

doi:10.3799/dqkx.2012.00

云南马关新生代钾玄质玄武岩的岩石学与地球化学特征及构造环境

黄行凯¹, 莫宣学¹, 喻学惠^{1*}, 李 勇¹, 和文言¹, 李小微²

1. 地质过程与矿床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. 北京大学地球空间与科学学院, 北京 100871

摘要: 云南马关地区广泛出露了一套富含大量幔源包体和捕虏晶的新生代玄武岩。对该地区的新生代玄武岩进行了岩石学和地球化学方面的研究, 为该地区自新生代印度—欧亚大陆碰撞以来发生的岩浆活动及壳幔物质交换等问题提供重要的信息和岩浆岩约束。研究表明: 该区玄武岩具有富碱且富钾的特征, 其中全碱含量 $w(K_2O + Na_2O)$ 变化在 2.94%~8.23% 之间、 K_2O/Na_2O 在 0.44~6.72 之间, 21 个样品平均的 K_2O/Na_2O 比值为 1.26。采用火山岩类型系列与划分方法, 确定本区多数岩石属于钾玄岩类的玄武岩或碧玄岩。岩石具有富集 LREE 和 LILE 的特征, 经球粒陨石/原始地幔标准化后的稀土元素配分形式和微量元素蜘蛛图均具有与 OIB 相似的特征。岩石中含有大量深源岩石包体, 斑晶含量少且结晶程度低, 相容元素 Ni 含量较高等特点, 符合原生岩浆的基本特征; 唯有 $Mg^\#$ (0.49~0.72) 偏低, 可能与源区本身的性质或者源区发生的壳幔混合作用等因素有关。根据钾质岩石构造环境判别标准, 显示岩石形成于板内环境, 其成因与印度—欧亚大陆的碰撞诱发的软流圈物质向高原东南方向侧向挤出有关。

关键词: 云南马关; 新生代钾玄岩; 岩石地球化学; 构造环境。

中图分类号: 文章编号: 1000-2383(2012)03-0000-12

收稿日期: 2011-11-29

Petro-Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of Cenozoic Shoshonitic Basalts from Maguan, Yunnan Province

HUANG Xing-kai¹, MO Xuan-xue¹, YU Xue-hui^{1*}, LI Yong¹, HE Wen-yan¹, LI Xiao-wei²

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

2. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: A suite of Cenozoic shoshonitic basalts bearing abundant mantle-derived xenoliths and xenocrysts outcropped in Maguan area, Yunnan province. This study provided results of petrological and geochemical characteristics of the Cenozoic shoshonitic volcanic rocks, aiming to offer some food to thoughts related to volcanism and mantle-crust interaction related to the continental collision between India and Asia plates. Results showed that Cenozoic shoshonitic basalts from this area have relatively high and variable alkali contents (2.94%—8.23%), and are rich in potassium (average K_2O/Na_2O of 21 samples is 1.26). They are classified as shoshonitic basalts or basanite. They are enriched in both light rare earth elements (LREE) and large ion lithophile elements (LILE), and distribution patterns in the chondrite-normalized diagram and primitive-normalized spidergram collectively resemble the pattern of OIB. The shoshonitic basalts contain abundant mantle-derived xenoliths and xenocrysts, and are poorly crystallized with very low contents of phenocrysts, and have considerably high abundance of compatible elements such as Ni, implying that the Cenozoic basaltic rocks of Maguan area are representatives of primary magma derived from mantle sources. The relatively low $Mg^\#$ of rocks, ranging from 0.49 to 0.72, can either be ascribed to the intrinsic characteristics of the source region or to the mixing of crust and mantle materials in the source region, which needs to be further

基金项目: 国家重点基础研究“973”项目 (No. 2009CB421000)。

作者简介: 黄行凯 (1985—), 矿物岩石矿床学专业博士研究生, 主要从事岩浆岩及相关矿产方面的研究。

*** 通讯作者:** 喻学惠, E-mail: xhy532@yahoo.com.cn

studied. The Cenozoic shoshonitic basalts formed in a within-plate tectonic setting, the petrogenesis of which is related to the lateral extrusion of asthenospheric mantle along the southeastern of Tibetan plateau induced by the Indo-Asia collision.

Key words: Maguan area of Yunnan Province; Cenozoic potassic basalts; petro-geochemistry; tectonic setting.

0 引言

钾玄岩系列岩石是一类富碱($K_2O + Na_2O > 5\%$)、具有高的 K_2O/Na_2O 比值(>0.5)、低 TiO_2 ($<1.3\%$)、 Al_2O_3 含量高而且变化范围大($9\% \sim 20\%$)、并强烈富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE)的超钾质岩浆岩(Morrison, 1980). 其产状包括火山岩以及成分相当的浅成岩和深成侵入岩. 众多学者对钾玄岩类岩石的特征以及产出的构造环境等问题进行了大量研究, 提出了钾玄岩的构造环境的判别标志(Bergman, 1987; Foley *et al.*, 1987; Muller *et al.*, 1992). 一些学者(Nelson *et al.*, 1986; Conticelli and Peccerillo, 1992)对西澳大利亚、意大利、西班牙和东非裂谷等地超钾质—钾质火山岩进行了研究, 提出超钾质火山岩的成因与富集地幔的部分熔融有关. 产于造山带的钾玄岩类岩石蕴含了造山作用过程中钾与其他高度不相容元素在岩浆中的富集过程与机制等重要信息, 对于深刻揭示岩浆的分异作用, 地壳沉积物的俯冲与混染, 熔体与流体对岩石圈地幔的交代等壳幔交换信息具有重要的意义. 因此, 对钾玄岩类岩石的研究, 一直是国内外岩石学地球化学及大地构造学研究者关注的热点(Varne, 1985; Rogers *et al.*, 1987; Foley, 1992a, 1992b; Carlson and Nowell, 2001).

金沙江—哀牢山—红河断裂带北起青藏高原东缘, 南经越南进入北部湾, 是滇藏特提斯与扬子—华南陆块在地质和地形方面的重要分界. 印度支那半岛沿着该剪切带相对于华南陆块向东南方向挤出了约 600 km, 并导致了南海的张开(Tapponnier *et al.*, 1982; Chung *et al.*, 1998). 因此该区一直是国际地学界研究大陆碰撞及有关效应的重点地区. 在该带广泛分布了新生代钾玄质富碱斑岩, 前人对富碱斑岩等岩石开展过大量岩石学与地球化学的研究, 提出新生代富碱斑岩与 65 Ma 以来印度—欧亚大陆碰撞的动力学条件下, 金沙江—哀牢山—红河断裂带的左行走滑和拉张诱发的地幔部分熔融作用有关, 源区可能是富含金云母的交代地幔(张玉泉和谢应雯, 1997; 邓万明, 1998a, 1998b; 王建等, 2003). 但是, 因为该带幅员辽阔, 钾质岩浆岩分布广泛, 岩浆岩类型复杂. 有关该钾质岩浆岩的起源成因

及其动力学条件等问题仍存在争议, 还有待于进一步研究.

在金沙江—哀牢山—红河断裂带南端的马关地区, 发育了一套富含幔源包体的新生代钾质玄武岩, 为深入研究钾质岩浆的起源条件与成因、地幔源区特征和壳幔交换等地球动力学问题提供了得天独厚的条件. 前人对马关地区的玄武岩和幔源包体开展了岩石学和地球化学方面的研究, 初步厘定了包体的起源深度和地温梯度, 探讨了地幔变形特征以及岩浆作用的起源成因与动力学意义等(梅厚钧, 1966; 舒小辛, 1995; Xu *et al.*, 2001; 魏启荣等, 2003, 2006; 魏启荣和王江海, 2004; Wei and Wang, 2004; 夏萍和徐义刚, 2004, 2006; 喻学惠等, 2006). 但是, 与中国东部新生代玄武岩与地幔包体的研究相比, 马关地区玄武岩与地幔包体的研究程度还非常低, 而该区处于金沙江—哀牢山—红河断裂带南段的大地构造部位, 是研究与确定滇西特提斯与扬子—华南陆块过渡与转化的关键地区. 因此, 对该区新生代玄武岩与地幔包体开展深入的岩石学、矿物学与地球化学研究是非常必要的.

本文提供了马关八寨地区新生代钾质玄武岩详细的岩石学与稀土微量元素地球化学分析数据, 并对岩石形成的构造环境与成因进行了讨论, 为该地区深部地质过程研究提供进一步的岩浆岩约束.

1 地质背景及玄武岩岩相学特征

1.1 地质背景

马关处于云南省文山州境内, 位于金沙江—哀牢山—红河巨型走滑断裂带东南端, 大地构造上处于扬子地台的西南缘, 是滇藏特提斯与华南褶皱系过渡地带. 马关地区广泛分布了新生代富含深源岩石包体的玄武岩, 以小型岩筒/岩管或岩脉/岩墙侵位于寒武系和奥陶系地层中. 深源岩石包体类型丰富, 包括含尖晶石的二辉橄榄岩、方辉橄榄岩和单辉橄榄岩, 含石榴子石的二辉橄榄岩以及石榴子石、单斜辉石、金云母和透长石巨晶等(魏启荣等, 2003, 2006; 夏萍和徐义刚, 2006; 喻学惠等, 2006). 之前所获得玄武岩中黑云母的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄为 11.9~12.4 Ma(Wang *et al.*, 2001).

1.2 玄武岩岩相学特征

本次研究工作的玄武岩样品采自马关八寨—木厂街地区的下河头村、郑家山、蒿子坝和老厂等地(图 1)。各地玄武岩的岩相学特征如下:

下河头玄武岩为一中心式喷发的岩筒。火山岩筒平面上近圆形,直径仅几十米,由强烈喷发的火山角砾岩组成。野外露头上可以较清楚地看到灰岩和变质岩的围岩角砾。

下河头玄武岩手标本上为黑色—灰黑色,斑状结构,气孔构造或块状构造,斑晶主要是橄榄石和辉石,斑晶含量很少,其中橄榄石斑晶含量 5%,粒径 0.2~0.5 mm,少数大斑晶可达 2~3 mm,单斜辉石斑晶含量 2%~3%,粒径 0.3~0.5 mm,橄榄石多数已经遭受了不同程度的蛇纹石化,单斜辉石蚀变程度稍低;基质部分为微晶—隐晶质结构,由于蚀变强烈颗粒不清楚。

下河头玄武石中含有较多角砾和大量幔源岩石包体。角砾成分复杂,主要是灰岩或其他变质岩,也有少量同成分的火山岩角砾。角砾形态不规整,分选与磨圆都很差,大小从几厘米至几十厘米不等。包体多呈不规则圆球形或扁圆形,直径从几厘米至几十厘米不等,主要是含尖晶石、石榴石的辉石岩或二辉岩,含尖晶石的二辉橄榄岩和含石榴石的二辉橄榄岩,以及少量的纯橄岩和方辉橄榄岩。此外玄武岩中

还可见单斜辉石巨晶和石榴石巨晶。单斜辉石巨晶为黑色,沥青光泽,因熔蚀晶面圆滑,大小从 1~9 cm 不等。石榴石巨晶为深红色,大小从 1~3 cm 不等,晶形不完整,但非常新鲜。有些巨晶已经碎裂。

郑家山玄武岩手标本上为黑色—灰黑色,斑状结构,块状构造,几乎未见角砾。斑晶含量较少,主要为橄榄石和辉石,含量分别为 5%和 2%,橄榄石大斑晶达 1~2 mm,其裂隙中有辉石颗粒充填。岩石中含有橄榄石和尖晶石捕虏晶,其中橄榄石捕虏晶发育波状消光和曲折带,尖晶石捕虏晶为棕红色,大小不等,大者可达 0.5 mm,边缘发育富铁矿物的反应边结构。基质部分具间粒间隐结构,长条状斜长石微晶杂乱分布,其间为橄榄石、单斜辉石、磁铁矿和火山玻璃等充填。郑家山玄武岩中也含有很多幔源辉石岩和橄榄岩包体以及单斜辉石巨晶,幔源包体特征和大小与下河头相似,辉石巨晶边缘发育由辉石和橄榄石的细小颗粒组成的反应边。本次工作还在郑家山玄武岩薄片中发现一颗石英捕虏晶,其周围被环状的淬火玻璃和辉石微晶环绕。

蒿子坝玄武岩为斑状结构,块状构造,偶见角砾状构造,但角砾含量很少,斑晶主要为橄榄石,粒径为 0.1~0.2 mm,含量 5%;单斜辉石斑晶量少,粒径比橄榄石稍大,为 0.2~0.4 mm,一组完全解理清晰可见。此外,岩石中也见少量橄榄石捕虏晶,粒径 2~3 mm,以发育曲折带和波状消光可与斑晶橄榄石区别。基质具间粒间隐结构,大量长条状斜长石微晶杂乱密集分布,其间充填有橄榄石、辉石、磁铁矿和火山玻璃等。蒿子坝玄武岩中也含有幔源岩石包体,但包体数量较少,个体较小且蚀变比较显著。

老厂玄武岩也具斑状结构,块状构造,斑晶主要为橄榄石和辉石,含量分别为 5%和 2%,岩石中含有较多的橄榄石和尖晶石捕虏晶,以及具反应边结构的单斜辉石巨晶。基质为间粒间隐结构,斜长石微晶含量多而排列杂乱,其间为细小的单斜辉石、磁铁矿和隐晶质充填。老厂玄武岩中几乎未见深源包体。

2 分析方法及分析结果

2.1 分析方法

本次工作对马关地区的玄武岩开展了全岩化学与稀土微量元素地球化学分析和研究。样品的预处理在河北省廊坊区调队实验室完成。通常的方法是将样品去掉表皮,选取内部新鲜部分粗碎后,先在超声波清洗池中震动 30 min,再用纯净水清洗 3 次,烘

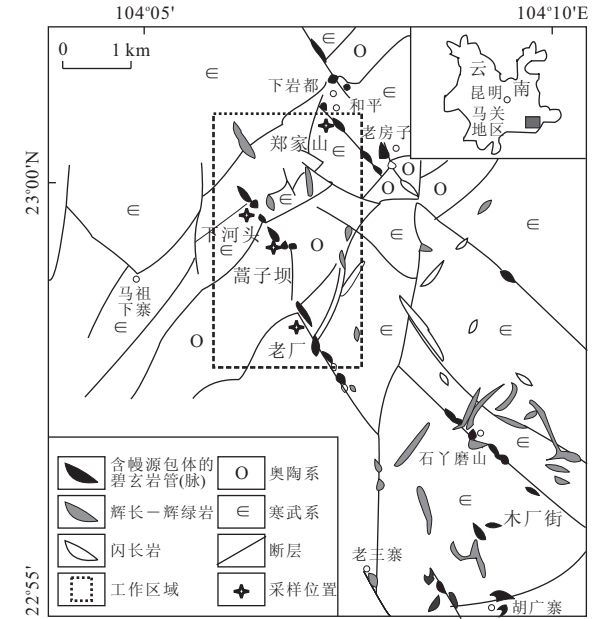


图 1 马关地区八寨—木厂街地质简图和采样位置示意(据魏启荣等,2003 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of Bazhai-Muchangjie area in Maguan county showing sampling locations

干后将其磨细至 200 目. 主量元素由国土资源部武汉矿床资源监督检测中心(武汉综合岩矿测试中心)采用湿化学法分析, 分析精度优于 1%; 微量元素由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 Agilent7500a 等离子体质谱仪(ICP-MS)分析, 精度优于 5%. 详细的溶液制备方法和分析流程见 Gao *et al.* (2002).

2.2 主量元素

马关玄武岩样品的主量元素分析结果列于表 1. 由表可见, 本区玄武岩的 SiO_2 含量在 45.23%~52.38% 之间; Al_2O_3 的含量较高, 在 12.13%~17.18% 范围内; MgO 变化范围较大, 在 3.91%~14.72% 之间, 其中有 5 个样品的 MgO 含量较低, 在 3.91%~4.22% 之间, 其余样品 MgO 含量均大于 6%, 平均为 8.57%; TiO_2 含量较高, 为 1.23%~3.32%; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量的变化范围也较大, 在 2.94%~8.23% 之间, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值在 0.44~6.72 之间, 平均达 1.26. 全岩的 $\text{Mg}^\# \{ \text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+}) \}$ 在 0.42~0.72 之间, 绝大多数的样品 $\text{Mg}^\# < 0.65$, 在 0.49~0.63 之间, 仅 2 个样品的 $\text{Mg}^\# \geq 0.65$. 与世界火成岩平均化学成分(Le Maitre, 1989)相比, 马关地区新生代玄武岩的 SiO_2 含量与拉斑玄武岩和碧玄岩的平均值相当, 但是岩石的全碱含量特别是钾的含量总体偏高, 基本上与世界碧玄岩及霞石白榴石玄武岩相当, MgO 含量也与碧玄岩和霞石白榴石玄武岩接近. 与黎彤和饶纪龙(1963)提供的中国主要岩浆岩的平均化学成分相比, 马关地区新生代玄武岩的 SiO_2 和 MgO 含量大体与白榴石玄武岩和粗面玄武岩相当, 但全碱含量及 K_2O 含量稍低.

在火山岩类型划分的 TAS 图解中(图 2), 样品点比较分散, 多数样品点落在玄武岩区上部靠近粗面玄武岩的区域, 也有部分样品点落在粗面玄武岩区内或粗面玄武岩与碧玄岩交界处, 还有 3 个样品点落在响岩质碱玄岩下部靠近玄武质粗面安山岩的位置. 在 SiO_2 - K_2O 图解中(图 3a), 样品主要落在钾玄岩区, 少数样品落在高钾钙碱性岩与钙碱性过渡区域. 在 Na_2O - K_2O 图(图 3b)中, 除 3 个样品落在高钾质岩石区内, 其余样品点均落在钾质岩石区.

在主量元素的哈克图解(图 4)中, Al_2O_3 和 Na_2O 与 SiO_2 之间显示出较好的正相关关系, MgO 与 SiO_2 大致呈负相关, 而其他氧化物 K_2O 、 CaO 、 TiO_2 和 TFe_2O_3 与 SiO_2 之间的相关性不明显或较差.

2.3 稀土元素和微量元素

马关地区新生代玄武岩的稀土元素总量 ΣREE 在 $(85.3 \sim 198.1) \times 10^{-6}$ 之间, 其中轻稀土元素总量 ΣLREE 为 $49.61 \times 10^{-6} \sim 154.45 \times 10^{-6}$, 重稀土元素总量 ΣHREE 为 $35.71 \times 10^{-6} \sim 43.6 \times 10^{-6}$, 反映轻重稀土分馏程度的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 和 $[\text{La}/\text{Yb}]_n$ 比值分别为 1.39~3.52 和 2.90~13.50. 经球粒陨石标准化后的稀土元素配分型式为较平滑的右倾型(图 5), 显示了轻稀土富集特征, 但其富集程度明显低于青藏高原(Chung *et al.*, 2003)和西秦岭(喻学惠等, 2009)新生代钾质火山岩, HREE 分布相对比较平坦. $\delta\text{Eu} = 0.89 \sim 0.98$ 和 $\delta\text{Ce} = 0.94 \sim 1.0$, 说明无明显的 Eu 和 Ce 的异常, 表明岩浆未经历过斜长石的分离结晶作用(表 2).

微量元素具有富集大离子亲石元素(LILE)和高场强元素(HFSE)的特征, 经原始地幔标准化后的微量元素蜘蛛图中, 绝大多数样品具 K、Rb、Nb、Ta、Zr、Ti 等元素的正异常和 Pb、Th 的负异常. 仅 XHT-2 一个样品微量元素的总含量低于其他样品, 且具有明显 Ti 的正异常和 Pb 的正异常, 但 K、Nb、Ta 的正异常较弱.

样品的稀土和微量元素的分配型式总体上与 OIB 相似.

3 讨论与结论

3.1 马关新生代钾质玄武岩是原生岩浆吗?

Frey *et al.* (1978) 在研究玄武岩的起源与源区特征时, 最早提出原生玄武岩的判别标志. 莫宣学(1988)在对我国东部新生代含地幔包体的碱性玄武岩的研究中, 进一步阐述了原生岩浆的判别标志, 归纳起来有如下几方面: (1) 岩石中含有大量幔源岩石包体, 被认为是岩浆快速上升的标志. 因为岩浆快速上升, 避免了岩浆的结晶分离作用与同化混染作用的发生, 使岩浆原始成分得以保持, 因此是原生岩浆必备的条件之一; (2) 玄武岩中斑晶含量低, 岩石总体的结晶程度差, 反映岩浆在上升过程中基本保持其熔体性质; (3) 玄武质原生岩浆的 $\text{Mg}^\#$ 变化范围在 0.68~0.75(Frey *et al.*, 1978)或者 0.65~0.72 之间(邓晋福等, 2004); (4) 原生岩浆中相容元素的含量较高, 当 MgO 含量为 10.0~12.5 时, 原生岩浆中 NiO 含量应为 0.03%~0.05%.

马关地区新生代玄武岩中含有大量的幔源包

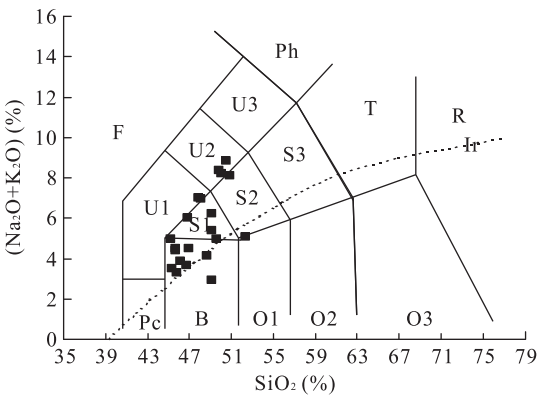


图 2 马关地区新生代玄武岩 TAS 图(底图取自 Le Maitre, 1989)
Fig. 2 TAS diagram of Cenozoic basalts from Maguan area
Pc. 苦橄玄武岩; B. 玄武岩; O1. 玄武安山岩; O2. 安山岩; O3. 英安岩; R. 流纹岩; S1. 粗面玄武岩; S2. 玄武质粗面安山岩; S3. 粗面安山岩; T. 粗面岩、粗面英安岩; F. 副长石岩; U1. 碱玄岩、碧玄岩; U2. 响岩质碱玄岩; U3. 碱玄质响岩; Ph. 响岩; Ir-Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性

体,包体数量多且个体大,只有当岩浆以十分快的速度上升时,才可能将如此多和如此大的包体带到地表浅部. 为此笔者采用莫宣学(1984)根据包体大小推测岩浆上升时间的公式做初步计算.

计算公式和过程如下:

$$V_n = \left(\frac{4r_n \Delta \rho g}{27 \rho_L^{2/5}} \right)^{5/7} (d_n / \eta_L)^{3/7},$$

式中 V_n 为包体沉降速度,也就是岩浆必需的最小上升速度, d_n 、 r_n 分别为包体的直径和半径, η_L 为岩浆粘度, ρ_L 为岩浆密度, $\Delta \rho$ 为包体与岩浆的密度差, g 为重力加速度 (980 cm/s^2),取橄榄岩包体的密度 $\rho_n = 3.234 \text{ g/cm}^3$,岩浆的密度 $\rho_L = 2.550 \text{ g/cm}^3$,岩浆的粘度 $\eta_L = 16.44 \text{ pois}$ (莫宣学,1984),计算结果如下:假设岩浆所含包体的大小(直径)分别为 1、5

和 10 cm 时,岩浆的上升速度分别为 0.14、0.85 和 1.88 km/h. 当这样的岩浆从 100 km 深处上升至地表,所需要的时间分别近似为 30、5 和 2 d. 事实上,马关地区玄武岩所含包体有较多直径大于 10 cm,最大者可达 40 cm. O'Reilly *et al.* (2009)曾做过类似估算,认为携带地幔包体的岩浆上升速度非常快,到达地表的时间最长不会超过 60 h,可能在 20 h 左右,与笔者的计算结果比较接近. 由此可以判断,马关地区玄武岩的上升速度是非常快的. 因此基本上可以排除岩浆在上升过程中发生明显分异作用的可能性.

另外,马关地区绝大多数玄武岩具有斑状结构或显微斑状结构,而且斑晶含量不高(低于 10% 或更低),因此岩石的结晶程度较低;岩石中相容元素 Ni 的含量较高,多数样品 Ni 的含量高于 200×10^{-6} ,接近或超过原生玄武岩的 Ni 含量. 但岩石的 $Mg^\#$ 的变化范围较大,在 0.72~0.49 之间,除 2 个样品的 $Mg^\#$ 达到原生岩浆的 $Mg^\#$ (分别为 0.65 和 0.72),其他样品的 $Mg^\#$ 均低于 0.65. 综合上述特征,笔者认为马关地区新生代玄武岩基本上应属于原生岩浆结晶的产物. 初步推测可能有如下几个方面的原因造成岩石 $Mg^\#$ 偏低:(1)与岩浆源区的类型有关;(2)与岩浆源区的壳幔混合作用有关;(3)与分析样品本身有关. 比如由于风化与蚀变作用导致岩石中 Fe^T 增高,从而降低了岩石的 $Mg^\#$;(4)岩浆在捕获包体之前已经发生了某种分异作用等. 对此尚需作深入研究.

3.2 马关钾质玄武岩的构造环境判别与岩石成因

火成岩构造环境的判别和确定一直是火成岩研究中的一个重大问题. 因为钾玄岩类岩石具有特殊的成因指示意义并且与矿产具有密切的关系,对其

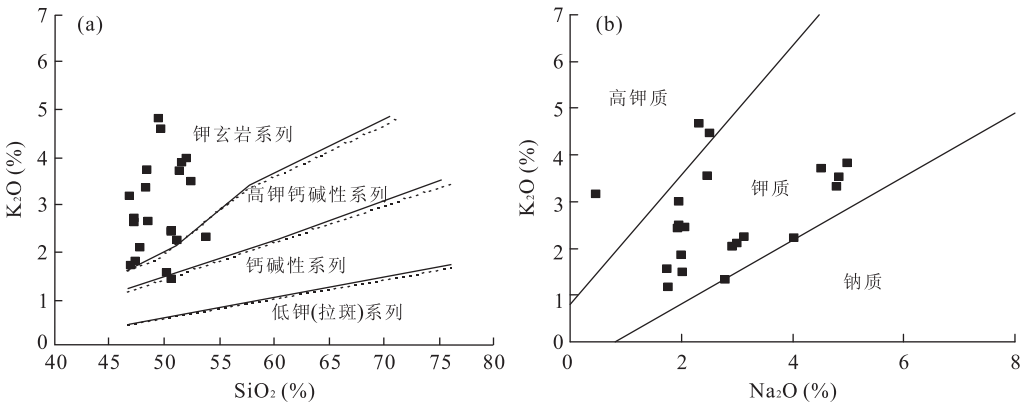


图 3 马关地区新生代钾质玄武岩 K_2O-SiO_2 图解(a)和 K_2O-Na_2O 图解(b)
Fig. 3 K_2O-SiO_2 diagram (a) and K_2O-Na_2O diagram (b) of Cenozoic basalts

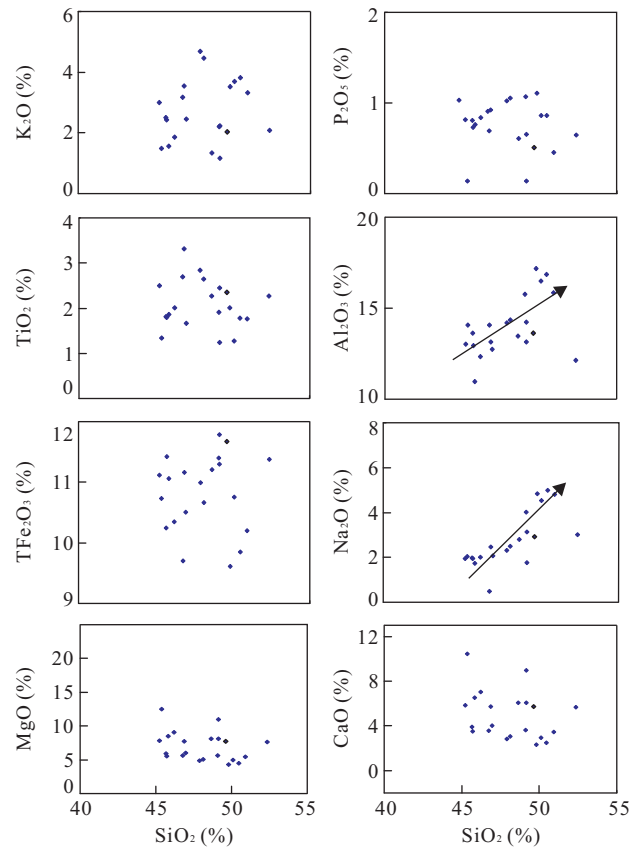


图 4 马关地区新生代玄武岩的哈克图解
Fig. 4 Harker diagram of Cenozoic basalts from Maguan area

产出的构造环境的判别更是众多学者十分关注的研究课题(喻学惠等,2009). 目前应用愈来愈广泛的岩浆岩的微量元素构造环境判别图解为研究岩石的构造环境提供了非常大的便利,但在使用过程中也存在很多的问题. 利用图解进行构造环境判别时,必须要遵守判别图解与判别的岩石类型一致的原则,对

于特殊类型的岩石要选择专门用于该类型的判别图解,如碱性花岗岩和钾质火成岩. 由于钾质火成岩的显著特点是富 K, 亏损高场强元素 Ti、Nb 和 Ta, 对于常用的玄武岩的微量元素构造环境判别图解是不适用的, 比如在 Ti-Zr, Ti-Zr-Y 以及 Hf/3-Th-Ta 图解中钾质火成岩处于图解所确定的各种构造环境之外(赵振华,2007). 根据钾质火山岩主量和微量元素的差异, Muller *et al.* (1992) 将钾玄岩类岩石的大地构造环境进一步划分为 5 类, 分别是大陆弧、后碰撞弧、初始洋弧、晚期洋弧和板内. 马关地区玄武岩主要属于钾玄岩类岩石, 因此笔者采用 Muller *et al.* (1992) 提出的钾质火成岩构造环境判别的 $Zr/Al_2O_3-TiO_2/Al_2O_3$ 和 $TiO_2-Al_2O_3$ 图解, 来确定其形成的构造环境(图 6). 在 $Zr/Al_2O_3-TiO_2/Al_2O_3$ 图中(图 6a), 除一个样品点落入大陆弧环境之外, 其他所有样品点均落到板内环境; 在 $TiO_2-Al_2O_3$ 图中(图 6b), 大多数样品点同样投在代表板内环境的区域内, 少数样品落在了靠近板内环境的过渡区域.

前已述及, 马关地区地处金沙江—哀牢山—红河断裂带的东南端, 是滇西特提斯造山带与华南陆块交接过渡的地区. 马关地区新生代玄武岩是整个金沙江—哀牢山—红河新生代岩浆岩带的重要组成部分. 已有的研究表明, 滇西古特提斯洋与金沙江洋盆已于晚三叠世完全闭合, 而金沙江—哀牢山—红河断裂带新生代岩浆活动主要发生在 45~30 Ma 之间(喻学惠等,2009), 马关地区钾质玄武岩浆活动的时间更晚, 主要在 16 Ma 以后(Wang *et al.*, 2001). 因此, 该区岩浆活动属于板内岩浆作用的产物.

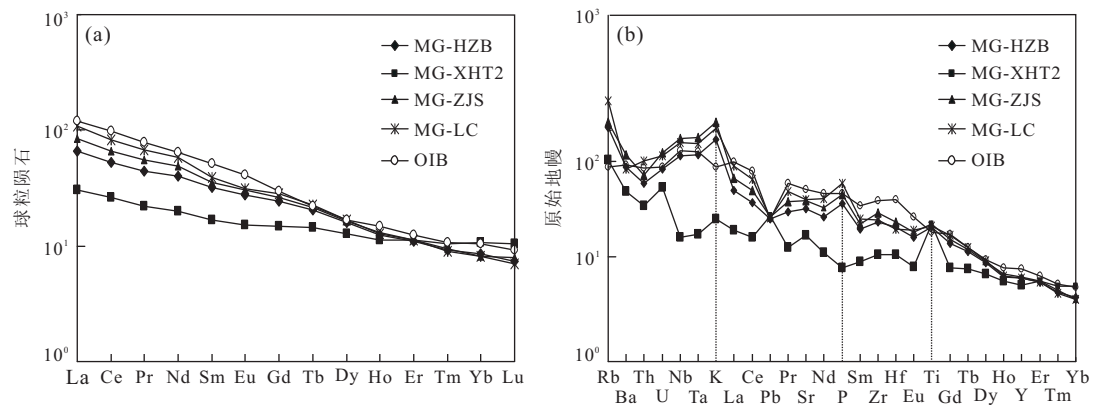


图 5 马关新生代玄武岩稀土元素配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(据 Evensen *et al.*, 1978; Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized rare earth elements distribution patterns (a) and Primitive mantle-normalized incompatible elements spidergram (b) of Cenozoic basalts from Maguan area

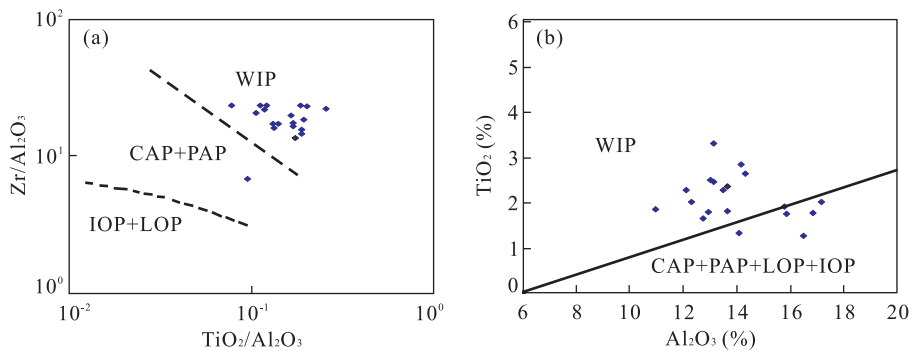


图 6 钾质火成岩构造环境判别(据 Muller *et al.* , 1992)

Fig. 6 Tectonic setting discriminant diagram of potassic volcanic rocks
CAP. 大陆弧; IOP. 初始洋弧; LOP. 晚期洋弧; PAP. 后碰撞弧; WIP. 板内

有关金沙江—哀牢山—红河断裂带钾质火山岩成因,前人提出过很多解释(张玉泉和谢应雯,1997;邓万明等,1998a;王建等,2003;夏萍和徐义刚,2004)。研究表明,青藏高原及其周边地区新生代岩浆活动是对印度—亚洲大陆碰撞作用的一种响应。岩浆作用大致可以划分为碰撞期(65~45 Ma)和后碰撞(<45 Ma)两个大的构造—岩浆旋回(莫宣学,2009)。从火山岩的时空分布来看,始于 65 Ma 左右的岩浆活动主要出露在高原腹地的冈底斯带林子宗地区;而 45 Ma 以后的后碰撞火山活动首先发生在羌塘—“三江”北段,之后的岩浆活动继续向北西方向的可可西里、南部的冈底斯、高原东北角的西秦岭和西北角的西昆仑以及高原东南方向的“三江”地区迁移(莫宣学等,2007)。为此,Chung *et al.* (2005)和 Mo *et al.* (2006)提出青藏高原及其周边地区碰撞—后碰撞火成活动具有明显而有规律的时空迁移特征,并推测其成因与印度—欧亚大陆强烈碰撞诱发的高原下深部物质的横向流动有关。

陈忠等(2004)和喻学惠等(2006)基于对马关深源岩石包体的研究也发现,马关地区的大地热流值和上地幔的流动应力均高于中国东部,采用各种深源包体平衡温压推算的包体起源深度可达到 93 km 左右,可能接近该区岩石圈底界或软流圈的深度,而深源包体的寄主玄武岩浆应该来源更深,直接起源于软流圈地幔。从金沙江—哀牢山—红河断裂带岩浆活动的时空分布来看,早期(65~45 Ma±)的岩浆岩主要分布在金沙江—哀牢山断裂带的北东段;晚期(45~20 Ma±)的岩浆活动集中出露在该带中段地区;而该断裂带东南端的马关地区,新生代玄武岩形成于 16 Ma 以后(Wang *et al.* , 2001)。综合以上,笔者认为马关地区新生代碱性玄武岩的成因与印度—欧亚大陆强烈碰撞诱发的软流圈物质的横向

流动有关。金沙江—哀牢山—红河断裂带自新生代以来的剪切走滑,为软流圈物质的上涌提供了通道。

3.3 结论

(1)马关地区新生玄武岩具有富碱特别是富钾的特征,岩石类型主要属钾玄岩。在稀土微量元素地球化学方面,具有富集 LREE 和 LILE 的特征,经标准化后的稀土和微量元素分配型式总体上显示出与 OIB 相似的特征。

(2)马关地新生代玄武岩中含有大量深源岩石包体和高压巨晶,岩石的斑晶含量少且结晶程度低,以及相容元素 Ni 含量高等特征均表明,该区玄武岩总体应该属于原生玄武岩浆。影响岩石的 Mg[#] 变化范围大且总体偏低的原因很多,尚须进一步深入研究。

(3)马关地区新生代玄武岩产于板内构造环境,其成因与印度—欧亚大陆的碰撞诱发的深部地幔物质的流动与软流圈向高原东南方向侧向挤出有关。金沙江—哀牢山—红河断裂带自新生代以来的剪切走滑,为软流圈地幔上涌提供了通道。

References

Bergman, S. C. , 1987. Lamproites and other potassium-rich igneous rocks: a review of their occurrence, mineralogy and geochemistry. In: Fitton, J. G. , Upton, B. G. J. , eds. , Alkaline igneous rocks. *Geol. Soc. Spec. Publ.* , 30: 103–190.
Carlson, R. W. , Nowell, G. M. , 2001. Olivine-poor sources for mantle-derived magmas: Os and Hf isotopic evidence from potassic magmas of the Colorado plateau. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* , 2(6): 1034. doi: 10. 1029/2000GC000128
Chen, Z. , Qiu, X. L. , Lu, Q. , et al. , 2004. Microstructures of olivine from Cenozoic mantle-derived spinel-lherzolite

- xenoliths beneath Maguan, Yunnan Province and its reflection of physical state of upper mantle. *Journal of Tropical Oceanography*, 23(1): 34–43 (in Chinese with English abstract).
- Chung, S. L., Chu, M. F., Zhang, Y. Q., et al., 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth Science Reviews*, 68(3–4): 173–196. doi: 10.1016/j.earscirev.2004.05.004
- Chung, S. L., Liu, D. Y., Ji, J. Q., et al., 2003. Adakites from continental collision zones: melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geology*, 31(11): 1021–1024. doi: 10.1130/G19796.1
- Chung, S. L., Lo, C. H., Lee, T. Y., et al., 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Myr ago. *Nature*, 394: 723–725. doi: 10.1038/29511
- Corticelli, S., 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. doi: 10.1016/0024-4937(92)9008-M
- Deng, J. F., Luo, Z. H., Su, S. G., 2004. Petrogenesis, tectonic setting and mineralization. Geological Publishing House, Beijing, 3–49 (in Chinese).
- Deng, W. M., Huang, X., Zhong, D. L., 1998a. Petrological characteristics and genesis of Cenozoic alkali-rich porphyry in West Yunnan, China. *Scientia Geologica Sinica*, 33(4): 412–425 (in Chinese with English abstract).
- Deng, W. M., Huang, X., Zhong, D. L., 1998b. Alkali-rich porphyry and its relation with intraplate deformation of north part of Jinsha river belt in western Yunnan, China. *Science in China (Ser. D)*, 28(2): 111–117 (in Chinese with English abstract).
- Evensen, N. M., Hamilton, P. J., O'Nions, R. K., 1978. Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42(8): 1199–1212. doi: 10.1016/0016-7037(78)90114X
- Foley, S. F., Venturelli, G., Green, D. H., et al., 1987. The ultrapotassic rocks: characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models. *Earth Science Reviews*, 24(2): 81–134. doi: 10.1016/0012-8252(87)90001-8
- Foley, S., 1992a. Petrological characterization of the source components of potassic magmas: geochemical and experimental constraints. *Lithos*, 28(3–6): 187–204. doi: 10.1016/0024-4937(92)90006-K
- Foley, S., 1992b. Vein-plus-wall-rock melting mechanisms in the lithosphere and the origin of potassic alkaline magmas. *Lithos*, 28(3–6): 435–453. doi: 10.1016/0024-4937(92)90018-T
- Frey, F. A., Green, D. H., Roy, S. D., 1978. Integrated models of basalt petrogenesis: a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from south eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data. *Journal of Petrology*, 19(3): 463–513. doi: 10.1093/petrology/19.3.463
- Gao, S., Liu, X. M., Yuan, H. L., et al., 2002. Determination of forty two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards Newsletter—Journal of Geostandards and Geoanalysis*, 26(2): 181–196. doi: 10.1111/j.1751-908X.2002.tb00886.x
- Le Maitre, R. W., 1989. Igneous rocks: a classification and glossary of terms. Cambridge University Press, New York.
- Li, T., Yao, J. R., 1963. The average chemical composition of igneous rocks in China. *Acta Geologica Sinica*, 43(3): 271–280 (in Chinese with English abstract).
- Mei, H. J., 1966. Olivine basalt and camptonite with peridotite xenoliths from Makwan, Yunnan. *Sci. Geol. Sinica*, (1): 50–60 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., 1984. The partial molar volumes of oxide components in magmas and their petrological applications. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology*, 24(1): 31–42 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., 1988. Generation of Cenozoic basalts in eastern China. In: Chi, J. S., ed., Research on Cenozoic basalts and upper mantle in eastern China. China University of Geoscience Press, Wuhan, 108–125 (in Chinese).
- Mo, X. X., 2009. Geodynamic significance of Cenozoic igneous rocks in the Tibetan plateau. In: Mo, X. X., Zhao, Z. D., Yu, X. H., et al., eds., Cenozoic syn-collisional and post-collisional igneous rocks in the Tibetan plateau. Geology Press, Beijing, 367–370 (in Chinese).
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Deng, J. F., et al., 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., 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)
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Deng, J. F., et al., 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).
- Morrison, G. W., 1980. Characteristics and tectonic setting of

- the shoshonite rock association. *Lithos*, 13 (1): 97 — 108. doi:10.1016/0024-4937(80)90067-5
- Muller, D., Rock, N. M. S., Groves, D. I., 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic settings: a pilot study. *Mineral. Petrol.*, 46 (4): 259 — 289. doi: 10.1007/BF01173568
- Nelson, D. R., McCulloch, M. T., Sun, S., 1986. The origins of ultrapotassic rocks as inferred from Sr, Nd and Pb isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50 (2): 231—245. doi:10.1016/0016-7037(86)90172-9
- O'Reilly, S. Y., Zhang, M., Griffin, W. L., et al., 2009. Ultra-deep continental roots and their oceanic remnants: a solution to the geochemical “mantle reservoir” problem. *Lithos*, 211(Suppl. 2):1043—1054. doi:10.1016/j.lithos.2009.04.028
- Rogers, N. W., Hawkesworth, C. J., Matthey, D. P., et al., 1987. Sediment subduction and the source of potassium in orogenic leucitites. *Geology*, 15(5): 451—453. doi: 10.1130/0091-7613(1987)15<451:SSATSO>2.0.CO;2
- Shu, X. X., 1995. The genesis of Cpx-peridotitic xenoliths in basanite of Maguan, Yunnan Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 14(1): 47—51 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the Ocean basins*. Geological Society Special Press, London, 42: 313—345.
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A. Y., et al., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10 (12): 611—616. doi:10.1130/0091-7613(1982)10<611:PETIAN>2.0.CO;2
- Varne, R., 1985. Ancient subcontinental mantle: a source for K-rich orogenic volcanics. *Geology*, 13 (6): 405—408. doi:10.1130/0091-7613(1985)13<405:ASMASF>2.0.CO;2
- Wang, J. H., Yin, A., Harrison, T. M., et al., 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone. *Earth, Planet. Sci. Lett.*, 188(1—2): 123—133. doi:10.1016/S0012-821X(01)00315-6
- Wang, J., Li, J. P., Wang, J. H., 2003. Shoshonitic magmatism in Dali-Jianchuan area, western Yunnan: a geochemical study of arc magmatism in a post-collisional strike-slip extensional setting. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1):61—70 (in Chinese with English abstract).
- Wei, Q. R., Li, D. W., Zheng, J. P., et al., 2006. Study on petrology and mineralogy of pyrolite xenolith in Maguan area, eastern Tibet. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 26(1):20—28 (in Chinese with English abstract).
- Wei, Q. R., Wang, J. H., 2004. 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).
- Wei, Q. R., Wang, J. H., 2004. Geochemical characteristics of Cenozoic basaltic high-K volcanic rocks from Maguan area, eastern Tibet. *Chinese Journal of Geochemistry*, 23 (1):57—64.
- Wei, Q. R., Wang, J. H., Xie, G. H., 2003. The chemical composition characteristics of clinopyroxenes from spinel-lherzolite xenoliths in Maguan area, eastern Tibet and its significance. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 87—92 (in Chinese with English abstract).
- Xia, P., Xu, Y. G., 2004. Lithosphere mantle domain discrimination and enrichment mechanism in West Yunnan: a study on the contrast of two types of Cenozoic ultra-potassic volcanic rocks. *Sci. China (Ser. D)*, 34(12): 1118—1128 (in Chinese with English abstract).
- Xia, P., Xu, Y. G., 2006. Mantle-derived xenoliths in Maguan Cenozoic potassic basalt, Southeast Yunnan and its bearing on lithospheric composition and dynamics. *Geochimica*, 35 (1): 27—40 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., Menzies, M. A., Thirlwall, M. F., et al., 2001. Exotic lithosphere mantle beneath the western Yangtze craton: Petrogenetic links to Tibet using highly magnesian ultrapotassic rocks. *Geology*, 29(9): 863—866. doi:10.1130/0091-7613(2001)029<0863
- Yu, X. H., 2009. The origin, genesis and dynamics of Cenozoic volcanism in western Yunnan. In: Mo, X. X., Zhao, Z. D., Yu, X. H., et al., eds., *Cenozoic syn-collisional and post-collisional igneous rocks in Tibetan plateau*. Geology Press, Beijing, 268—272 (in Chinese).
- Yu, X. H., Mo, X. X., Zeng, P. S., et al., 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).
- Yu, X. H., Mo, X. X., Zhao, Z. D., et al., 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, Y. Q., Xie, Y. W., 1997. Geochronology of Ailaoshan-Jinshajiang alkali-rich intrusive rocks and their Sr and

- Nd isotopic characteristics. *Sci. China (Ser. D)*, 27(4): 289—293 (in Chinese).
- Zhao, Z. H., 2007. How to use the trace element diagrams to discriminate tectonic settings. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(1): 92—103 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈忠, 丘学林, 陆琦, 等, 2004. 云南马关新生代地幔包体中橄榄石的显微构造及其反映的上地幔物理状态特征. *热带海洋学报*, 23(1): 34—43.
- 邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 等, 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用. 北京: 地质出版社, 3—49.
- 邓万明, 黄萱, 钟大赉, 1998a. 滇西新生代富碱斑岩的岩石特征与成因. *地质科学*, 33(4): 412—425.
- 邓万明, 黄萱, 钟大赉, 1998b. 滇西金沙江带北段的富碱斑岩及其与板内变形的关系. *中国科学(D 辑)*, 28(2): 111—117.
- 黎彤, 饶纪龙, 1963. 中国岩浆岩的平均化学成分. *地质学报*, 43(3): 271—280.
- 梅厚钧, 1966. 云南马关含橄榄岩捕虏体的玄武岩和煌斑岩. *地质科学*, 1: 50—63.
- 莫宣学, 1984. 岩浆中氧化物组分的偏摩尔体积及其岩石学意义. *地球科学——武汉地质学院学报*, 24(1): 31—42.
- 莫宣学, 1988. 中国东部新生代玄武岩岩浆的起源. 见: 池际尚著, 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 108—125.
- 莫宣学, 2009. 青藏高原新生代火成岩的地球动力学意义. 见: 莫宣学, 赵志丹, 喻学惠, 等著, 青藏高原新生代碰撞—后碰撞火成岩. 北京: 地质出版社, 367—370.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等, 2007. 青藏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.
- 舒小辛, 1995. 云南马关地区碧玄岩中单辉橄榄岩包体的成因. *岩石矿物学杂志*, 14(1): 47—51.
- 王建, 李建平, 王江海, 2003. 滇西大理—剑川地区钾玄质岩浆作用: 后碰撞走滑拉伸环境岛弧型岩浆作用的地球化学研究. *岩石学报*, 19(1): 61—70.
- 魏启荣, 李德威, 郑建平, 等, 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, 2004. 云南马关尖晶石相二辉橄榄岩包体的平衡温压条件及其指示意义. *矿物学报*, 24(3): 278—284.
- 魏启荣, 王江海, 解广轰, 2003. 青藏东缘马关尖晶石二辉橄榄岩包体中单斜辉石的成分特征及其意义. *地学前缘*, 10(3): 87—92.
- 夏萍, 徐义刚, 2004. 滇西岩石圈地幔域分区和富集机制: 新生代两类超钾质火山岩的对比研究. *中国科学(D 辑)*, 12(4): 1118—1128.
- 夏萍, 徐义刚, 2006. 滇东南马关地区新生代钾质玄武岩中幔源包体研究: 深部物质组成与动力学过程探讨. *地球化学*, 35(1): 27—40.
- 喻学惠, 2009. 滇西地区新生代火山作用的起源、成因及深部动力学背景. 见: 莫宣学, 赵志丹, 喻学惠, 等著, 青藏高原新生代碰撞—后碰撞火成岩. 北京: 地质出版社, 268—272.
- 喻学惠, 莫宣学, 曾普胜, 等, 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.
- 喻学惠, 莫宣学, 赵志丹, 等, 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.
- 张玉泉, 谢应雯, 1997. 哀牢山—金沙江富碱侵入岩年代学和 Nd, Sr 同位素特征. *中国科学(D 辑)*, 27(4): 289—293.
- 赵振华, 2007. 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题. *大地构造与成矿学*, 31(1): 92—103.