

# 缅甸密支那、抹谷地区地幔橄榄岩岩石和 矿物化学组成研究及其构造意义

魏超<sup>1,2</sup>, 彭头平<sup>1,3\*</sup>, 范蔚茗<sup>2,3,4</sup>, 张靖祎<sup>1,2</sup>, 高剑峰<sup>5</sup>,  
董晓涵<sup>1,2</sup>, 梁细荣<sup>1</sup>, 陈林丽<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 4. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100101; 5. 中国科学院  
地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 蛇绿岩作为古老大洋消亡的产物, 隐含了重要的关于古大洋形成和演化的信息。缅甸地区作为我国藏东构造结的南延, 两条重要的蛇绿岩带(东带和西带)被证实, 其中东带密支那-抹谷蛇绿岩带形成于中侏罗世, 西带形成于早白垩世。针对缅甸东带蛇绿岩中的地幔橄榄岩开展了系统的岩石(相)学和矿物化学的研究。岩石(相)学的研究显示, 东带密支那和抹谷地区的地幔橄榄岩组成相同, 主要由尖晶石方辉橄榄岩和纯橄岩组成。进一步矿物化学组成分析表明, 密支那地区尖晶石方辉橄榄岩( $Fo = 90.4\sim 90.9$ )与纯橄岩( $Fo = 90.8$ )具有相同的橄榄石  $Fo$  值, 前者的尖晶石  $Cr^{\#}$ 值( $0.36\sim 0.47$ )明显低于纯橄岩角砾中的尖晶石  $Cr^{\#}$ 值( $Cr^{\#} = 0.61$ ); 抹谷地区尖晶石方辉橄榄岩( $Fo = 91.32\sim 92.01$ )具有比纯橄岩( $Fo = 91.93\sim 93.69$ )略窄的橄榄石  $Fo$  值变化范围, 以及略低的尖晶石  $Cr^{\#}$ 值(前者为  $0.66\sim 0.71$ , 后者为  $0.68\sim 0.80$ )。两个地区地幔橄榄岩矿物化学组成的差别反映了其源区部分熔融程度的差别, 即密支那地区地幔橄榄岩的部分熔融程度要低于抹谷地区橄榄岩。而两地橄榄岩矿物化学组成均表明它们具有 SSZ 型蛇绿岩地幔橄榄岩的特征。结合前人对密支那地区地幔橄榄岩和相关岩石组合的研究结果, 暗示缅甸东带蛇绿岩带形成于中侏罗世的俯冲背景。考虑到我国境内滇西地区并未证实与西藏地区相似的班公-怒江洋演化的岩浆产物, 我们认为密支那-抹谷蛇绿岩带代表的是西藏班公-怒江洋(中特提斯洋)的南延, 而不是新特提斯洋演化的产物。

**关键词:** 地幔橄榄岩; SSZ 型蛇绿岩; 密支那; 抹谷; 缅甸

中图分类号: P595; P594; P596 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2018)06-0612-15

DOI: 10.19700/j.0379-1726.2018.05.015

## Petrological and mineralogical chemistry of mantle peridotites from the Myitkyina-Mogok ophiolitic belt (Myanmar) and its tectonic significance

WEI Chao<sup>1,2</sup>, PENG Tou-ping<sup>1,3\*</sup>, FAN Wei-ming<sup>2,3,4</sup>, ZHANG Jing-yi<sup>1,2</sup>, GAO Jian-feng<sup>5</sup>,  
DONG Xiao-han<sup>1,2</sup>, LIANG Xi-rong<sup>1</sup> and CHEN Lin-li<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China;
4. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
5. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

**Abstract:** An ophiolite is a section of the Earth's oceanic crust and the underlying upper mantle that has been emplaced onto continental crustal rocks. The origin and formation of ophiolites are very important to constrain the formation and evolution of the extinct ocean. Two ophiolitic belts have been identified in Myanmar, namely the

收稿日期(Received): 2018-02-09; 改回日期(Revised): 2018-03-02; 接受日期(Accepted): 2018-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(41490613, 41672058)

作者简介: 魏超(1992-), 男, 硕士研究生, 地球化学专业。E-mail: 1195605750@qq.com

\* 通讯作者(Corresponding author): PENG Tou-ping, E-mail: tppeng@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85290227

Eastern Belt and Western Belt. The Myitkyina-Mogok ophiolites within the Eastern Belt were formed during the Middle Jurassic, whereas the ophiolites in the Western Belt were generated during the Early Cretaceous. This paper presents a new petrological investigation and mineralogical data for the mantle peridotites from the Eastern Belt. Both the Myitkyina and Mogok mantle peridotites from the Eastern Belt are composed of spinel harzburgites and dunite. In the case of the mantle peridotite in the Myitkyina mantle, the olivines in the spinel harzburgites ( $Fo = 90.35-90.94$ ) had similar  $Fo$  values to those in the dunite ( $Fo = 90.79$ ), whereas the spinels in the former ( $Cr^{\#} = 0.36-0.47$ ) showed lower  $Cr^{\#}$  values than those in the latter ( $Cr^{\#} = 0.61$ ). For the Mogok mantle peridotite, the  $Fo$  values of the olivines and  $Cr^{\#}$  values of the spinels from the spinel harzburgites were lower relative to those from the dunites. Collectively, the higher  $Fo$  values and  $Cr^{\#}$  values of the Mogok mantle peridotites compared with those of the Myitkyina mantle peridotites indicated a higher degree of partial melting for the former. Nonetheless, the chemical compositions of the minerals in the Myitkyina and Mogok mantle peridotites were commonly similar to those generated in a subduction-related tectonic setting. Combined with previous data, it is likely that the east ophiolites in Myanmar were generated in a subduction regime. Based on the fact that no Jurassic ophiolites similar to those in the Tibetan Plateau were identified in the western Yunnan Province, it is likely that the Myitkyina-Mogok ophiolites in the Eastern Belt of Myanmar are the southern continuation of the Bangong-Nujiang suture in the Tibetan Plateau, which represents relics of the Meso-Tethys Ocean.

**Key words:** mantle peridotite; supra-subduction zone ophiolite; Myitkyina; Mogok; Myanmar

## 0 引言

超基性岩以低  $SiO_2$  贫  $K_2O$  和  $Na_2O$  含量而富含  $FeO$  和  $MgO$  为特点, 故又称超铁镁质岩。岩石中铁镁矿物占绝对优势, 主要是橄榄石和辉石, 代表性岩石包括纯橄岩、橄橄榄岩、辉石岩等。它们是地幔的重要组成部分, 也是了解地幔属性的重要的物质记录。然而, 由于岩石圈地幔经历过不同历史时期的演化和改造, 不同的地区岩石圈地幔在组成上存在着差别, 例如大陆岩石圈地幔以富集不相容元素为特征, 比原始地幔少 5% 或 5% 以下的高度不相容元素<sup>[1]</sup>; 而洋中脊岩石圈地幔亏损不相容元素<sup>[2]</sup>。深部岩石圈地幔来源的捕虏体或者蛇绿岩带中裸露的超基性岩就为我们研究和了解岩石圈地幔的组成及变化提供了至关重要的物质记录。

蛇绿岩作为一种可以和现代大洋岩石圈对比的镁铁、超镁铁质岩石组合, 代表大洋岩石圈在造山带中的残留, 被广泛应用于全球板块构造系统的研究<sup>[3-5]</sup>。它们的来源被分为几种不同的构造环境-洋中脊环境的 MOR (Mid Ocean Ridge) 和代表俯冲带环境的 SSZ (Supra-Subduction Zone) 型<sup>[6]</sup>。地幔橄榄岩作为蛇绿岩的重要组成部分, 对蛇绿岩形成的构造环境有重要的判别意义<sup>[7]</sup>。而古老的蛇绿岩通常都容易发生风化蚀变或者变质, 往往很难找到新鲜的样品。最近,

我们在缅甸密支那-抹谷地区发现了一些非常新鲜的蛇绿岩, 特别是超基性的地幔橄榄岩, 为研究该区古老岩石圈地幔演化或者属性提供了极好的机会。

缅甸境内目前被证实存在两条蛇绿岩带: 分别为东带和西带蛇绿岩<sup>[8-11]</sup>, 西带蛇绿岩大致沿着东印缅山脉南起安达曼-尼科巴岛向北延伸至那加丘陵比如曼尼普尔马和那加兰邦蛇绿岩<sup>[8]</sup>, 东带蛇绿岩在印缅山脉的东边即玉矿带和太公-密支那带<sup>[10]</sup>。由于缅甸常年处于战乱状态, 特别是密支那地区, 前人认为缅甸东西两条蛇绿岩带形成于相同时代和构造背景<sup>[10]</sup>。近年来, 一些高精度年代学研究表明, 东、西两条蛇绿岩带形成的时间存在差别, 如, 2012 年杨经纬等<sup>[12]</sup>获得了密支那蛇绿岩带中安山玄武岩、淡色辉长岩、橄橄榄辉石岩、斜长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄, 分别为  $(166 \pm 3)$  Ma,  $(177 \pm 1)$  Ma,  $(171 \pm 2)$  Ma,  $(176 \pm 1)$  Ma, 显示其形成时代为中侏罗世; 最近, 2016 年 Liu *et al.*<sup>[13]</sup> 也获得密支那地区辉长岩、闪长岩锆石 U-Pb 年龄分别为  $(171.6 \pm 2.0)$  Ma 和  $(173.0 \pm 1.5)$  Ma, 进一步证实东带蛇绿岩形成时代为中侏罗世。Liu *et al.*<sup>[13]</sup> 还获得了西带蛇绿岩带古灵庙地区异剥钙榴岩锆石 U-Pb 年龄为  $(125.8 \pm 1.7) \sim (126.6.0 \pm 1.0)$  Ma, 表明西带蛇绿岩形成时代为早白垩世。关于它们产生的构造背景目前依然存在争议, 如, Mitchell<sup>[10]</sup> 和杨经纬等<sup>[12]</sup> 认为东西两个蛇绿岩带属于同一个带并和雅鲁藏布江带相连; 而 Liu *et al.*<sup>[13-14]</sup> 则认为东带和

西带不属于同一个带,即东、西蛇绿岩带分别代表的是班公湖-怒江带、雅鲁藏布江带的南延。

然而,目前关于东蛇绿岩带的研究主要集中于密支那地区,而作为其南延的抹谷地区并未开展详细的研究。因此,对于东蛇绿岩带代表的大洋岩石圈地幔属性是否存在差别,抑或这些作为蛇绿岩套重要组成的地幔橄榄岩的成因是否存在差异,依然是一个重要的科学问题,也是全面理解古大洋演化的关键。基于此,我们拟系统地开展密支那-抹谷地区地幔橄榄岩的岩石(相)学、矿物学和矿物地球化学的研究,以期更详细地了解古老大洋岩石圈地幔的形成和演化过程及其产生的背景。

## 1 地质背景

缅甸、孟加拉东部和印度东部的地质情况通常划分为三个主要的构造单元<sup>[15]</sup>:印度板块以东、实皆断裂(SGF)以西的西缅地块(WBB)和实皆断裂以东的保山-掸泰地块(BS-STB)(图 1a)。沿着印缅山脉(IBR)西部边缘增生楔向东倾的安达曼俯冲带标志活动的印度板块边缘。掸邦高原是滇缅地块的一部分,并以抹谷变质带作为西部边缘的边界。抹谷变质带为变质沉积岩、变质侵入岩和更年轻的侵入体组成的一条镰刀型的变质带,从毛淡棉向北到抹谷以西延伸约 700 km<sup>[16]</sup>。

西缅地块坐落在 1200 km 长的右旋实皆断裂上,缅甸板块相对亚洲板块每年向北大约移动 18 mm<sup>[20]</sup>。印缅山脉作为西缅地块向西的边界,主要由蛇绿岩<sup>[10,13]</sup>和不整合覆盖在三叠纪复理石沉积之上的晚白垩世-古近纪海相沉积岩组成<sup>[21]</sup>。印缅山脉的东侧西缅地块发育一系列中白垩世-中新世间歇沉降的沉积盆地(钦敦江、敏巫、勃生等)<sup>[22]</sup>。

在西缅地块北部三条变质带将实皆断裂间隔开<sup>[19]</sup>,它们分别是玉矿带、杰沙-甘高带和太公-密支那带。杰沙-甘高带主要由浅变质的岩石组成,如石英岩、蓝晶石片岩、石英云母石榴石片岩<sup>[19]</sup>。相反像榴辉岩等高压变质岩在公文山脉(Kumon Range)报道过<sup>[23]</sup>。太公-密支那带由低变质的云母片岩、绿泥片岩、滑石片岩组成,局部被上层的浊积岩覆盖<sup>[15]</sup>。片岩被花岗岩和花岗闪长岩所侵入。蛇绿岩比蛇纹石化方辉橄榄岩、玄武岩和燧石通常作为内围层(inliers)出现在晚第三纪沉积物和冲积层内。太公-密支那区域和抹谷变质带的边界为高角度局部

向东南倾的皎漂(Kyaukphyu)逆冲断层<sup>[17]</sup>。相对于产出中低压变质岩的杰沙-甘高和太公-密支那带,玉矿带主要由高压变质岩石组成。不同类型的硬玉、蛇纹石橄榄岩以巨砾的形式出现在冲积矿床中<sup>[24]</sup>。

## 2 岩相学特征

### 2.1 密支那

密支那蛇绿岩沿着太公密支那带分布,地幔橄榄岩岩体广泛分布,但大多被沉积物和植被覆盖,局部地区有着很好的人工露头(图 2a, ),主要由方辉橄榄岩(图 2b 和 2d)组成,局部地区发现了纯橄岩角砾(图 2c)。

#### 2.1.1 方辉橄榄岩

方辉橄榄岩为黄绿色-暗绿色,块状构造,主要由橄榄石(70%~80%)、斜方辉石(15%~25%)、少量单斜辉石(1%~4%)和尖晶石(1%~2%)组成。

显微镜下常见橄榄石和斜方辉石的残碎斑结构(图 3b 和 3c),围绕残斑分布颗粒较小的橄榄石碎基(图 3b 和 3c),橄榄石和斜方辉石裂纹较发育,沿两者裂纹见蛇纹石。此外,交代脉也发育(图 3a),在斜方辉石中经常包含橄榄石矿物(图 3a 和 3c)。

#### 2.1.2 纯橄岩角砾

纯橄岩角砾为黄绿色,局部蛇纹石化,块状构造,主要由橄榄石(90%~95%)和斜方辉石(3%~7%)和少量单斜辉石(1%~2%)和尖晶石(1%~2%)组成。

显微镜下,常见橄榄石组成粒状镶嵌结构(图 3d、3e、3f),其中橄榄石和斜方辉石可见波状消光(图 3e、3f),斜方辉石中可见呈叶片状出熔的单斜辉石以及可见小颗粒的橄榄石分布其中。另外橄榄石中由于出熔而生成的针状和小颗粒的橄榄石。

### 2.2 抹谷

抹谷地区地幔橄榄岩露头良好(图 4a、4e),主要由方辉橄榄岩(图 4b、4c)和纯橄岩组成(图 4d)。

#### 2.2.1 方辉橄榄岩

方辉橄榄岩为黄绿色-暗绿色,常发育蛇纹石化,块状构造,主要由橄榄石(75%~85%),斜方辉石(10%~20%),少量单斜辉石(1%~3%)和尖晶石(1%~2%)组成。

显微镜下可见橄榄石和斜方辉石裂纹发育(图 5a、5b、5c),沿橄榄石裂纹见蛇纹石化,并将两者切割成网状(图 5b、5c),尖晶石呈自形到不自形分布于橄榄石和辉石间的粒间空隙中(图 5a、5b),橄榄石见波状消光(图 5a)。

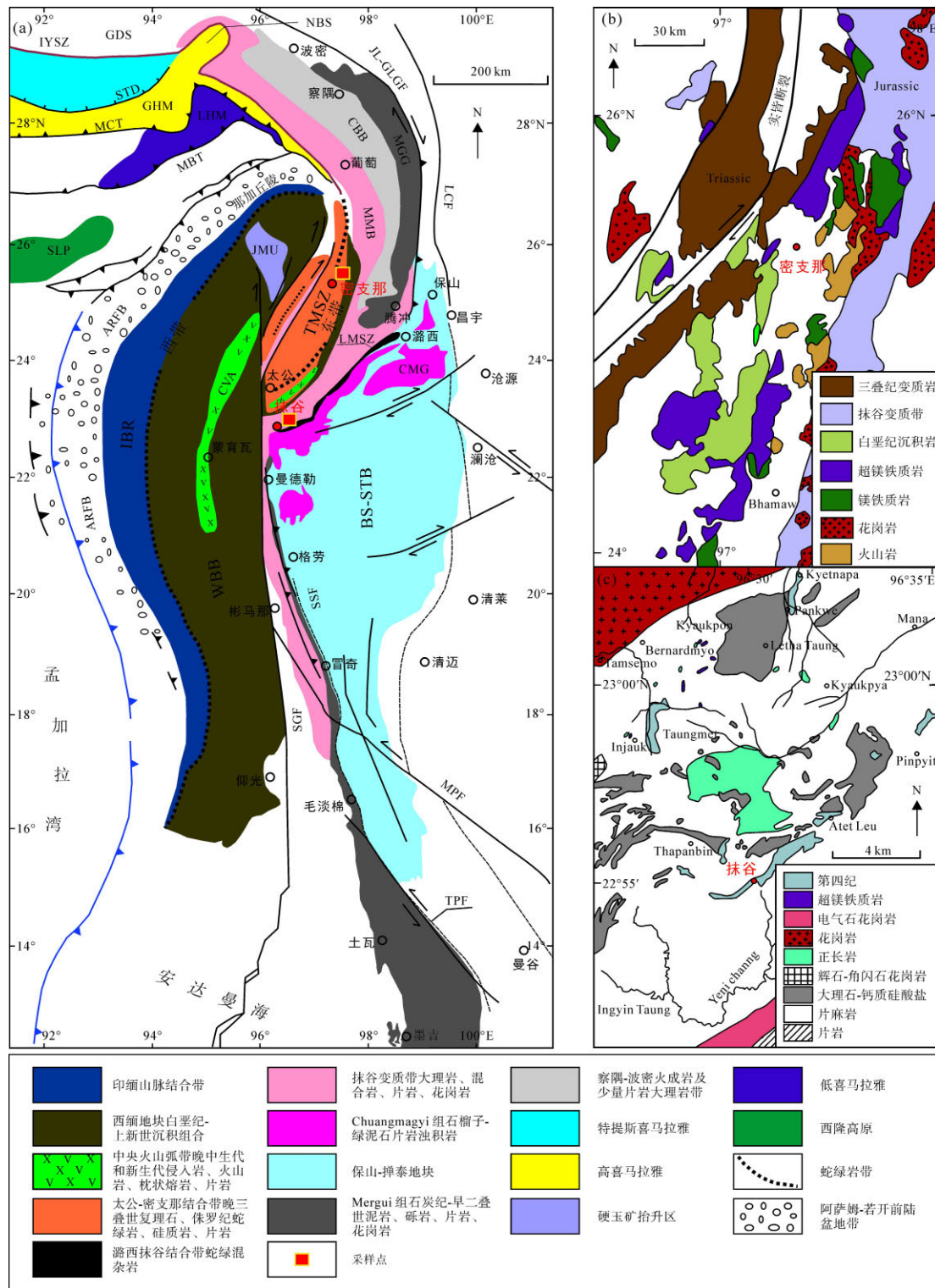


图 1 研究区及其邻区构造概图(a, 据 Mitchell *et al.*<sup>[17]</sup>; Searle *et al.*<sup>[15]</sup>; 王宏等<sup>[18]</sup>); 密支那蛇绿岩地质概图 (b, 据 Liu *et al.*<sup>[14]</sup>); 抹谷蛇绿岩地质概图(c, 据 Mitchell *et al.*<sup>[19]</sup>)

Fig. 1 Geological and tectonic sketch map of the research area and adjacent areas (a, after Mitchell *et al.*<sup>[17]</sup>; Searle *et al.*<sup>[15]</sup>; Wang *et al.*<sup>[18]</sup>), sketch geological map of the Myitkyina ophiolite (b, after Liu *et al.*<sup>[14]</sup>), and sketch geological map of the Mogok ophiolite (c, after Mitchell *et al.*<sup>[19]</sup>)

IYSZ-印度-雅鲁藏布江结合带; SGF-实皆断裂; GDS-冈底斯主俯冲增生造山带; NBS-南迦巴瓦构造结; STD-藏南拆离系; MCT-主中央冲断裂; MBT-主边冲断裂; SSF-掸邦陡崖断裂系; JL-GLGF-嘉黎-高黎贡断裂; LCF-澜沧江断裂; TPF-三塔断裂; MPF-眉萍断裂。

IYSZ-Indus-Yarlung Zangbo suture zone; SGF-Sagaing Fault; GDS-Gangdise main subduction accessional orogenic zone; NBS-Namche Barwa syntaxis; STD-South Tibetan detachment; MCT-Main central thrust; MBT-Main boundary thrust; SSF-Shan scarp Fault; JL-GLGF-Jiali-Gaoligong Fault; LCF-Lancangjiang Fault; TPF-Three pagodas Fault; MPF-Meiping Fault.

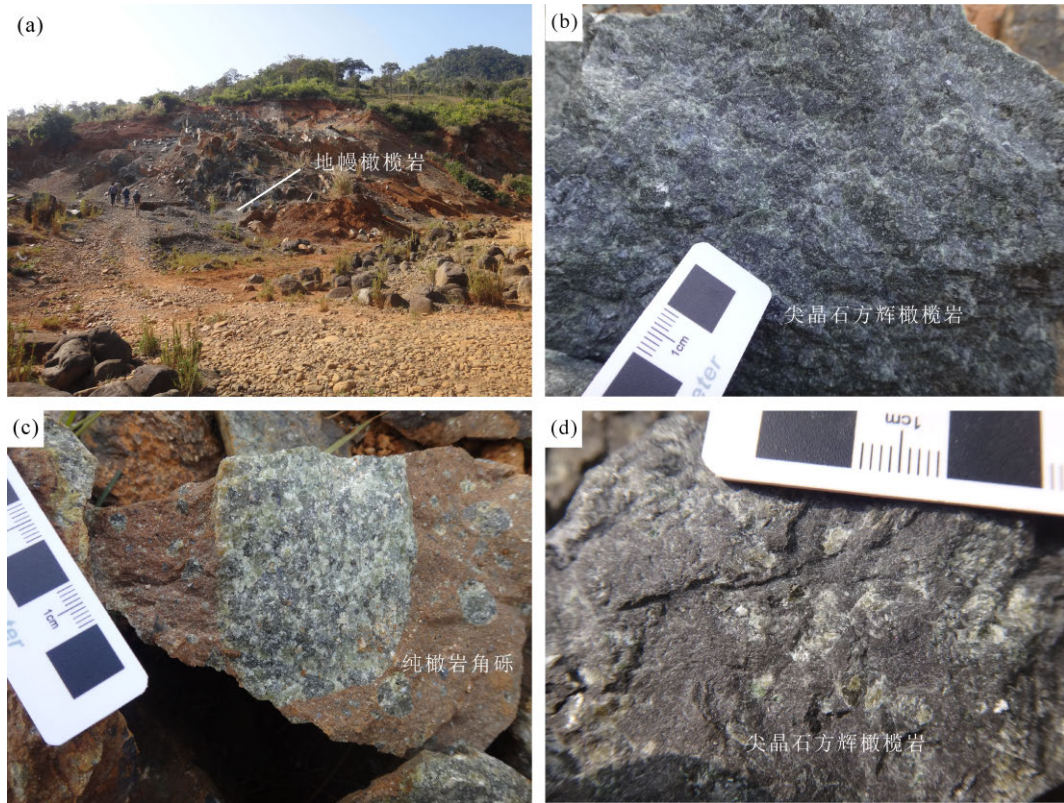
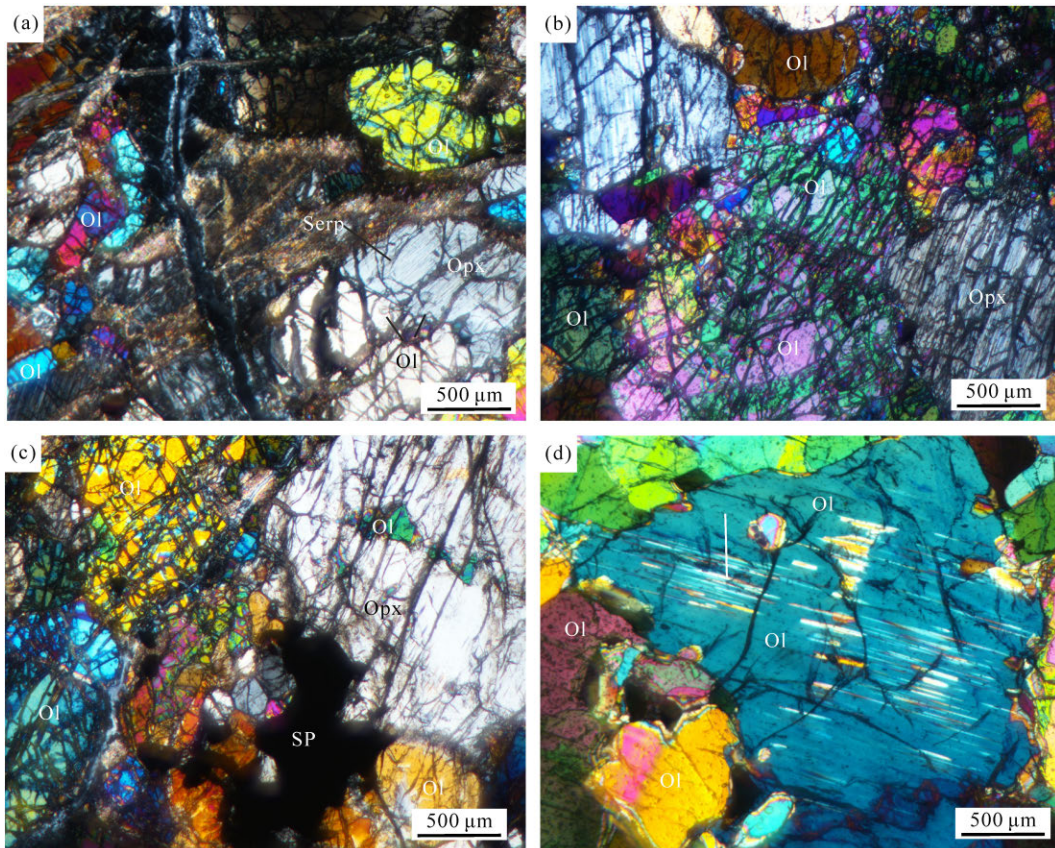


图 2 密支那地幔橄榄岩野外照片

Fig.2 Field photographs of the Myitkyina mantle peridotite

(a) 地幔橄榄岩采石场; (b) 尖晶石方辉橄榄岩; (c) 纯橄岩角砾; (d) 尖晶石方辉橄榄岩。  
(a) A quarry of mantle peridotites; (b) spinel harzburgite; (c) dunite breccia; (d) spinel harzburgite.



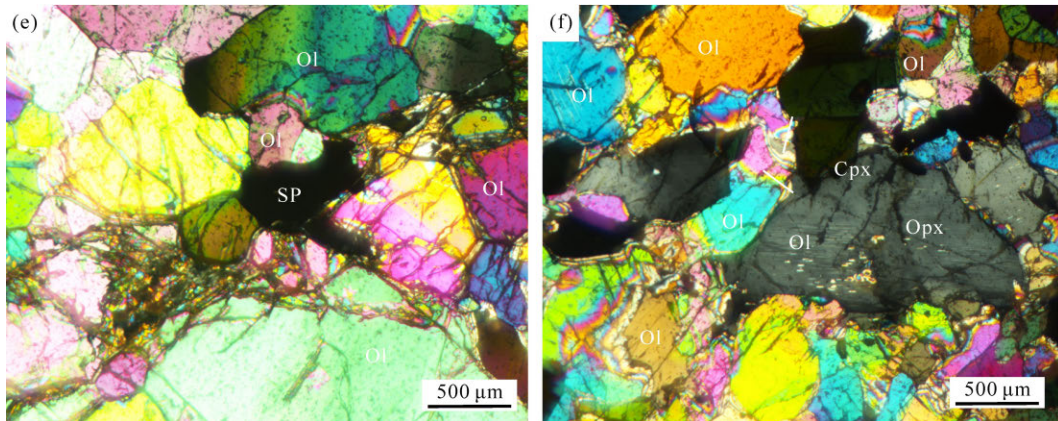


图 3 密支那地幔橄榄岩显微照片

Fig.3 Microstructure of the Myitkyina mantle peridotites

(a) 尖晶石方辉橄榄岩, 交代结构, 沿橄榄石斜方辉石裂纹见蛇纹石; (b) 尖晶石方辉橄榄岩, 碎斑结构, 橄榄石和斜方辉石破碎, 碎斑周围见细小的碎基; (c) 尖晶石方辉橄榄岩, 包橄结构, 斜方辉石中见细小颗粒的橄榄石; (d) 纯橄岩, 镶嵌结构, 橄榄石中见片状和小颗粒橄榄石; (e) 纯橄岩, 镶嵌结构, 橄榄石见波状消光; (f) 纯橄岩, 斜方辉石见波状消光, 斜方辉石中包含早世代橄榄石并出熔形成叶片状的单斜辉石。  
Ol-橄榄石; Opx-斜方辉石; Cpx-单斜辉石; Sp-尖晶石; Serp-蛇纹石。

(a) Spinel harzburgites, metasomatic texture, and olivine partially altered to serpentine along olivine cracks; (b) spinel harzburgites, porphyroclastic texture, and broken olivine and orthopyroxene phenocrysts surrounded by olivine and neoblasts; (c) spinel harzburgites, poikilitic texture, and small olivine in orthopyroxene; (d) dunite, mosaic texture, and small olivine in olivine; (e) dunite, mosaic texture, and undulatory extinction structure of olivine in dunite; (f) dunite, undulatory extinction structure of orthopyroxene in dunite, orthopyroxene with clinopyroxene exsolution, and early olivine in orthopyroxene.

Ol - olivine; Opx - orthorhombic pyroxene; Cpx - monoclinic pyroxene; Sp - spinel; Serp - serpentine.

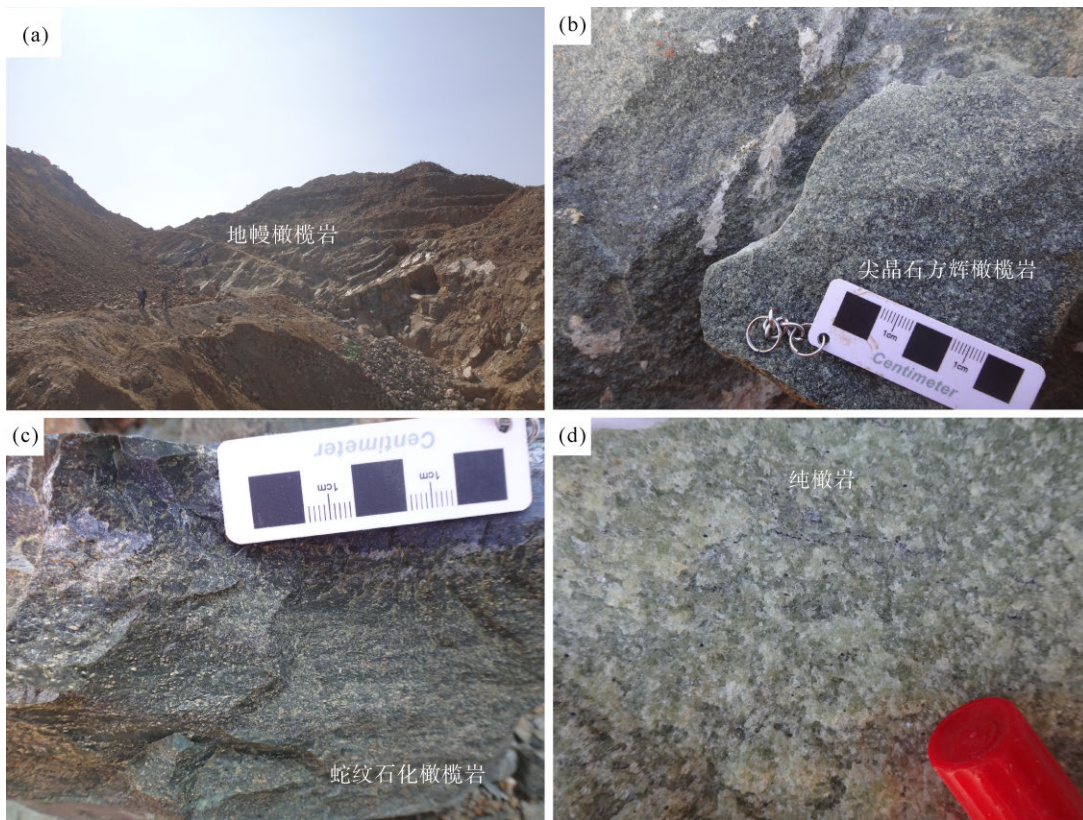


图 4 抹谷地幔橄榄岩野外照片

Fig.4 Field photographs of the Mogok mantle peridotite

(a) 地幔橄榄岩采石场; (b) 尖晶石方辉橄榄岩; (c) 蛇纹石化橄榄岩; (d) 纯橄岩。  
(a) A quarry of mantle peridotites; (b) spinel harzburgite; (c) serpentinized peridotite; (d) dunite.

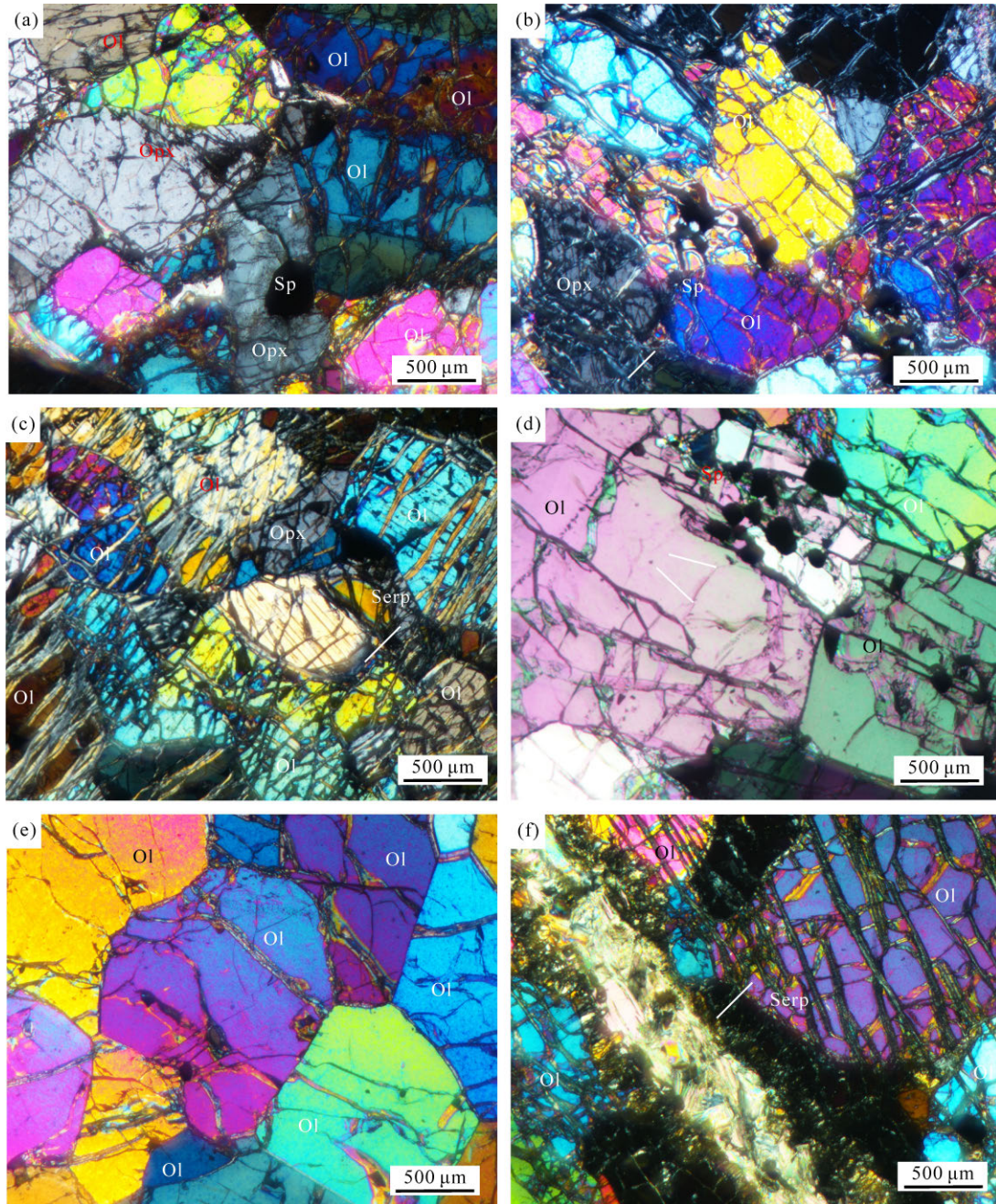


图5 抹谷地幔橄榄岩显微照片

Fig.5 Microstructure of the Mogok mantle peridotites

(a) 尖晶石方辉橄榄岩, 碎斑结构, 尖晶石自形出现在颗粒间; (b、c) 尖晶石方辉橄榄岩, 网状结构, 橄榄石和斜方辉石裂纹见蛇纹石呈网状交代; (d) 纯橄岩, 镶嵌结构, 小颗粒橄榄石间见自形的尖晶石; (e) 纯橄岩, 镶嵌等粒结构, 橄榄石自形呈三连点结构; (f) 纯橄岩, 交代结构, 沿橄榄石裂纹发育蛇纹石。

Ol-橄榄石; Opx-斜方辉石; Cpx-单斜辉石; Sp-尖晶石; Serp-蛇纹石。

(a) Spinel harzburgites, porphyroclastic texture, and euhedral spinel between minerals; (b, c) spinel harzburgites, netted texture, and olivine partially altered to serpentine along cracks; (d) dunite, mosaic texture, and euhedral spinel between olivine; (e) dunite, mosaic equigranular texture, and euhedral olivine with triple point structure; (f) dunite, metasomatic texture, and olivine partially altered to serpentine along olivine cracks.

Ol - olivine; Opx - orthorhombic pyroxene; Cpx - monoclinic pyroxene; Sp - spinel; Serp - serpentine.

### 2.2.2 纯橄岩

纯橄岩为黄绿色, 块状构造, 主要由橄榄石(90%~95%)和斜方辉石(3%~7%)和少量单斜辉石(1%~2%)和1%左右的尖晶石组成。

显微镜下, 常见橄榄石组成粒状镶嵌结构(图5d、5e)橄榄石自形且彼此等粒直线接触, 三连点结构发育(图5e), 橄榄石裂纹发育, 沿裂纹见蛇纹石发育(图5f), 其中还可见交代脉发育, 可见尖晶石呈

自形分布于橄榄石颗粒间的空隙中。

### 3 分析方法

经过详细的野外观测, 采集密支那和抹谷两个地区典型剖面的地幔橄榄岩样品, 将样品制成薄片,

并在镜下进行详细的岩相学研究。地幔橄榄岩的矿物化学成分电子探针成分分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素国家重点实验室完成, 所用仪器为日本电子公司JXA-8100型电子探针, 加速电压15 kV, 探针束流20 nA, 电子束斑2 μm。分析结果见表1~表4。

表1 缅甸橄榄岩中橄榄石电子探针分析结果(%)  
Table 1 Electron microprobe analyses (%) of olivine in the Myanmar mantle peridotite

岩性	样品号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	NiO	Total	Fo	Mg <sup>#</sup>
密支那橄榄岩															
尖晶石方辉 橄榄岩	16MF-5	41.59	0.00	0.03	0.01	9.07	0.13	48.75	0.06	0.04	0.01	0.39	100.08	90.55	0.91
	16MF-6	41.33	0.01	0.01	0.01	9.17	0.12	48.84	0.01	0.01	0.01	0.40	99.92	90.47	0.90
	16MF-7	41.62	0.00	0.00	0.01	8.81	0.14	49.08	0.05	0.02	0.00	0.41	100.13	90.85	0.91
	16MF-8	41.57	0.01	0.00	0.01	9.23	0.12	48.49	0.02	0.02	0.00	0.40	99.87	90.35	0.90
	16MF-9	41.63	0.00	0.01	0.11	8.72	0.12	49.14	0.02	0.03	0.00	0.44	100.23	90.94	0.91
纯橄榄岩角砾	16MF-10	41.36	0.01	0.01	0.01	8.85	0.12	48.97	0.01	0.01	0.01	0.39	99.74	90.79	0.91
抹谷橄榄岩															
尖晶石方辉 橄榄岩	16MF-120B	41.41	0.00	0.00	0.00	8.06	0.14	49.76	0.00	0.00	0.01	0.39	99.78	91.67	0.92
	16MF-124	41.23	0.01	0.00	0.03	8.43	0.12	49.80	0.01	0.01	0.01	0.41	100.06	91.32	0.91
	16MF-125C	40.64	0.00	0.01	0.56	7.97	0.11	48.95	0.01	0.02	0.01	0.39	98.67	91.63	0.92
	16MF-127	41.33	0.01	0.00	0.01	8.27	0.11	49.91	0.01	0.01	0.01	0.41	100.07	91.50	0.92
	16MF-132A	41.75	0.01	0.00	0.01	7.68	0.12	49.63	0.01	0.00	0.00	0.45	99.66	92.01	0.92
纯橄榄岩	16MF-129A	41.63	0.00	0.00	0.01	6.15	0.09	51.29	0.01	0.10	0.01	0.45	99.88	93.69	0.94
	16MF-129B	41.63	0.01	0.00	0.01	6.18	0.09	51.34	0.01	0.01	0.01	0.46	99.74	93.67	0.94
	16MF-130B	41.22	0.00	0.00	0.02	7.81	0.11	49.92	0.01	0.02	0.01	0.41	99.53	91.93	0.92
	16MF-130C	41.28	0.01	0.01	0.02	7.81	0.11	49.94	0.01	0.01	0.01	0.43	99.64	91.93	0.92

注: Fo = 100 × Mg/(Mg + Fe); Mg<sup>#</sup> = Mg/(Mg + Fe)。

表2 缅甸橄榄岩中斜方辉石电子探针分析结果(%)  
Table 2 Electron microprobe analyses (%) of orthopyroxenes in the Myanmar mantle peridotite

岩性	样品号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	NiO	Total	Mg <sup>#</sup>	
密支那橄榄岩															
尖晶石方辉 橄榄岩	16MF-5	56.09	0.09	3.10	0.78	5.76	0.13	31.91	1.94	0.02	0.01	0.09	99.86	0.91	
	16MF-6	56.21	0.09	2.44	0.72	6.03	0.13	32.82	1.31	0.03	0.01	0.09	99.80	0.91	
	16MF-7	56.31	0.09	2.84	0.77	5.75	0.13	32.62	0.95	0.02	0.00	0.09	99.53	0.91	
	16MF-8	56.24	0.09	2.91	0.79	5.89	0.13	32.24	1.41	0.02	0.01	0.09	99.75	0.91	
	16MF-9	56.26	0.10	2.57	0.82	5.75	0.13	31.86	2.15	0.03	0.00	0.10	99.73	0.91	
纯橄榄岩角砾	16MF-10	56.94	0.08	1.91	0.67	5.81	0.14	33.35	0.83	0.02	0.00	0.08	99.77	0.91	
抹谷橄榄岩															
尖晶石方辉 橄榄岩	16MF-124	57.48	0.08	0.87	0.31	5.69	0.13	34.82	0.54	0.03	0.02	0.08	99.97	0.92	
	16MF-125C	57.71	0.06	1.00	0.28	5.51	0.12	34.86	0.53	0.00	0.00	0.06	100.07	0.92	
	16MF-127	57.82	0.08	0.74	0.24	5.63	0.14	35.09	0.49	0.01	0.01	0.08	100.24	0.92	
	16MF-132A	58.10	0.09	0.87	0.29	5.30	0.11	34.15	0.51	0.02	0.01	0.09	99.45	0.92	
纯橄榄岩	16MF-130B	57.82	0.08	0.72	0.19	5.45	0.13	34.81	0.45	0.01	0.00	0.08	99.68	0.92	

注: Mg<sup>#</sup> = Mg/(Mg + Fe)。



表3 缅甸橄榄岩中单斜辉石电子探针分析结果(%)

Table 3 Electron microprobe analyses (%) of clinopyroxenes in the Myanmar mantle peridotite

岩性	样品号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	NiO	Total	Mg <sup>#</sup>	Cr <sup>#</sup>
密支那橄榄岩															
尖晶石方辉 橄榄岩	16MF-5	52.75	0.07	3.50	1.08	2.23	0.06	16.31	23.43	0.06	0.00	0.05	99.55	0.93	0.17
	16MF-6	52.50	0.08	3.14	1.37	2.19	0.07	16.18	23.52	0.13	0.00	0.04	99.22	0.93	0.23
	16MF-7	52.83	0.15	3.31	1.10	2.42	0.09	16.86	22.49	0.15	0.01	0.03	99.42	0.93	0.18
	16MF-8	52.80	0.08	3.36	1.13	2.21	0.08	16.15	23.72	0.05	0.01	0.05	99.62	0.93	0.18
	16MF-9	52.57	0.07	3.20	1.30	2.22	0.07	16.24	23.35	0.18	0.01	0.05	99.26	0.93	0.21
纯橄岩角砾	16MF-10	54.09	0.04	1.42	0.81	2.14	0.07	17.50	23.03	0.23	0.00	0.03	99.37	0.94	0.28
抹谷橄榄岩															
尖晶石方辉 橄榄岩	16MF-124	48.44	0.04	8.86	2.17	3.10	0.04	20.09	12.10	2.05	0.37	0.10	97.36	0.92	0.14
	16MF-125C	46.11	0.08	10.14	2.24	3.92	0.06	19.46	12.17	2.17	0.71	0.12	97.18	0.90	0.13
	16MF-127	51.23	0.02	6.68	1.31	2.85	0.06	20.81	12.70	1.09	0.27	0.09	97.12	0.93	0.12
	16MF-132A	48.03	0.03	9.27	1.71	3.85	0.05	19.21	12.16	2.26	0.50	0.11	97.20	0.90	0.11
纯橄岩	16MF-129A	51.35	0.17	6.20	0.95	2.48	0.03	22.25	12.59	2.06	0.15	0.12	98.35	0.94	0.09
	16MF-130B	51.88	0.05	6.20	1.00	3.28	0.05	21.41	12.35	1.31	0.19	0.12	97.84	0.92	0.10

注: Mg<sup>#</sup> = Mg/(Mg + Fe); Cr<sup>#</sup> = Cr/(Cr + Al)。

表4 缅甸橄榄岩中尖晶石电子探针分析结果(%)

Table 4 Electron microprobe analyses (%) of spinels in the Myanmar mantle peridotite

岩性	样品号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	NiO	Total	Mg <sup>#</sup>	Cr <sup>#</sup>	F
密支那橄榄岩																
尖晶石方辉 橄榄岩	16MF-5	0.02	0.05	37.02	31.05	14.05	0.19	16.58	0.01	0.03	0.01	0.18	99.17	0.68	0.36	13.78
	16MF-6	0.06	0.04	30.14	35.83	17.74	0.24	13.53	0.00	0.00	0.00	0.09	97.66	0.58	0.44	15.87
	16MF-7	0.02	0.11	33.77	33.43	15.10	0.20	16.23	0.00	0.05	0.00	0.17	99.09	0.66	0.40	14.81
	16MF-8	0.01	0.04	34.29	33.23	15.88	0.20	15.47	0.01	0.03	0.00	0.16	99.31	0.63	0.39	14.69
	16MF-9	0.01	0.10	29.05	37.82	17.60	0.24	14.40	0.01	0.02	0.00	0.12	99.36	0.59	0.47	16.35
纯橄岩角砾	16MF-10	0.02	0.07	20.61	47.86	19.10	0.32	11.60	0.00	0.03	0.01	0.06	99.68	0.52	0.61	18.98
抹谷橄榄岩																
尖晶石方辉 橄榄岩	16MF-120B	0.01	0.03	14.30	52.52	22.35	0.38	9.78	0.00	0.00	0.02	0.04	99.42	0.44	0.71	20.59
	16MF-124	0.02	0.02	14.45	49.54	24.55	0.35	9.82	0.00	0.03	0.00	0.07	98.84	0.42	0.70	20.39
	16MF-125C	0.04	0.04	15.21	44.20	30.39	0.40	8.72	0.00	0.06	0.01	0.11	99.18	0.34	0.66	19.86
	16MF-127	0.01	0.04	13.66	47.85	28.36	0.37	9.65	0.00	0.01	0.00	0.08	100.04	0.38	0.70	20.45
	16MF-132A	0.02	0.02	12.78	42.50	36.18	0.45	7.18	0.00	0.01	0.00	0.19	99.32	0.26	0.69	20.30
纯橄岩	16MF-129A	0.02	0.05	9.46	55.76	23.94	0.41	9.94	0.00	0.01	0.00	0.08	99.67	0.43	0.80	21.75
	16MF-129B	0.03	0.06	9.22	55.58	24.51	0.44	9.96	0.00	0.03	0.01	0.08	99.90	0.42	0.80	21.79
	16MF-130B	0.01	0.05	10.06	37.89	43.34	0.41	7.12	0.00	0.04	0.01	0.33	99.28	0.23	0.72	20.66
	16MF-130C	0.01	0.03	14.88	46.14	27.02	0.35	10.37	0.08	0.10	0.01	0.12	99.09	0.41	0.68	20.08

注: Fo = 100 × Mg/(Mg + Fe); Mg<sup>#</sup> = Mg/(Mg + Fe); Cr<sup>#</sup> = Cr/(Cr + Al); F = 10 × ln(Cr<sup>#</sup>) + 24。

## 4 结果

### 4.1 密支那

矿物的化学分析结果显示, 尖晶石方辉橄榄岩中的橄榄石 Fo 值为 90.35~90.94, 纯橄岩角砾中的橄榄石 Fo 值则落在前者的范围内为 90.79 (图 6a)。

尖晶石方辉橄榄岩中的尖晶石 Cr<sup>#</sup>值为 0.36~0.47; 相比尖晶石方辉橄榄岩, 纯橄岩角砾中的尖晶石 Cr<sup>#</sup>值(为 0.61)显著高于前者(图 6)。尖晶石方辉橄榄岩和纯橄岩角砾中的尖晶石 TiO<sub>2</sub> 大多低于 0.1%, 仅一个尖晶石方辉橄榄岩略微大于 0.1%, TiO<sub>2</sub> = 0.11%。与含斜长石的深海橄榄岩(plagioclase-bearing abyssal peridotites)<sup>[27]</sup>相比, 密支那橄榄岩具有较低的 TiO<sub>2</sub>

的含量(图7)。另外,密支那橄榄岩中尖晶石的  $Cr^{\#}$  值和橄榄石的 Fo 值为负相关关系(图6a); 相反尖晶石  $Cr^{\#}$  值与尖晶石  $Mg^{\#}$  值以及尖晶石  $TiO_2$  含量为正相关关系(图6b、6c)。

#### 4.2 抹谷

抹谷橄榄岩中,尖晶石方辉橄榄岩的橄榄石 Fo 值为 91.32~92.01, 纯橄榄岩的橄榄石 Fo 值较尖晶石方辉橄榄岩高,为 91.93~93.69 (图6a)。尖晶石方辉橄榄岩中的尖晶石  $Cr^{\#}$  值较高,为 0.66~0.71, 而纯橄榄岩角砾中的尖晶石  $Cr^{\#}$  值更高,为 0.68~0.80 (图6)。值得注意的是,16MF-129A、16MF-129B 两个橄榄石尖晶石样品  $Cr^{\#}$  值超出了 Parkinson *et al.*<sup>[25]</sup> 和 Pearce *et al.*<sup>[26]</sup> 给出的 SSZ 型橄榄岩的范围(图6), 暗示更程度的部分熔融。尖晶石方辉橄榄岩和纯橄榄岩角砾中的尖晶石  $TiO_2$  的值都低于 0.05%, 都未落入含斜长石深海橄榄岩的范围内(图7), 说明抹谷橄榄岩中没有出现斜长石, 因为地幔橄榄岩中的  $TiO_2$  含量可以指示斜长石出现<sup>[7,31]</sup>。与密支那相同的是,抹谷橄榄岩中尖晶石的  $Cr^{\#}$  值和橄榄石的 Fo 值显示出负相关关系(图6a), 尖晶石的  $Cr^{\#}$  值与  $TiO_2$  含量呈正相关关系(图6b); 不相同的是,尖晶石  $Cr^{\#}$  值与  $Mg^{\#}$  值关系不明显(图6c)。

总体上,与密支那地区的橄榄岩相比,抹谷地区橄榄岩具有明显更高的尖晶石  $Cr^{\#}$  值和橄榄石的 Fo 值,以及更低的尖晶石的  $Mg^{\#}$  值和尖晶石  $TiO_2$  含量。

## 5 讨论

蛇绿岩代表拼贴在陆地的洋壳岩石圈碎片,主要形成于两种不同的构造环境——洋中脊(MOR型)和俯冲带(SSZ型)<sup>[6]</sup>。其形成或者产出的构造环境的判别通常是基于地壳岩石组合的地球化学和结构特征<sup>[32-33]</sup>, 对于其中的超基性岩,由于岩石中的矿物尖晶石的形成受地幔橄榄岩的熔融程度、形成压力控制<sup>[7]</sup>, 利用尖晶石的  $Cr^{\#}$  值与橄榄石的 Fo 值的关系可以推测寄主岩石的熔融程度、形成压力以及构造环境<sup>[26]</sup>。例如, MOR 型蛇绿岩中地幔橄榄岩的尖晶石  $Cr^{\#}$  值常低于 0.6<sup>[34]</sup>; SSZ 型蛇绿岩中地幔橄榄岩的尖晶石  $Cr^{\#}$  值常高于 0.6<sup>[35]</sup>。

### 5.1 密支那-抹谷地幔橄榄岩成因

已有的研究认为,斜方辉石中  $Al_2O_3$  含量可作为部分熔融的标志,因为斜方辉石中的  $Al_2O_3$  含量越高,反映其形成深度越大且部分熔融程度越低<sup>[28]</sup>。

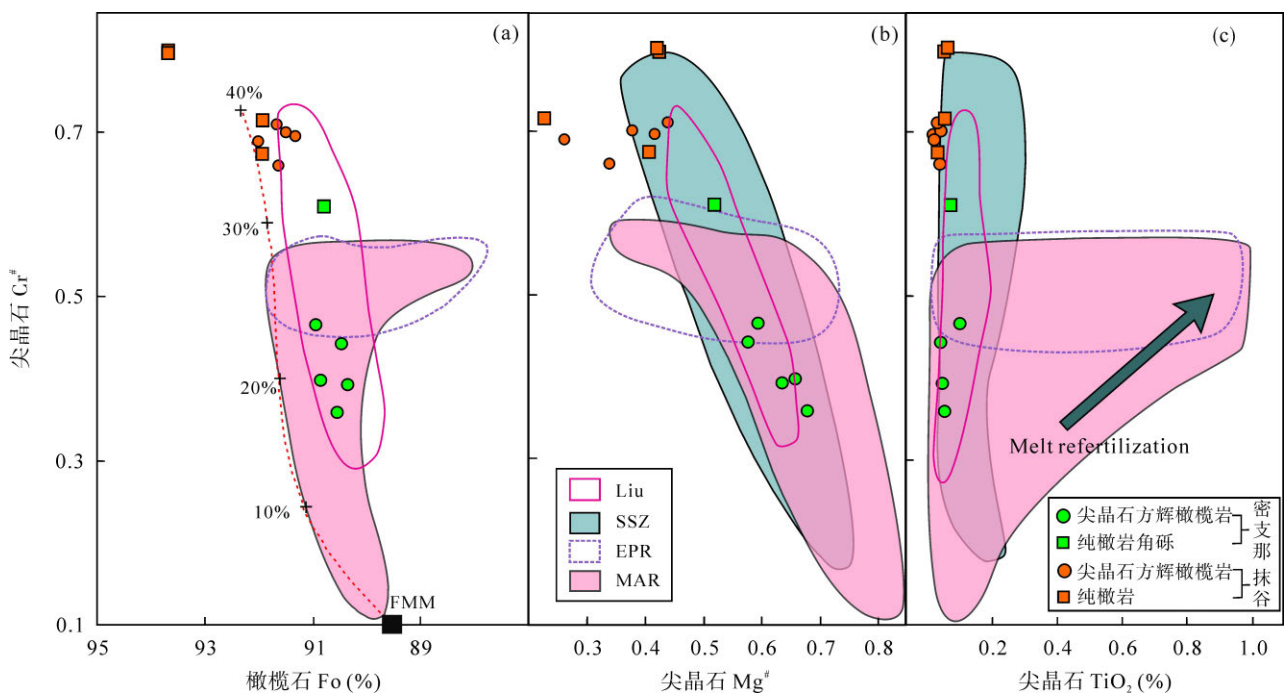


图6 缅甸地幔橄榄岩中尖晶石  $Cr^{\#}$  与橄榄石 Fo (a)、尖晶石  $Mg^{\#}$  (b)、尖晶石  $TiO_2$  (c)图解(据 Liu *et al.*<sup>[14]</sup>)

Fig.6 Spinel  $Cr^{\#}$  vs. olivine Fo (a), spinel  $Mg^{\#}$  (b), and spinel  $TiO_2$  (c) of the Myanmar mantle peridotite (after Liu *et al.*<sup>[14]</sup>)  
Liu—密支那地幔橄榄岩(数据引自 Liu *et al.*<sup>[14]</sup>); FMM—富沃洋中脊玄武岩地幔; SSZ—俯冲带区域(数据引自 Parkinson *et al.*<sup>[25]</sup>和 Pearce *et al.*<sup>[26]</sup>); EPR—东太平洋隆起(数据引自 Allan *et al.*<sup>[27]</sup>、Dick *et al.*<sup>[28]</sup>和 Edwards *et al.*<sup>[29]</sup>); MAR—大西洋中脊(数据引自 Dick<sup>[30]</sup>)  
Liu—Myitkyina mantle peridotites (data from Liu *et al.*<sup>[14]</sup>); FMM—fertile MORB mantle; SSZ—supra-subduction zone (data from Parkinson *et al.*<sup>[25]</sup>; Pearce *et al.*<sup>[26]</sup>); EPR—East Pacific Rise (data from Allan *et al.*<sup>[27]</sup>; Dick *et al.*<sup>[28]</sup>; Edwards *et al.*<sup>[29]</sup>); MAR—Mid-Atlantic Ridge (data from Dick<sup>[30]</sup>).

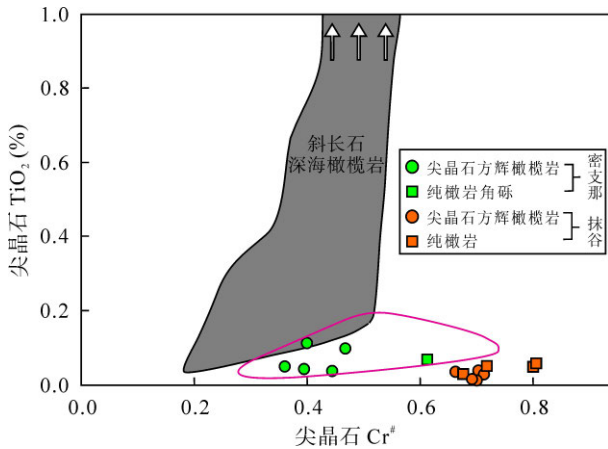


图7 缅甸地幔橄榄岩中尖晶石 TiO<sub>2</sub>-Cr<sup>#</sup>图解  
(据 Liu *et al.*<sup>[14]</sup>)

Fig.7 Spinel TiO<sub>2</sub> contents vs. Cr<sup>#</sup> of the Myanmar mantle peridotites (after Liu *et al.*<sup>[14]</sup>)

斜长石深海橄榄岩(数据引自 Hellebrand *et al.*<sup>[31]</sup>).

Pl-bearing abyssal peridotites (data from Hellebrand *et al.*<sup>[31]</sup>).

抹谷地区橄榄岩中斜方辉石的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量普遍较密支那橄榄岩低, 说明抹谷橄榄岩较密支那橄榄岩部分熔融程度高(图 8a)。此外, 尖晶石作为地幔橄榄岩

的重要矿物成分, 其 Cr<sup>#</sup>值也是判别地幔橄榄岩部分熔融程度的良好指标, 由于地幔橄榄岩中尖晶石的 Cr<sup>#</sup>值会随着熔融程度的增加而增大<sup>[7, 36]</sup>。Hellebrand *et al.*<sup>[36]</sup>进一步根据尖晶石 Cr<sup>#</sup>值与部分熔融程度(*F*)的关系建立了一个经验公式计算部分熔融程度, 即  $F = 10 \times \ln(\text{Cr}^\#) + 24$ 。依据这个公式, 进一步获得了密支那地区地幔橄榄岩的部分熔融程度。结果显示, 密支那方辉橄榄岩是来自亏损地幔 13.78%~16.35% 程度的部分熔融的产物。

## 5.2 构造背景

正如前面所述, 地幔橄榄岩矿物的化学组成对于判别其形成的构造背景具有重要的指示意义。密支那地区方辉橄榄岩中的尖晶石 Cr<sup>#</sup>值较低, 全部落入大西洋中脊(MAR)深海橄榄岩的区域(图 6), 与 Liu *et al.*<sup>[14]</sup>获得的数据相一致(图 6)。不同的是, 密支那地区纯橄岩中的尖晶石 Cr<sup>#</sup>值大于 0.6, 落入到俯冲带橄榄岩区域(SSZ, 图 6)。而从橄榄石 NiO-Fo 和 MnO-Fo 图解(图 9)以及斜方辉石 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Mg<sup>#</sup>、

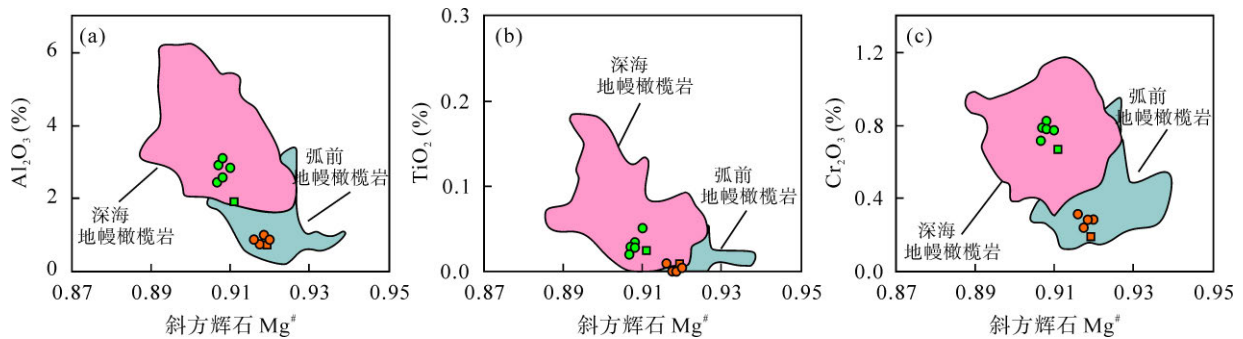


图8 缅甸地幔橄榄岩斜方辉石成分图解(据 Lian *et al.*<sup>[37]</sup>、张利等<sup>[38]</sup>)

Fig.8 Compositional variations in the orthopyroxenes of the Myanmar mantle peridotite (after Lian *et al.*<sup>[37]</sup>; Zhang *et al.*<sup>[38]</sup>)

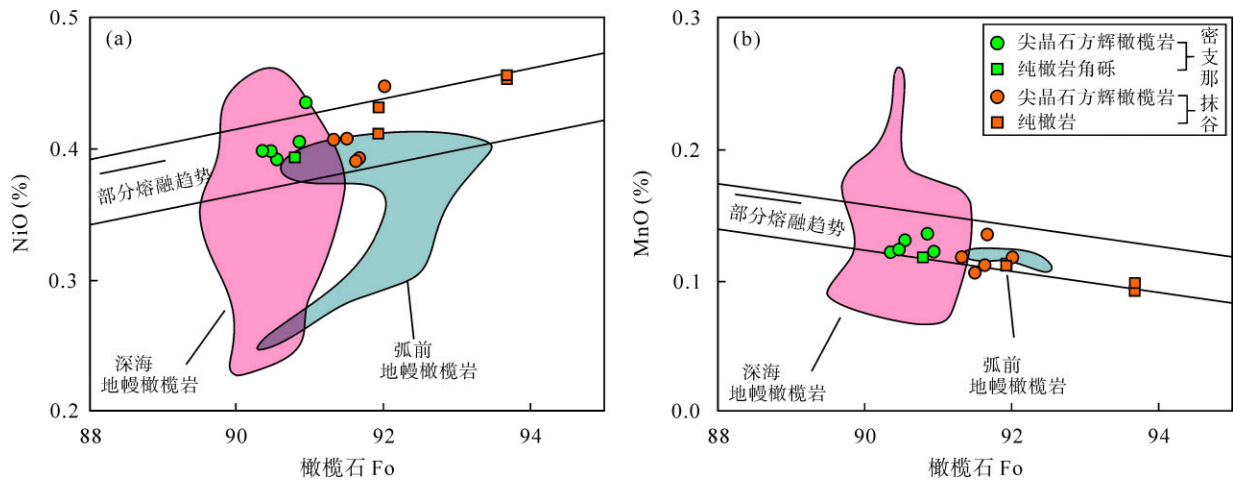


图9 缅甸地幔橄榄岩橄榄石成分图解(据张利等<sup>[38]</sup>)

Fig.9 Compositional variations in the olivines of the Myanmar mantle peridotites (after Zhang *et al.*<sup>[38]</sup>)

TiO<sub>2</sub>-Mg<sup>#</sup>和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Mg<sup>#</sup>图解(图 8)可见, 密支那橄榄岩均落入深海地幔橄榄岩的范围, 抹谷橄榄岩均落入弧前地幔橄榄岩的范围。而单斜辉石的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Mg<sup>#</sup>、TiO<sub>2</sub>-Mg<sup>#</sup>和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Mg<sup>#</sup>图解(图 10)并未显示出统一规律。

结合最近杨经绥等<sup>[12]</sup>针对密支那地区蛇绿岩带中的其他岩石组合的研究结果, 包括安山玄武岩、辉长岩、斜长花岗岩、辉石岩的元素和同位素地球化学的研究, 其中安山玄武岩显示相同的岛弧岩浆岩的特征, 明显富集大离子亲石元素 Sr、K、Rb 和 Ba, 而亏损高场强元素 Nb、Th、Ta、Zr 和 Ti; 其他类型岩石也都显示出类似弧岩浆岩的 Nb 的负异常特征, 很明显这些蛇绿岩套中的岩浆岩主要表现为典型的 SSZ 构造背景成因的岩石特征。

抹谷地区方辉橄榄岩中的尖晶石 Cr<sup>#</sup>值较高, 全部大于 0.6, 除 16MF-125C、16MF-132A 因为尖晶石 Mg<sup>#</sup>值偏低而偏离外, 其余都落入 SSZ 型橄榄岩区域(SSZ, 图 6); 纯橄岩中的尖晶石 Cr<sup>#</sup>值比方辉橄榄岩中的尖晶石 Cr<sup>#</sup>还高, 同样的除 16MF-130B 因为尖晶石 Mg<sup>#</sup>偏低而偏离外, 其余都落入 SSZ 型橄榄岩区域。表明抹谷地区地幔橄榄岩与密支那类似, 主要形成于典型的 SSZ 构造背景。

已有的区域地质调查和研究表明, 密支那和抹谷地区早古生代以来的演化历史与腾冲地块变质带具有非常相似的特征, 密支那-抹谷地区属于腾冲地块高级变质带的南延<sup>[39]</sup>, 密支那和抹谷地区的蛇绿岩应该是相同大洋演化的产物, 代表了中侏罗世的大洋。事实上, 课题组也获得了抹谷地区中侏罗世的斜长花岗岩的锆石 U/Pb 年龄(课题组未发表的数据), 与杨经绥等<sup>[12]</sup>和 Liu *et al.*<sup>[13]</sup>给出的密支那蛇绿岩的年龄相近(表 5)。进一步表明密支那和抹谷地区蛇绿岩代表的是相同的大洋演化的产物。其矿物地

球化学成分的差别, 如两个地区橄榄岩中尖晶石 Cr<sup>#</sup>值存在差异, 可能是同一个带上不同熔融程度的结果。

### 5.3 缅甸密支那-抹谷蛇绿岩的构造归属

虽然目前关于缅甸东西带蛇绿岩的形成时间已经确定, 东带蛇绿岩形成于中侏罗世<sup>[12-13]</sup>, 而西带蛇绿岩主要形成于白垩纪<sup>[13]</sup>。然而, 缅甸两条蛇绿岩带的构造归属, 即它们是否对应我国青藏高原内相同时代的班公-怒江带(中侏罗世)和雅鲁藏布带(白垩纪)蛇绿岩带, 目前还存在争议。Mitchell<sup>[10]</sup>和杨经绥等<sup>[12]</sup>认为两个带属于同一个带并与雅鲁藏布江带相连; 而 Liu *et al.*<sup>[13-14]</sup>则认为东带和西带不属于同一个带, 它们分别是班公-怒江带和雅鲁藏布江带的南延。其主要依据来自缅甸蛇绿岩年代学格架和青藏高原蛇绿岩带年代学对比(表 5), 如缅甸东带密支那-抹谷蛇绿岩年龄为别为 170 Ma 和 180 Ma 左右, 对应于青藏高原内部班公-怒江带蛇绿岩带 167~187 Ma 的蛇绿岩<sup>[13]</sup>; 而西带古灵庙蛇绿岩白垩纪年龄(约 125 Ma), 对应了约 130 Ma 的雅鲁藏布江蛇绿岩<sup>[13]</sup>。虽然钟立峰等<sup>[45]</sup>早期获得了雅鲁藏布江东段罗布莎蛇绿岩 162 Ma 的形成时代, 而雅鲁藏布江西段和中段蛇绿岩均形成于早白垩世。更重要的是, 最近罗布莎地区获得多组锆石、楣石年龄均显示为 128~131 Ma<sup>[42]</sup>。因此, 雅鲁藏布江蛇绿岩是否存在侏罗纪的蛇绿岩还需要进一步的详细研究。

至于与班公-怒江带的关系, 尽管前人基于腾冲地块东缘高级变质带内出现的超基性岩体归结于该带为青藏高原内班公-怒江带蛇绿岩的南延<sup>[46]</sup>。事实上, 储著银等<sup>[47]</sup>针对这些超基性岩的 Os-Nb-Pb-Sr 同位素开展了研究后发现, 腾冲地块东缘龙陵-瑞丽断裂带超镁铁岩具有古老的富集岩石圈地幔的特征,

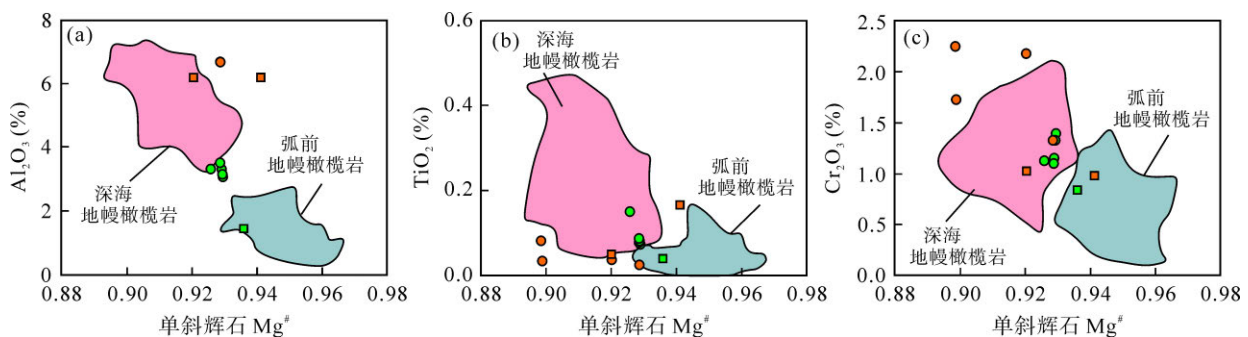


图 10 缅甸地幔橄榄岩单斜辉石成分图解(据 Lian *et al.*<sup>[37]</sup>、张利等<sup>[38]</sup>)

Fig. 10 Compositional variations in the clinopyroxenes of the Myanmar mantle peridotites (after Lian *et al.*<sup>[37]</sup>; Zhang *et al.*<sup>[38]</sup>)

表5 缅甸蛇绿岩和班公湖-怒江、雅鲁藏布江蛇绿岩年代学数据  
Table 5 Chronological data of the ophiolites from Myanmar and the Yarlung-Tsangpo-Bangong-Nujiang zone

地区	岩性	锆石 U/Pb 年龄 (Ma)	参考文献
缅甸带			
抹谷	斜长花岗岩	176±1	课题组未发表
	安山玄武岩	166±3	
密支那	淡色辉长岩	177±1	[12]
	橄榄辉石岩	171±2	
	斜长花岗岩	180.3±1.6	
古灵庙	辉长岩、闪长岩	(171.6±2)~(173.0±1.5)	[13]
	异剥钙榴岩	(125.8±1.7)~(126.6.0±1.0)	
	斜长角闪岩	114.7±1.4	
班公湖-怒江带			
班公湖	辉长岩	167±1.4	[40]
日土(Rutog)	辉长岩	169±2	
Dongco	辉长岩	167±2	
Dongqiao	辉长岩	187±2	[41]
Amdo	辉长岩	184±2	
Dengqen	辉长岩	164±2、177±3	
雅鲁藏布江带			
罗布莎	辉长岩	128.4±0.9	
罗布莎	角闪岩	131.0±1.2	[42]
罗布莎	角闪岩	128.4±0.9	
普兰	辉长岩	131.0±1.2	[43]
东波	辉长岩	130±0.5	
东波	辉石岩	128±1.1	[44]

不同于典型的大洋岩石圈地幔的超基性岩<sup>[48-49]</sup>。说明这些超镁铁岩并非作为蛇绿岩存在于腾冲与保山地块之间。此外,腾冲地块东缘潞西地区超基性岩出露区缺乏早侏罗世地层以及中侏罗世地层主要以紫红色砂页岩、砂岩夹少量的灰岩透镜体为主,而底部出现薄层砾岩的特征(潞西幅 1:20 万地质图),明显不同于大洋沉积以碳酸盐沉积为主的特征。结合该区并未出现类似青藏高原班怒带蛇绿岩相似的岩石组合,而仅仅出现了大陆岩石圈地幔属性的超基性岩,青藏高原腹地班怒带蛇绿岩的南延并非进入我国的滇西地区。从蛇绿岩套的形成时间上和岩石组合特征上的相同,缅甸东带的密支那-抹谷蛇绿岩带很可能代表了青藏高原班怒带蛇绿岩带的南延。

## 6 结论

(1) 矿物学和矿物地球化学以及岩石地球化学特征表明,密支那-抹谷地区地幔橄榄岩代表 SSZ 构造背景下的地幔残留,两地地幔橄榄岩是相同构造

背景下不同熔融程度的产物。

(2) 根据时空关系和岩石组合特征,缅甸东带密支那-抹谷蛇绿岩带很可能是青藏高原班公-怒江蛇绿岩带在缅甸地区的南延。

感谢两位审稿人刘传周研究员和杨阳副研究员的认真评阅和建设性意见,帮助我们改进!野外考察得到缅甸地质学会 Kyaing Sein 教授,密支那大学 Hnin Min Soe、Me Me Aung 和 Aung Naing Thu 三位老师,以及中国科学院青藏高原研究所的丁林院士、蔡福龙副研究员、李金祥副研究员、张利云副研究员和中国科学院地质与地球物理研究所的吴福元院士、陈意副研究员的帮助,一并表示感谢!此外,也要感谢编辑部老师的大力支持和帮助,以及中国科学院地球化学研究所高剑峰百人计划项目对本研究的资助!

### 参考文献(References):

- [1] McDougall W F. Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle [J]. Earth Planet Sci Lett, 1990, 101:

- 1-18.
- [2] Ringwood A E. Composition and Petrology of the Earth's Mantle [M]. New York: McGraw-Hill, 1975: 1-618.
- [3] Dewey J F, Bird J. Origin and emplacement of the ophiolite suite: Appalachian ophiolites in Newfoundland [J]. *J Geophys Res*, 1971, 76(14): 3179-3206.
- [4] Coleman R G, Keith T E. A chemical study of serpentinization Burro Mountain, California [J]. *J Petrol*, 1971, 12(2): 311-328.
- [5] Kidd R G W. A model for the process of formation of the upper oceanic crust [J]. *Geophys J Roy Astron Soc*, 1977, 50(1): 149-183.
- [6] Dilek Y, Furnes H. Ophiolites and their origins [J]. *Elements*, 2014, 10(2): 93-100.
- [7] Dick H J B, Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1984, 86(1): 54-76.
- [8] Acharyya S K. Collisional emplacement history of the Naga-Andaman ophiolites and the position of the eastern Indian suture [J]. *J Asian Earth Sci*, 2007, 29(2/3): 229-242.
- [9] Acharyya S K. Indo-Burma Range: A belt of accreted microcontinents, ophiolites and Mesozoic-Paleogene flyschoid sediments [J]. *Int J Earth Sci*, 2015, 104(5): 1235-1251.
- [10] Mitchell A H G. Cretaceous-Cenozoic tectonic events in the western Myanmar (Burma)-Assam region [J]. *J Geol Soc London*, 1993, 150(6): 1089-1102.
- [11] Mitchell A H G, Tin Hlaing Nyunt Htay. The Chin Hills segment of the Indo-Burma Ranges: Not a simple accretionary wedge [M]//Ibotombi S. Indo-Myanmar Ranges in the Tectonic Framework of the Himalaya and Southeast Asia. Bangalore: Memoir Geological Society of India, 2010: 3-24.
- [12] 杨经绥, 许志琴, 段向东, 李静, 熊发挥, 刘钊, 蔡志慧, 李化启. 缅甸密支那地区发现侏罗纪的 SSZ 型蛇绿岩[J]. *岩石学报*, 2012, 28(6): 1710-1730.  
Yang Jing-sui, Xu Zhi-qin, Duan Xiang-dong, Li Jing, Xiong Fa-hui, Liu Zhao, Cai Zhi-hui, Li Hua-qi. Discovery of a Jurassic SSZ ophiolite in the Myitkyina region of Myanmar [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2012, 28(6): 1710-1730 (in Chinese with English abstract).
- [13] Liu C Z, Chung S L, Wu F Y, Zhang C, Xu Y, Wang J G, Chen Y, Shun G. Tethyan suturing in Southeast Asia: Zircon U-Pb and Hf-O isotopic constraints from Myanmar ophiolites [J]. *Geology*, 2016, 44(4): 311-314.
- [14] Liu C Z, Zhang C, Xu Y, Wang J G, Chen Y, Shun G, Wu F Y, Sein K. Petrology and geochemistry of mantle peridotites from the Kalaymyo and Myitkyina ophiolites (Myanmar): Implications for tectonic settings [J]. *Lithos*, 2016, 264: 495-508.
- [15] Searle M P, Noble S R, Cottle J M, Waters D J, Mitchell A H G, Hlaing T, Horstwood M S A. Tectonic evolution of the Mogok metamorphic belt, Burma (Myanmar) constrained by U-Th-Pb dating of metamorphic and magmatic rocks [J]. *Tectonics*, 2007, 26(3): TC3014.
- [16] Searle D L, Ba Than Haq. The Mogok belt of Burma and its relationship to the Himalayan orogeny [C]. Delhi: Proceedings of the 22nd International Geological Conference, 1964: 132-161.
- [17] Mitchell A H G, Ausa C A, Deiparine L, Hlaing T, Htay N, Khine A. The Modi Taung-Nankwe gold district, Slate belt, Central Myanmar: Mesothermal veins in a Mesozoic orogen [J]. *J Asian Earth Sci*, 2004, 23(3): 321-341.
- [18] 王宏, 林方成, 李兴振, 施美凤, 刘朝基, 石洪召. 缅甸中北区及其邻区构造构造单元划分及新特提斯的演化[J]. *中国地质*, 2012, 39(4): 912-922.  
Wang Hong, Lin Fang-cheng, Li Xing-zhen, Shi Mei-feng, Liu Chao-ji, Shi Hong-zhao. Tectonic unit division and Neo-Tethys tectonic evolution in north-central Myanmar and its adjacent areas [J]. *Geol China*, 2012, 39(4): 912-922 (in Chinese with English abstract).
- [19] Mitchell A H G, Htay M T, Htun K M, Win M N, Oo T, Hlaing T. Rock relationships in the Mogok metamorphic belt, Tatkon to Mandalay, Central Myanmar [J]. *J Asian Earth Sci*, 2007, 29(5/6): 891-910.
- [20] Maurin T, Masson F, Rangin C, Min U T, Collard P. First global positioning system results in northern Myanmar: Constant and localized slip rate along the Sagaing Fault [J]. *Geology*, 2010, 38(7): 591-594.
- [21] Bender F. Geology of Burma [M]. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1983: 1-293.
- [22] Pivnik D A, Nahm J, Tucker R S, Smith G O, Kyaw Nyein, Maung Nyunt, Maung P H. Polyphase deformation in a fore-arc/back-arc basin, Salin Subbasin, Myanmar (Burma) [J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82(10): 1837-1856.
- [23] Enami M, Ko Z W, Win A, Tsuboi M. Eclogite from the Kumon range, Myanmar: Petrology and tectonic implications [J]. *Gondw Res*, 2012, 21(2/3): 548-558.
- [24] Franz L, Tay Thye Sun Hanni H A, de Capitani C, Thanasuthipitak T, Atichat W. A comparative study of jadeite, omphacite and kosmochlor jades from Myanmar, and suggestions for a practical nomenclature [J]. *J Gemmol*, 2014, 34(3): 210-229.
- [25] Parkinson I J, Pearce J A. Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc (ODP Leg125): Evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra subduction zone setting [J]. *J Petrol*, 1998, 39(9): 1577-1618.
- [26] Pearce J A, Baker P F, Edwards S J, Parkinson I J, Leat P T. Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2000, 139(1): 36-53.
- [27] Allan J F, Dick H J B. Cr-rich spinel as a tracer for melt migration and melt-wall rock interaction in the mantle [C]//Mével C, Gillis M C, Allan J F, Meyer P S. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. Texas: Ocean Drilling Program, College Station, Texas, 1996: 157-172.
- [28] Dick H J B, Natland J H. Late stage melt evolution and transport in the shallow mantle beneath the East Pacific Rise [C]//Mével C, Gillis M C, Allan J F, Meyer P S. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. Texas: Ocean

- Drilling Program, College Station, Texas, 1996: 103–134.
- [29] Edwards S J, Malpas J. Melt-peridotite interactions in shallow mantle at the East Pacific Rise: Evidence from ODP Site 895 (Hess Deep) [J]. *Mineral Mag*, 1996, 60(1): 191–206.
- [30] Dick H J B. Abyssal peridotites, very slow spreading ridges and ocean ridge magmatism [M]//Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. London: Geological Society Special Publication, 1989: 71–105.
- [31] Hellebrand E, Snow J E, Mühe R. Mantle melting beneath Gakkel Ridge (Arctic Ocean): Abyssal peridotite spinel compositions [J]. *Chem Geol*, 2002, 182(2/4): 227–235.
- [32] Pearce J A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust [J]. *Lithos*, 2008, 100(1/4): 14–48.
- [33] Pearce J A. Immobile element fingerprinting of ophiolites [J]. *Elements*, 2014, 10(2): 101–108.
- [34] Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites [J]. *Geol Soc London Spec Publ*, 1984, 16(1): 77–94.
- [35] Arai S. Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation [J]. *Chem Geol*, 1994, 113(3/4): 191–204.
- [36] Hellebrand E, Snow J E, Dick H J B, Hofmann A W. Coupled major and trace elements as indicators of the extend of melting in mid-ocean-ridge peridotites [J]. *Nature*, 2001, 410(6829): 677–681.
- [37] Lian D Y, Yang J S, Robinson P T, Liu F, Xiong F H, Zhang L, Gao J, Wu W W. Tectonic evolution of the western Yarlung Zangbo phiolitic belt, Tibet: Implications from the petrology, mineralogy, and geochemistry of the peridotites [J]. *J Geol*, 2016, 124(3): 353–376.
- [38] 张利, 杨经绥, 刘飞, 连东洋, 黄健, 赵慧, 杨艳. 南公珠错地幔橄欖岩: 雅鲁藏布江缝合带西段一个典型的大洋地幔橄欖岩[J]. *岩石学报*, 2016, 32(12): 3649–3672.  
Zhang Li, Yang Jing-sui, Liu Fei, Lian Dong-yang, Huang Jian, Zhao Hui, Yang Yan. The South Gongzhucuo peridotite massif: A typical MOR type peridotite in the western Yarlung Zangbo suture zone [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2016, 32(12): 3649–3672 (in Chinese with English abstract).
- [39] 陈希节, 许志琴, Sein K, 孟元库, 蔡志慧. 缅甸中部抹谷早白垩世构造岩浆作用及对特提斯演化的启示[J]. *地质学报*, 2016, 90(11): 3060–3080.  
Chen Xi-jie, Xu Zhi-qin, Sein K, Meng Yuan-ku, Cai Zhi-hui. The Early Cretaceous tectonic magmatism in the Mogok District, Central Myanmar, and its implication for the evolution of Tethys [J]. *Acta Geol Sinica*, 2016, 90(11): 3060–3080 (in Chinese with English abstract).
- [40] 史仁灯. 班公湖 SSZ 型蛇绿岩年龄对班-怒洋时限的制约[J]. *科学通报*, 2007, 52(2): 223–227.  
Shi Rendeng. Age of SSZ ophiolite in Bangong: Constraint on formation age of Bangong-Nujiang suture [J]. *Chinese Sci Bull*, 2007, 52(2): 223–227 (in Chinese).
- [41] Wang B D, Wang L Q, Chung S L, Chen J L, Yin F G, Liu H, Li X B, Chen L K. Evolution of the Bangong-Nujiang Tethyan ocean: Insights from the geochronology and geochemistry of mafic rocks within ophiolites [J]. *Lithos*, 2016, 245: 18–33.
- [42] Zhang C, Liu C Z, Wu F Y, Zhang L L, Ji W Q. Geochemistry and geochronology of mafic rocks from the Luobusa ophiolite, south Tibet [J]. *Lithos*, 2016, 245: 93–108.
- [43] 刘钊, 李源, 熊发挥, 吴迪, 刘飞. 西藏西部普兰蛇绿岩中的 MOR 型辉长岩: 岩石学和年代学[J]. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3269–3279.  
Liu Zhao, Li Yuan, Xiong Fa-hui, Wu Di, Liu Fei. Petrology and geochronology of MOR gabbro in the Purang ophiolite of western Tibet, China [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2011, 27(11): 3269–3279 (in Chinese with English abstract).
- [44] 熊发挥, 杨经绥, 梁凤华, 巴登珠, 张健, 徐向珍, 李源, 刘钊. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段东波蛇绿岩中锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3223–3238.  
Xiong Fa-hui, Yang Jing-sui, Liang Feng-hua, Ba Deng-zhu, Zhang Jian, Xu Xiang-zhen, Li Zhao. Zircon U-Pb ages of the Dongbo ophiolite in the western Yarlung Zangbo suture zone and their geological significance [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2011, 27(11): 3223–3238 (in Chinese with English abstract).
- [45] 钟立峰, 夏斌, 周国庆, 张玉泉, 王冉, 韦栋梁, 杨之青. 藏南罗布莎蛇绿岩辉绿岩中锆石 SHRIMP 测年[J]. *地质论评*, 2006, 52(2): 224–229.  
Zhong Li-feng, Xia Bin, Zhou Guo-qing, Zhang Yu-quan, Wang Ran, Wei Dong-liang, Yang Zhi-qing. SHRIMP age determination of the diabase in Luobusa ophiolite, southern Xizang (Tibet) [J]. *Geol Rev*, 2006, 52(2): 224–229 (in Chinese with English abstract).
- [46] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 291–301.  
Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan. *Regional Geology of Yunnan Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 291–301 (in Chinese).
- [47] 储著银, 王伟, 陈福坤, 王秀丽, 李向辉, 李建清. 云南路西三台山超镁铁岩体 Os-Nb-Pb-Sr 同位素特征及地质意义[J]. *岩石学报*, 2009, 25(12): 3221–3228.  
Chu Zhu-yin, Wang Wei, Chen Fu-kun, Wang Xiu-li, Li Xiang-hui, Ji Jian-qing. Os-Nb-Pb-Sr isotopic compositions of the santaishan ultramafic rock in western Yunnan and its geological significances [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2009, 25(12): 3221–3228 (in Chinese with English abstract).
- [48] Walker R J, Prichard H M, Ishiwatari A, Pimenrel M. The osmium isotopic composition of convecting upper mantle deduced from ophiolite chromites [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2002, 66(2): 329–345.
- [49] 朱炳泉. 全球幔源 Pb-Sr-Nb 同位素体系[J]. *地学前缘*, 2007, 14(2): 24–36.  
Zhu Bing-quan. Pb-Sr-Nb isotopic systematics in mantle derived rocks [J]. *Earth Sci Front*, 2007, 14(2): 24–36 (in Chinese with English abstract).