

## 2018 年度项目进展

### 1、俯冲起始地质记录的综述工作

我们对已有的初始俯冲工作进行了梳理,总结出俯冲起始过程中的四个主要地质记录,分别为一系列地球化学成分多样的岩浆活动、SSZ 型蛇绿岩、变质底板和玻安岩及其对应的铬铁矿床。土耳其南部构造带作为特提斯造山带的重要组成部分,是研究新特提斯洋俯冲起始的理想场所,主要有如下特点:1)不同地区的镁铁质岩石甚至同一地区的镁铁质岩石具有不同的地球化学特征,从似洋中脊玄武岩,到过渡型岩石类型和玻安质岩石均有发育;2)大部分蛇绿岩具有完整的序列,各单元及变质底板岩石中普遍发育侵入的基性岩脉,产状多变,是多期岩浆事件的产物;3)蛇绿岩下部通常发育一套角闪岩相变质底板,且其年龄与蛇绿岩的形成年龄基本一致;4)蛇绿岩中普遍发育铬铁矿床,以高 Cr 型为主,部分蛇绿岩中还赋存高 Al 高 Cr 的过渡型铬铁矿,均被认为是幔源岩浆与地幔橄榄岩反应的产物。因而,这些地质体完整记录了新特提斯洋形成-俯冲-消滅的演化过程。该综述性成果发表在岩石学报上。

### 2、土耳其 Pozanti-Karsanti 蛇绿岩中橄榄石的 Li 同位素研究

锂同位素体系在研究蛇绿岩形成演化以及铬铁矿床成因方面有其独特优势:1) Li 为中等不相容元素,在部分熔融和结晶分异过程中会发生明显元素分馏,而 Li 同位素不发生显著分馏;2) Li 在橄榄石中为微量元素,而铬铁矿几乎不含 Li 元素,因而纯橄岩和铬铁岩中橄榄石的 Li 含量和 Li 同位素组成不受二者元素交换的影响,可以记录其初始组成;3) 低温蚀变与高温过程中的 Li 元素和 Li 同位素表现出明显不同的地球化学行为,较易区分出后期改造过程。

基于以上认识,我们对土耳其 Pozanti-Karsanti 蛇绿岩中各个岩石单元的橄榄石进行了细致的 Li 同位素原位分析。结果显示不同成因的各岩石单元之间具有明显不同的 Li 含量和 Li 同位素变化范围和变化趋势。与洋中脊橄榄岩、弧后背景的 Trinity 蛇绿岩和相对成熟弧背景的罗布莎蛇绿岩相比, Pozanti-Karsanti 蛇绿岩显示更大的 Li 含量和 Li 同位素变化范围,与俯冲相关的各个地质储库的 Li 同位素组成相重叠,这与俯冲初始阶段各种俯冲物质不同比例参与岩浆活动密切相关。该项工作表明 Li 同位素可作为揭示蛇绿岩属性和形成构造背景以及铬铁矿床成因机制的重要地球化学示踪剂。这一成果近期发表在国际知名岩石学期刊 *Journal of Petrology* 上。

### 3、土耳其 Pozanti-Karsanti 蛇绿岩铬铁矿中的矿物包裹体研究

我们通过对 Pozanti-Karsanti 蛇绿岩中赋存的不同类型铬铁矿展开详细的包裹体分析。扫描电镜观察发现,寄主铬铁矿中的包裹体具多种形态(如自形柱状、

长板状及他形粒状),且大小不一,在块状、浸染状和条带状铬铁岩中均有出露,但浸染状和条带状铬铁岩中的包裹体种类相对较多。按照包裹体是否常见,可将包裹体分为常见的硅酸盐矿物和不常见的其他矿物;硅酸盐矿物根据其是否含水,可分为不含水硅酸盐矿物及含水硅酸盐矿物。此外,个别样品中可见多种矿物组成的同一包裹体,故将其划分为复合型包裹体。其中,不含水的硅酸盐矿物多为橄榄石和单斜辉石:橄榄石包裹体粒径为 10~50 $\mu\text{m}$ ,自形、半自形和他形均有出露,单斜辉石作为最常见的硅酸盐矿物包裹体,多与含水硅酸盐矿物角闪石共生。含水硅酸盐矿物包裹体主要为角闪石,偶见云母及蛇纹石。角闪石常以集合体形式产出,可与云母、单斜辉石等硅酸盐矿物共生。云母则多成群产出,单独产出的云母包裹体较为少见。铬铁矿中还发育不同类型的复合型包裹体,主要包括以下四类:(1)云母和单斜辉石;(2)单斜辉石、硅灰石和蛇纹石;(3)单斜辉石、绿泥石和菱镁矿;(4)云母和蛇纹石。值得注意的是,铬铁矿中含有多种类型的富 Ca 矿物包裹体和其他不常见矿物,包括方解石、硅灰石、磷灰石、钙铬榴石、基性斜长石、铂族元素硫化物等,其形态、大小不一,常和其他矿物共生形成复合型包裹体。其中,方解石和硅灰石包裹体为蛇绿岩铬铁矿中首次发现。

电子探针对寄主铬铁矿和其中的矿物包裹体研究表明,硅酸盐矿物包裹体多显示高 Mg#特征(如橄榄石 Fo=95.4~97.1;单斜辉石 Mg#=92.0~99.9;角闪石 Mg#=88.9~99.8),表明母岩浆具有高 Mg 的特征;而含水矿物包裹体的出现表明结晶铬铁矿的母岩浆具有富水特征。此外,方解石和硅灰石等富 Ca 矿物的出现以及硅酸盐矿物的高 CaO 含量(如单斜辉石 CaO=20.1%~24.6%)均揭示了铬铁岩母岩浆的富 Ca 特征。母岩浆中的 Ca 组分可能来源于俯冲板块中富 Ca 岩石/矿物的部分熔融,Ca 离子的大量出现使得 Cr<sup>3+</sup>在熔体中更加稳定,同时富 Ca 矿物的结晶促进了岩浆中 Cr 的进一步富集而利于铬铁矿的大量结晶沉淀。

本次工作的亮点在于首次在蛇绿岩铬铁矿中发现了方解石和硅灰石的富 Ca 矿物包裹体,提出铬铁矿的成矿母岩浆可能具有富 Ca 的成分特征。此外,结合其他矿物包裹体的分析测试,综合提出铬铁矿成矿母岩浆具有“富 Mg、富 H<sub>2</sub>O、高 Ca”的特点。这一成果发表在地球科学上。

#### 4、土耳其西北部地幔橄榄岩包体的矿物 Li 同位素研究

我们对土耳其西北部 Thrace 盆地的 35 个地幔橄榄岩样品进行了详细的岩石学和地球化学分析工作。样品主要为方辉橄榄岩和少量二辉橄榄岩、橄榄辉石岩。分析结果显示,全岩轻稀土元素与大离子亲石元素的富集和高场强元素与 Y 元素的亏损,指示有与俯冲过程相关的熔流体交代作用的存在。在同一样品内部和不同样品之间,硅酸盐矿物都存在极大的 Li 含量和同位素的不平衡,但是单个样品中矿物的主量元素却相对均一。橄榄石 Li 含量为 1.45 ~ 2.81 ppm,  $\delta^7\text{Li} = +1.2 \sim +17.5\%$ ; 斜方辉石 Li 含量为 0.07 ~ 16.6 ppm,  $\delta^7\text{Li} = -71.6 \sim +10.8\%$ ; 单斜辉

石 Li 含量为 2.16 ~ 22.0 ppm,  $\delta^7\text{Li} = -54.6 \sim +1.9\%$ 。橄榄石单颗粒 Li 含量非常均一, 但 Li 同位素值存在明显差异, 明显远离地幔正常值, 并且  $\delta^7\text{Li}$  和 Fo 值呈负相关关系。两种辉石的 Li 含量和同位素都明显远离地幔正常值, 并且与之对应的主量元素皆没有相关关系, 但是单个矿物存在明显的剖面上的 Li 含量和同位素的变化。其中斜方辉石的剖面最为明显且变化一致, 其核部相较于边部更富集 Li 含量和轻 Li 同位素。这一不平衡的现象无法由矿物之间 Li 元素的扩散, 以及 Li 元素从寄主岩向捕虏体的扩散进行解释, 而反映的是地幔交代作用的信息。

两种辉石核部的 Li 含量和同位素异常和 Li 在剖面上的系统变化显示出了两期交代作用的信息。辉石核部的所富集的 Li 含量和轻 Li 同位素代表了早期的硅酸盐交代的信息, 这与橄榄石所经历的硅酸盐交代作用为同一期过程。而边部逐渐减少的 Li 含量以及变重的 Li 同位素则代表了近期的流体交代作用, 并且这一期交代对橄榄石的影响很弱导致其无法形成剖面上的变化。也正因为如此, 橄榄石能够保存  $\delta^7\text{Li}$  和 Fo 值的负相关关系。相反, 由于辉石受到了明显的两期交代的影响, 导致其 Li 同位素和主量元素的相关性发生了扰乱。由全岩微量元素可以看出, 这两期的交代作用的熔流体的来源很可能与早期俯冲板片的熔融以及近期俯冲脱水所流体的释放有关。

此项工作的意义主要有两点: Li 同位素体系在示踪高温地质过程中的作用, 以及在指示交代介质的性质上的有效性; 对该地区的地幔橄榄岩捕虏体的地球化学数据做了相应的补充, 首次提供了该区域矿物原位的 Li 同位素数据, 揭示了土耳其西北部岩石圈地幔的演化历史。该项工作发表于 *Journal of Asian Earth Sciences* 上。

## 5、Fe-Mg 同位素和水含量在铬铁矿成矿中的应用分析

对西藏普兰和罗布莎、土耳其 Kızıldağ 和 Kop 蛇绿岩中的地幔橄榄岩和铬铁岩地全岩和单矿物 Fe-Mg 同位素工作进行了系统总结。结果表明: 1) 蛇绿岩中的地幔橄榄岩具有较均一的 Fe-Mg 同位素组成, 与世界其它地区地幔橄榄岩相似; 2) 铬铁岩中铬铁矿和橄榄石之间存在明显的 Fe-Mg 同位素分馏, 铬铁矿多具有比共存橄榄石轻的 Fe 同位素组成, 与地幔橄榄岩中的尖晶石和橄榄石相反, 而 Mg 同位素变化较大; 3) 铬铁矿和橄榄石的 Fe-Mg 同位素主要受控于结晶分异和 Fe-Mg 交换, 且这两个过程造成的同位素变化趋势明显不同。因此, Fe-Mg 同位素在揭示铬铁矿母岩浆来源性质及成矿过程方面具有较大的应用潜力。

为了厘清铬铁矿床母岩浆的含水性及水在铬铁矿成矿中的作用, 我们从岩石矿物学角度对与铬铁矿床有关的三类岩体进行了对比。蛇绿岩和大型层状镁铁-超镁铁岩体是全球铬铁矿床的主要载体, 而弧岩浆堆晶成因的阿拉斯加型岩体则

以铬铁矿化为主，少见有经济价值的铬铁矿床。前两者均缺少独立产出的含水矿物，表明为典型的贫水体系，与其铬铁矿中含水矿物包裹体和流体包裹体所推测的母岩浆富水特征相悖；贫矿的阿拉斯加型岩体产出大量的含水矿物，与其产出于俯冲构造背景的富水高氧逸度特征相一致。因此，岩浆的高含水量并不是铬铁矿成矿的关键。结合实验岩石学结果，我们认为铬铁矿的结晶应与岩浆演化过程中的水饱和以及流体不混溶有关，铬铁矿的表面吸附水对铬铁矿的运移富集起到了重要作用。这些表面吸附水的命运是多样化的：最主要的是造成了铬铁矿周边橄榄石的蛇纹石化，形成铬铁矿体的选择性蚀变；有时可以进入橄榄石甚至是铬铁矿晶格，随后发生矿物出溶现象；亦可与演化的熔体混合结晶粒间矿物（以辉石为主）；也有可能被生长的铬铁矿所包裹形成包裹体。上述成果发表于矿物岩石地球化学通报和地球科学上。

### 发表成果：

1. Su, B.X., Chen, C., Pang, K.N., Sakyi, P.A., Uysal, I., Avci, E., Liu, X., Zhang, P.F., 2018. Melt penetration in oceanic lithosphere: Li isotope records from the Pozanti-Karsanti ophiolite in southern Turkey. *Journal of Petrology* 59, 191-205 (第一标注).
2. 苏本勋，白洋，陈晨，刘霞，肖燕，唐冬梅，梁子，崔梦萌，彭青山，2018. 铬铁矿床母岩浆含水性的岩石矿物学探讨. *矿物岩石地球化学通报* 37(6), 1035-1046. (第三标注)
3. 苏本勋，肖燕，陈晨，白洋，刘霞，梁子，彭青山. 2018. Fe-Mg 同位素在蛇绿岩中铬铁矿床成因研究中的应用潜力. *地球科学* 43(4), 1011-1024. (第二标注)
4. 刘霞，苏本勋，白洋，陈晨，肖燕，梁子，杨赛红，彭青山，苏本灿，刘斌. 2018. 蛇绿岩中铬铁矿母岩浆的富 Ca 特征:矿物包裹体证据. *地球科学* 43(4), 1038-1050. (第二标注)
5. 陈晨，苏本勋，景揭俊，肖燕，林伟，褚杨，刘霞，白洋. 2018. 新特提斯洋俯冲起始的地质记录: 土耳其南部蛇绿岩和变质底板. *岩石学报* 34(11), 3302-3314. (第一标注)
6. Jing, J.J., Su, B.X., Xiao, Y., Martin, L., Zhang, H.F., Uysal, I., Chen, C., Lin, W., Chu, Y., Seitz, H.M., Zhang, P.F., 2018. Cryptic metasomatism revealed by Li isotopes of mantle xenoliths beneath the Thrace Basin, NW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences* 166, 270-278. (第二标注)