, 孙金凤, 于枫. 2008. 青藏高原西南部赛利普超钾质火山岩富集地幔源区和岩石成因: 锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素制约. *岩石学报*, 24(2): 249–264
- 王保弟, 许继峰, 张兴国, 陈建林, 康志强, 董彦辉. 2008. 青藏高原西部赛利普中新世火山岩源区: 地球化学及 Sr-Nd 同位素制约. *岩石学报*, 24(2): 265–278
- 王建, 李建平, 王江海, 马志红. 2002. 滇西剑川——大理地区新生代钾玄岩系中深源包体的地质意义. *矿物学报*, 22(2): 113–125
- 魏启荣, 李德威, 郑建平, 王江海. 2006. 青藏东缘马关地幔岩包体的岩石学与矿物学研究. *矿物岩石*, 26(1): 20–28
- 魏启荣, 王江海. 2004a. 青藏东缘六合——香多镁铁质深源包体的岩石学和矿物学研究. *矿物岩石*, 24(1): 17–28
- 魏启荣, 王江海. 2004b. 云南马关尖晶石相二辉橄辉岩包体的平衡温压条件及其指示意义. *矿物学报*, 24(3): 278–284
- 徐义刚, 颜文, 孙敏, 刘颖, 何在成, 史兰斌. 2001. 大陆地幔变压熔融机制: 广东麒麟幔源包体提供的证据. *科学通报*, 46(11): 943–947

- 徐义刚. 1998. 上地幔熔体—岩石相互作用与大陆地幔演化. 地学前缘, 5(增刊): 76–85
- 于宋月, 徐义刚, 黄小龙, 葛文春, 马金龙. 2007. 吉林双辽地区橄榄岩包体中熔体—岩石作用特征及其对地幔交代作用的启示. 岩石矿物学杂志, 26(3): 213–222
- 喻学惠, 莫宣学, 廖忠礼, 赵欣, 苏祺. 2001. 西秦岭石榴石二辉橄榄岩和石榴石二辉岩包体的温度和压力条件. 中国科学, 31(增刊): 128–133
- 喻学惠, 莫宣学, 曾普胜, 朱德勤, 肖小牛. 2006. 云南马关地区新生代碧玄岩中地幔包体研究. 岩石学报, 22(3): 621–630
- 赵新苗, 张宏福, 朱祥坤, 张文慧, 杨岳衡, 汤艳杰. 2007. 华北中、新生代岩石圈地幔的交代作用: 含金云母地幔岩提供的证据. 岩石学报, 23(6): 1281–1293
- 赵志丹, 莫宣学, Nomade S, Renne PR, 周肃, 董国臣, 王亮亮, 朱弟成, 廖忠礼. 2006. 青藏高原拉萨地块碰撞后超钾质岩石的时空分布及其意义. 岩石学报, 22(4): 787–794
- 郑建平, 路凤香, O'Reilly SY, 罗照华. 2001. 新疆托云地幔单斜辉石微量元素与西南天山岩石圈深部过程. 科学通报, 46(6): 497–502
- 朱永峰. 2003. 俯冲带中 H₂O 和 K 的深循环: 对碰撞后富钾岩浆成因研究的启示. 地学前缘, 10(3): 171–177