

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2022.03.004

文章编号:1672-3767(2022)03-0027-14

雅江柳区蛇纹岩元素迁移规律及意义:来自全岩地球化学和岩相学的约束

姜 丽,孟凡雪,孟元库

(山东科技大学 地球科学与工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:藏南雅鲁藏布江缝合带分布有大规模的蛇纹岩体。选取日喀则柳区蛇纹岩单元作为研究对象,对其进行岩相学、全岩地球化学及尖晶石电子探针分析。岩相学研究发现,柳区蛇纹岩中蛇纹石含量超过 90%,平均为 95.6%,蛇纹石化程度高。研究表明,柳区蛇纹岩保留了原始深海地幔橄榄岩的特征,同时经受了俯冲带环境的改造,具有大洋中脊(MOR)和俯冲带之上(SSZ)的双重构造演化背景。全岩主量元素研究表明,柳区蛇纹岩原岩在经历强烈蛇纹石化作用过程中,存在 CaO、Al₂O₃ 和 MgO 的流失,而后期碳酸盐化作用对 Ca 流失具有补偿性。柳区蛇纹岩与全球深海及弧前蛇纹岩的 Al₂O₃-CaO 和 Al₂O₃/SiO₂-MgO/SiO₂ 趋势的不一致性,以及 MgO 与 SiO₂、Al₂O₃ 之间无相关性进一步表明,强烈的蛇纹石化作用对柳区蛇纹岩原岩的主量元素组成影响较大。另外,通过与已发表的研究区新鲜橄榄岩对比,发现柳区蛇纹岩微量元素含量总体偏低,表明大部分微量元素会随蛇纹石化作用的进行而溶解迁出。但是该过程也会导致一些微量元素的富集,如 Ba、Pb、Sr 等大离子亲石元素。

关键词:蛇纹石化;雅江缝合带;蛇纹岩;元素迁移;构造背景

中图分类号:P597

文献标志码:A

Principle of elemental migration and their significance of the Liuqu ophiolites in Yarlung Zangbo suture zone: Constraints from whole-rock geochemistry and petrography

JIANG Li, MENG Fanxue, Meng Yuanku

(College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Ophiolites are widely distributed in the Yarlung Zangbo suture zone in southern Tibet. In this paper, the Liuqu serpentinite unit in Xigaze was selected as the research target, and the petrography, whole-rock geochemistry and spinel electron probe were analyzed. Petrographic study shows that serpentine content in the Liuqu serpentinites is more than 90%, averaging at 95.6%, indicating high degree of serpentine mineralization. This study shows that the Liuqu serpentinites preserve the characteristics of primitive abyssal peridotite, and then modified in the supra-subduction zone background, showing a dual tectonic evolution background of mid-ocean ridge (MOR) and supra-subduction zone (SSZ). The whole-rock major elemental results show the losses of CaO, Al₂O₃ and MgO in the Liuqu serpentinites during the serpentinization process, and the late carbonation can compensate the loss of Ca. The inconsistency between the Liuqu serpentinites and the global serpentinites in the trend of Al₂O₃-CaO and Al₂O₃/SiO₂-MgO/SiO₂, and the no correlation between MgO vs. SiO₂ and Al₂O₃, respectively, further indicate that the strong serpentinization has a great influence on the content of the major elements of the Liuqu serpentinite protoliths. In addition, the trace elements concentrations of the Liuqu serpentinites are lower than that of the fresh peridotite in study area, revealing that trace elements might also be dissolved and removed on some extent during

收稿日期:2021-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41876037)

作者简介:姜 丽(1997—),女,山东烟台人,硕士研究生,主要从事岩石地球化学研究。

孟凡雪(1981—),女,辽宁葫芦岛人,副教授,主要从事岩石地球化学研究,本文通信作者。E-mail:mfx1117@163.com

serpentinization process. However, this process can also result in the enrichment of some trace elements, such as Ba, Pb, Sr and other large ion lithophile elements (LILEs).

Key words: serpentinization; Yarlung Zangbo suture zone; serpentinite; elemental migration; tectonic background

蛇绿岩套代表残留在大陆边缘的大洋岩石圈碎片,在一定程度上可以与现代洋底层序对比,因此蛇绿岩是大洋岩石圈形成、发展、消亡过程中各种岩浆和变质作用的“忠实记录者”,也是研究大洋岩石圈演化过程中流体交代作用的重要载体。青藏高原作为地球上面积最大的高原,记录了原-古-新特提斯洋演化闭合多期次地质事件。其中晚白垩世—早古新世早期,随着新特提斯洋的闭合,形成了雅江缝合带。雅鲁藏布蛇绿岩沿缝合带呈断续分布,在日喀则出露尤为集中^[1]。因此这些蛇绿岩代表新特提斯洋岩石圈向北俯冲到拉萨地块之下的残余^[1],记录了新特提斯洋演化的关键信息。

雅鲁藏布蛇绿岩带从东向西划分为东段(曲水-墨脱)、中段(昂仁-仁布)和西段(萨嘎以西至中印边境)三部分^[2]。中段日喀则蛇绿岩研究程度最高,但其形成的构造背景存在较大争议,部分学者认为是洋中脊(mid-oceanic ridge, MOR)型^[1,3],也有学者认为是俯冲带之上(supra-subduction zone, SSZ)型^[4]。此外,与国外典型的蛇绿岩相比,日喀则蛇绿岩的系统性研究相对匮乏。前人针对日喀则蛇绿岩中未遭受蚀变或遭受微弱蚀变的基性镁铁质岩石^[1,3]和地幔橄榄岩^[1,3-4]开展了岩石学、年代学、构造背景及侵位机制等研究,而对于蚀变严重的交代岩研究较为薄弱,这制约了对雅鲁藏布蛇绿岩构造背景及后期蛇纹石化过程的认识。考虑到蛇绿岩在其初始形成和后期构造侵位过程中常受到流体交代作用发生蛇纹石化形成蛇纹岩,选取日喀则蛇绿岩的柳区蛇纹岩体作为研究对象,通过岩石学和全岩地球化学分析,探讨蛇纹石化作用信息和元素迁移规律,综合认识日喀则蛇绿岩的形成演化及后期水岩作用过程。

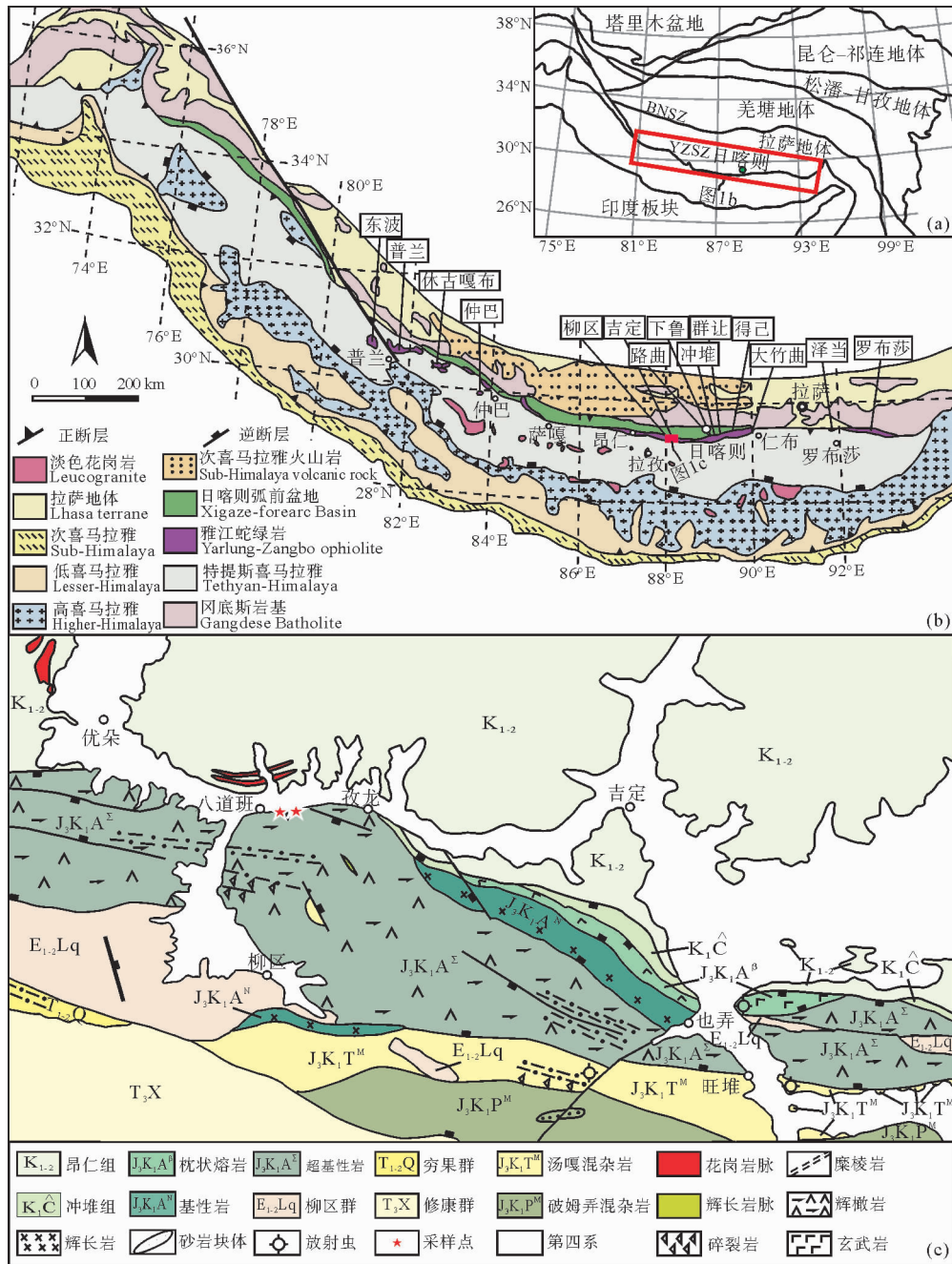
1 区域地质背景

青藏高原由多个地体拼接而成,由北向南包括昆仑-祁连地体、松潘-甘孜地体、羌塘地体以及拉萨地体。这些地体被贯穿其中的东西向缝合带所隔开。雅江缝合带是最南端的一条缝合带,横跨西藏南部长达 2 000 km,将北部的拉萨地体与南部的印度大陆分隔开(图 1(a))。雅江缝合带南侧分布有侏罗纪—白垩纪的蛇绿混杂岩。本研究所采的柳区岩体位于日喀则市区向西 60 km 处(GPS:北纬 29°12′44.10″N,东经 88°13′44.13″E)(图 1(b))。根据野外观察,并结合已有研究资料,柳区蛇绿岩具有以下特征:①发育大规模地幔橄榄岩。根据野外露头观察,超镁铁岩分布远远大于镁铁质岩石;②地幔橄榄岩蛇纹石化作用普遍,野外较少见新鲜样品。野外和手标本上可见有不同方向的灰白色脉体构成网脉状结构(图 2(a)、2(b)),暗示多期的热液活动;③强蛇纹石化地幔橄榄岩具细粒结构,块状构造,油脂光泽,岩石表面有明显滑感,颜色以橄榄绿、墨绿色为主,风化面为黄褐色(图 2(a)、2(b));④研究区内的地质构造主要以韧性剪切带为主(图 1(c)),岩石破碎程度高(图 2(c)),说明晚期造山运动过程中叠加了脆、韧性变形;⑤地幔橄榄岩中发育有顺层侵入的辉长岩-辉绿岩岩席,缺乏典型蛇绿岩中出现的辉绿岩岩墙群,有时还可见辉绿岩侵入到玄武岩之中,Nicolas 等^[1]认为辉长岩-辉绿岩大量侵入地幔橄榄岩的现象在世界上是极为少见的。

2 分析方法

2.1 岩相学分析

研究区样品后期化学蚀变严重,光学显微镜下很难准确辨别原生矿物,本研究结合 TESCAN 自动矿物分析系统(TESCAN integrated mineral analyzer, TIMA)和激光拉曼光谱进行岩相学分析。TIMA 测试在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成,仪器采用配有 4 个能谱探头(EDAX Element 30)的 Mira-3 扫描电镜完成,薄片在实验前进行喷碳。实验中加速电压 25 kV,电流 9 nA,工作距离为 15 mm,电流和背散射电子成像(back scattered electron, BSE)信号强度使用铂法拉第杯自动程序校准,能量色散谱仪(energy dispersive X-ray spectrometer, EDS)信号使用 Mn 标样校准。测试中使用解离模式,同时获取 BSE 图和 EDS 数据,每个点的 X 射线计数为 1 000。像素大小为 3 μm ,能谱步长为 9 μm 。



(a)青藏高原构造格架图^[5]; (b)雅鲁藏布江缝合带及蛇绿岩简图^[6]; (c)柳区及邻区地质简图

图 1 研究区及邻区地质简图

Fig. 1 Simplified geologic map of the research and adjacent areas

激光拉曼光谱测试在中国地质大学(北京)宝石学实验中心完成,仪器采用 HORIBA HR-Evolution 型激光拉曼光谱仪,激发波长为 532 nm,测试范围为 100~4 000 cm^{-1} ,积分时间为 3 s,积分次数为 1 次。

2.2 全岩主、微量元素分析

样品处理在河北省廊坊市地质测绘院岩矿实验室制作完成。首先挑选 50~70 g 的代表性样品,在无铁器污染条件下,用刚玉颚式破碎机把岩石粗碎至 2~4 mm,然后将其装入玛瑙罐中,用球磨仪将样品研磨至 200 目粉末,以备主、微量元素地球化学分析测试。



(a)、(b)地幔橄榄岩蛇纹石化强烈,具细粒结构,块状构造,油脂光泽,岩石表面有明显滑感,颜色以橄榄绿、墨绿色为主,风化面为黄褐色,岩石表面可见有不同方向的灰白色脉体构成网脉状结构;(c)岩石破碎程度高,可能在晚期造山运动过程中叠加了脆、韧性变形

图2 雅江柳区蛇绿岩野外及手标本照片

Fig. 2 Field and hand specimen pictures of the Liuqu ophiolites in the Yarlung Zangbo suture zone

全岩主量元素分析在山东科技大学 X 射线荧光光谱仪实验室采用熔片法进行测定,仪器型号为 ZSX Primus IV,测试采用无标样自动校准软件,主量元素的分析精度优于 $\pm 1\%$ 。全岩微量分析在武汉上谱科技有限责任公司采用 Agilent 7500a 电感耦合等离子质谱(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)完成。

微量元素样品前处理流程包括:①将 200 目粉末样品置于 105 °C 烘箱中烘干 12 h;②精准称取~50 mg 粉末样品并置于 Teflon 溶样弹中;③依次缓慢加入 1 mL 高纯 HNO₃ 和 1 mL 高纯 HF;④将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于烘箱中 190 °C 加热 24 h;⑤待溶样弹冷却之后,取出溶样弹,开盖后置于电热板上 140 °C 蒸干;⑥加入 1 mL HNO₃ 并再次蒸干;⑦加入 1 mL 高纯 HNO₃、1 mL MQ 水和 1 mL 内标 In(浓度为 1 ppm),再次将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于烘箱中 190 °C 加热 12 h;⑧检查样品是否完全溶解至清澈透明。如果没有完全溶解,重复上述步骤,直至完全溶解;⑨将样品溶液转入聚乙烯料瓶中,并用 2% HNO₃ 稀释至 100 g 以备 ICP-MS 测试。微量分析选用国际标样 AGV-2、BHVO-2、BCR-2 和 RGM-2 作为监测。大多数微量元素的分析精度优于 $\pm 5\%$ 。

2.3 尖晶石电子探针分析

尖晶石电子探针分析测试在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,仪器型号为(JEOL)JXA-8230。实验条件为:工作电压 15 kV,发射电流 20 nA,束斑直径 1 μm 。峰值计数时间为 10 s(Mn 和 Ti 为 20 s),背景计数时间为峰值计数时间的一半。本次实验使用以下标样:KAlSi₃O₈ (K)、TiO₂ (Ti)、CaMnSi₂O₆ (Ca)、(Mg, Fe)₂SiO₄ (Si)、FeCr₂O₄ (Fe, Cr, Al)、MnSiO₃ (Mn)、NaAlSi₂O₆ (Na)、Mg₃Al₂Si₃O₁₂ (Mg)、和(Fe, Ni)₉S₈ (Ni)。

3 结果

3.1 岩相学特征

TIMA 测试(图 3)表明蛇纹石含量超过 90%。拉曼数据表明蛇纹石端元以利蛇纹石为主,图 4(a)显示利蛇纹石的拉曼特征峰为 227、381、686 cm^{-1} ,图 4(b)显示利蛇纹石的拉曼特征峰为 230、382、686 cm^{-1} 。镜下观察表明(图 5),岩石中发生强烈蛇纹石化的区域常见等粒变晶结构(图 5(a)),原岩中的橄榄石和辉石已完全蚀变,镜下可以看到残留骸晶(图 5(b)、5(c)、5(e))。大颗粒单斜辉石被蛇纹石完全交代,呈保留单斜辉石假象及解理纹的残斑晶结构,具有波状消光(图 5(b))。镜下有多条受流体侵入裂隙交代的纤蛇纹石细脉,早期蛇纹石细脉进一步与流体发生元素交换,形成次一期蛇纹石脉,并切穿早期细脉,且应力变形痕迹十分明显,如扭折带(图 5(d))。

磁铁矿含量为 2%~5%,呈半自形-它形的星点状或粉末状,镜下为不透明黑色。磁铁矿是橄榄石在蛇纹石化过程中析出的,部分磁铁矿在原橄榄石边缘析出,保留原矿物的轮廓(图 5(e))。方解石含量不超过 1%,呈长短粗细不一的脉状(图 3(a)、5(f))或它形不规则粒状(图 3(c)、5(g)),高级白干涉色。橄榄岩的蛇纹石化过程有时也伴随着碳酸盐化作用,因此这些方解石是蛇纹石被晚期的碳酸盐流体交代形成的,并切穿

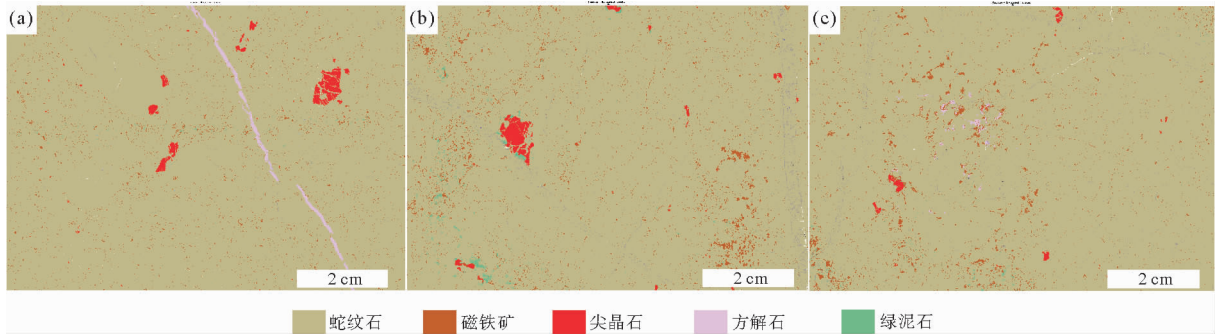


图 3 柳区蛇纹岩 TIMA 岩相图

Fig. 3 TIMA petrological diagrams of the Liuqu serpentinites

蛇纹石颗粒,表明碳酸盐化时间晚于蛇纹石化。值得注意的是,在自然系统中,常见的碳酸盐矿物除方解石外,还有菱镁矿、白云石。然而本研究样品中出现的碳酸盐矿物仅为方解石。高的 Ca/Mg 值会促使菱镁矿和白云石转变为方解石。因此样品中只有方解石很可能是含 CO_2 流体与富 Ca 流体反应的结果: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Ca}^{2+} = \text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+$ 。尖晶石含量为 1% 左右,呈半自形-它形的粒状或蠕虫状,粒度为 0.2~1.5 mm,深褐色,部分尖晶石颗粒颜色浅,普遍发育不规则裂隙,表现为熔/溶蚀港湾状结构(图 5(h))。绿泥石可能是富铝的尖晶石或单斜辉石分解产生的,含量不超过 1%,一级灰干涉色,呈它形粒状或粉末状,不均匀零星分布在尖晶石边部(图 3(b))。

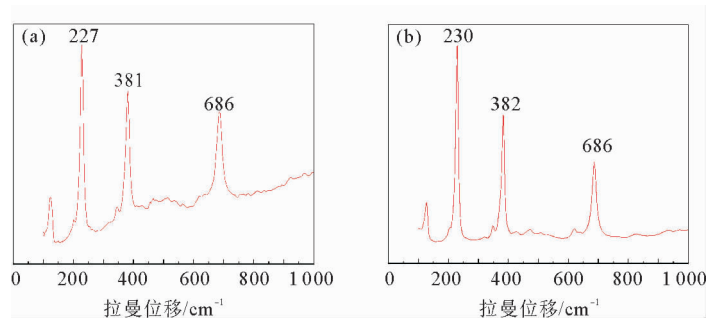
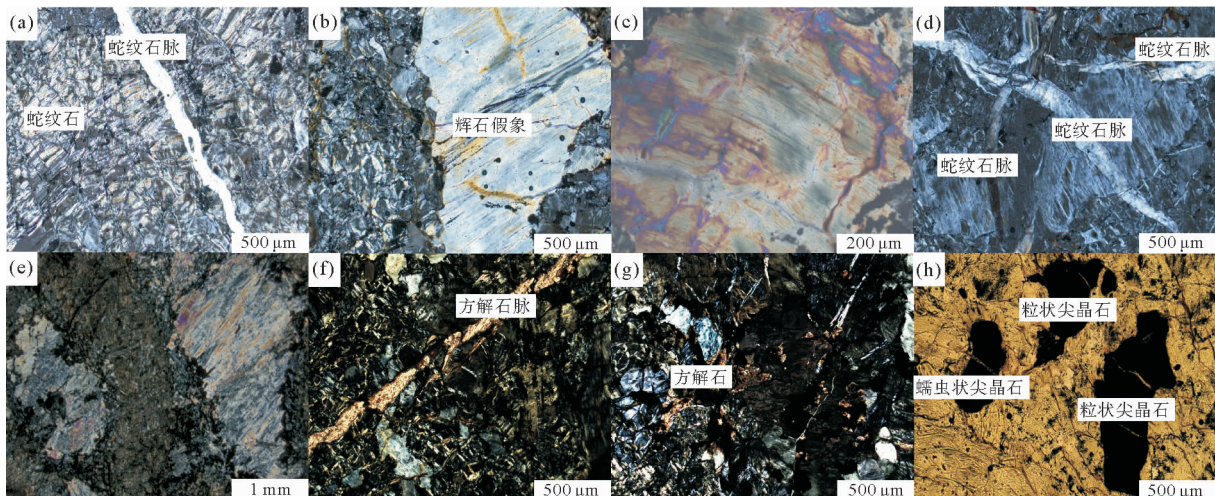


图 4 柳区蛇纹岩中利蛇纹石的拉曼谱峰图

Fig. 4 Roman spectrum diagrams of lizardites in the Liuqu serpentinites

尖晶石含量为 1% 左右,呈半自形-它形的粒状或蠕虫状,粒度为 0.2~1.5 mm,深褐色,部分尖晶石颗粒颜色浅,普遍发育不规则裂隙,表现为熔/溶蚀港湾状结构(图 5(h))。绿泥石可能是富铝的尖晶石或单斜辉石分解产生的,含量不超过 1%,一级灰干涉色,呈它形粒状或粉末状,不均匀零星分布在尖晶石边部(图 3(b))。



(a) 蛇纹石显示等粒变晶结构和以残余橄榄石假象为中心的网状结构;(b) 大颗粒单斜辉石被蛇纹石完全交代,无原矿物残留,呈保留单斜辉石假象及解理纹的残斑晶结构,具有波状消光;(c) 波状消光和扭折带;(d) 纤状蛇纹石脉,呈现扭折带结构;(e) 磁铁矿在原橄榄石边缘析出而保留原矿物的轮廓;(f) 方解石脉;(g) 不规则粒状方解石;(h) 尖晶石呈半自形-它形的粒状或蠕虫状,普遍发育不规则裂隙,表现熔/溶蚀港湾状结构。其中(a)~(g)为正交偏光,(h)为单偏光

图 5 柳区蛇纹岩样品镜下特征

Fig. 5 Photomicrographs of the Liuqu serpentinites samples showing the structure

通过 TIMA 扫描(图 3)及镜下观察(图 5),上述反应矿物与原矿物之间都存在一定的原矿物假晶、交代假象等痕迹,未见新鲜的橄榄石和辉石残留,已完全蚀变成蛇纹石。另外,部分样品发生不同程度的碳酸盐化、绿泥石化和磁铁矿化作用,表明蛇纹石化可能与碳酸盐化等其他次生蚀变存在一定耦合关系。本研究在接下来的讨论中将样品称为蛇纹岩。

3.2 全岩主微量元素特征

3.2.1 全岩主量元素特征

对 19 件柳区蛇纹岩样品进行主量元素分析,结果列于表 1 中。烧失量为 23.31%~24.50%,平均 23.79%,这是原岩经历强烈水岩作用的结果。在 Al_2O_3 -CaO-MgO 三角图中(图 6),19 个样品全部落在变质橄榄岩区域内,与野外和岩相学观察结果一致,表明柳区地幔橄榄岩发生了强烈的蛇纹石化作用。雅鲁藏布蛇绿岩中弱蛇纹石化橄榄岩的 MgO 含量一般为 40.65%~46.40%^[3,8-10],而柳区蛇纹岩的 MgO 含量为 26.61%~27.65%,表明经历强烈蛇纹石化作用之后的橄榄岩普遍亏损 MgO。研究表明,MgO 校正法可有效修正蛇纹石化对主量元素的影响^[11]。因此,扣除全岩主量元素的烧失量后,增加 10%的 MgO 含量,再进行全岩归一化处理。结果表明,MgO 含量(36.99%~38.68%)与原始地幔相当,而易熔元素 CaO(0.13%~0.86%)、 Al_2O_3 (0.75%~1.23%)和 Na_2O (0.08%~0.16%)含量较低,均明显低于原始地幔组分^[12],可能与蛇纹石化作用相关。

3.2.2 全岩微量元素特征

对 19 件柳区蛇纹岩样品进行微量元素分析,结果列于表 1 中。稀土元素总体表现为相似的性质,能更忠实地记录源区的组成。样品稀土元素总量(total content of rare earth element, ΣREE)低(图 7(a)), ΣREE 介于 $0.11 \times 10^{-6} \sim 0.32 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 0.18×10^{-6} ,仅为碳质球粒陨石的 0.04~0.13 倍,且远低于原始地幔($\Sigma\text{REE} = 7.43 \times 10^{-6}$)和亏损地幔($\Sigma\text{REE} = 4.25 \times 10^{-6}$)值,与极度亏损的蛇纹岩相似,指示地幔源区经历较高度度的熔体提取^[12]。 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 比值为 $0.60 \times 10^{-6} \sim 21.01 \times 10^{-6}$,平均值为 4.64×10^{-6} ,表明轻稀土有一定程度富集。 δEu 值分为 3 组,分别为 1.24~2.14、0.91~1.07 和 0.16~0.89,分别代表铕的正异常、无异常和负异常,铕的正异常可能是幔源特征,而负异常可能与斜长石的分离结晶或后期蚀变作用的叠加有关。本研究样品为蛇纹石化橄榄岩,其原岩橄榄岩的熔融、亏损程度存在差异,导致不同样品的 REE 丰度也有一定差异,但图 7(a)中 REE 配分模式较为一致,表明样品为同源岩浆的演化分异特征。轻稀土元素(light rare earth element, LREE)和中稀土元素(medium rare earth element, MREE)的含量较为分散,而重稀土元素(heavy rare earth element, HREE)的含量较为集中,总体为 HREE、LREE 相对富集, MREE 强烈亏损的“U”型分布模式,指示岩石经历强烈熔体提取作用,后遭受流体/熔体交代导致 LREE 富集。

在图 7(b)中,样品相对富集 Ba、Pb、Sr、U 等大离子亲石元素(large ion lithophile element, LILEs),与洋底蛇纹岩特征相似,可能与后期流体交代有关。此外,Zr、Hf 等高场强元素强烈富集,而 Th、Nb 等高场强元素相对亏损,如此显著的差异表明柳区蛇纹岩既受到亏损地幔源区特征的影响,也受到不同程度的俯冲带流体(或熔体)的改造,可能反映了 MOR 和 SSZ 两种构造环境。

3.3 矿物化学特征

对 19 件蛇纹岩样品中的 23 个尖晶石进行电子探针分析。结果表明,尖晶石 Cr_2O_3 含量为 33.69%~41.56%,平均值为 38.24%。 Al_2O_3 含量为 27.42%~34.75%,平均值为 30.55%。 FeO 含量为 16.59%~19.43%,平均值为 17.54%。 TiO_2 含量为 0~0.06%,平均值为 0.03%。由此可见,样品相对贫 Al、Fe,而富 Cr。 $\text{Cr}^\#$ 值($\text{Cr}^\# = \text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$)介于 0.39~0.50 之间,不存在明显成分环带结构。 $\text{Mg}^\#$ 值($\text{Mg}^\# = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$)介于 0.53~0.58 之间。

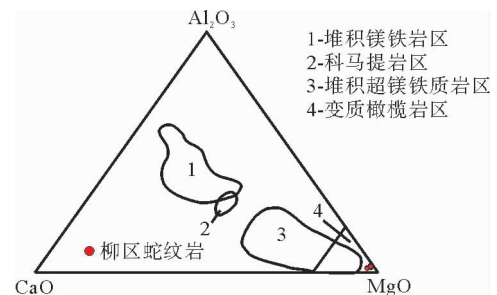
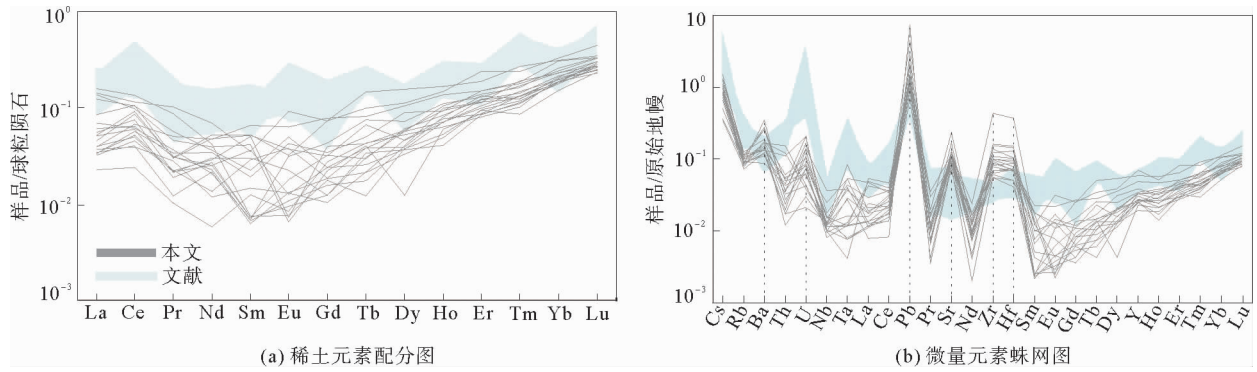


图 6 柳区蛇纹岩 Al_2O_3 -CaO-MgO 判别图解^[7]

Fig. 6 Al_2O_3 -CaO-MgO discrimination diagram for the Liuqu serpentinites



原始地幔和球粒陨石标准化值据 Sun and McDonough^[12], 文献数据引自赵梅善^[3]
图 7 柳区蛇纹岩球粒陨石标准化稀土元素配分图和原始地幔标准化微量元素蛛网图
 Fig. 7 Chondrite-normalized REE pattern and primitive mantle-normalized trace element spider diagram for the Liuqu serpentinites

表 1 柳区蛇纹岩全岩主量元素 (%) 和微量元素 ($\times 10^{-6}$) 组成

Tab. 1 The whole-rock major (%) and trace ($\times 10^{-6}$) elements compositions of the Liuqu serpentinites

| 样品 | XZ01 | XZ02 | XZ03 | XZ04 | XZ05 | XZ06 | XZ07 | XZ08 | XZ09 | XZ10 | XZ11 | XZ12 | XZ13 | XZ14 | XZ15 | XZ16 | XZ17 | XZ18 | XZ19 |
|---|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 39.35 | 39.48 | 39.08 | 39.53 | 39.07 | 39.39 | 39.59 | 39.40 | 39.67 | 39.56 | 39.55 | 39.52 | 39.24 | 39.38 | 39.44 | 38.89 | 39.29 | 39.02 | 38.97 |
| Al ₂ O ₃ | 0.98 | 0.80 | 0.83 | 0.75 | 0.70 | 0.81 | 0.84 | 0.88 | 0.77 | 0.65 | 0.75 | 0.84 | 0.87 | 0.83 | 0.80 | 0.86 | 0.75 | 0.79 | 0.59 |
| MgO | 27.65 | 27.20 | 27.51 | 27.14 | 27.30 | 27.38 | 27.38 | 26.97 | 27.29 | 27.03 | 27.33 | 27.31 | 27.24 | 27.27 | 27.26 | 26.68 | 26.80 | 26.74 | 26.61 |
| Na ₂ O | 0.10 | 0.07 | 0.08 | 0.06 | 0.08 | 0.13 | 0.08 | 0.08 | 0.10 | 0.08 | 0.10 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.12 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 |
| P ₂ O ₅ | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| K ₂ O | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| CaO | 0.15 | 0.20 | 0.10 | 0.19 | 0.63 | 0.16 | 0.13 | 0.13 | 0.18 | 0.31 | 0.14 | 0.12 | 0.13 | 0.14 | 0.13 | 0.19 | 0.12 | 0.19 | 0.67 |
| TiO ₂ | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| MnO | 0.15 | 0.13 | 0.14 | 0.13 | 0.14 | 0.11 | 0.13 | 0.11 | 0.10 | 0.11 | 0.12 | 0.12 | 0.14 | 0.13 | 0.12 | 0.12 | 0.13 | 0.13 | 0.13 |
| Fe ₂ O ₃ ^T | 8.18 | 8.34 | 7.71 | 8.28 | 7.89 | 8.10 | 8.01 | 9.09 | 8.29 | 8.48 | 8.20 | 8.20 | 8.31 | 8.36 | 8.29 | 9.82 | 9.24 | 9.50 | 8.42 |
| LOI | 23.41 | 23.77 | 24.50 | 23.90 | 24.16 | 23.88 | 23.81 | 23.31 | 23.57 | 23.75 | 23.77 | 23.79 | 23.96 | 23.78 | 23.81 | 23.33 | 23.56 | 23.53 | 24.50 |
| Total | 100.00 | 100.01 | 99.98 | 100.00 | 100.00 | 99.99 | 99.99 | 100.00 | 99.99 | 99.99 | 99.99 | 100.00 | 99.99 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 99.98 | 99.99 | 99.99 |
| Li | 0.27 | 0.61 | 0.41 | 0.18 | 0.22 | 0.23 | 0.37 | 0.52 | 0.36 | 0.34 | 0.38 | 0.40 | 0.45 | 0.37 | 0.38 | 0.48 | 0.51 | 0.61 | 0.89 |
| Be | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Sc | 13.68 | 9.37 | 10.80 | 10.99 | 11.18 | 10.08 | 12.54 | 9.30 | 9.97 | 9.29 | 10.50 | 11.41 | 15.44 | 11.07 | 10.77 | 10.79 | 13.56 | 11.25 | 9.09 |
| V | 54.65 | 38.30 | 41.95 | 45.21 | 51.22 | 46.60 | 49.08 | 42.32 | 40.41 | 38.94 | 44.14 | 49.86 | 58.30 | 44.43 | 47.98 | 52.79 | 48.10 | 50.18 | 36.57 |
| Cr | 2539 | 2403 | 2185 | 2897 | 2917 | 2734 | 2551 | 2500 | 2532 | 2588 | 2721 | 2819 | 3112 | 2414 | 2732 | 3205 | 2237 | 2545 | 1968 |
| Co | 106 | 108 | 105 | 99 | 102 | 102 | 103 | 102 | 91 | 96 | 103 | 102 | 107 | 108 | 103 | 99 | 101 | 101 | 99 |
| Ni | 2091 | 2310 | 2166 | 1962 | 2001 | 2060 | 2039 | 2062 | 1911 | 1965 | 2070 | 2017 | 2076 | 2130 | 2062 | 2001 | 1986 | 1989 | 1979 |
| Cu | 36.74 | 41.55 | 25.60 | 5.15 | 11.64 | 11.34 | 16.08 | 10.02 | 9.93 | 11.63 | 16.10 | 14.99 | 47.94 | 34.06 | 15.44 | 12.26 | 18.76 | 12.96 | 15.01 |
| Zn | 40.30 | 33.12 | 31.25 | 43.00 | 48.84 | 50.15 | 43.80 | 47.32 | 36.67 | 41.24 | 55.18 | 46.63 | 43.05 | 41.71 | 43.65 | 53.08 | 58.35 | 55.52 | 44.69 |
| Ga | 0.92 | 0.86 | 0.80 | 0.76 | 0.93 | 0.86 | 0.83 | 0.80 | 0.71 | 0.72 | 0.81 | 0.89 | 1.02 | 0.88 | 0.83 | 1.03 | 0.75 | 0.83 | 0.69 |
| Rb | 0.07 | 0.05 | 0.05 | 0.07 | 0.06 | 0.05 | 0.05 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.05 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.08 | 0.06 | 0.07 | 0.07 |
| Sr | 2.43 | 2.33 | 2.35 | 4.96 | 2.30 | 1.48 | 1.79 | 1.75 | 1.91 | 2.65 | 2.14 | 1.64 | 2.50 | 2.33 | 1.88 | 1.97 | 1.88 | 2.75 | 3.59 |
| Y | 0.32 | 0.11 | 0.16 | 0.13 | 0.15 | 0.15 | 0.18 | 0.09 | 0.12 | 0.12 | 0.11 | 0.12 | 0.27 | 0.15 | 0.11 | 0.12 | 0.22 | 0.14 | 0.11 |

续表 1

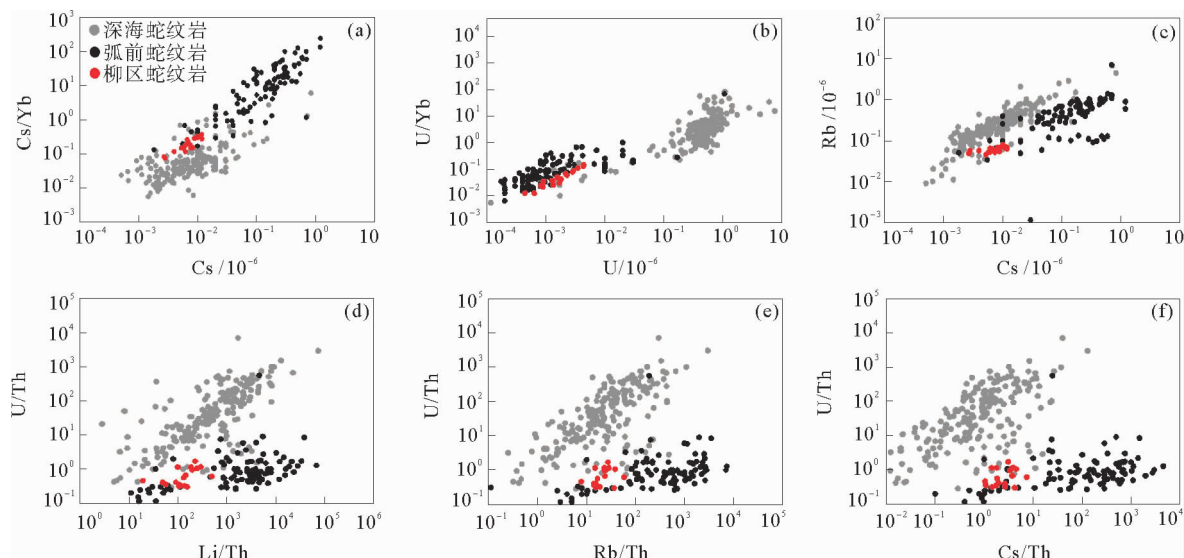
| 样品 | XZ01 | XZ02 | XZ03 | XZ04 | XZ05 | XZ06 | XZ07 | XZ08 | XZ09 | XZ10 | XZ11 | XZ12 | XZ13 | XZ14 | XZ15 | XZ16 | XZ17 | XZ18 | XZ19 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Zr | 4.83 | 1.10 | 1.81 | 1.73 | 1.53 | 1.13 | 1.09 | 1.21 | 1.05 | 1.38 | 0.97 | 0.62 | 0.91 | 0.88 | 0.62 | 0.68 | 0.72 | 0.78 | 0.77 |
| Nb | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 |
| Sn | 0.10 | 0.08 | 0.45 | 0.27 | 0.12 | 0.11 | 0.17 | 0.08 | 0.20 | 0.46 | 0.01 | 0.08 | 0.05 | 0.06 | 0.15 | 0.13 | 0.04 | 0.08 | 0.01 |
| Cs | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Ba | 0.94 | 1.18 | 1.23 | 0.94 | 0.99 | 0.85 | 0.97 | 1.16 | 0.82 | 2.42 | 0.87 | 0.61 | 1.80 | 1.07 | 0.77 | 1.33 | 1.16 | 1.80 | 1.92 |
| La | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 |
| Ce | 0.07 | 0.06 | 0.04 | 0.06 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.08 | 0.02 | 0.04 | 0.03 | 0.01 | 0.05 | 0.03 | 0.02 | 0.05 | 0.04 | 0.06 | 0.06 |
| Pr | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Nd | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.01 |
| Sm | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| Eu | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Gd | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.00 |
| Tb | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Dy | 0.03 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.01 |
| Ho | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 |
| Er | 0.04 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Tm | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Yb | 0.06 | 0.03 | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.03 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.05 | 0.03 | 0.03 |
| Lu | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Hf | 0.12 | 0.03 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Ta | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Tl | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| Pb | 0.08 | 0.32 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.07 | 0.06 | 0.08 | 0.21 | 0.16 | 0.05 | 0.52 | 0.14 | 0.07 | 0.09 | 0.14 | 0.06 | 0.11 | 0.08 |
| Th | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| U | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

4 讨论

4.1 构造环境

早期研究普遍认为雅鲁藏布蛇绿岩形成于大洋中脊环境(MOR)^[1]。随着研究的深入,越来越多的研究者认为雅鲁藏布蛇绿岩可能形成于俯冲带之上(SSZ)^[4]。此外,还有研究者认为造山带中蛇绿岩的形成环境复杂多样,不能将其归结为某种单一的背景,提出雅鲁藏布蛇绿岩形成于 MOR 环境,但后期经历 SSZ 环境改造的观点^[8-9,13-14]。

研究表明,蛇纹石化过程的流体组成及氧化还原环境是影响蛇纹岩组成的重要因素^[15]。在俯冲带,俯冲板片脱水是引起地幔橄榄岩发生蛇纹石化的主要流体来源。来自俯冲板片的沉积物流体通常具有还原性,而深海橄榄岩发生蛇纹石化的海水来源流体具有相对氧化的特征^[15]。据此,Peters 等^[15]统计了大量不同地区及构造环境中的蛇纹岩微量元素组成并进行投图,发现这些不同来源的蛇纹岩其构造环境分为明显不同的两类:一类为 MOR 型,另一类为 SSZ 型。不同类型的蛇纹岩表现出不同的微量元素特征。研究发现,柳区蛇纹岩大部分样品落在深海蛇纹岩和弧前蛇纹岩的过渡地带(图 8),表明样品可能经历了洋中脊(MOR)和俯冲带(SSZ)两个阶段的构造演化背景。



深海蛇纹岩及弧前蛇纹岩数据引自 Peters 等^[15]

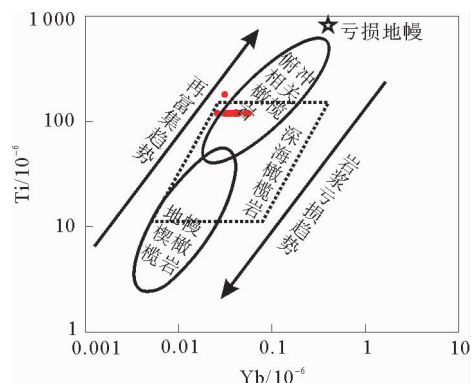
图 8 柳区蛇纹岩全岩微量元素及其比值的双变量图解

Fig. 8 Bivariate diagrams of trace elements and their ratios for the Liuqu serpentinites

在 Yb-Ti 图解(图 9)中,样品也几乎全部落在深海橄榄岩与俯冲相关橄榄岩重叠区域,表明柳区蛇纹岩来源于早期具 MORB 特征的亏损地幔,在后期构造就位过程中受到了 SSZ 环境的改造。此外,Yb-微量元素图解(图 10)同样支持这一观点。

尖晶石在蛇纹岩中虽然含量很低,但其性质相对稳定,在后期地质作用过程中不易发生蚀变,因此是非常重要的原位矿物,同样可以用来判断蛇绿岩的构造背景。其中,尖晶石的 $Cr^\#$ 值($Cr^\# = Cr/(Cr + Al)$)通常可以指示部分熔融程度的高低, $Cr^\#$ 值越高,部分熔融程度越高,地幔橄榄岩越亏损。因此俯冲带相关的地幔橄榄岩(SSZ 型)通常具有较高的 $Cr^\#$ 值($Cr^\# > 0.6$),例如马里亚纳弧前橄榄岩 $Cr^\#$ 高达 0.82^[17],而形成于慢速扩张脊的深海地幔橄榄岩(MOR 型)往往具有较低的 $Cr^\#$ 值($Cr^\# < 0.6$)。本研究柳区蛇纹岩中尖晶石电子探针分析结果表明其均为低铬尖晶石, $Cr^\#$ 值介于 0.39~0.50 之间,指示大洋中脊环境。在尖晶石成分图解(图 11)中,样品点同样全部位于 MOR 型地幔橄榄岩和 SSZ 型地幔橄榄岩重叠区域,反映蛇绿岩在不同构造背景下经历多期演化。

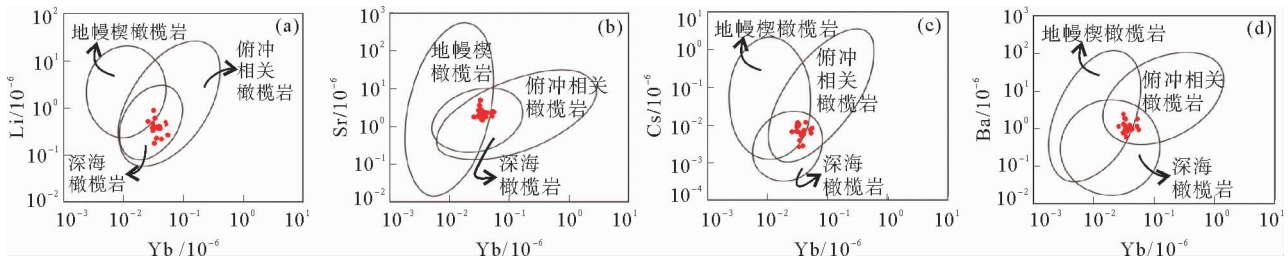
此外,柳区蛇纹岩的 TiO_2 含量 $<0.1\%$,稀土元素配分模式为 LREE 富集的 U 型,均指示俯冲带环境影响。而尖晶石 $Cr^\#$ 值介于 0.39~0.50,指示大洋中脊环境。事实上,多阶段演化的观点在雅鲁藏布蛇绿岩带内是广泛存在的。Liu 等^[13]通过对地幔橄榄岩的地球化学特征和矿物显微结构进行研究,得出雅鲁藏布西段的普兰蛇绿岩早先形成于洋中脊,后期被俯冲带上环境改造的结论。Dai 等^[8]对仲巴蛇绿岩体的地幔橄榄岩进行了岩石学和地球化学研究,也认为其经历了 MOR 和 SSZ 两个阶段的演化。徐向珍等^[9,14]对西段普兰蛇绿岩和东段罗布莎的地幔橄榄岩进行研究,也得到了相同结论。综上,认为柳区蛇纹岩的构造背景非常复杂,不是一成不变的,其最可能先形成于大洋中脊环境,后期随着板片俯冲,遭受洋内俯冲消减作用,经历了 MOR 和 SSZ 双重阶段构造演化。



地幔楔橄榄岩,俯冲相关橄榄岩及深海橄榄岩
数据引自 Deschamps 等^[16]

图 9 柳区蛇纹岩全岩 Yb-Ti 图解

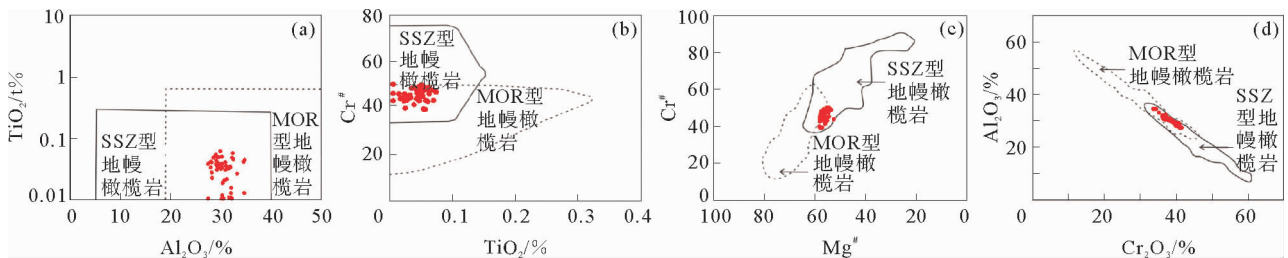
Fig. 9 Diagram of Yb-Ti for the Liuqu serpentinites



地幔楔橄榄岩,俯冲相关橄榄岩及深海橄榄岩数据引自 Deschamps 等^[16]

图 10 柳区蛇纹岩全岩 Yb-微量元素图解

Fig. 10 Diagrams of Yb-trace elements for the Liuqu serpentinites



(a)底图修改自 Kamenetsky 等^[18]; (b)底图修改自周文达等^[19]; (c)、(d)底图修改自张利等^[10]

图 11 柳区蛇纹岩尖晶石成分图解

Fig. 11 Compositional variations of spinels from the Liuqu serpentinites

4.2 元素迁移规律

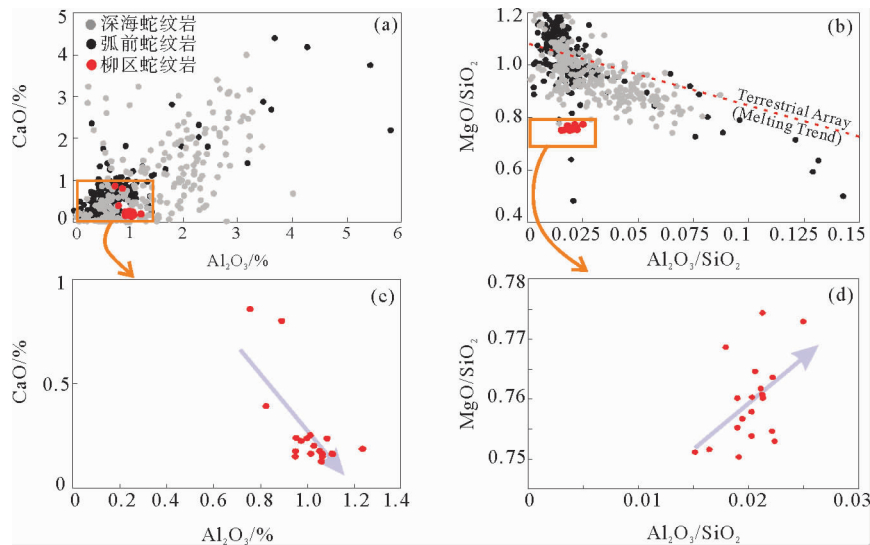
蛇纹石化过程中元素的活动性为综合理解岩石圈-海水的元素循环问题提供重要信息,但目前对元素活动性的研究相对较少,且缺乏一致的认识。研究表明,柳区蛇纹岩的原岩经历了强烈的蛇纹石化作用,为探究蛇纹石化过程中的元素迁移规律提供了良好的素材。Coleman 等^[20]定量评估了橄榄岩蛇纹石化过程中的元素迁移,认为除了 Ca 元素的流失,其他主量元素丰度变化可忽略不计。Bogolepov^[21]认为不同蛇纹石化蚀变程度的样品保留了稳定的 sum-oxides/SiO₂ 比值(sum-oxides = MgO + Fe₂O₃ + Al₂O₃ + TiO₂ + CaO + Cr₂O₃ + MnO + NiO + Na₂O + K₂O + P₂O₅),表明蛇纹石化过程不影响原岩的主量元素含量。然而,也有学者认为蛇纹石化会导致原岩的主量元素含量发生改变,比如橄榄岩在蛇纹石化过程中会丢失 MgO,从而导致全岩 MgO/SiO₂ 比值的降低^[11]。事实上,蛇纹石化作用也会引起岩石中微量元素的变化,如 Li、B、As、Sb、U、Pb、Cs、Ba 和 Sr 的增加^[22]。

4.2.1 主量元素迁移规律

柳区蛇纹岩的 SiO₂ 含量平均为 49.85%,高于 126 件全球深海变质橄榄岩的平均值(45.6%)^[11];而 Al₂O₃ 含量平均为 1.01%,低于全球深海变质橄榄岩^[11]和岛湾蛇绿岩中橄榄岩^[23]的平均值(分别为 1.92%、2.52%);CaO 含量平均为 0.27%,也低于全球深海变质橄榄岩^[11]和岛湾蛇绿岩中橄榄岩^[23]的平均值(分别为 1.29%、0.8%);MgO 含量为 36.99%~38.68%,远低于全球深海变质橄榄岩^[11]、岛湾蛇绿岩中橄榄岩^[23]和世界典型蛇绿岩中方辉橄榄岩^[11]的值(分别为 41.6%、45%、39.6%~48.4%)。由此可见,柳区蛇纹岩大部分主量元素含量低于全球深海变质橄榄岩和世界典型蛇绿岩中的橄榄岩,表明蛇纹石化对柳区蛇纹岩主量元素可能有较大影响。

将本研究的柳区蛇纹岩和已发表的全球深海及弧前蛇纹岩的主量元素结果^[15]投点在 Al₂O₃-CaO 图和 Al₂O₃/SiO₂-MgO/SiO₂ 图中(图 12(a)、12(b))进行对比。从图中可以看出,柳区蛇纹岩具有低的 Al₂O₃ 和 CaO 含量(图 12(a)、12(c)),可能与源区高程度的部分熔融或后期强烈的蛇纹石化作用造成的主量元素变化相关。过去的研究也证实了蛇纹石化过程中存在 Ca 的系统性流失^[20]。然而,部分柳区蛇纹岩样品具有

相对高的 CaO 含量(图 12(a)、12(c)),可能与碳酸盐化作用对 Ca 流失的补偿相关^[25],这与岩相学观察存在方解石相吻合(图 3(a)、5(f))。此外,难熔地幔岩通常具有较高的 MgO/SiO₂ 比值(MgO/SiO₂>1)^[26],而柳区蛇纹岩的 MgO/SiO₂<1,都处于全球阵列(terrestrial array)^[24]之下,也低于全球深海蛇纹岩和弧前蛇纹岩(图 12(b))。Niu^[11]认为深海橄榄岩中低的 MgO/SiO₂ 比值是由于洋底风化过程中 MgO 的丢失所致。另外,在图 12(a)、12(c)中,柳区蛇纹岩与全球弧前及深海蛇纹岩的 Al₂O₃-CaO 趋势不一致。而且在图 12(b)、12(d)中,柳区蛇纹岩与全球弧前及深海蛇纹岩的 Al₂O₃/SiO₂-MgO/SiO₂ 趋势也不一致。因此,强烈的蛇纹石化作用可能对柳区蛇纹岩原岩的主量元素,尤其是 CaO、Al₂O₃ 和 MgO 等,有明显影响,因此用其探究岩浆作用信息时有待深究和商榷。



深海蛇纹岩和弧前蛇纹岩数据引自 Peters 等^[15], Terrestrial Array 引自 Jagoutz 等^[24]

图 12 Al₂O₃-CaO 图和 Al₂O₃/SiO₂-MgO/SiO₂ 图

Fig. 12 Diagrams of Al₂O₃-CaO and Al₂O₃/SiO₂-MgO/SiO₂

值得注意的是,在岩浆演化过程中,硅铝质成分和镁铁质成分互为消长,随着熔体提取,亏损的地幔橄榄岩表现为富 Mg、贫 Si 的特征。因此, MgO 含量可以作为橄榄岩亏损程度的指标^[11],随着熔体提取程度增高, MgO 含量增高,而 SiO₂、Al₂O₃ 等易熔组分减少,两者呈明显的负相关关系。但图 13 表明,柳区蛇纹岩 MgO 与 SiO₂、Al₂O₃ 之间无相关性,表明后期作用对主量元素的影响较大。

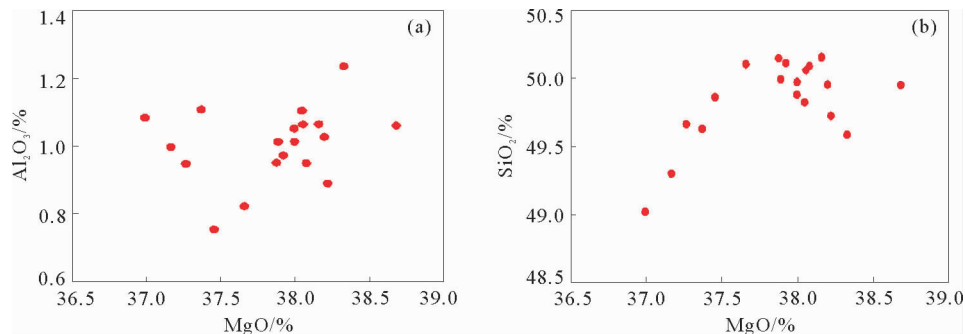


图 13 全岩主量元素含量协变图解

Fig. 13 Correlation diagrams of whole-rock major elements

综上,柳区蛇纹岩原岩在经历强烈蛇纹石化作用过程中,主量元素含量可能发生明显的改变,如 CaO 、 Al_2O_3 和 MgO 的流失,随后的碳酸盐化作用等可能对主量元素也有轻微影响,如研究区碳酸盐化作用可能对 Ca 流失具有一定补偿作用。因此,柳区蛇纹岩蛇纹石化和后期碳酸盐化作用过程可能会对 CaO 、 Al_2O_3 和 MgO 等主量元素造成影响,也可以推断 K 、 Na 等流体活动性元素同样会受到不同程度影响。

4.2.2 微量元素迁移规律

蛇纹岩在成因上与蛇纹石化过程中的流体迁移和交代作用有关^[27]。本研究通过与已发表的新鲜橄榄岩结果进行比较^[3],以期揭示蛇纹石化过程中微量元素迁移的规律和特征。前人研究指出,橄榄岩发生蛇纹石化会使原本紧密的矿物被溶蚀并产生裂隙,促进矿物与流体之间的物质交换,导致矿物中的一些微量元素溶解迁出,因此蛇纹岩中微量元素的赋存状况与原岩蚀变程度之间存在一定耦合关系^[28]。如图7所示,柳区蛇纹岩和前人新鲜橄榄岩具有相似的 REE 配分模式和微量元素特征,都表现为 LREE 和 HREE 富集的 U 型,但是橄榄岩的微量和稀土元素含量总体要高于柳区蛇纹岩,说明原岩中的微量元素和稀土元素随蛇纹石化的进行而溶解迁出。值得注意的是,蛇纹岩相对橄榄岩具有更高的 Pb 、 Sr 、 Zr 、 Hf 和 Ba 含量,其中 Ba 、 Pb 、 Sr 的富集与前人研究一致,这些元素是流体活动性元素,更容易富集在蛇纹岩中^[28]。 Zr 、 Hf 等高场强元素通常不易受到流体影响,主要受控于源区熔体提取和矿物组成(如锆石)等。柳区蛇纹岩中锆石的出现是俯冲地壳熔体迁移高场强元素(high field strength element, HFSE)进入地幔楔的重要矿物学证据^[29]。因此 Zr 、 Hf 的富集可能是熔体交代作用而不是蛇纹石化的结果。

5 结论

通过详细的野外、岩相学、矿物学及地球化学研究,主要取得以下两点认识:

1) 柳区地幔橄榄岩发生了强烈的蛇纹石化,已完全蚀变为蛇纹岩。样品中蛇纹石含量超过 90%,有的高达 97%,平均 95.6%。样品全岩微量元素及尖晶石地球化学特征表明,柳区蛇纹岩的构造背景非常复杂,不是一成不变的,其形成于大洋中脊环境,后期随着板块俯冲,遭受洋内俯冲消减作用,具有 MOR 和 SSZ 双重演化背景。

2) 全岩主量元素研究表明,柳区蛇纹岩原岩在经历强烈蛇纹石化作用过程中,存在 CaO 、 Al_2O_3 和 MgO 的流失,后期碳酸盐化作用对 Ca 流失具有一定补偿。柳区蛇纹岩与全球深海及弧前蛇纹岩的 Al_2O_3 - CaO 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ - MgO/SiO_2 趋势不一致性以及 MgO 与 SiO_2 、 Al_2O_3 之间无相关性进一步表明,强烈的蛇纹石化作用对柳区蛇纹岩原岩的主量元素组成影响较大。此外,柳区蛇纹岩微量元素含量明显低于新鲜橄榄岩微量元素含量,表明微量元素会随着蛇纹石化作用溶解迁出,但是 Ba 、 Pb 、 Sr 等大离子亲石元素也会发生一定程度富集。

致谢:野外采样得到了魏友卿老师的帮助;两位审稿人对本文进行了认真的审阅和批注,并提出宝贵的修改意见;在此一并表示感谢!

参考文献:

- [1] NICOLAS A, GIRARDEAU J, MARCOUX J, et al. The Xigaze ophiolite (Tibet): A peculiar oceanic lithosphere[J]. *Nature*, 1981, 294(5840): 414-417.
- [2] 潘桂棠, 丁俊. 青藏高原及邻区地质图(1:1500000)[M]. 成都: 成都地图出版社, 2004: 8-43.
PAN Guitang, DING Jun. Geological map of Qinghai-Tibet Plateau and adjacent areas[M]. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House, 2004: 8-43.
- [3] 赵梅善. 西藏日喀则蛇纹岩地幔源区和流体交代的地球化学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021: 124-125.
ZHAO Meishan. A geochemical study of mantle source and fluid metasomatism recorded by Xigaze ophiolites in southern

- Tibet[D].Hefei:University of Science and Technology of China,2021:124-125.
- [4]ZHANG C,LIU C Z,WU F Y,et al.Ultra-refractory mantle domains in the Luqu ophiolite (Tibet):Petrology and tectonic setting[J].Lithos,2017,286/287:252-263.
- [5]WU F Y,JI W Q,LIU C Z,et al.Detrital zircon U-Pb and Hf isotopic data from the Xigaze fore-arc basin:Constraints on Transhimalayan magmatic evolution in southern Tibet[J].Chemical Geology,2010,271(1/2):13-25.
- [6]AN W,HU X,GARZANTI E,et al.Xigaze forearc basin revisited (South Tibet):Provenance changes and origin of the Xigaze ophiolite[J].Geological Society of America Bulletin,2014,126(11/12):1595-1613.
- [7]COLEMAN R G.Petrological and geophysical nature of serpentinites[J].Geological Society of America Bulletin,1971,82(4):897-918.
- [8]DAI J G,WANG C S,HÉBERT R,et al.Petrology and geochemistry of peridotites in the Zhongba ophiolite, Yarlung Zangbo Suture Zone:Implications for the Early Cretaceous intra-oceanic subduction zone within the Neo-Tethys[J].Chemical Geology,2011,288(3/4):133-148.
- [9]徐向珍,杨经绥,郭国林,等.雅鲁藏布江缝合带西段普兰蛇绿岩中地幔橄榄岩的岩石学研究[J].岩石学报,2011,27(11):3179-3196.
- XU Xiangzhen,YANG Jingsui,GUO Guolin,et al.Lithological research on the Purang mantle peridotite in western Yarlung-Zangbo suture zone in Tibet[J].Acta Petrologica Sinica,2011,27(11):3179-3196.
- [10]张利,杨经绥,刘飞,等.南公珠错地幔橄榄岩:雅鲁藏布江缝合带西段一个典型的大洋地幔橄榄岩[J].岩石学报,2016,32(12):3649-3672.
- ZHANG Li,YANG Jingsui,LIU Fei,et al.The south Gongzhucuo peridotite massif:A typical MOR type peridotite in the western Yarlung Zangbo suture zone[J].Acta Petrologica Sinica,2016,32(12):3649-3672.
- [11]NIU Y L.Bulk-rock major and trace element compositions of abyssal peridotites:Implications for mantle melting,melt extraction and post-melting processes beneath mid-ocean ridges[J].Journal of Petrology,2004,45(12):2423-2458.
- [12]SUN S S,MCDONOUGH W F.Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts:Implications for mantle composition and processes[J].Geological Society,1989,42(1):313-345.
- [13]LIU C Z,WU F Y,WILDE S A,et al.Anorthitic plagioclase and pargasitic amphibole in mantle peridotites from the Yungbwa ophiolite (southwestern Tibetan Plateau) formed by hydrous melt metasomatism[J].Lithos,2010,114(3/4):413-422.
- [14]XU X Z,YANG J S,BA D Z,et al.Petrogenesis of the Kangjinla peridotite in the Luobusa ophiolite,Southern Tibet[J].Journal of Asian Earth Sciences,2011,42(4):553-568.
- [15]PETERS D,BRETSCHER A,JOHN T,et al.Fluid-mobile elements in serpentinites:Constraints on serpentinisation environments and element cycling in subduction zones[J].Chemical Geology,2017,466:654-666.
- [16]DESCHAMPS F,GODARD M,GUILLOT S,et al.Geochemistry of subduction zone serpentinites:A review[J].Lithos,2013,178(18):96-127.
- [17]ISHII T,ROBINSON P T,MAEKAWA H,et al.Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamounts in the Izu-Ogasawara-Mariana forearc,Leg 125[J].Proc.,Scientific Results,1992,125:445-486.
- [18]KAMENETSKY V S,CRAWFORD A J,MEFFRE S.Factors controlling chemistry of magmatic spinel:An empirical study of associated olivine,Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks[J].Journal of Petrology,2001,42(4):655-671.
- [19]周文达,杨经绥,赵军红,等.西藏雅鲁藏布江缝合带西段普兰蛇绿岩地幔橄榄岩矿物学研究和成因探讨[J].岩石学报,2014,30(8):2185-2203.
- ZHOU Wenda,YANG Jingsui,ZHAO Junhong,et al.Mineralogical study and the origin discussion of Purang ophiolite peridotites,western part of Yarlung-Zangbo Suture Zone (YZSZ),Southern Tibet[J].Acta Petrologica Sinica,2014,30(8):2185-2203.
- [20]COLEMAN R G,KEITH T E.A chemical study of serpentinitization-burro mountain,California[J].Journal of Petrology,

1971,12(2):311-328.

- [21]BOGOLEPOV V G.Problem of serpentinization of ultrabasic rocks[J].International Geology Review,1970,12(4):421-432.
- [22]HATTORI K H,GUILLOT S.Geochemical character of serpentinites associated with high-to ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Alps,Cuba,and the Himalayas:Recycling of elements in subduction zones[J/OL].Geochemistry Geophysics Geosystems,2007,19.DOI:10.1029/2007GC001594.
- [23]DICK H J B,BULLEN T.Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas[J].Contributions to Mineralogy and Petrology,1984,86(1):54-76.
- [24]JAGOUTZ E,PALME H,BADDENHAUSEN H,et al.The abundance of major,minor and trace elements in the Earth's mantle as derived from primitive ultramafic nodules[J].Lunar and Planetary Science Conference,1979,10:2031-2050.
- [25]SEIFERT K,BRUNOTTE D.Geochemistry of serpentinized mantle peridotite from Site 897 in the Iberia Abyssal Plain[C]//Proceedings of the Ocean Drilling Program,Scientific Results,1996,149:413-424.
- [26]PAULICK H,BACH W,GODARD M,et al.Geochemistry of abyssal peridotites (Mid-Atlantic Ridge,15°20'N,ODP Leg 209);Implications for fluid/rock interaction in slow spreading environments[J].Chemical Geology,2006,234(3):179-210.
- [27]李旭平,RAHN M,BUCHER K,等.蛇绿岩套中超基性岩体的岩石组合:蛇纹岩、异剥钙榴岩和蛇绿碳酸岩—以西阿尔卑斯 Zermatt-Saas 蛇绿岩为例[J].地学前缘,2003,10(4):457-468.
- LI Xuping,RAHN M,BUCHER K,et al.Lithological association of ultramafic rocks in sphiolites;Serpentinite,rodingite and ophicarbonat:An example from zermatt-saas of western Alps[J].Earth Science Frontiers,2003,10(4):457-468.
- [28]KODOLANYI J,PETTKE T,SPANDLER C,et al.Geochemistry of ocean floor and fore-arc serpentinites;Constraints on the ultramafic input to subduction zones[J].Journal of Petrology,2012,53(2):235-270.
- [29]ZHENG Y F.Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones[J].Chemical Geology,2012,328(1):5-48.

(责任编辑:高丽华)