

· 专题研究 ·

青藏高原西北缘新生代超基性-基性岩脉锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征

晁文迪, 厉小钧

(中国冶金地质总局 西北地质勘查院, 陕西 西安 710119)

摘要: 青藏高原西北缘米提孜北新发现多条新生代超基性-基性岩脉。岩脉侵位于长城纪赛拉加兹塔格岩群中, 整体位于柯岗断裂北侧附近, 近东西向展布。岩脉岩性为闪斜煌岩和云斜煌岩, 分别具钠质碱性煌斑岩和钠质钙碱性煌斑岩地球化学特征。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得闪斜煌岩年龄为 38.24 ± 0.54 Ma, 表明岩脉形成于新生代古近纪。岩脉稀土元素总量偏低 ($64.28 \times 10^{-6} \sim 253.41 \times 10^{-6}$), Eu ($\delta Eu = 1.04 \sim 1.21$) 和 Ce ($\delta Ce = 0.99 \sim 1.03$) 异常均不明显, 稀土元素配分模式呈 LREE 富集 (LREE/HREE = 4.15 ~ 6.45) 的右倾型, 大离子亲石元素 (LILE) 相对富集, 高场强元素 (HFSE) 相对亏损。研究结果显示, 岩脉是岩石圈地幔低程度部分熔融的产物, 岩浆活动持续时间短, 岩脉侵位后冷却速度快; 岩脉产出于走滑构造体制下, 大型走滑断裂控制了岩浆活动的发生和岩脉的分布。

关键词: 超基性-基性岩脉; 锆石 U-Pb 年代学; 地球化学; 青藏高原西北缘; 米提孜北

中图分类号: P588.12; P595; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)01-0001-17

Zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of Cenozoic ultrabasic-basic dyke swarms in northwestern Tibetan Plateau

CHAO Wen-di and LI Xiao-jun

(Northwest Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Xi'an 710119, China)

Abstract: Cenozoic ultrabasic-basic dyke swarms were newly discovered in northern Mitizi area in northwest Tibetan Plateau. The dyke swarms intruded into the Changchengian Sailajiazitage Group. The nearly E-W-trending dyke swarms are located on the northern margin of Kogan Fault. The rocks are mainly composed of spessartite and ker-santite, which have features of AL_{Na} and CAL_{Na} respectively, as shown by geochemical analyses. The LA-ICP-MS zircon U-Pb age of spessartite yielded an age of 38.24 ± 0.54 Ma, suggesting that these dyke swarms were formed in Paleogene. The dyke swarms have low REE ($64.28 \times 10^{-6} \sim 253.41 \times 10^{-6}$), and the anomalies of Eu ($\delta Eu = 1.04 \sim 1.21$) and Ce ($\delta Ce = 0.99 \sim 1.03$) are not obvious. REE distribution patterns are of the right-oblique type (LREE/HREE = 4.15 ~ 6.45). All samples are characterized by the relative enrichment of LILE and depletion of HFSE. The dyke swarms are products of low degree partial melting of lithospheric mantle. The magmatic activity lasted for a short time and the dyke swarms had quick cooling rate after intruding into the surrounding rocks. The tectonic setting of the dyke swarms was strike-slip fault, and the magmatism occurred along the large scale strike-slip faults.

Key words: ultrabasic-basic dyke swarms; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; geochemistry; northwestern Tibetan

收稿日期: 2019-05-15; 接受日期: 2019-11-05; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国地质调查局资助项目(DD20160003)

作者简介: 晁文迪(1991-), 男, 工程师, 从事区域地质调查和矿产地质调查相关工作, E-mail: chaowendi@qq.com。

Plateau; northern Mitizi

Fund support: Project of China Geological Survey(DD20160003)

青藏高原西北缘是印度洋向北扩张挤压应力聚集的地带,也是陆-陆碰撞造山带的典型地区之一(肖序常等, 2002),自显生宙以来遭受了强烈的挤压,构造复杂,因而成为了研究青藏高原周缘造山带及青藏高原早期演化的热点地区(Pan *et al.*, 1996; 丁道桂等, 1996, Zhang *et al.*, 2007; 李荣社等, 2008; 康磊等, 2012)。伴随着岩石圈的缩短、增厚和隆升,青藏高原北向扩展,在西北缘发育一系列新生代岩浆岩。这些岩浆岩包括了侵入岩和火山岩两类,其中侵入岩主要为中酸性,具富碱特征,主要出露于塔什库尔干地区等地(柯珊等, 2006, 2008);火山岩主要为基性,具钾质特征,主要出露于康西瓦、大红柳滩、泉水沟、甜水海、阿什库勒和普鲁等地(鲍佩声等, 2006; Zhang *et al.*, 2008; 王洪燕等, 2011)。岩浆岩作为探测深部的“探针”和“窗口”,也是区域构造演化的记录,在青藏高原大陆动力学研究中有着重要的作用(莫宣学, 2011)。前人对该区以新生代富碱侵入岩和钾质火山岩为代表的岩浆岩进行了较为详尽的研究,但是目前对青藏高原西北缘新生代岩浆岩的研究仅限于中酸性和基性岩浆岩,相关区域构造演化结论也只是基于这些中酸性和基性岩浆岩而得出。本文首次于青藏高原西北缘米提孜北发现多条新生代超基性-基性岩脉,表明该区新生代岩浆岩不仅存在中酸性岩和基性岩,还存在超基性-基性岩,相关区域构造背景的探讨也必须考虑到这些超基性-基性岩的存在。本文对这些新发现的超基性-基性岩脉进行了锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究,试图探讨其成因机制和大地构造意义,为研究青藏高原北向扩展和西北缘新生代岩石圈的演化过程提供新的证据。

1 地质概况及岩石学特征

青藏高原西北缘位于中央造山带的最西端(姜春发等, 2000; 张传林等, 2005)、古亚洲洋和特提斯构造域的结合部位(任纪舜, 1999; 薛光琦等, 2005),区域岩浆活动频繁,尤其以新生代岩浆活动最为强烈(于晓飞等, 2012),形成了主要沿喀喇昆仑断裂分布的塔什库尔干碱性岩浆岩带和主要沿康西瓦断裂分布的钾质火山岩带。

本文研究的超基性-基性岩脉位于青藏高原西北缘米提孜北,新疆和田地区喀拉喀什河上游,构造上位于塔里木板块西南缘铁克里克断隆带内(图 1b),整体位于柯岗断裂北侧附近。柯岗断裂是划分塔里木陆块和西昆仑造山带的边界断裂(赵佳楠等, 2013),整体呈北西向弧形展布,位于康西瓦断裂北侧。通过 1:5 万区域地质调查工作,目前在米提孜北共发现 7 处超基性-基性岩脉(图 1a),分别位于阿西帕克、都拉希和乌鲁瓦提水利枢纽南。岩脉所在地平均海拔约 3 000 m,山势陡峭,切割强烈,高差大。

超基性-基性岩脉主要呈脉状产于长城纪赛拉加兹塔格岩群中,围岩主要为各类石英片岩和变质分异石英条带。岩脉总体呈近东西向展布,一般高角度切穿主期片理面,库娜提大型向形构造南北两侧皆有出现。岩脉延伸可达数十米,但仅有少数线性特征明显(图 2a),大部分岩脉被巨厚的风成沙覆盖,野外和遥感影像上线性特征均不明显。单个脉体宽度不一,最宽者可达 20 余米,最窄者宽度不足 1 m(图 2b)。

超基性-基性岩脉全部呈致密块状,大都具典型的煌斑结构,主要由斑晶和基质组成。斑晶含量 11% ~ 15%,大部分为角闪石或者黑云母。其中角闪石斑晶呈柱状或近自形菱形状,个别见两组菱形解理,粒径 0.8 ~ 2.4 mm,整体具强绿泥石化和绿帘石化,沿解理析出黑色金属矿物,或沿解理分布深褐色自形晶黑云母(图 2c);黑云母斑晶呈深褐色,叶片状,整体绿泥石化,晶形大多较完好,一组解理清晰。基质主要由角闪石、黑云母和钠长石组成,钠长石可见钠长双晶,自形程度整体较斑晶低,且浅色矿物的自形程度较暗色矿物低,基质中角闪石和黑云母整体亦绿泥石化。副矿物榍石见弱钛铁矿化。镜下偶见裂隙,裂隙中大都充填碳酸盐矿物。斑晶角闪石边部或者内部沿解理分布自形片状黑云母,而非细小鳞片状,表明黑云母可能为角闪石分离结晶形成;次生蚀变矿物绿帘石、绿泥石遍布斑晶和基质中,表明岩脉后期整体可能遭受了一定程度的热液蚀变。由于超基性-基性岩脉中的斑晶大部分为角闪石或者黑云母,且基质中浅色矿物主要为斜长石而非碱性长石,可以按照其具体矿物成分定名为闪

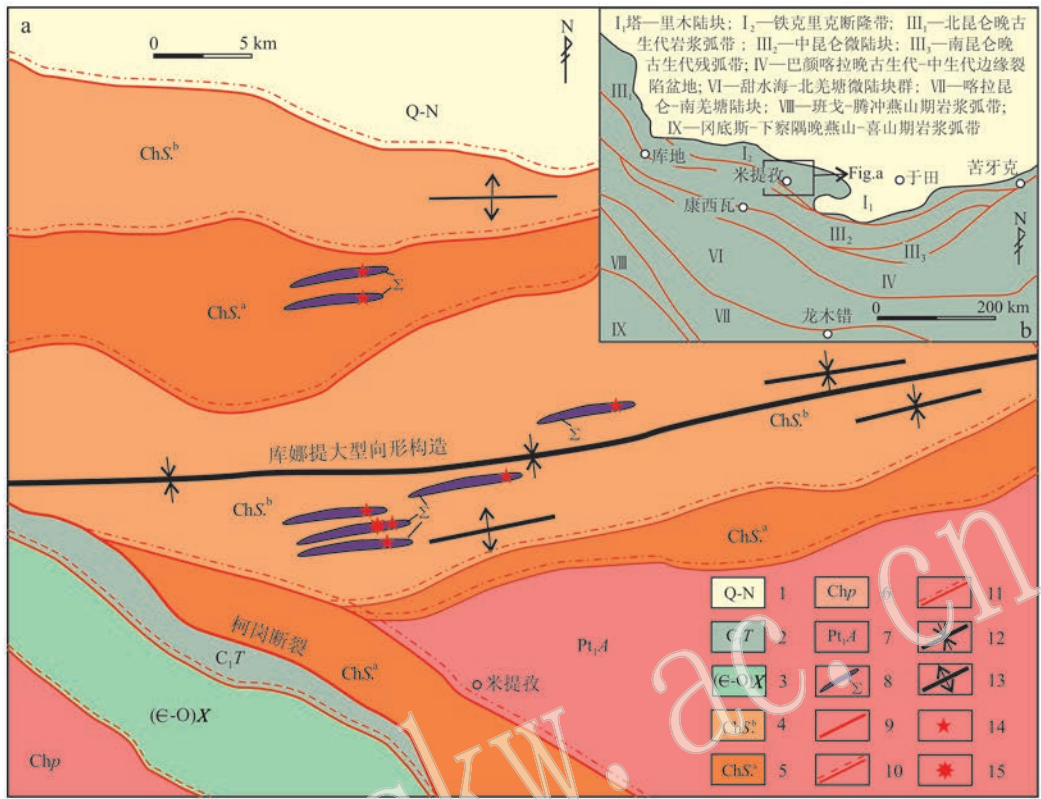


图 1 米提孜一带地质简图 [a, 据陕西省地质调查院(2006)^①、中国冶金地质总局西北地质勘查院(2019)^②]和青藏高原西北缘构造单元划分图(b, 据李荣社等, 2008)

Fig. 1 Sketch geological map of Mitizi (a, after Shaanxi Institute of Geological Survey, 2006^① and Northwest Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, 2019^②) and division of geological tectonic units in northwestern Tibetan Plateau (b, after Li Rongshe *et al.*, 2008)

- 1—第四系-新近系; 2—石炭纪他龙群; 3—寒武-奥陶纪西合休岩群; 4—长城纪赛拉加兹塔格岩群 B 岩组; 5—长城纪赛拉加兹塔格岩群 A 岩组; 6—长城纪普守岩组; 7—埃连卡特岩群; 8—超基性-基性岩脉; 9—边界断裂; 10—深大断裂; 11—脆韧性断裂; 12—向形轴; 13—背形轴; 14—主微量样品采集点; 15—锆石 U-Pb 样品采集点
- 1—Quaternary-Neogene; 2—Carboniferous Talong Group; 3—Cambrian-Ordovician Xihexiu Group; 4—B Formation of Changchengian Sailajiazitage Group; 5—A Formation of Changchengian Sailajiazitage Group; 6—Changchengian Pushou Group; 7—Ailiankate Group; 8—ultrabasic-basic dyke swarms; 9—boundary fault; 10—large fault; 11—brittle shear fault; 12—syncline axis; 13—anticlinal axis; 14—sampling location of major and trace elements; 15—sampling location of zircon U-Pb dating

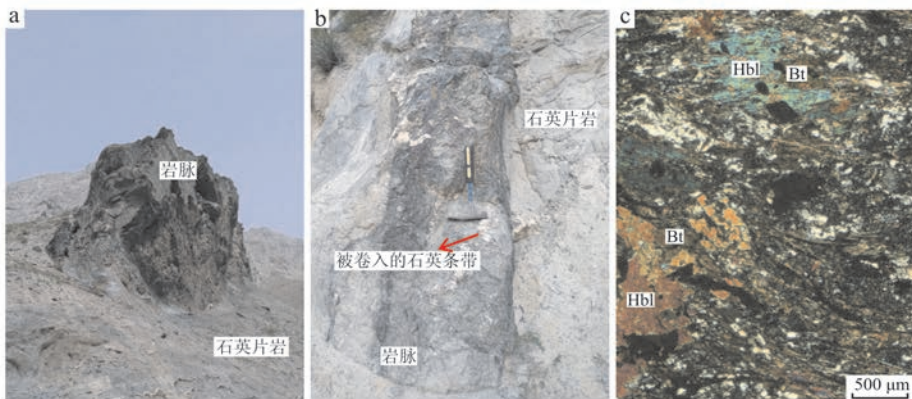


图 2 米提孜北超基性-基性岩脉野外露头特征(a,b)和正交偏光显微照片(c)

Fig. 2 Field characteristics (a, b) and microphotograph (c, crossed nicols) of ultrabasic-basic dyke swarms in northern Mitizi
 a & b—ultrabasic-basic dyke swarms; c—petrographic section of ultrabasic-basic dyke swarms; Hbl—hornblende; Bt—biotite (mineral abbreviations after Shen Qihan, 2009)

① 陕西省地质调查院. 2006. 1:25 万康西瓦幅(J44C 004001)、恰哈幅(J44 C 004002)区域地质调查报告.

② 中国冶金地质总局西北地质勘查院. 2019. 1:5 万吐鲁干直幅(J44E 020006)、库娜提阿格子幅(J44E 020007)、米提孜幅(J44E 021006)区域地质调查报告.

斜煌岩或者云斜煌岩,其中斑晶多见角闪石的为闪斜煌岩,斑晶多见黑云母的为云斜煌岩。

2 分析方法

本文主要对超基性-基性岩脉进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、主量元素和微量元素分析,用于分析测试的样品均采自实测剖面 and 地质路线,分析方法如下:

用于锆石 U-Pb 定年的样品经锆石单矿物挑选、制备样品靶之后,拍摄阴极发光图像、透射光图像和反射光图像,选取分析点位。锆石的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)原位 U-Pb 定年在中国地质调查局西安地质调查中心的自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成。实验室采用的 ICP-MS 为美国 Agilent 公司生产的 Agilent7700x,剥蚀系统为德国 MircoLas 公司生产的 GeoLas Pro,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm ,考虑超基性-基性岩脉样品锆石颗粒普遍较小,激光剥蚀束斑直径调整为约 25 μm 。锆石年龄采用标准锆石 91500 作为外部标准物质,元素含量外标为 NIST SRNI610。在锆石的同位素比值及元素含量计算中选用 ^{29}Si 作为内标(袁洪林等, 2003),具体分析步骤和数据处理方法参见相关文献(Ballard *et al.*, 2001; Košler *et al.*, 2002)。应用 Glitter(ver4.0, Macquarie University)计算程序计算锆石的表面年龄及标准偏差,并对测

试过程中产生的元素分馏和质量歧视进行校正(Andersen, 2002)。应用 Isoplot 计算程序对锆石样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄在谐和图上进行投图,并计算年龄谐和测点的加权平均值(weighted average,基于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄)(Ludwig, 2003)。

采自 7 个已发现超基性-基性岩脉的 7 件主、微量样品分析在长安大学成矿作用及其动力学实验室完成。主量元素分析采用 X 射线荧光光谱法(XRF)完成,所用主要仪器为日本岛津顺序扫描 LAB CENTER XRF-1800 型波长色散 X 射线荧光光谱仪,分析精度优于 1%。微量元素分析采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)完成,所用主要仪器为美国热电 X-7 型、安捷伦 7700E 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析仪,样品测试经 BHVO-2、AGV-1、BCR-2 国际标样监控,分析方法详见 Liang 等(2000),分析精度优于 5%。烧失量(LOI)是样品在烘箱中经 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 高温烘烤 90 min 后称重获得的。

3 超基性-基性岩脉地质时代

用于锆石 U-Pb 测年的样品(PM05-25-2RZ)采自阿西帕克(图 1a),样品岩性为灰黑色闪斜煌岩。挑选出的单颗粒锆石为浅黄色-无色透明,自形程度一般,大都呈半自形-它形,部分呈半浑圆状,蚀变不明显。由锆石阴极发光图像可知(图 3),锆石多数颗粒较小,粒径大多为 50~150 μm 。锆石大小不一,

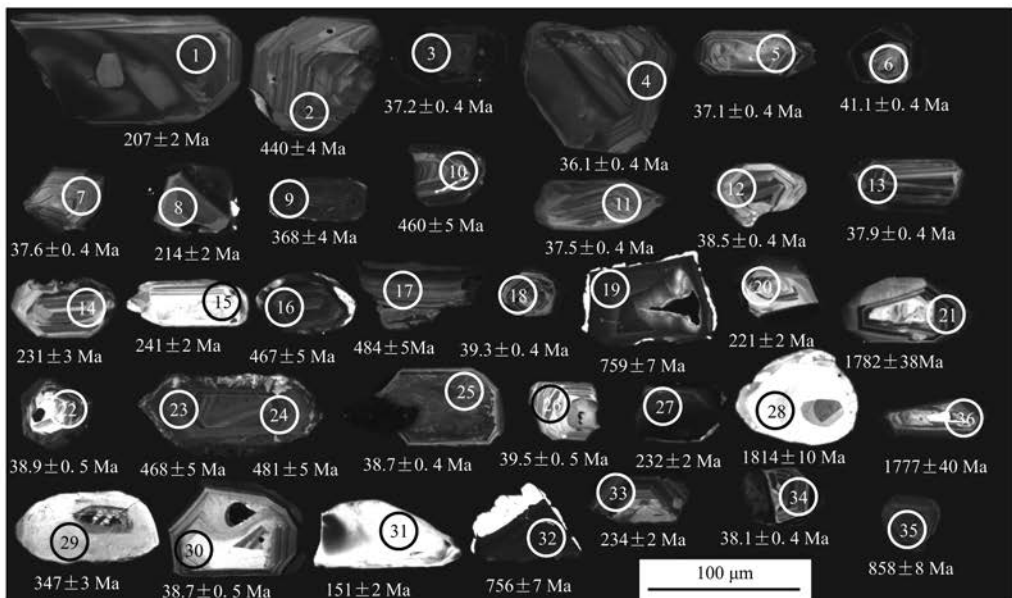


图 3 米提孜北闪斜煌岩样品锆石 CL 图像
Fig. 3 Zircon CL images of spessartite from northern Mitizi

形态比较单一,多数不完整,短柱状,部分呈不规则状。锆石大都可见振荡环带或者扇形分带结构,但环带整体不发育,反映锆石可能是在不自由的环境中生长的,这种环境很可能是快速降温的环境。

PM05-25-2RZ 号样品共有 36 个有效锆石点,样品分析测试结果见表 1。36 个样品测点 ^{232}Th 含量为 $12.37 \times 10^{-6} \sim 1580.71 \times 10^{-6}$, ^{238}U 含量为 $66.21 \times 10^{-6} \sim 2981.68 \times 10^{-6}$, ^{232}Th 和 ^{238}U 的含量变化范围较大。MT28 和 MT31 号测点 Th/U 值分别为 0.29 和 0.05, 小于 0.4, 且 CL 图像显示分带较弱, 可能为变质成因锆石(吴元保等, 2004), 可能是来自于变质基底的捕获锆石; MT29 号测点 Th/U 值为 0.18, 年龄谐和度亦较差。除上述 3 个测点外, 其余锆石 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值大部分大于 0.4, 结合其振荡环带或者扇形分带结构, 应属岩浆成因锆石(Pidgeon *et al.*, 1998; Claesson *et al.*, 2000)。

36 个测点的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 1 886.0 ~ 36.1 Ma, 总体上变化较大。统计分析发现, 绝大部分测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄小于 700 Ma, 仅有 6 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄大于 700 Ma。具体分析 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄大于 700 Ma 的 6 个测点(MT19、MT21、MT28、MT32、MT35、MT36)可以发现, MT19 号测点(Th = 1348.95×10^{-6} , U = 446.17×10^{-6})和 MT32 号测点(Th = 1580.71×10^{-6} , U = 555.16×10^{-6})的 Th、U 的含量明显高于其他测点; MT21 号测点 [$100(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄)/($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄) = 154.15] 和 MT36 号测点 [$100(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄)/($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄) = 157.12] 的谐和度较差; MT28 号测点(Th = 18.91×10^{-6} , U = 66.21×10^{-6})的 Th、U 含量明显低于其他测点; MT28 号测点的锆石粒径则明显低于其他锆石(图 3)。也就是说, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄大于 700 Ma 的 6 个锆石与其他锆石具有明显不同的特征, 可能为来自于变质基底或者过渡型基底的捕获锆石。

除去上述 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄大于 700 Ma 的这 6 个测点及年龄谐和度较差的 MT29 号测点 [$100(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄)/($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄) = 115.85], 在剩余 29 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄小于 700 Ma 的测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄谐和图(图 4a)上, 可以发现年龄值大部分集中在 ~40 Ma、250 ~ 200Ma 和 500 ~ 450 Ma 这 3 个区间。年龄位于这 3 个区间内的数据点大都落在谐和线上及附近, 说明可能并未发生明显的 Pb 丢失。其中第 1 组样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 472 ± 21 Ma, 时代为早奥陶世(图 4b); 第 2 组样

品的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 228 ± 11 Ma, 时代为晚三叠世(图 4c); 第 3 组样品的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 38.24 ± 0.54 Ma, 时代为古近纪始新世(图 4d)。前两组样品的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄相对第 3 组样品偏老, 结合锆石自形程度整体相对较差且部分呈半浑圆状的特征, 推测这些锆石可能是岩浆上升过程中从围岩捕获的, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄可能代表了捕获锆石年龄; 第 3 组样品的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄最年轻, 锆石自形程度亦相对较好, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄应代表闪斜煌岩的结晶年龄(即形成年龄), 为新生代古近纪。

4 超基性-基性岩脉地球化学特征

4.1 主量元素地球化学特征

超基性-基性岩脉样品的主量元素分析结果见表 2。其 SiO_2 含量介于 42.70% ~ 46.26% 之间, 平均 44.64%, 属于超基性岩-基性岩范畴; TiO_2 含量较高, 介于 1.96% ~ 4.32% 之间, 平均 2.52%; Al_2O_3 含量介于 12.39% ~ 15.67% 之间, 平均 14.20%; MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 均较低, MgO 含量介于 4.85% ~ 8.16% 之间, 平均 6.00%, $\text{Mg}^\#$ 则介于 36.36 ~ 51.44 之间, 平均 46.22; Na_2O 介于 1.71% ~ 3.22% 之间, 平均 2.68%; 全碱含量($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量介于 2.84% ~ 5.07% 之间, 平均 3.76%; K_2O 含量较低, 介于 0.82% ~ 1.13% 之间, 平均 1.09%, 远低于钾镁煌斑岩的相应值($\text{K}_2\text{O} = 5\% \sim 10\%$)(叶德隆, 1993)。在 TAS 图解中(图 5a), 大部分样品投入了碱性的玄武岩、碱玄岩、碧玄岩和苦橄玄武岩区域, 两个样品投在碱性和亚碱性玄武岩边界附近。利用抗蚀变元素 $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$ 图解(图 5b)进行进一步判别, 大部分样品投入亚碱性区域, 两个样品投在了碱性玄武岩区域, 这与 TAS 图解不一致, 可能与超基性-基性岩脉遭受了一定程度的蚀变有关。

按路凤香等(1991)对煌斑岩的分类原则, 在 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解中(图 6a), 样品投入钠质碱性煌斑岩区和钠质钙碱性煌斑岩区。参考 Rock(1987)所提供的特征矿物作为参考, 亦出现碱性煌斑岩和钙碱性煌斑岩两类, 这与斑晶出现角闪石和黑云母两种矿物相吻合, 其中斑晶为角闪石的闪斜煌岩属于碱性煌斑岩, 斑晶为黑云母的云斜煌岩属于钙碱性煌斑岩。进一步利用 $\text{K}/\text{Al} - \text{K}/(\text{K} + \text{Na})$ 图解进行判别(图 6b), 所有样品均落在钠质煌斑岩区, 这与 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解所确定的钠质特征一致, 也与基质中

表 1 米提孜北闪斜煌岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses of spessartite in northern Mitizi

点号	$t_D/10^{-6}$				同位素比值				同位素年龄/Ma										
	^{232}Th	^{238}U	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Th}$	1 σ						
MT01	176.89	271.30	0.65	0.050 32	0.000 89	0.226 15	0.003 84	0.032 64	0.000 35	0.010 68	0.000 33	210.0	21.0	207.0	3.0	207.0	2.0	215.0	7.0
MT02	231.24	356.61	0.65	0.055 61	0.000 72	0.540 97	0.006 76	0.070 65	0.000 71	0.022 64	0.000 45	437.0	13.0	439.0	4.0	440.0	4.0	453.0	9.0
MT03	546.53	1 580.60	0.35	0.050 56	0.002 64	0.040 38	0.002 06	0.005 79	0.000 06	0.001 83	0.000 02	221.0	121.0	40.0	2.0	37.2	0.4	36.9	0.4
MT04	864.96	932.94	0.93	0.046 05	0.001 48	0.035 67	0.001 07	0.005 62	0.000 07	0.001 87	0.000 06	-	67.0	36.0	1.0	36.1	0.4	38.0	1.0
MT05	387.37	510.94	0.76	0.046 05	0.001 96	0.036 67	0.001 50	0.005 78	0.000 06	0.001 94	0.000 09	-	90.0	37.0	1.0	37.1	0.4	39.0	2.0
MT06	753.13	786.82	0.96	0.051 06	0.001 12	0.044 88	0.000 95	0.006 39	0.000 07	0.002 00	0.000 07	244.0	29.0	44.6	0.9	41.1	0.4	40.0	1.0
MT07	292.83	436.11	0.67	0.045 53	0.001 59	0.036 69	0.001 24	0.005 85	0.000 07	0.001 87	0.000 11	-27.0	47.0	37.0	1.0	37.6	0.4	38.0	2.0
MT08	143.53	278.86	0.51	0.050 60	0.000 93	0.235 38	0.004 17	0.033 80	0.000 36	0.010 07	0.000 38	223.0	22.0	215.0	3.0	214.0	2.0	203.0	8.0
MT09	683.71	2 981.68	0.23	0.055 95	0.000 59	0.452 32	0.004 68	0.058 74	0.000 58	0.016 76	0.000 25	450.0	10.0	379.0	3.0	368.0	4.0	336.0	5.0
MT10	221.53	381.66	0.58	0.055 08	0.000 71	0.561 01	0.007 01	0.074 00	0.000 75	0.021 78	0.000 46	415.0	13.0	452.0	5.0	460.0	5.0	435.0	9.0
MT11	553.79	723.84	0.77	0.054 81	0.001 34	0.043 99	0.001 04	0.005 83	0.000 07	0.001 83	0.000 08	404.0	32.0	44.0	1.0	37.5	0.4	37.0	2.0
MT12	560.51	622.22	0.90	0.046 05	0.001 24	0.038 08	0.000 94	0.006 00	0.000 07	0.002 01	0.000 07	-	55	37.9	0.9	38.5	0.4	41.0	1.0
MT13	826.59	1 051.60	0.79	0.046 02	0.001 00	0.037 38	0.000 79	0.005 90	0.000 07	0.001 84	0.000 06	-1.0	23.0	37.3	0.8	37.9	0.4	37.0	1.0
MT14	71.15	141.12	0.50	0.049 53	0.001 16	0.248 26	0.005 65	0.036 42	0.000 42	0.011 05	0.000 56	173.0	32.0	225.0	5.0	231.0	3.0	222.0	11.0
MT15	199.45	319.77	0.62	0.055 86	0.000 89	0.292 41	0.004 49	0.038 03	0.000 40	0.012 07	0.000 34	447.0	17.0	260.0	4.0	241.0	2.0	243.0	7.0
MT16	177.03	271.42	0.65	0.054 48	0.000 75	0.563 86	0.007 50	0.075 21	0.000 77	0.020 74	0.000 47	391.0	14.0	454.0	5.0	467.0	5.0	415.0	9.0
MT17	191.68	272.89	0.70	0.056 13	0.000 75	0.602 66	0.007 82	0.078 01	0.000 80	0.023 20	0.000 48	458.0	13.0	479.0	5.0	484.0	5.0	464.0	9.0
MT18	506.70	988.91	0.51	0.048 15	0.001 01	0.040 52	0.000 82	0.006 12	0.000 07	0.001 81	0.000 08	107.0	27.0	40.3	0.8	39.3	0.4	37.0	2.0

续表 1
Continued Table 1

点号	$^{46}\text{B}/10^{-6}$				$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$				同位素比值				同位素年龄/Ma						
	^{232}Th	^{238}U	^{238}U	^{232}Th	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	
MT19	1 348.95	446.17	3.02	0.062 03	0.000 71	1.066 48	0.011 91	0.124 93	0.001 26	0.037 06	0.000 39	675.0	11.0	737.0	6.0	759.0	7.0	736.0	8.0
MT20	80.79	165.28	0.49	0.052 49	0.001 07	0.251 53	0.004 97	0.034 82	0.000 39	0.010 78	0.000 47	307.0	25.0	228.0	4.0	221.0	2.0	217.0	9.0
MT21	102.22	287.44	0.36	0.108 93	0.002 23	2.950 51	0.051 88	0.196 44	0.002 06	0.056 86	0.000 64	1 782.0	38.0	1 395.0	13.0	1 156.0	11.0	1 118.0	12.0
MT22	724.35	710.00	1.02	0.051 12	0.004 28	0.042 67	0.003 53	0.006 05	0.000 08	0.001 91	0.000 02	246.0	192.0	42.0	3.0	38.9	0.5	38.5	0.4
MT23	421.27	799.72	0.53	0.055 14	0.000 63	0.571 46	0.006 40	0.075 31	0.000 76	0.022 86	0.000 35	418.0	11.0	459.0	4.0	468.0	5.0	457.0	7.0
MT24	253.56	802.03	0.32	0.055 28	0.000 63	0.589 87	0.006 61	0.077 54	0.000 78	0.025 03	0.000 45	424.0	11.0	471.0	4.0	481.0	5.0	500.0	9.0
MT25	556.03	651.48	0.85	0.045 56	0.001 25	0.037 73	0.001 00	0.006 02	0.000 07	0.001 72	0.000 07	-25.0	32.0	37.6	1.0	38.7	0.4	35.0	1.0
MT26	368.14	428.58	0.86	0.049 47	0.001 64	0.041 82	0.001 35	0.006 14	0.000 08	0.002 03	0.000 10	170.0	51.0	42.0	1.0	39.5	0.5	41.0	2.0
MT27	107.73	197.26	0.55	0.050 38	0.000 97	0.253 92	0.004 73	0.036 63	0.000 40	0.010 83	0.000 41	213.0	24.0	230.0	4.0	232.0	2.0	218.0	8.0
MT28	18.91	66.21	0.29	0.110 88	0.001 32	5.183 99	0.061 10	0.339 77	0.003 57	0.096 28	0.003 01	1 814.0	10.0	1 850.0	10.0	1 886.0	17.0	1 858.0	55.0
MT29	138.75	789.55	0.18	0.063 77	0.000 75	0.485 91	0.005 59	0.055 38	0.000 56	0.038 82	0.000 74	734.0	11.0	402.0	4.0	347.0	3.0	770.0	14.0
MT30	405.07	433.01	0.94	0.045 77	0.001 57	0.037 88	0.001 26	0.006 02	0.000 08	0.001 91	0.000 09	-14.0	43.0	38.0	1.0	38.7	0.5	39.0	2.0
MT31	12.37	265.10	0.05	0.048 04	0.000 98	0.156 49	0.003 11	0.023 67	0.000 26	0.008 25	0.001 31	101.0	27.0	148.0	3.0	151.0	2.0	166.0	26.0
MT32	1 580.71	555.16	2.85	0.062 52	0.000 70	1.070 19	0.011 90	0.124 41	0.001 26	0.037 13	0.000 38	692.0	11.0	739.0	6.0	756.0	7.0	737.0	7.0
MT33	139.56	312.39	0.45	0.048 90	0.000 81	0.248 46	0.004 03	0.036 93	0.000 40	0.011 21	0.000 37	143.0	19.0	225.0	3.0	234.0	2.0	225.0	7.0
MT34	767.78	1 336.37	0.57	0.047 66	0.000 91	0.038 84	0.000 72	0.005 92	0.000 06	0.001 69	0.000 06	82.0	25.0	38.7	0.7	38.1	0.4	34.0	1.0
MT35	158.93	190.31	0.84	0.067 19	0.000 84	1.316 44	0.016 20	0.142 40	0.001 48	0.041 34	0.000 73	844.0	12.0	853.0	7.0	858.0	8.0	819.0	14.0
MT36	151.17	309.30	0.49	0.108 65	0.002 30	2.872 82	0.052 56	0.191 77	0.002 06	0.055 52	0.000 59	1 777.0	40.0	1 375.0	14.0	1 131.0	11.0	1 092.0	11.0

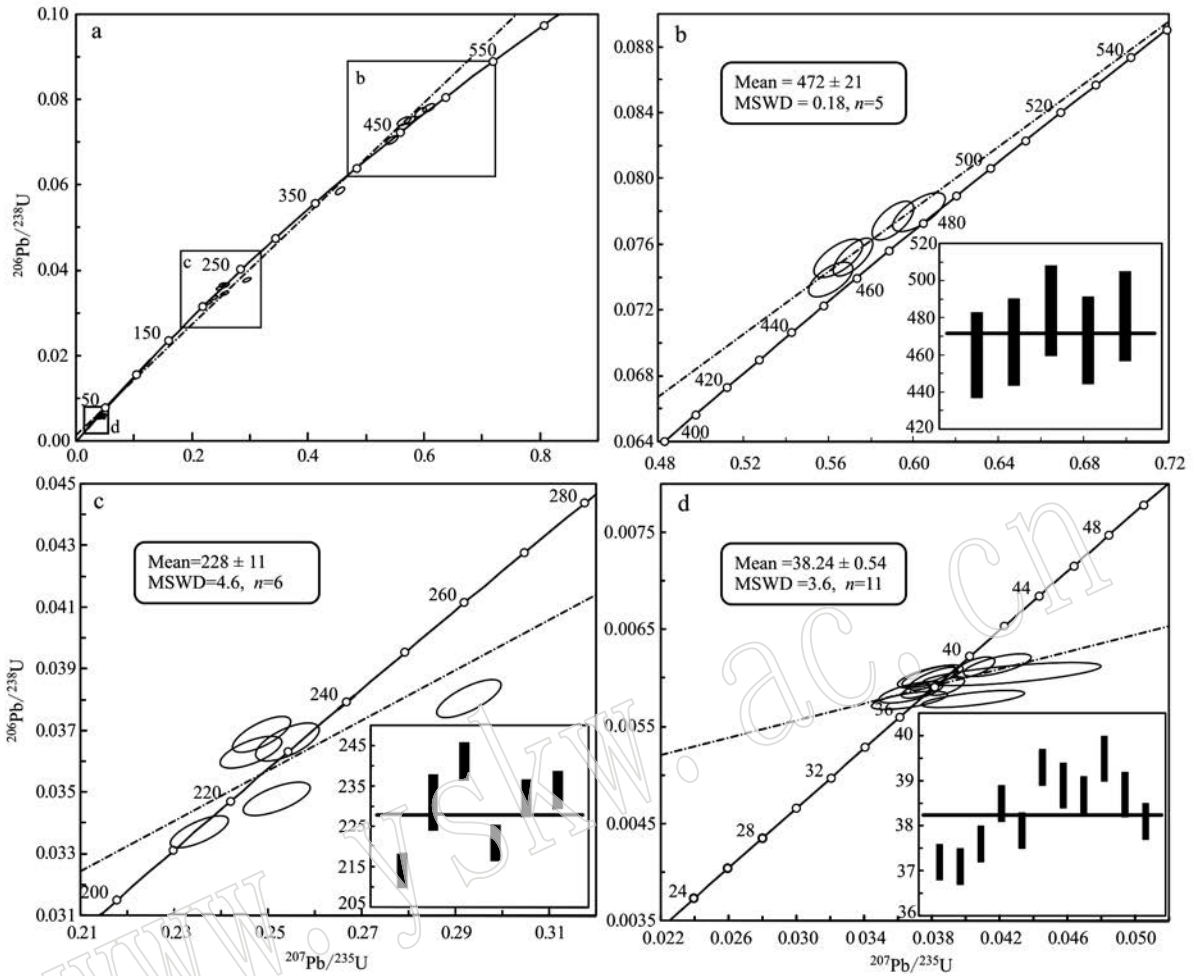


图4 米提孜北闪斜煌岩样品锆石 U-Pb 年龄加权分布图及谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb distribution and concordia diagram of spessartite from northern Mitizi

表2 米提孜北超基性-基性岩脉样品主量元素分析结果 ($w_B/\%$) 及主要参数

Table 2 Major elements concentrations ($w_B/\%$) of samples from ultrabasic-basic dyke swarms in northern Mitizi

序号	1	2	3	4	5	6	7	-
样号	28-YQ1	25-YQ2	34-YQ1	D4236-YQ1	36-YQ1	25-YQ1	D4377-YQ1	AVG
SiO ₂	42.70	43.93	44.14	44.44	45.45	45.59	46.26	44.64
TiO ₂	4.32	2.11	1.96	2.87	2.09	2.17	2.10	2.52
Al ₂ O ₃	15.67	14.60	12.93	14.86	12.39	13.42	15.50	14.20
TFe ₂ O ₃	16.98	15.41	13.33	13.65	12.52	12.80	12.41	13.87
MnO	0.16	0.19	0.19	0.17	0.21	0.21	0.15	0.18
MgO	4.85	8.16	6.79	5.02	5.76	5.34	6.07	6.00
CaO	5.08	7.67	9.26	8.01	11.20	7.72	9.18	8.30
Na ₂ O	3.22	2.20	3.08	2.99	1.71	3.06	2.48	2.68
K ₂ O	0.94	0.86	0.82	1.18	1.13	2.01	0.66	1.09
P ₂ O ₅	0.80	0.35	0.13	0.38	0.24	0.39	0.21	0.36
LOI	3.88	3.90	6.33	5.86	6.86	7.61	3.40	5.41
TATAL	98.60	99.38	98.96	99.43	99.56	100.32	98.42	99.24
Mg [#]	36.36	51.44	50.47	42.39	47.93	45.49	49.46	46.22
K ₂ O/Na ₂ O	0.29	0.39	0.27	0.39	0.66	0.66	0.27	0.42
K ₂ O + Na ₂ O	4.16	3.06	3.90	4.17	2.84	5.07	3.14	3.76
K/(K + Na)	0.16	0.20	0.15	0.21	0.30	0.30	0.15	0.21
K/Na	0.19	0.26	0.18	0.26	0.44	0.43	0.18	0.28
K/Al	0.07	0.06	0.07	0.09	0.10	0.16	0.05	0.08

注: TFe₂O₃ 为全铁; LOI 为烧失量; FeO = 0.8998 * TFe₂O₃; Mg[#] = 100 * Mg / (Mg + Fe²⁺); AVG 为平均值。

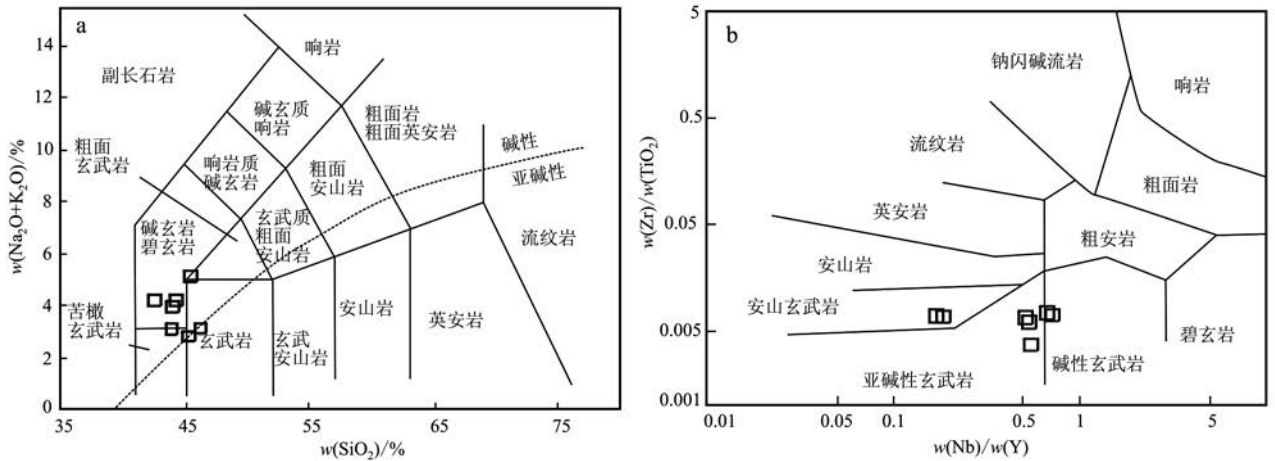


图 5 米提孜北超基性-基性岩脉样品 TAS 图解(a, 据 Le Bas *et al.*, 1986)和 Zr/TiO₂ - Nb/Y 图解 (b, 据 Winchester and Floyd, 1977)

Fig. 5 TAS diagram (a, after Le Bas *et al.*, 1986) and Zr/TiO₂ - Nb/Y diagram (b, after Winchester and Floyd, 1977) of samples from ultrabasic-basic dyke swarms in northern Mitizi

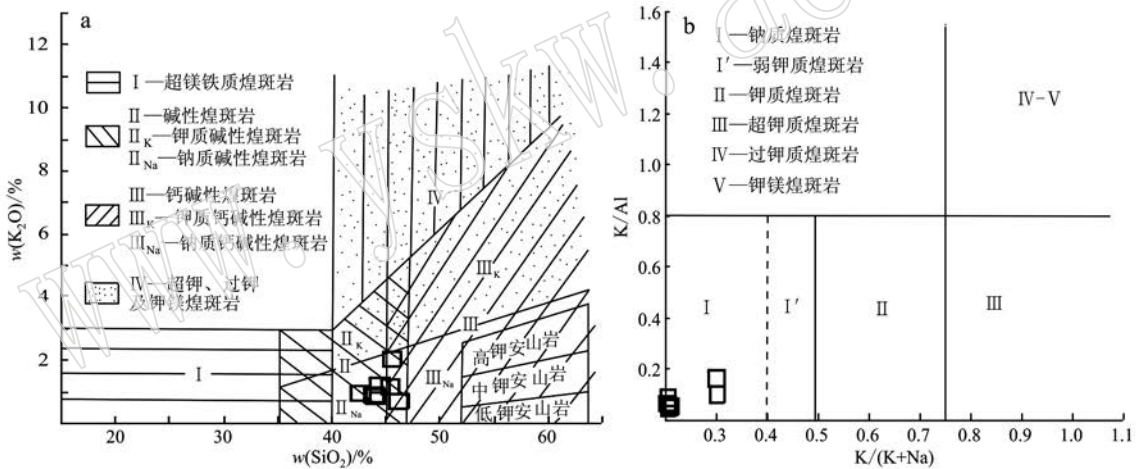


图 6 米提孜北超基性-基性岩脉样品 K₂O - SiO₂ 图解(a)和 K/Al - K/(K + Na) 图解(b) (据路凤香等, 1991)
Fig. 6 K₂O - SiO₂ (a) and K/Al - K/(K + Na) (b) diagrams of samples from ultrabasic-basic dyke swarms in northern Mitizi (after Lu Fengxiang *et al.*, 1991)

浅色矿物主要为斜长石(钠长石与钙长石的固溶体)而非碱性长石(钠长石与钾长石的固溶体)相吻合。

4.2 微量元素地球化学特征

超基性-基性岩脉样品的微量元素测试结果见表 3。其稀土元素总量相对较低,介于 64.28×10^{-6} ~ 253.41×10^{-6} 之间,平均 134.23×10^{-6} 。轻稀土和重稀土元素分异明显, $(La/Yb)_N = 4.37 \sim 8.25$, 平均 6.05。LREE 含量为 51.81×10^{-6} ~ 219.40×10^{-6} , 平均 113.45×10^{-6} , HREE 含量为 12.47×10^{-6} ~ 34.01×10^{-6} , 平均 20.78×10^{-6} 。LREE/HREE 值为 4.15 ~ 6.45, 平均 5.27, $(Ce/Yb)_N$ 变化

于 3.72 ~ 6.88 之间,平均 5.20, 整体表现出轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的特征。轻稀土元素与重稀土元素内部分馏较弱, $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 平均值分别为 2.26 和 2.14。所有样品基本不存在 Eu 和 Ce 异常, $\delta Eu = 1.04 \sim 1.21$, 平均 1.10, $\delta Ce = 0.99 \sim 1.03$, 平均 1.01。基本不存在 Eu 异常反映在岩浆演化过程中基本不存在斜长石的分离结晶作用。在球粒陨石标准化稀土元素配分图上,样品稀土元素配分曲线整体形态基本一致,均为右倾平滑曲线(图 7a)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 7b)中,样品不相容元素含量明显高于原始地幔,

表3 米提孜北超基性-基性岩脉样品微量元素分析结果

 $w_B/10^{-6}$

Table 3 Trace elements concentrations of samples from ultrabasic-basic dyke swarms in northern Mitizi

序号	1	2	3	4	5	6	7	-
样号	28-YQ1	25-YQ2	34-YQ1	D4236-YQ1	36-YQ1	25-YQ1	D4377-YQ1	AVG
Li	69.12	40.21	42.58	50.71	49.96	53.19	26.66	47.49
Be	1.41	0.93	4.18	1.16	1.79	1.08	0.55	1.59
Sc	23.27	12.25	33.96	11.84	29.55	22.44	16.85	21.45
V	240.79	304.34	317.55	214.91	282.95	257.94	292.63	273.02
Cr	38.38	145.31	149.91	51.62	122.64	53.84	95.74	93.92
Co	53.03	68.12	57.18	53.85	52.75	44.71	49.18	54.12
Ni	88.10	120.20	89.12	120.32	80.55	51.75	92.75	91.83
Cu	71.06	89.03	14.52	62.45	72.80	82.09	74.94	66.70
Zn	192.85	123.83	133.29	114.69	121.24	114.21	104.73	129.26
Ga	26.27	20.50	17.76	23.64	21.10	18.09	22.42	21.40
Rb	59.19	17.09	48.76	39.06	55.63	55.81	22.43	42.57
Sr	389.99	519.83	276.69	1066.49	412.20	306.86	1127.43	585.64
Y	44.97	26.63	17.46	28.22	25.52	32.04	24.35	28.46
Zr	312.25	140.57	70.91	199.13	136.37	146.05	123.97	161.32
Nb	30.15	5.00	9.61	20.25	13.20	5.53	13.17	13.84
Mo	1.16	0.12	0.29	1.20	0.65	0.57	0.61	0.66
Cd	0.28	0.14	0.16	0.18	0.21	0.15	0.15	0.18
Cs	11.77	1.39	8.77	5.00	7.67	14.11	1.25	7.14
Ba	294.11	558.35	149.61	362.27	239.37	839.31	306.76	392.83
La	43.58	17.97	9.88	26.84	16.78	23.08	16.59	22.10
Ce	96.61	42.22	21.72	57.81	37.66	50.12	37.13	49.04
Pr	12.15	5.57	2.85	7.02	4.85	6.46	4.73	6.23
Nd	52.17	24.46	12.78	31.68	21.98	29.10	21.36	27.65
Sm	11.17	5.47	3.21	6.76	5.36	6.19	4.86	6.15
Eu	3.72	2.18	1.37	2.65	1.98	2.23	1.82	2.28
Gd	11.33	5.85	3.69	7.20	6.08	6.90	5.27	6.62
Tb	1.64	0.88	0.57	1.06	0.91	1.06	0.85	0.99
Dy	9.28	5.30	3.51	5.76	5.31	5.97	4.53	5.67
Ho	1.75	1.04	0.67	1.11	1.01	1.22	0.94	1.11
Er	4.85	3.14	1.91	2.85	2.74	3.55	2.62	3.09
Tm	0.64	0.41	0.26	0.40	0.36	0.46	0.31	0.41
Yb	3.95	2.37	1.62	2.33	2.30	3.00	2.11	2.53
Lu	0.57	0.39	0.24	0.35	0.34	0.47	0.28	0.38
Hf	7.58	3.46	1.91	4.88	3.51	3.77	3.24	4.05
Ta	1.75	0.28	0.51	1.15	0.78	0.29	0.74	0.79
Pb	5.39	4.33	7.81	6.76	15.91	7.48	4.25	7.42
Th	3.13	0.68	1.14	2.07	1.69	0.83	1.46	1.57
U	1.23	0.24	0.61	0.68	0.54	0.25	0.71	0.61
ΣREE	253.41	117.26	64.28	153.82	107.66	139.80	103.40	134.23
LREE	219.40	97.88	51.81	132.77	88.61	117.18	86.49	113.45
HREE	34.01	19.38	12.47	21.05	19.05	22.62	16.91	20.78
LREE/HREE	6.45	5.05	4.15	6.31	4.65	5.18	5.11	5.27
δEu	1.00	1.17	1.21	1.16	1.06	1.04	1.10	1.10
δCe	1.01	1.03	0.99	1.01	1.01	0.99	1.01	1.01
(La/Yb) _N	7.91	5.44	4.37	8.25	5.23	5.52	5.64	6.05
(La/Sm) _N	2.52	2.12	1.99	2.56	2.02	2.41	2.20	2.26
(Gd/Yb) _N	2.37	2.04	1.88	2.55	2.19	1.90	2.07	2.14
(Eu/Sm) _N	0.88	1.05	1.13	1.04	0.97	0.95	0.99	1.00
(Ce/Yb) _N	6.79	4.95	3.72	6.88	4.55	4.64	4.89	5.20

注: 比值中的下标 N 为球粒陨石标准化值, 标准化值引自 Henderson(1984)。

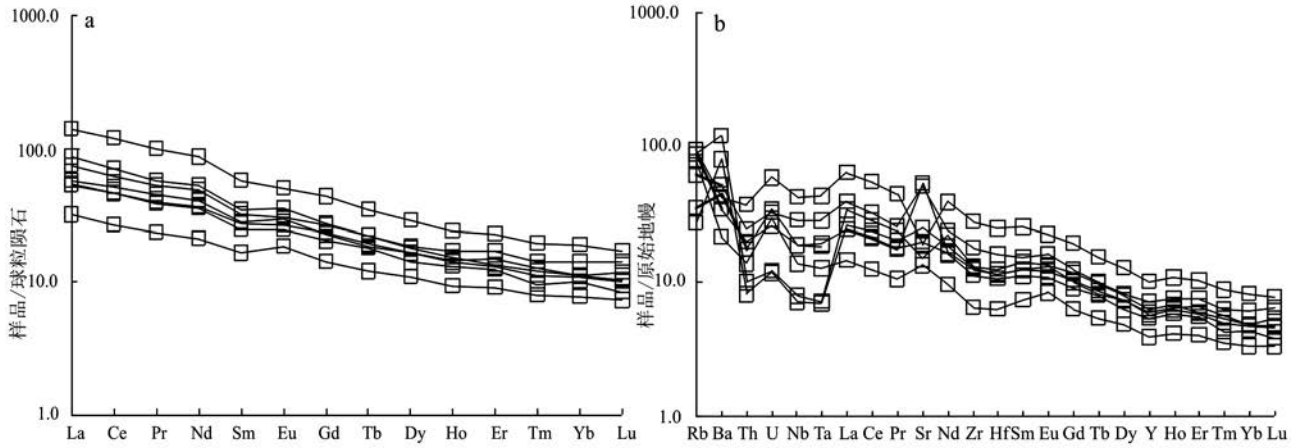


图 7 米提孜北超基性-基性岩脉样品球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a, 球粒陨石数据据 Henderson, 1984)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, 原始地幔数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a, chondrite-normalized values after Henderson, 1984) and primitive mantle-normalized trace element diagram (b, primitive mantle-normalized values after Sun and McDonough, 1989) of samples from ultrabasic-basic dyke swarms in northern Mitizi

均表现出不同程度的富集;总体上以 Rb、Ba 为代表的大离子亲石元素(LILE)相对富集,以 Nb、Ta、Zr、Hf 为代表的高场强元素(HFSE)相对亏损,但这些富集和亏损均不明显。

5 讨论

5.1 超基性-基性岩脉岩石成因

米提孜北超基性-基性岩脉的岩性主要为煌斑岩,这类暗色矿物含量较高且具有典型斑状结构的脉岩,成分复杂、种类繁多,常以岩脉、岩墙的形式分布于不同时期不同类型的大地构造环境中(Rock, 1990),关于其岩石成因也是争论不休(贾丽琼等, 2013)。但是,无论是交代富集地幔的部分熔融模式(Rock and Groves, 1988; Stille *et al.*, 1989)、基性岩浆陆壳的混染模式(Bernard-Griffiths *et al.*, 1991),还是幔源钾镁煌斑岩熔体与壳源硅质熔体的岩浆混合模式(Prelevic *et al.*, 2004),都承认煌斑岩以幔源成因为主,只是在地壳混染、结晶分异等岩浆演化过程尚有争议。

从米提孜北超基性-基性岩脉样品的地球化学特征来看,岩脉具有低 Mg 含量(MgO 平均含量 6.00%, Mg[#] 平均 46.22)的特征, Cr、Ni 含量(Cr = $38.38 \times 10^{-6} \sim 149.91 \times 10^{-6}$, 平均 93.92×10^{-6} ; Ni = $51.75 \times 10^{-6} \sim 120.32 \times 10^{-6}$, 平均 91.83×10^{-6})亦低于原生岩浆(Cr = $200 \times 10^{-6} \sim 500 \times$

10^{-6} , Ni = $90 \times 10^{-6} \sim 700 \times 10^{-6}$, Rock, 1990),说明岩浆经过了一定程度的演化,因此讨论岩浆源区性质时,应排除地壳混染和结晶分异等岩浆演化过程的干扰。

地壳混染方面,这里选取一些特殊的微量元素及其比值探讨其的影响。由于 Nb、Ta 的原子结构和地球化学性质相近,其比值在分离结晶演化过程中一般变化很小,常常可以用来探讨岩浆的物质源区特征(Foley, 1984; Weaver, 1991; Green, 1995)。岩脉样品 Nb/Ta 值(17.02 ~ 19.13, 平均 17.92)远大于下地壳的 Nb/Ta 值(8.3, Plank, 2005),而接近于原始地幔的 Nb/Ta 值(17.39, Sun and McDonough, 1989)。Th/La 值在探讨岩浆的物质源区特征有着与 Nb/Ta 值相类似的效果,岩脉样品 Th/La 值(0.04 ~ 0.12, 平均 0.08)接近于球粒陨石和原始地幔的比值(≈ 0.12 , Sun and McDonough, 1989),而远小于陆壳的比值(≈ 0.3 , Plank, 2005)。亦有研究表明,La/Sm 值与地壳混染程度呈正相关,而超基性-基性岩脉样品 La/Sm 值(3.08 ~ 3.97, 平均 3.50)低于地壳混染的范围(>5, 张招崇等, 2004)。这些都表明超基性-基性岩脉没有受到明显的陆壳混染。另一方面,如果岩脉发生了强烈的陆壳混染或者壳幔混合,其基性程度也不会如此之高,因为其围岩为各类石英片岩和变质分异石英条带,混染或者混合这些围岩会使其 SiO₂ 含量显著增高。野外地质观察也发现,被卷入的围岩大都形态完整(图 2b),表

明岩脉侵位后冷却速度较快。

结晶分异方面,岩脉中见钛铁氧化物,斑晶仅见角闪石和黑云母,未见橄榄石和辉石斑晶,角闪石亦见向黑云母分离结晶的趋势,结合岩脉具有低 Mg、低 Cr 和低 Ni 的特征推测岩浆发生过一定的橄榄石、辉石和部分角闪石等镁铁质矿物的分离结晶作用。这种镁铁质矿物的分离结晶,表明岩脉有从超基性向基性结晶分异演化的趋势。所有样品基本不存在 δEu 异常,表明在岩浆演化过程中基本不存在斜长石的分离结晶作用,这与岩石中不存在斜长石斑晶也是一致的。

部分熔融程度和源区性质方面,超基性-基性岩

脉样品具有较低的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ (4.37 ~ 8.25)、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ (1.88 ~ 2.55)、 $(\text{Dy}/\text{Yb})_N$ (1.33 ~ 1.65) 和 Sm/Yb 值 (1.98 ~ 2.90) 和相对较高的 HREE 含量(大于 10 倍的球粒陨石, Henderson, 1984), 表明其原始岩浆可能来源于含有石榴石和尖晶石二辉橄榄岩的部分熔融 (Chung, 1999), 这与在微量元素 $\text{Sm}/\text{Yb}-\text{La}/\text{Sm}$ 图解中样品分布在石榴石二辉橄榄岩和尖晶石二辉橄榄岩演化曲线之间相一致(图 8a), 部分熔融的程度约为 10%。进一步利用 $\text{Zr}/\text{Y}-(\text{La}/\text{Sm})_N$ 图解(图 8b), 发现源区包含不足 5% 的石榴石、2% 左右的尖晶石和少量的角闪石。

煌斑岩或者钾镁煌斑岩均是富集的岩石圈地幔

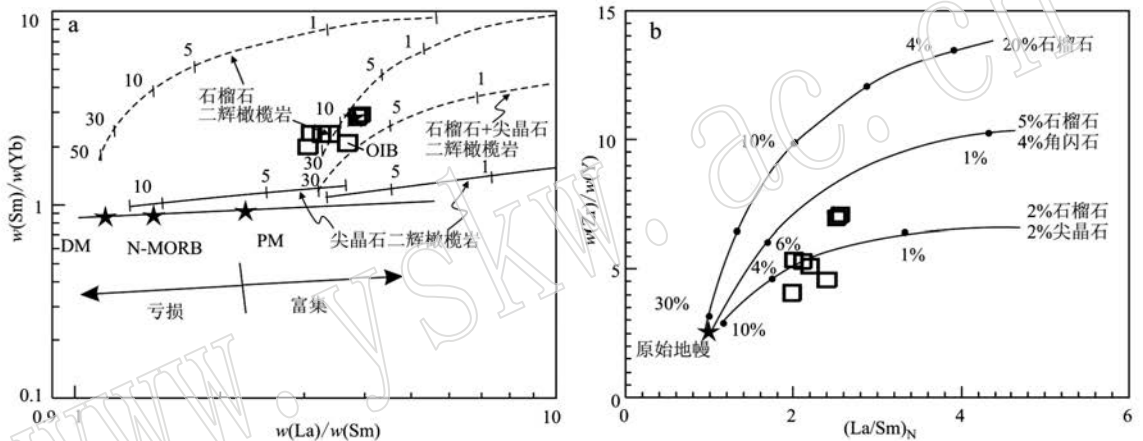


图 8 米提孜北超基性-基性岩脉样品 $\text{Sm}/\text{Yb}-\text{La}/\text{Sm}$ 图解(a, 据 Zhao *et al.*, 2007) 和 $\text{Zr}/\text{Y}-(\text{La}/\text{Sm})_N$ 图解(b, 据 Gurenko *et al.*, 2006; Dai *et al.*, 2011)

Fig. 8 $\text{Sm}/\text{Yb}-\text{La}/\text{Sm}$ diagram (a, Zhao *et al.*, 2007) and $\text{Zr}/\text{Y}-(\text{La}/\text{Sm})_N$ diagram (b, after Gurenko *et al.*, 2006; Dai *et al.*, 2011) of samples from ultrabasic-basic dyke swarms in northern Mitizi

部分熔融的产物(徐夕生等, 2010)。一般认为,软流圈上涌导致的减压熔融是幔源岩浆活动的主要诱因,而软流圈的上涌则可以分为主动上涌和被动上涌两种方式,依据地质过程的持续时间可以识别这两种不同的上涌方式,其中持续时间长的为主动上涌方式,持续时间短的为被动上涌方式(罗照华等, 2008)。米提孜北超基性-基性岩脉锆石 U-Pb 测年结果表明岩浆活动以持续时间短为特征,结合锆石 U-Pb 年龄具有宽年龄谱系的特点,应将其归属为软流圈被动上涌的结果。

这里需要特别说明的是,超基性岩和基性岩中 SiO_2 是不饱和的,而熔浆中 ZrO_2 和 SiO_2 同时过饱和是锆石结晶的必要条件。但事实上,基性岩、超基性岩岩中常常产出锆石颗粒(如 Yu *et al.*, 2001; 王磊等, 2015; 骆文娟等, 2018),甚至在深达 600 km

的地幔高压条件下锆石也是稳定的矿物相(Tange and Takahashi, 2004)。某些硅酸盐不饱和岩浆岩中含有锆石的事实,加之含岩浆锆石玄武岩和普通玄武岩的成分对比表明,硅酸盐不饱和岩浆岩中的锆石可能是在某种特殊的环境中晶出的,一种可能的解释是,在其他硅酸盐矿物尚未开始结晶的条件下, ZrO_2 因失水而过饱和,继而与熔浆中的游离 SiO_2 结合,锆石因而得以晶出(罗照华等, 2006a),米提孜北超基性-基性岩脉中的锆石可能就是在这一过程中形成的。

由此,可将岩浆上升过程表述为:软流圈的被动上涌导致岩石圈地幔源区相对较低程度的部分熔融,原始岩浆在可能位于岩石圈地幔的深部岩浆房中发生了橄榄石和辉石的结晶分异,角闪石来不及完全结晶分异时,产生的超基性岩浆就快速上升侵

位,形成了米提孜北超基性-基性岩脉,总体特征为岩浆活动持续时间短、岩脉侵位后冷却速度快。

5.2 超基性-基性岩脉产出的构造背景

青藏高原的形成与演化归因于自 45 ~ 44 Ma 前的印度-亚洲大陆碰撞而导致的地壳缩短和增厚,且这种造山过程目前仍正在进行中 (Mulnar and Tapponnier, 1975, Yin and Harrison, 2000, Tiwari *et al.*, 2015)。然而,青藏高原西北缘发育的各类新生代火山岩均具有幔源原生岩浆的性质 (罗照华等, 2003),这与一般造山带以中酸性岩浆活动为主的性质明显不同。而且,分析其产出位置可以发现,青藏高原西北缘的幔源岩浆活动局限在大型走滑断裂的交汇部位及其附近,岩浆活动主要与走滑断裂活动有关 (罗照华等, 2006b)。这表明,在青藏高原西北缘的岩石圈运动和构造变形中,大型走滑断裂具有重要的意义和作用。

前已述及,具有幔源原生岩浆性质的青藏高原西北缘新生代火山岩大都沿康西瓦走滑断裂南缘分布。康西瓦走滑断裂是青藏高原西北部一条经过长期演化、多期次变形且现在仍在活动的重要大型走滑断裂 (Mattle *et al.*, 1996; 许志琴等, 2007; Li *et al.*, 2012, 葛成隆等, 2017),主要的变形特征表现为古韧性走滑剪切带的再活动,印支期以来转为左行走滑特征 (Xu *et al.*, 2005; 许志琴等, 2011)。

与沿康西瓦断裂南缘分布的新生代火山岩相类似,米提孜北超基性-基性岩脉的分布也与大型断裂关系密切,岩脉全部分布在柯岗断裂北侧附近。柯岗断裂是划分塔里木陆块和西昆仑造山带的边界断裂,总体走向与康西瓦断裂一致,为 NW 向。柯岗断裂断层性质总体表现为压扭性右行逆断层,中生代前发生逆冲推覆构造,中生代后发生右行走滑。遥感影像上,亦可见柯岗断裂南盘存在向西的平移运动,具右行走滑特征 (赵佳楠等, 2013)。由此可见,米提孜北新生代超基性-基性岩脉可能也是产出于走滑构造体制下,“大型走滑 + 块体旋转 + 岩石圈拆沉作用”模式可以解释岩脉产出的构造背景 (Luo *et al.*, 2001; 罗照华等, 2006b)。

区域扩展是青藏高原的隆升在不同区域具有不均一性的最明显特征,青藏高原北向扩展也已被大多数研究者所接受 (司家亮, 2008)。在向北移动与塔里木板块相互作用过程中,青藏高原通过地壳逆冲作用北向扩展,而地壳逆冲则可能主要以上地壳在壳内滑脱层之上的逆冲扩展为主 (叶卓等,

2018)。青藏高原西北缘在青藏高原与塔里木板块的相互作用过程中,发生强烈的挤压造山运动,造成了地壳缩短和岩石圈增厚,沿着与区域主压应力斜交的岩石圈断裂较容易发生大型走滑运动,而康西瓦断裂和柯岗断裂则兼具走滑与挤压的性质。青藏高原的北向扩展受控于一系列的走滑断裂带,而单条断裂各个部位的走滑速度、走滑距离,甚至是相邻断裂的走滑方向等,在走滑运动进一步发展过程中都可能存在一定差别,如康西瓦断裂和柯岗断裂走滑方向的不一致性,前者为左行,后者为右行。

由此,被断裂体系夹持的块体可能发生一定的旋转,这种块体旋转有利于在断裂部分位置出现局部拉张和伸展作用,导致软流圈物质的被动上涌,地幔源区由于软流圈物质的被动上涌发生了较低程度的部分熔融。走滑断裂剪切作用产生的热量还普遍提高了断裂带附近岩石的温度,这种热量的集聚可以作为部分熔融作用的催化剂。深部流体的介入可能也对地幔源区的部分熔融有着重要的影响,断裂主干部位没有发现新生代岩浆活动则暗示着岩浆发生之前可能曾经有过岩石圈拆沉作用 (罗照华等, 2001)。另一方面,大型走滑断裂也是深部岩浆的运移通道,主干断裂及其次级断裂控制了岩脉的分布。

6 结论

(1) 青藏高原西北缘米提孜北超基性-基性岩脉岩石类型为闪斜煌岩和云斜煌岩,地球化学特征分别具钠质碱性煌斑岩和钠质钙碱性煌斑岩的特征,其中闪斜煌岩锆石 U-Pb 年龄为 38.24 ± 0.54 Ma,形成时代为新生代古近纪。

(2) 岩脉 Ce 异常和 Eu 异常不明显,稀土元素分配模式呈右倾型,大离子亲石元素 (LILE) 相对富集,高场强元素 (HFSE) 相对亏损,但均不强烈。岩脉是岩石圈地幔低程度部分熔融的产物,岩浆活动持续时间短,岩脉侵位后冷却速度快。

(3) 米提孜北新生代超基性-基性岩脉整体位于柯岗断裂北侧附近,产出于走滑构造体制下,大型走滑断裂控制了岩浆活动的发生和岩脉的分布。

致谢 论文相关内容撰写过程中,中国地质调查局西安地质调查中心滕家欣教授级高工、陈隽璐研究员和高永宝副研究员曾多次给予热情的指导与建议,在此致以诚挚的感谢! 另外,镜下薄片鉴定、

锆石分析测试、锆石数据处理分别得到了寇昭娟、桑继镇和王祚鹏的热情帮助,在此一并致谢!

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1~2): 59~79.
- Ballard J R, Palin J M, Williams I S, *et al.* 2001. Two ages of porphyry intrusion resolved for the super-giant Chuquibambilla copper deposit of northern Chile by ELA-ICP-MS and SHRIMP[J]. *Geology*, 29(5): 383~386.
- Bao Peisheng, Xiao Xuchang and Su Li. 2006. Geochemical Characteristics of the Potassic Volcanics in the North western Tibet Plateau and its implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(10): 1 578~1 587 (in Chinese with English abstract).
- Bernard-Griffiths J, Fourcade S and Dupuy C. 1991. Isotopic study (Sr, Nd, O and C) of lamprophyres and associated dykes from Tamazert (Morocco): Crustal contamination processes and source characteristics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 103(1~4): 190~199.
- Claesson S, Vetrin V, Bayanova T, *et al.* 2000. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia: a record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic[J]. *Lithos*, 51(1~2): 95~108.
- Chung S L. 1999. Trace element and isotope characteristics of Cenozoic basalts around the Tanlu Fault with implications for the eastern plate boundary between north and south China[J]. *Journal of Geology*, 107: 301~312.
- Dai J G, Wang C S and Hébert R. 2011. Late Devonian OIB alkaline gabbro in the Yarlung Zangbo Suture Zone: remnants of the Paleotethys? [J]. *Gondwana Research*, 19: 232~243.
- Ding Daogui, Wang Daoxuan and Liu Weixin. 1996. The Western Kunlun Orogenic Belt and Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 36~72 (in Chinese).
- Foley S F. 1984. Liquid immiscibility and melt segregation in alkaline lamprophyres from Labrador[J]. *Lithos*, 17: 127~137.
- Ge Chenglong, Liu Dongliang, Wang Shiguang, *et al.* 2017. The characteristics and tectonic implications of the western extension of the Karakax fault, West Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(12): 3 942~3 956 (in Chinese with English abstract).
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. *Chemical Geology*, 120(3): 347~359.
- Gurenko A, Hoernle K and Hauff F. 2006. Major, trace element and Nd-Sr-Pb-O-He-Ar isotope signatures of shield stage lavas from the central and western Canary Islands: Insights into mantle and crustal processes[J]. *Chemical Geology*, 233: 75~112.
- Henderson P. 1984. General Geochemical Properties and Abundances of the Rare Earth Element [M]. *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63~114.
- Jia Liqiong, Mo Xuanxue, Dong Guochen, *et al.* 2013. Genesis of lamprophyres from Machangqing, western Yunnan: Constraints from geochemistry, geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1 247~1 260 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Chunfa, Wang Zongqi, Li Jinyi, *et al.* 2000. Opening-Closing Tectonics of the Central Orogenic Belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 47~68 (in Chinese).
- Kang Lei, Xiao Peixi, Gao Xiaofeng, *et al.* 2012. The age and origin of the Konjirap Pluton in Northwestern Tibetan Plateau and its tectonic significances[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(7): 1 063~1 076 (in Chinese with English abstract).
- Ke Shan, Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, *et al.* 2008. The geochronology of Taxkorgan alkalic complex, Pamir synclax[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 315~324 (in Chinese with English abstract).
- Ke Shan, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, *et al.* 2006. Petrogenesis and geochemistry of Cenozoic Taxkorgan alkalic complex and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 905~915 (in Chinese with English abstract).
- Košler J, Fonneland H, Sylvester P, *et al.* 2002. U-Pb dating of detrital zircons for sediment provenance studies—A comparison of laser ablation ICP MS and SIMS techniques[J]. *Chemical Geology*, 182(2~4): 605~618.
- Le Bas M J, Le Maitre R W and Streckeisen A. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkalic-silica diagram [J]. *Journal of Petrology*, 27: 745~750.
- Li H B, Van der Woerd J, Sun Z M, *et al.* 2012. Co-seismic and cumulative offsets of the recent earthquakes along the Karakax left-lateral strike-slip fault in western Tibet[J]. *Gondwana Research*, 21(1): 64~87.
- Li Rongshe, Ji Wenhua and Yang Yongcheng. 2008. Geological of Kunlun Mountains and Its Adjacent Areas [M]. Beijing: Geological Publishing House, 128~141 (in Chinese).
- Liang Q, Jing H and Gregoire D C. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Ta-*

- lanta, 51: 507 ~ 513.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley C A: Berkeley Geochronological Center Special Publication.
- Lu Fengxiang, Shu Xiaoxin and Zhao Chonghe. 1991. A suggestion on classification of Lamprophyres[J]. Geological Science and Technology Information, 10(S): 55 ~ 62(in Chinese with English abstract).
- Luo Wenjuan, Zhang Zuoheng, Duan Shigang, *et al.* 2018. Geochronology and geochemistry of the Beizhan basic-ultrabasic pluton in West Tianshan, Xinjiang: Petrogenesis and geodynamical implications [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 37(5): 733 ~ 753(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua, Bai Zhida, Zhao Zhidan, *et al.* 2003. Cenozoic magmatism in the south and north rims of Tarim Basin: Petrogenesis and tectonic implications[J]. Earth Science Frontiers, 10(3): 179 ~ 189(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, *et al.* 2006b. An integrated model for the Cenozoic evolution of the Tibetan plateau: Constraints from igneous rocks[J]. Earth Science Frontiers, 13(4): 196 ~ 211(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, Wan Yusheng, *et al.* 2006a. Geological implications of the youngest SHRIMP U-Pb age of the alkaline basalt in the Tibetan Plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(3): 578 ~ 584(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua, Wei Wenbo, Wang Bingzhang, *et al.* 2008. Upwelling styles of the convective mantle and their implication for continental dynamics[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 27(Suppl): 8 ~ 9(in Chinese).
- Luo Zhaohua, Xiao Xuchang, Cao Yongqing, *et al.* 2001. The Cenozoic mantle magmatism and motion of lithosphere on the north margin of the Tibetan Plateau[J]. Science in China(Series D), 44(Suppl): 10 ~ 17.
- Matte P, Tapponnier P, Arnaud N, *et al.* 1996. Tectonics of western Tibet, between the Tarim and the Indus[J]. Earth and Planetary Science Letters, 142(3 ~ 4): 311 ~ 330.
- Mo Xuanxue. 2011. Magmatism and evolution of the Tibetan Plateau[J]. Geological Journal of China Universities, 17(3): 351 ~ 367(in Chinese with English abstract).
- Mulnar P and Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision[J]. Science, 189: 419 ~ 426.
- Pan Y S, Zhou W M, Xu R H, *et al.* 1996. The geological characteristics and evolution of Early Paleozoic in Kunlun, China[J]. Science in China(Series D), 26(4): 302 ~ 307.
- Pidgeon R T, Nemchin A A and Hitchen G J. 1998. Internal structures of zircons from Archaean granites from the Darling Range batholith: Implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 132(3): 288 ~ 299.
- Plank T. 2005. Constraints from thorium/lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents[J]. Journal of Petrology, 46(5): 921 ~ 944.
- Prelevic D, Foley S F, Cvetkovi V, *et al.* 2004. Origin of minette by mixing of lamproite and dacite magmas in Veliki Majdan, Serbia[J]. Journal of Petrology, 45(4): 759 ~ 792.
- Ren Jishun, Wang Zuoxun, Chen Bingwei, *et al.* 1999. The Tectonics of China from a Global View—A Guide to the Tectonic Map of China and Adjacent Region[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Rock Nicholas M S. 1987. The nature and origin of lamprophyres: An overview, Alkaline igneous rocks[A]. Fitton J G & Upton B G J. Geological Society Special Publication[C]. 30: 191 ~ 226.
- Rock N M S and Groves D I. 1988. Can lamprophyres resolve the genetic controversy over mesothermal gold deposits? [J]. Geology, 16(6): 538 ~ 541.
- Rock N M S. 1990. Lamprophyres[M]. Glasgow: Blackie, 1 ~ 285.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 28(5): 495 ~ 500(in Chinese with English abstract).
- Si Jiali. 2008. Cenozoic Uplift and Growth of Northwestern Margin of the Tibetan Plateau[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese).
- Stille P, Oberhänsli R and Wenger-Schenk K. 1989. Hf-Nd isotopic and trace element constraints on the genesis of alkaline and calc-alkaline lamprophyres[J]. Earth and Planetary Science Letters, 96(1 ~ 2): 209 ~ 219.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins [C]. Geol Soc. Spec. Pub., London, 42: 313 ~ 345.
- Tange Y and Takahashi. 2004. Stability of the high-pressure polymorph of zircon(ZrSiO₄) in the deep mantle[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 143 ~ 144: 223 ~ 229.
- Tiwari V M, Mishra D C and Pandey A K. 2015. The lithospheric density structure below the western Himalayan syntaxis: Tectonic implications[A]. Geological Society, London, Special Publications[C]. 412(1): 55 ~ 65.

- Wang Hongyan and Zhang Chuanglin. 2011. Age and geochemical characteristics of Quaternary volcanic rocks in the northwestern margin of Tibetan Plateau and their significance[J]. Geological Bulletin of China, 30(8): 1 171 ~ 1 181(in Chinese with English abstract).
- Wang Lei, Yang Jianguo, Wang Xiaohong, *et al.* 2015. Zircon SHRIMP U-Pb age of Dashantouan basic-ultrabasic intrusion complex in the Beishan Mountain, Gansu Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 34(5): 697 ~ 709(in Chinese with English abstract).
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: Trace element and isotopic constraints[J]. Earth and Planetary Science Letters, 104(2): 381 ~ 397.
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 20: 325 ~ 343.
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 49(15): 1 554 ~ 1 569(in Chinese).
- Xiao Xuchang, Liu Xun, Gao Rui, *et al.* 2002. Lithospheric structure and tectonic evolution of the West Kunlun and its adjacent areas—Brief report on the South Tarim-West Kunlun multidisciplinary geoscience transect[J]. Geological bulletin of China, 21(2): 63 ~ 68 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng and Qiu Jiasheng. 2010. Igneous Petrology[M]. Beijing: Science Press, 137 ~ 162(in Chinese).
- Xu Zhiqin, Li Haibing, Tang Zhemin, *et al.* 2011. The transformation of the terrain structures of the Tibet Plateau through large-scale strike-slip faults[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(11): 3 157 ~ 3 170(in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Qi X X, Liu F L, *et al.* 2005. A new Caledonian Khondalite Series in West Kunlun, China: Age constraints and tectonic significance[J]. International Geology Review, 47(9): 986 ~ 998.
- Xu Zhiqin, Qi Xuexiang, Yang Jingsui, *et al.* 2007. Senses and timings of two kinds of shear in the Kangxiar strike-slip shear zone, West Kunlun, and their tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 26(10): 1 252 ~ 1 261(in Chinese with English abstract).
- Xue Guangqi, Qian Hui and Jiang Mei. 2005. Tectonic Characteristic of Mantle on the West Edge of Qinghai-Xizang Plateau-Receiver Function Inversion through West Kunlun Orogenic Belt[J]. Geological Review, 51(6): 708 ~ 712(in Chinese with English abstract).
- Ye Delong. 1993. Criteria for discrimination of lamproite and their classification[J]. Geological Science and Technology Information, 12(1): 39 ~ 46.
- Ye Zhuo, Gao Rui, Li Qiusheng, *et al.* 2018. Eastward extrusion and northward expansion of the Tibetan Plateau—Discussions for the deep processes of the plateau uplift[J]. Science China, 63: 3 217 ~ 3 228.
- Yin An and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 28: 211 ~ 280.
- Yu Xiaofei, Sun Fengyue, Hou Zengqian, *et al.* 2012. Zircon U-Pb age and its significance of the granodiorite from Siruyidieer Pb-Zn deposit, Taxkorgan, Xinjiang, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(12): 4 151 ~ 4 160(in Chinese with English abstract).
- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, *et al.* 2003. Zircon U-Pb age and REE contents analysis of Cenozoic era intrusion in North-east area[J]. Chinese Science Bulletin, 48(14): 1 511 ~ 1 520(in Chinese).
- Yu S C, Tung S F and Lee J S. 2001. Structural and spectroscopic features of mantle-derived zircon crystals from Tibet[J]. Western Pacific Earth Sciences, 1(1): 47 ~ 58.
- Zhang C L, Lu S N and Yu H F. 2007. Geological evolution of orogenic belt in northern Qinghai Tibet Plateau, west Kunlun, China, and evidence from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS dating[J]. Science in China(Series D, Earth Sciences), 37(2): 145 ~ 154.
- Zhang Chuanlin, Yu Haifeng, Wang Aiguo, *et al.* 2003. Dating of Triassic granites in the Western Kunlun Mountains and its tectonic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 79(5): 645 ~ 652(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Hao Yanli, *et al.* 2004. Geochemistry of the picrites and associated basalts from the Emeishan large igneous basalt province and constraints on their source region[J]. Acta Geologica Sinica, 78(2): 171 ~ 180(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Xiao X C, Wang J, *et al.* 2008. Post-collisional Plio-Pleistocene shoshonitic volcanism in the west Kunlun Mountains, NW China, Geochemical constraints on mantle source characteristics and petrogenesis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 31(4 ~ 6): 379 ~ 403.
- Zhao J H and Zhou M F. 2007. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle[J]. Precambrian Research, 152: 27 ~ 47.
- Zhao Jianan and Tian Shufang. 2012. The nature of Kogan fault and geological interpretation of remote sensing in Taxkorgan Region, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 31(2): 152 ~ 155(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 鲍佩声, 肖序常, 苏犁. 2006. 青藏高原西北缘钾质火山岩地球化学特征及其地质涵义[J]. 地质学报, 80(10): 1 578 ~ 1 587.
- 丁道桂, 王道轩, 刘伟新. 1996. 西昆仑造山带与盆地[M]. 北京: 地质出版社, 36 ~ 72.
- 葛成隆, 刘栋梁, 王世广, 等. 2017. 西昆仑康西瓦断裂带西延特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 33(12): 3 942 ~ 3 956.
- 贾丽琼, 莫宣学, 董国臣, 等. 2013. 滇西马厂箐煌斑岩成因: 地球化学、年代学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素约束[J]. 岩石学报, 29(4): 1 247 ~ 1 260.
- 姜春发, 王宗起, 李锦铁. 2000. 中央造山带开合构造[M]. 北京: 地质出版社, 47 ~ 68.
- 康磊, 肖培喜, 高晓峰, 等. 2012. 青藏高原西北缘红其拉甫岩体的岩石成因、时代及其构造意义[J]. 地质学报, 86(7): 1 063 ~ 1 076.
- 柯珊, 罗照华, 莫宣学, 等. 2008. 帕米尔构造结塔什库勒干碱性杂岩同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 24(2): 315 ~ 324.
- 柯珊, 莫宣学, 罗照华, 等. 2006. 塔什库勒干新生代碱性杂岩的地球化学特征及岩石成因[J]. 岩石学报, 22(4): 905 ~ 915.
- 李荣社, 计文化, 杨永成, 等. 2008. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京: 地质出版社, 128 ~ 141.
- 路路, 舒小辛, 赵崇贺. 1991. 有关煌斑岩分类的建议[J]. 地质科技情报, 10(增刊): 55 ~ 62.
- 骆文娟, 张作衡, 段士刚, 等. 2018. 新疆西天山各战基性-超基性岩年代学和岩石地球化学研究及其对铁成矿背景的制约[J]. 岩石矿物学杂志, 37(5): 733 ~ 753.
- 罗照华, 白志达, 赵志丹, 等. 2003. 塔里木盆地西南缘新生代火山岩成因及其地质意义[J]. 地学前缘, 10(3): 179 ~ 189.
- 罗照华, 莫宣学, 侯增谦, 等. 2006b. 青藏高原新生代形成演化的整合模型-来自火成岩的约束[J]. 地学前缘, 13(4): 196 ~ 211.
- 罗照华, 莫宣学, 万渝生, 等. 2006a. 青藏高原最年轻碱性玄武岩 SHRIMP 年龄的地质意义[J]. 岩石学报, 22(3): 578 ~ 584.
- 罗照华, 魏文博, 王秉璋, 等. 2008. 对流地幔上涌的方式及其大陆动力学意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 27(增刊): 8 ~ 9.
- 罗照华, 肖序常, 曹永清, 等. 2001. 青藏高原北缘新生代幔源岩浆活动及构造运动性质[J]. 中国科学(D辑), 31(增刊): 8 ~ 13.
- 莫宣学. 2011. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. 高校地质学报, 17(3): 351 ~ 367.
- 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 1999. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图[M]. 北京: 地质出版社.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 495 ~ 500.
- 司家亮. 2008. 青藏高原西北缘新生代构造隆升及扩展[D]. 北京: 中国地质大学.
- 王洪燕, 张传林. 2011. 青藏高原西北缘第四纪火山岩的年龄、地球化学特征及意义[J]. 地质通报, 30(8): 1 171 ~ 1 181.
- 王磊, 杨建国, 王小红, 等. 2015. 甘肃北山大山头南基性-超基性杂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 34(5): 697 ~ 709.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1 589 ~ 1 604.
- 肖序常, 刘训, 高锐, 等. 2002. 西昆仑及邻区岩石圈结构构造演化——塔里木南-西昆仑多学科地学断面简要报道[J]. 地质通报, 21(2): 63 ~ 68.
- 薛光琦, 钱辉, 姜枚. 2005. 青藏高原西缘上地幔构造特征穿越西昆仑造山带的接收函数反演[J]. 地质论评, 51(6): 708 ~ 712.
- 徐夕生, 邱检生. 2010. 火成岩岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 137 ~ 162.
- 许志琴, 李海兵, 唐哲民, 等. 2011. 大型走滑断裂对青藏高原地体构架的改造[J]. 岩石学报, 27(11): 3 157 ~ 3 170.
- 许志琴, 戚学祥, 杨经绥, 等. 2007. 西昆仑康西瓦初性走滑剪切带的两类剪切指向、形成时限及其构造意义[J]. 地质通报, 26(10): 1 252 ~ 1 261.
- 叶德隆. 1993. 钾镁煌斑岩的鉴别标准和分类命名[J]. 地质科技情报, 12(1): 39 ~ 46.
- 于晓飞, 孙凤月, 侯增谦, 等. 2012. 新疆塔什库勒干斯如依迭尔铅锌矿区花岗闪长岩锆石 U-Pb 定年及其意义[J]. 岩石学报, 28(12): 4 151 ~ 4 160.
- 叶卓, 高锐, 李秋生, 等. 2018. 青藏高原向东挤出与向北扩展——高原隆升深部过程之探讨[J]. 科学通报, 63: 3 217 ~ 3 228.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 48(14): 1 511 ~ 1 520.
- 张传林, 于海锋, 王爱国, 等. 2005. 西昆仑西段三叠纪两类花岗岩年龄测定及其构造意义[J]. 地质学报, 79(5): 645 ~ 652.
- 张招崇, 王福生, 郝艳丽, 等. 2004. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束[J]. 地质学报, 78(2): 171 ~ 180.
- 赵佳楠, 田淑芳. 2013. 新疆塔什库勒干地区柯岗断裂性质及遥感地质解译[J]. 新疆地质, 31(2): 152 ~ 155.