

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.707



蛇绿岩中铬铁岩母岩浆的富 Ca 特征:矿物包裹体证据

刘霞^{1,2}, 苏本勋^{2,3*}, 白洋^{2,3}, 陈晨^{2,3}, 肖燕⁴, 梁子^{3,4},
杨赛红⁴, 彭青山⁵, 苏本灿⁶, 刘斌⁶

1. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059
2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029
5. 长春工程学院勘查与测绘工程学院, 吉林长春 130012
6. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第八采油厂, 陕西西安 710000

摘要: 铬铁矿作为蛇绿岩中的重要矿产, 其成矿母岩浆性质及演化一直存在较大争议. 铬铁矿的矿物包裹体同时或先于铬铁矿结晶, 其成分和类别能很好地记录成矿母岩浆性质和演化过程. 土耳其 Pozantı-Karsantı 蛇绿岩不同类型铬铁矿的铬铁矿中发现了多种类型包裹体: 不含水硅酸盐矿物(如橄榄石和单斜辉石)、含水硅酸盐矿物(如角闪石和金云母)、复合型矿物包裹体(如蛇纹石、硅灰石和单斜辉石的复合型包裹体)和不常见矿物(如磷灰石、铂族元素硫化物). 含水矿物包裹体的出现以及矿物的高 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)表明结晶铬铁矿的母岩浆具有富水、富 Mg 的特征. 同时, 除钙铬榴石和磷灰石的包裹体外, 在铬铁矿中首次发现富 Ca 矿物方解石和硅灰石, 其中方解石和菱镁矿以复合型包裹体形式产出, 硅灰石则分布于蛇纹石矿物包裹体中. 这些富 Ca 矿物的出现以及硅酸盐矿物的高 CaO 含量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 Cr³⁺ 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.
关键词: 蛇绿岩; 铬铁矿; 包裹体; 母岩浆; 矿物学; 岩石学.

中图分类号: P611

文章编号: 1000-2383(2018)04-1038-13

收稿日期: 2017-12-18

Ca-Enrichment Characteristics of Parental Magmas of Chromitite in Ophiolite: Inference from Mineral Inclusions

Liu Xia^{1,2}, Su Benxun^{2,3*}, Bai Yang^{2,3}, Chen Chen^{2,3}, Xiao Yan⁴, Liang Zi^{3,4},
Yang Saihong⁴, Peng Qingshan⁵, Su Bencan⁶, Liu Bin⁶

1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
5. Faculty of Prospecting and Survey Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China
6. Eighth Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina Co., Ltd., Xi'an 710000, China

Abstract: The origin and mechanisms involved in the formation of chromitite deposit in ophiolites remain a controversial subject of continuous debate. One of the important ways to address this issue is to investigate the nature and composition of parental

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 41772055, 91755205); 岩石圈演化国家重点实验室(专 201701).

作者简介: 刘霞(1996-), 女, 大学本科生, 研究方向为蛇绿岩中铬铁矿成矿作用. ORCID: 0000-0001-6222-8869. E-mail: diligentliuxia@qq.com

* 通讯作者: 苏本勋, ORCID: 0000-0002-5232-298X. E-mail: subenxun@mail.igcas.ac.cn

引用格式: 刘霞, 苏本勋, 白洋, 等, 2018. 蛇绿岩中铬铁岩母岩浆的富 Ca 特征: 矿物包裹体证据. 地球科学, 43(4): 1038-1050.

magmas of chromitite, which may be revealed by mineral inclusions in chromite interpreted to have crystallized contemporaneously with or earlier than the host chromite. Various types of inclusions have been found in chromite ores with different textures in the Pozantı-Karsantı ophiolite in Turkey, which include (1) anhydrous silicate type such as olivine and clinopyroxene, (2) hydrous silicate type such as amphibole and phlogopite, (3) composite type such as the association of serpentine, wollastonite and clinopyroxene, (4) and uncommon mineral type such as apatite and platinum group element sulfide. The occurrence of hydrous mineral and the high $Mg^{\#}$ of some minerals (e. g., olivine $Mg^{\#} = 95.4-97.1$, clinopyroxene $Mg^{\#} = 92.0-99.0$, amphibole $Mg^{\#} = 88.9-99.8$) suggest that parental magmas of the chromite are rich in Mg and water contents. Besides the inclusions of apatite and uvarovite, it is reported, for the first time, that calcite and wollastonite inclusions in chromite, which, together with high-CaO features in silicate minerals, indicate Ca-enrichment. The elevated Ca contents in melts are favorable in stabilizing Cr^{3+} in silicate melt, while crystallization of Ca-bearing minerals could result in Cr enrichment in the melts. The Ca-rich component was probably derived from Ca-enriched rocks in subducting slab.

Key words: ophiolite; chromite; inclusion; parental magma; mineralogy; petrology.

0 引言

铬铁矿作为蛇绿岩中的主要矿产之一,多呈豆荚状赋存于地幔橄榄岩中,偶见似层状产出于莫霍面之上(Paktunc, 1990)。同时,铬铁矿对蛇绿岩的形成、演化、侵位及铬铁矿成矿过程具有重要指示意义。然而,国内外学者对蛇绿岩中豆荚状铬铁矿床的成因尚未达成共识,目前主流的成因机制有以下几种:(1)熔-岩反应:主张铬铁矿为熔体和岩石反应形成,强调不同性质的熔体和地幔橄榄岩反应生成不同类型的铬铁矿(Pearce *et al.*, 1984; Zhou *et al.*, 1996, 2005; Melcher *et al.*, 1997; Rollinson, 2005; Tamura, 2005; Uysal *et al.*, 2007),其中橄榄岩和幔源岩浆反应形成的富Si熔体后期侵入岩浆的过程对形成豆荚状铬铁矿尤为重要(Arai, 1994; Zhou *et al.*, 1994);(2)地幔柱假说:铬铁矿中的透辉石出溶条纹及柯石英、金刚石、碳硅石等超高压超还原矿物的发现表明铬铁矿可能结晶于地幔过渡带(>380 km, Yamamoto *et al.*, 2009),随后被地幔柱带入浅部(Yang *et al.*, 2014, 2015a, 2015b; Xiong *et al.*, 2015);(3)部分熔融:豆荚状铬铁矿为原始地幔岩高度部分熔融的产物,其成分差异指示地幔部分熔融程度,从而制约铬铁矿床的产出背景(王希斌和鲍佩声, 1987; 王希斌等, 1992; 鲍佩声和王希斌, 1997; 鲍佩声, 2009)。

由于铬铁矿及伴生矿物(主要为橄榄石)的成分较为简单,缺乏常见并有效的微量元素和同位素示踪体系,研究方法较为有限。目前铬铁矿成矿作用的研究主要是建立在铬铁矿主量元素的对比上(Kamenetsky, 2001; Pagé and Barnes, 2009),该方法忽略了与铬铁矿共生的橄榄石的成分差异,故有学者尝试利用Li、Fe、Mg等非传统稳定同位素对

蛇绿岩中的铬铁矿和橄榄石进行研究(Chen *et al.*, 2015; Su *et al.*, 2015, 2016, 2018; Xiao *et al.*, 2016),力求从新的角度对铬铁矿成因和成矿作用机制提供新的制约。同时,原生包裹体作为先于或与寄主矿物同时结晶的矿物相,其存在对指示寄主矿物的成因及成矿母岩浆的成分具有重要意义(Melcher *et al.*, 1997; Arai *et al.*, 2006, 2010; Zhou *et al.*, 2014)。而铬铁矿作为岩浆早期结晶的矿物相之一,其中发现的各类包裹体一直备受关注。目前,阿曼、哈萨克斯坦 Kempirsai、土耳其 Pozantı-Karsantı、俄罗斯 Ray-Iz、中国罗布莎和萨尔托海等多处蛇绿岩铬铁矿中都被报道有不同类型的矿物包裹体(Melcher *et al.*, 1997; 白文吉等, 2004; Borisova *et al.*, 2012; Saka *et al.*, 2014; Zhou *et al.*, 2014; Rollinson and Adetunji, 2015; 黄竺等, 2015; 田亚洲等, 2015; Robinson *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2015a, 2015b; 郭国林等, 2016; Avci *et al.*, 2017)。

本文总结了土耳其 Pozantı-Karsantı 蛇绿岩中不同类型铬铁矿中的矿物包裹体,并结合其成分、产出特征及寄主铬铁矿的成分,以期厘定其母岩浆的成分和性质,并对铬铁矿成因机制提供新的制约。

1 Pozantı-Karsantı 蛇绿岩地质背景及样品描述

土耳其境内分布有大量的中生代蛇绿岩,自北向南分为北部、中部和南部3个蛇绿岩带(图1a),其中北部蛇绿岩带被认为是古特提斯洋残余,而南部蛇绿岩带为新特提斯洋的岩石圈残片(Dilek *et al.*, 1990)。Pozantı-Karsantı 蛇绿岩东段呈北东-南西走向,长约85 km、宽20 km,出露面积达1300 km²(图

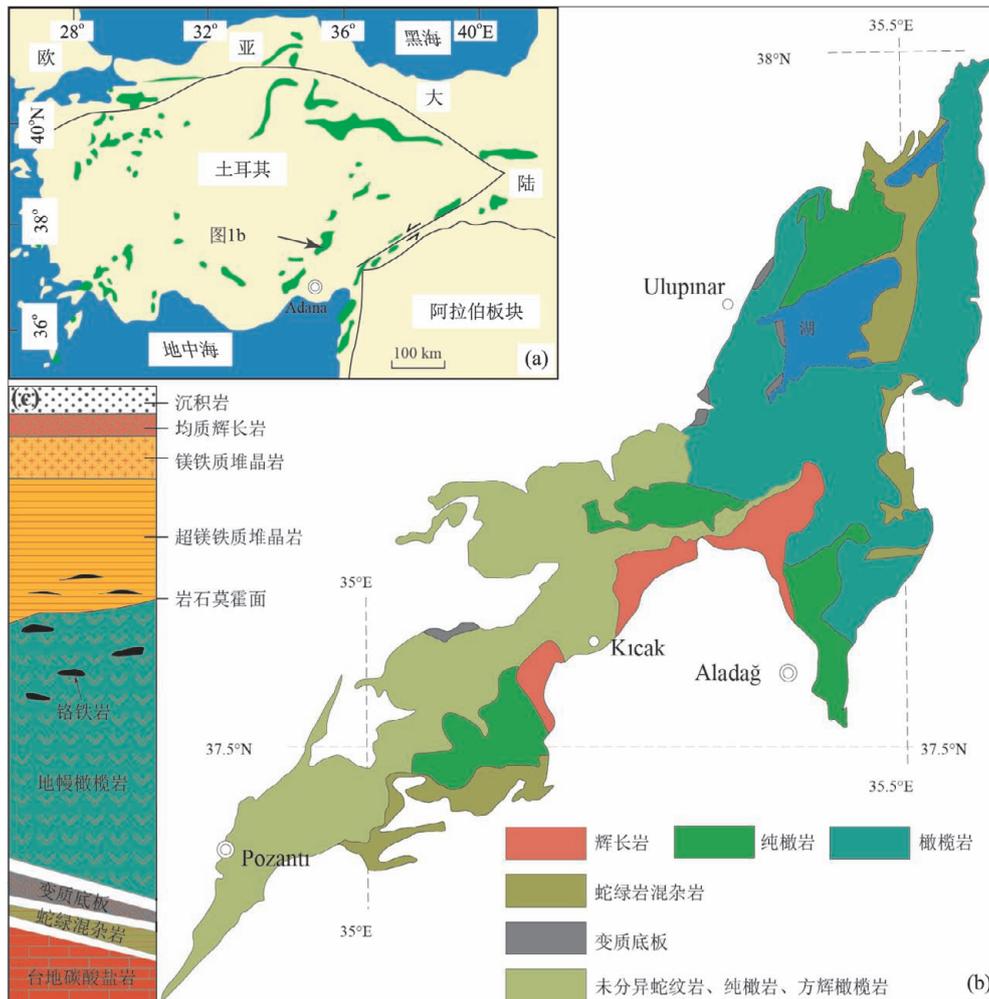


图 1 土耳其蛇绿岩分布图(a), Pozanti-Karsanti 蛇绿岩地质简图(b)和 Pozanti-Karsanti 蛇绿岩柱状剖面图(c)

Fig. 1 Distribution of ophiolites in Turkey (a), simplified geologic map (b) and columnar section of the Pozanti-Karsanti ophiolite (c)

图 a 据 Robertson(2002)修改; 图 b 据 Su *et al.* (2018)修改; 图 c 据 Saka *et al.* (2014)修改

1b). 该蛇绿岩西部为左行走滑断层区域的渐新世和晚第三纪沉积物及第三纪安山岩, 北部和东部为 Tauride 带的古生代灰岩, 南部为 Adana 盆地的晚第三纪沉积物(Polat and Casey, 1995).

Pozanti-Karsanti 蛇绿岩多被认为是 SSZ(俯冲带之上)构造背景的产物(Saka *et al.*, 2014; Lian *et al.*, 2017a; Su *et al.*, 2018), 位于晚泥盆世一早白垩世的碳酸盐岩台地之上(Dilek *et al.*, 1990; Robertson, 2002), 其底部与 Aladağ 蛇绿混杂岩和变质底板呈断层接触关系(Parlak *et al.*, 2002, 2009). 该蛇绿岩各岩石单元保存较为完整, 地幔部分主要为方辉橄榄岩、纯橄岩, 含少量二辉橄榄岩. 地壳部分自下而上分别为超镁铁质堆晶岩(包括堆晶纯橄岩、异剥橄榄岩、橄榄单斜辉石岩、单斜辉石岩)、镁铁质堆晶岩(包括辉长岩、辉长苏长岩)、均质辉长岩及上覆大洋沉积物(图 1c). 最近对辉长岩的锆

石 U-Pb 定年结果为 87 Ma, 被认定为是 Pozanti-Karsanti 蛇绿岩的形成年龄(Lian *et al.*, 2017a).

Pozanti-Karsanti 蛇绿岩中赋存较大规模的铬铁矿床, 包括地幔层位的豆荚状铬铁矿床和壳幔过渡带/地壳层位的似层状铬铁矿床(图 1c), 目前均在开采中. 豆荚状铬铁矿床位于莫霍面之下, 矿石结构多样(图 2a), 包括反豆状、豆状、块状、半块状、稠密浸染和稀疏浸染状(图 2b~2f; Avcı *et al.*, 2017). 这些豆荚状铬铁矿体常被纯橄岩薄壳包裹, 围岩为方辉橄榄岩, 其侧向延伸有限, 以断续出露的豆荚状为特征(Su *et al.*, 2018). 似层状(图 2g)产于莫霍面之上的超镁铁质堆晶岩(特别是堆晶纯橄岩)中, 多为条带状构造, 其与堆晶纯橄岩互层产出(图 2g; Avcı *et al.*, 2017; Lian *et al.*, 2017b; Su *et al.*, 2018), 无明显界限. 这些铬铁矿多呈自形一半自形, 粒度变化较大(几 μm 至 1~2 cm), 颗粒内

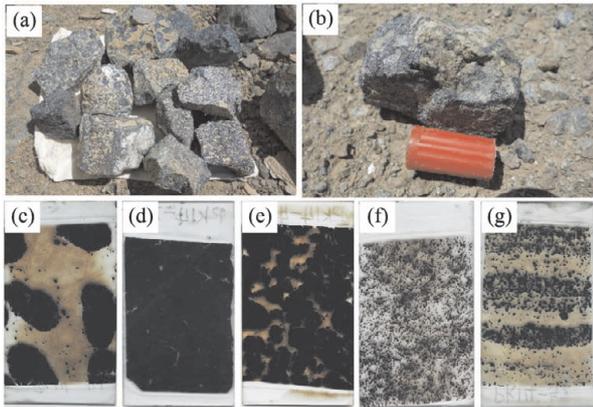


图 2 土耳其 Pozanti-Karsanti 蛇绿岩不同类型铬铁矿石野外及扫描薄片照片

Fig. 2 Field and scanned photos showing different textures and structures of chromitite in the Pozanti-Karsanti ophiolite in Turkey

a. 多种类型矿石; b. 反豆状结构矿石; c. 豆状矿石; d. 块状矿石; e. 半块状/豆状矿石; f. 稀疏浸染状矿石; g. 似层状铬铁矿石

部裂隙发育,基本无蚀变特征,仅部分铬铁矿裂隙附近和边缘可见蚀变. 铬铁矿主要与橄榄石伴生,个别样品可见他形单斜辉石充填于铬铁矿颗粒之间. 此外,铬铁矿中的矿物包裹体较为发育,类型复杂,形态多样(Avcı *et al.*, 2017; Lian *et al.*, 2017b).

2 分析方法

铬铁矿包裹体的主量元素分析是在中国科学院地质与地球物理研究所的 JEOL JXA8100 电子探针(EPMA)上完成的,仪器的分析状态为 $5\ \mu\text{m}$ 直径的束斑、10 nA 的束流和 15 kV 的加速电压;采用天然矿物硬玉[NaAlSi₂O₆]作为元素 Na、Al 和 Si 的标样,蔷薇辉石[MnSiO₃]作为 Mn 的标样,透长石[KAlSi₃O₈]作为 K 的标样,石榴子石[Fe₃Al₂Si₃O₁₂]作为 Fe 的标样,铬透辉石[(Mg, Cr)CaSi₂O₆]作为 Ca 的标样,橄榄石[(Mg, Fe)₂SiO₄]作为 Mg 的标样;人工合成金红石(TiO₂);99.7%的 Cr₂O₃ 和 Ni₂Si 分别作为 Ti、Cr 和 Ni 的标样;基体校正采用 ZAF 程序. JEOL JXA8100 的主量元素的检测限为 180×10^{-6} ,分析精度优于 1.5%(1SD). 铬铁矿相对其他硅酸盐矿物性质稳定,不易受后期流体交代和风化作用的影响,同时为避免矿物蚀变导致分析误差,选取靠近铬铁矿的中心位置进行化学成分分析.

矿物的背散射图和元素面分布图是在中国科学

院地质与地球物理研究所配备有英国牛津 X-MAXN80 X 射线能谱仪的 FEI Nova NanoSEM 450 场发射扫描电镜上获取的. 高分辨率(1 536 像素 \times 1 103 像素)的背散射图像在 15 kV 加速电压、 $5.5\ \mu\text{m}$ 束斑、6 mm 工作距离(WD)的仪器状态下获得,每像素点的驻留时间为 $30\ \mu\text{s}$. 矿物元素面分布分析采用自动获取能量范围及通道数量,图像分辨率为 1 024,每点像素驻留时间为 $100\ \mu\text{s}$,采集总时间约 10 min.

3 分析结果

3.1 寄主矿物特征及化学组成

土耳其 Pozanti-Karsanti 蛇绿岩铬铁矿(为表达方便起见,本文铬铁矿和铬尖晶石均表述为铬铁矿)的成分变化较大, Cr₂O₃ 含量为 46.4%~60.0%, Al₂O₃ 含量为 8.90%~18.5%, TiO₂ 含量较低(0.10%~0.40%;附表 1). 铬铁矿的 $\text{Cr}^\# = [100 \times \text{Cr} / (\text{Cr} + \text{Al})]$ 为 62.8~81.6, $\text{Mg}^\# = [100 \times \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})]$ 为 50.2~72.7,为高 Cr 型铬铁矿. 在铬铁矿 Al₂O₃ 与 TiO₂ 的成分投图中,所有样品均落入 SSZ 范围内,多数显示 ARC(岛弧)成分特征,显示其成岩母岩浆可能具弧岩浆性质. 铬铁矿 Cr[#] 与 TiO₂ 的成分相关性图解(图 3b)中,大部分样品落入玻安岩成分区域内,与 Al₂O₃ 与 TiO₂ 的成分投图结果一致. 与铬铁矿伴生的主要硅酸盐矿物为橄榄石和单斜辉石,橄榄石发生不同程度的蛇纹石化,可见新鲜颗粒,其 Fo 值(即 Mg[#] 值)为 93.1~95.0(附表 1).

3.2 矿物包裹体形态特征

寄主铬铁矿中的包裹体具多种形态(如自形柱状、长板状及半自形粒状),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,可将包裹体分为硅酸盐矿物和不常见矿物;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. 除单个矿物包裹体外,复合型包裹体也常见于不同类型的铬铁矿中.

3.2.1 不含水硅酸盐矿物包裹体 铬铁矿中发现的不含水硅酸盐矿物包裹体主要是橄榄石和单斜辉石, Avcı *et al.* (2017) 还发现有斜方辉石的矿物包裹体. 橄榄石包裹体粒径为 $10 \sim 50\ \mu\text{m}$, 自形、半自形和他形均有出露,可呈边界平直的四边形(图 4a~4b)、半自形(图 4c~4d)、六边形(图 4e~4f)和浑圆状(图 4g~4h)等多种形态,表面干净或

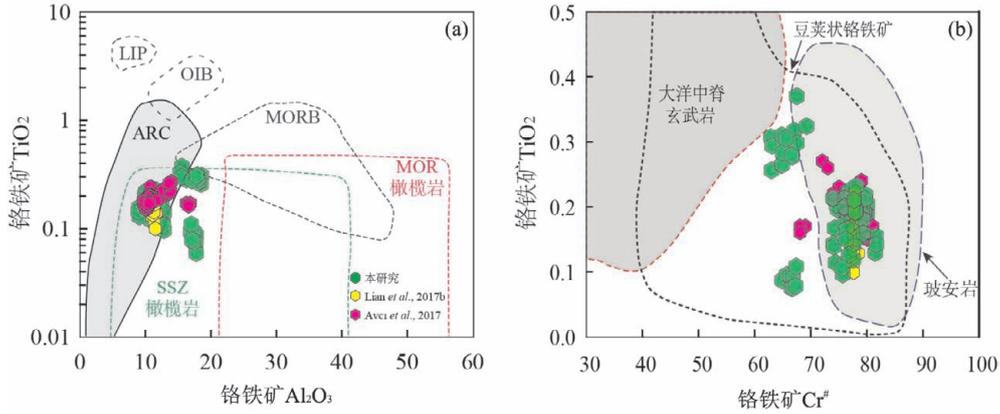


图 3 土耳其 Pozanti-Karsanti 蛇绿岩铬铁矿成分相关性图解

Fig. 3 Correlation diagrams of compositions of chromite in chromitite in the Pozanti-Karsanti ophiolite in Turkey

a. 铬铁矿 Al_2O_3 和 TiO_2 的成分相关性图解, 据 Kamenetsky *et al.* (2001); b. 铬铁矿 $Cr^{\#}$ 和 TiO_2 的成分相关性图解, 据 Pagé and Barnes (2009). MOR. 大洋中脊; MORB. 大洋中脊玄武岩; LIP. 大火成岩省玄武岩; OIB. 洋岛玄武岩; ARC. 岛弧火山岩; SSZ. 俯冲带之上

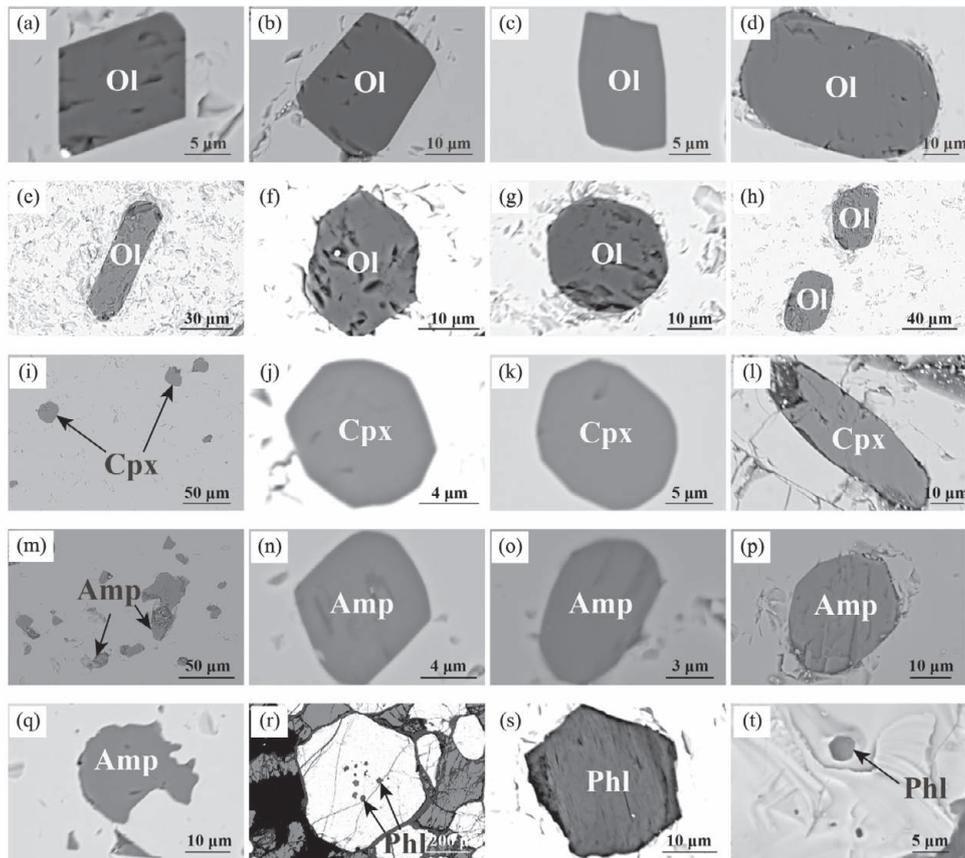


图 4 土耳其 Pozanti-Karsanti 蛇绿岩铬铁矿中不同类型的硅酸盐矿物包裹体

Fig. 4 BSE images showing various types of silicate inclusions with different shapes and sizes in chromite in the Pozanti-Karsanti ophiolite in Turkey

a, b. 自形橄榄石 (Ol); c, d. 半自形橄榄石; e, f. 自形六边形橄榄石; g, h. 他形浑圆状橄榄石; i. 单斜辉石 (Cpx) 矿物集合体; j. 近八边形自形单斜辉石; k. 半自形单斜辉石; l. 他形长条状单斜辉石; m. 角闪石 (Amp) 矿物集合体; n. 近菱形自形角闪石; o. 半自形长柱状角闪石; p. 他形浑圆状角闪石; q. 港湾状角闪石; r. 金云母 (Phl) 矿物集合体; s. 近五边形自形金云母; t. 七边形自形金云母

发育裂隙, 见于各种类型的铬铁岩中. 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, 呈近八边形短柱状、半自形粒状及长条状等不同形态 (图 4i~4l). 大多数单斜辉石的粒径为

8~40 μm , 部分样品(如 PK14-41)小于 1 μm . Lian *et al.* (2017b)在 Pozanti-Karsanti 蛇绿岩铬铁矿中也发现了相同的不含水硅酸盐矿物包裹体.

3.2.2 含水硅酸盐矿物包裹体 含水硅酸盐矿物包裹体主要为角闪石, 偶见云母及蛇纹石组成. 角闪石常以集合体形式产出(图 4m), 呈自形菱形(图 4n)、半自形长柱状(图 4o)、他形浑圆状(图 4p)和港湾状(图 4q)等不同形态, 粒度变化于 1~25 μm , 可与金云母、单斜辉石等硅酸盐矿物共生. 金云母呈片状, 偶见集合体形式(图 4r), 可呈近五边形形态(图 4s), 一组极完全解理清晰可见, 粒度为 1~20 μm . 单独产出的云母包裹体较为少见(图 4t), 多同角闪石、单斜辉石等硅酸盐矿物共生. 此外, 云母常见于浸染状、条带状矿石中, 块状和半块状矿石中少见.

3.2.3 复合型包裹体 不同样品中发现的复合型包裹体主要有 4 种类型: (1)金云母和单斜辉石; (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)金云母和蛇纹石(图 5). 金云母和单斜辉石的复合型包裹体中, 金云母大小为 5 μm × 12 μm , 单斜辉石约 30 μm × 40 μm . 第 2 类复合型包裹体大小约为 30 μm × 30 μm , 其中单斜辉石、硅灰石和蛇纹石大小分别为 15 μm × 20 μm 、10 μm × 12 μm 、10 μm × 13 μm . 单斜辉石作为第 3 类复合型包裹体中的主要矿物, 其大小为 60 μm × 100 μm , 绿泥石和菱镁矿的大小分别为 5 μm × 30 μm 、20 μm × 30

μm . 最后一类包裹体中金云母呈半自形片状, 可见应力弯曲的解理, 并与其他形的蛇纹石组成大小约为 65 μm × 70 μm 的椭圆状集合体.

3.2.4 不常见矿物包裹体 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(图 6a)、硅灰石(图 6b)、磷灰石(图 6c)、钙铬榴石(图 6d、6e)、基性斜长石(图 6f)、铂族元素硫化物(图 6g~6i)等, 其形态、大小不一, 常和其他矿物共生形成复合型包裹体. 富 Ca 的硅灰石可与蚀变矿物绿泥石、蛇纹石共生. 三角状磷灰石包裹于单斜辉石包裹体中, 粒径小于 5 μm . 钙铬榴石存在两种包裹形式: 单斜辉石裂隙中填隙状的他形钙铬榴石和半自形粒状的钙铬榴石. 基性斜长石包裹体“内嵌”于蛇纹石中, 大小约为 3 μm × 10 μm . 铂族元素以单质或硫化物形式产出, 可与角闪石组成复合型包裹体. 硫钨矿、硫钼矿、IPGE 合金、贱金属硫化物等包裹体在铬铁矿中也有出现(Avcı *et al.*, 2017). 此外, 铬铁矿石中还存在超高压矿物金刚石、超还原矿物碳硅石和锆石、金红石和独居石等壳源矿物(Lian *et al.*, 2017b).

3.3 包裹体成分特征

矿物包裹体的元素面分布图无明显环带, 表明其成分较为均一(图 7). 包裹体成分整体上具富 Mg 的特征, 其中橄榄石包裹体 Fo 值($\text{Mg}^\#$)为 95.4~97.1, 相对粒间橄榄石(93.1~95.0)更富 Mg(附表 1; 图 8a). 微量元素上, 橄榄石 MnO 含量很低, 仅为 0.04%~0.09%, 而 NiO(0.46%~1.01%)的含量较高. 单斜辉石 $\text{Mg}^\#$ 和 CaO 的成分相关性图解(图 8b)显示二者呈明显的正相关, 其成分变化较大, $\text{Mg}^\#$ 变化范围为 92.0~99.9, CaO 含量为 20.1%~24.6%, 整体均高于大洋中脊玄武岩, 少数与玻安岩重合, 表现高 Mg 和富 Ca 的特征. 单斜辉石 TiO_2 含量较低, 多小于 0.10%(附表 1), 相比玻安岩和大洋中脊玄武岩中的单斜辉石贫 Ti(图 8b, 8c).

含水硅酸盐矿物角闪石的 Cr_2O_3 和 Na_2O 含量较高, 分别为 2.96%~11.3%和 2.07%~3.67%(附表 2). 其高 $\text{Mg}^\#$ (88.9~99.8)和高 CaO 含量(10.4%~12.0%)表明角闪石成分上为钙镁闪石(除 PK14-60)(图 8d), 依据国际矿物协会的分类标准为非闪石. 金云母的 K_2O 和 Cr_2O_3 含量分别为 3.38%~6.82%和 2.16%~2.35%, 其 CaO(0.11%~1.01%)含量较高, TiO_2 较低($<0.55\%$), 表现低 Ti 特点(附表 2). 方解石、硅灰石和钙铬榴石的 CaO 分别为 51.2%、31.5%和 34.4%(附表 2), 均表现富 Ca 的特征.

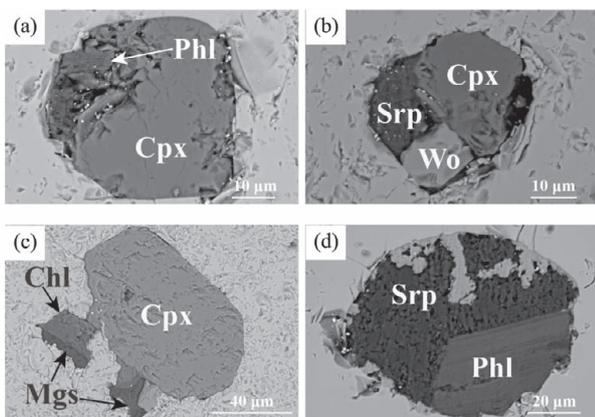


图 5 土耳其 Pozanti-Karsanti 蛇绿岩铬铁矿中不同类型复合型包裹体的背散射图像

Fig. 5 BSE images showing different types of composite inclusions in chromite in the Pozanti-Karsanti ophiolite in Turkey

a. 单斜辉石和金云母的复合型包裹体; b. 单斜辉石、硅灰石(Wo)和蛇纹石(Srp)的复合型包裹体; c. 单斜辉石、绿泥石(Chl)和菱镁矿(Mgs)的复合型包裹体; d. 金云母和蛇纹石的复合型包裹体

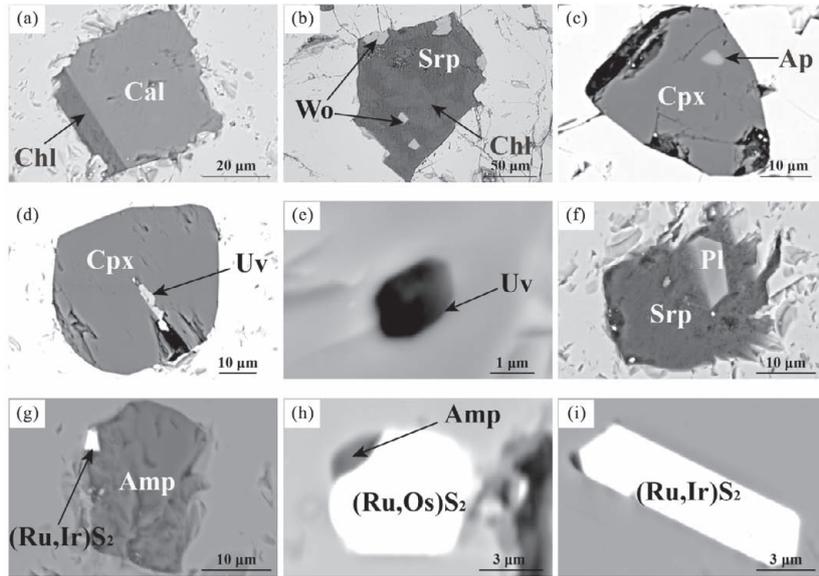


图 6 土耳其 Pozantı-Karsanti 蛇绿岩铬铁矿中不常见的矿物包裹体

Fig. 6 BSE images of uncommon mineral inclusions in chromite in the Pozantı-Karsanti ophiolite in Turkey

a. 方解石(Cal)和绿泥石的复合型包裹体; b. 硅灰石、绿泥石、蛇纹石的复合型包裹体; c. 磷灰石(Ap)和单斜辉石的复合型包裹体; d. 钙铬榴石(Uv)和单斜辉石的复合型包裹体; e. 钙铬榴石; f. 斜长石(Pl)和蛇纹石的复合型包裹体; g. 半自形角闪石和铂族元素硫化物的复合型包裹体; h. 铂族元素硫化物和他形角闪石的复合型包裹体; i. 柱状铂族元素硫化物

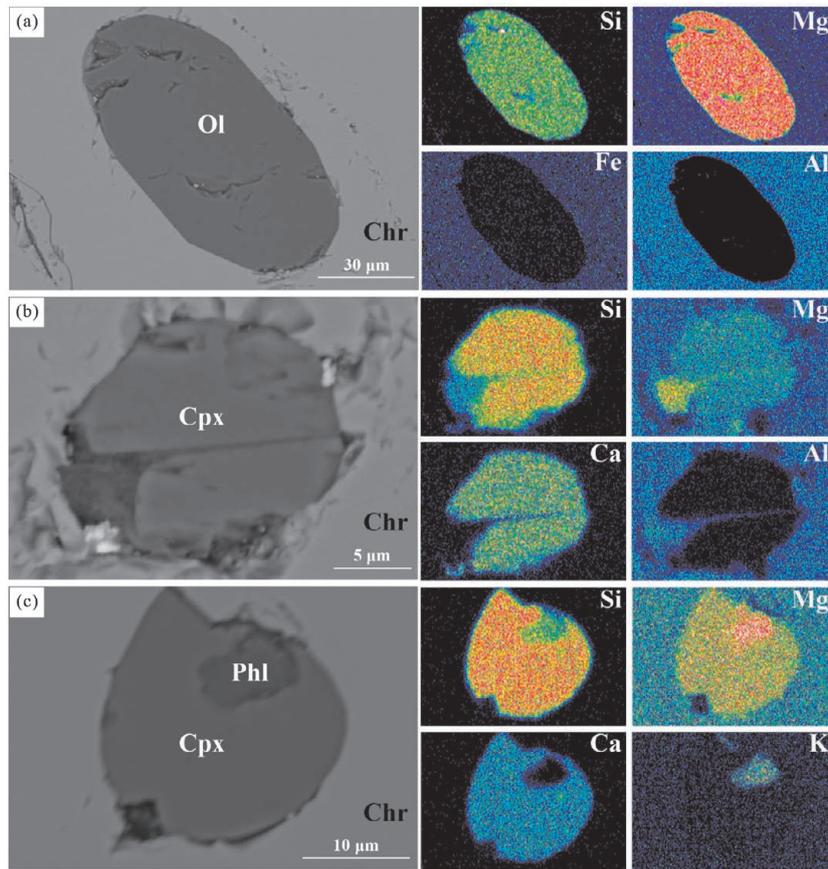


图 7 土耳其 Pozantı-Karsanti 蛇绿岩中铬铁矿的矿物包裹体背散射图和元素分布

Fig. 7 BSE images and elemental distribution mapping of mineral inclusions in chromite in the Pozantı-Karsanti ophiolite in Turkey

a. 橄榄石; b. 单斜辉石; c. 单斜辉石和金云母的复合型包裹体

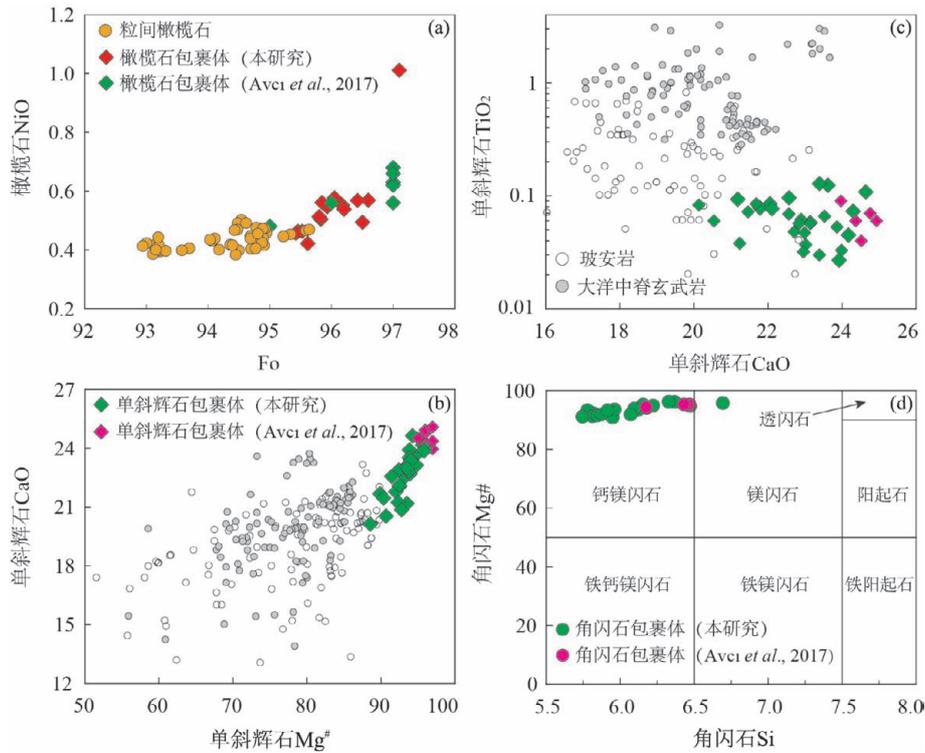


图 8 土耳其 Pozanti-Karsanti 蛇绿岩铬铁矿中橄榄石(a)、单斜辉石(b,c)和角闪石(d)包裹体的成分相关性图解

Fig. 8 Compositional correlation diagrams for olivine (a), clinopyroxene (b,c) and amphibole (d) inclusions in chromite in the Pozanti-Karsanti ophiolite in Turkey

玻安岩和大洋中脊玄武岩数据来自 GEOROC, <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/Start.asp>

4 讨论

4.1 矿物包裹体所揭示的铬铁矿母岩浆成分特征

蛇绿岩从形成到就位的过程十分复杂,不同期次的岩浆活动、变质作用和流体作用导致蛇绿岩中普遍存在矿物蚀变,如橄榄石蚀变为蛇纹石、辉石蚀变为角闪石. 土耳其 Pozanti-Karsanti 蛇绿岩铬铁矿的矿物包裹体靠近裂隙的地方多发生蚀变,远离裂隙的中心位置比较新鲜且与寄主铬铁矿之间的界线分明(图 9a~9d). 本次研究以铬铁矿中心未蚀变的矿物包裹体为研究对象,排除后期蚀变可能,保证矿物包裹体为母岩浆结晶的产物.

目前,诸多研究者在世界各地的蛇绿岩(如罗布莎、Ray-Iz、Masquard、Wadi Hilti、Kempirsai、萨尔托海、Semial、印度-缅甸蛇绿岩带)铬铁矿中发现了多种矿物包裹体,最常见的为角闪石、单斜辉石、橄榄石、云母(包括钠云母和钾云母)等硅酸盐矿物包裹体(Borisova *et al.*, 2012; 田亚洲等, 2015; Arai and Miura, 2016; Maibam *et al.*, 2017),各种铂族元素矿物(Melcher *et al.*, 1997; 白文吉等, 2004; Arai and Miura, 2016; 郭国林等, 2016)、贱

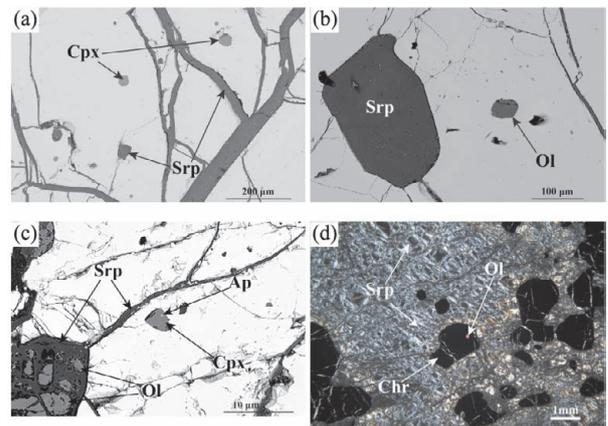


图 9 土耳其 Pozanti-Karsanti 蛇绿岩中铬铁矿的矿物包裹体特征

Fig. 9 Occurrence of inclusions in chromite in the Pozanti-Karsanti ophiolite in Turkey

a. 新鲜的单斜辉石和蚀变的蛇纹石; b. 新鲜的橄榄石和蚀变蛇纹石; c. 单斜辉石和磷灰石的复合型包裹体; d. 新鲜的橄榄石包裹体

金属硫化物(如黄铁矿、针镍矿、希兹硫镍矿, Melcher *et al.*, 1997; Borisova *et al.*, 2012; Maibam *et al.*, 2017)和壳源矿物(锆石、长石、金红石、榍石等)等矿物包裹体也较常出现(Melcher *et al.*,

1997; Robison *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2015a, 2015b; Maibam *et al.*, 2017), 部分蛇绿岩(如 Kempirsai 蛇绿岩) 铬铁矿中还发现流体包裹体(Melcher *et al.*, 1997). 学者还在多地蛇绿岩中发现有超高压和超还原矿物, 如金刚石、碳硅石和柯石英等(Yang *et al.*, 2014; Robinson *et al.*, 2015; Lian *et al.*, 2017b), 但这些异常矿物多为大量矿石分选得出而非原位的矿物包裹体, 故不能准确反映铬铁矿的母岩浆性质和结晶时的物理化学条件. 然而, 原位包裹体同时或先于寄主矿物结晶, 故其能很好地记录铬铁矿结晶时的物理化学条件, 并能够反映母岩浆的性质(Melcher *et al.*, 1997). 俯冲的新鲜或蚀变洋壳脱水产生了富水的母岩浆(Schiano *et al.*, 1997; Ahmed *et al.*, 2006), 从而结晶角闪石、云母等含水矿物包裹体, 同时水的加入导致亏损的方辉橄榄岩进一步部分熔融产生富 Mg 的熔体, 进而结晶出高 Mg 的橄榄石、单斜辉石和角闪石. 此外, 在高氧逸度环境中, 岩浆体系中的水分有利于结晶形成大量铬铁矿(Ford *et al.*, 1972; Matveev and Ballhaus, 2002; Feig *et al.*, 2006; Borisova *et al.*, 2012). 土耳其 Pozantı-Karsantı 蛇绿岩铬铁矿中高 Fo(95.4~97.1) 橄榄石、高 Mg[#](92.0~99.9) 单斜辉石、菱镁矿和含水硅酸盐矿物金云母、角闪石等包裹体的发现, 表明铬铁矿的母岩浆具有“高 Mg、富水、氧化”的性质. 尽管与铬铁矿的 Fe-Mg 交换也会使硅酸盐矿物的 Mg[#] 升高(Arai, 1980; Melcher *et al.*, 1997; Bai *et al.*, 2017), 但笔者近期的模拟工作(Xiao *et al.*, 2016) 表明要达到如附表 2 中高的 Mg[#], 那硅酸盐矿物最初的 Mg[#] 应高于正常玄武质岩浆结晶矿物的 Mg[#].

值得注意的是, 土耳其 Pozantı-Karsantı 蛇绿岩铬铁矿中发现方解石、硅灰石、钙铬榴石、磷灰石等富 Ca 矿物包裹体, 其中, 方解石和硅灰石的发现在铬铁矿研究中尚属首例, 磷灰石和钙铬榴石在哈萨克斯坦 Kempirsai 蛇绿岩、乌拉尔 Ray-Iz 蛇绿岩和罗布莎蛇绿岩中也有发现(Melcher *et al.*, 1997; Robinson *et al.*, 2015). 富 Ca 矿物包裹体多与硅酸盐矿物共生(图 6), 产出位置远离铬铁矿表面的裂隙, 可排除后期蚀变矿物的可能性, 揭示结晶铬铁矿的母岩浆具明显的富 Ca 特征. 此外, 单斜辉石包裹体的成分相关性图解显示其相对玻安岩和大洋中脊玄武岩的单斜辉石明显富 Ca(图 8b~8c), 角闪石包裹体的钙镁闪石成分特征(图 8d) 也从侧面反映了铬铁矿母岩浆的富 Ca 特征. 除土耳其 Pozantı-Karsantı

铬铁矿母岩浆显示富 Ca 特征外, 阿曼蛇绿岩高 Cr 铬铁矿的母岩浆也表现高 Ca 特征(Rollinson, 2008).

4.2 富 Ca 母岩浆中 Ca 的可能来源及其在铬铁矿成矿中的作用

4.2.1 Ca 的来源

土耳其 Pozantı-Karsantı 蛇绿岩铬铁矿中高 Ca 矿物包裹体的发现和其他硅酸盐矿物包裹体的高 CaO 含量, 均揭示了结晶铬铁矿的母岩浆具有富 Ca 特征, 其可能的来源有: (1) 洋内俯冲的构造环境中, 随着板块的持续俯冲, 在 120~160 km 处岩石发生变质作用(主要是榴辉岩相), 使得俯冲板块密度增加导致板块断裂, 板块断裂处软流圈地幔上涌发生减压熔融, 并有俯冲物质参与而形成钙碱性岩浆(Zhou *et al.*, 2014; Lian *et al.*, 2017a, 2017b); (2) 初始俯冲阶段, 俯冲板块的撕裂为软流圈地幔上涌提供了通道, 使得软流圈地幔在拉张的构造环境中发生减压重融并产生钙碱性岩浆(Robinson *et al.*, 2015); (3) 洋内俯冲起始, 板块的断裂导致软流圈地幔上涌, 其产生的热量使得俯冲板块发生部分熔融. 新鲜或蚀变洋壳、海沟处刮擦带入的远洋沉积物(如高岭土等黏土矿物)和俯冲板块中台地碳酸盐岩的部分熔融产生富水的钙碱性熔体(Su *et al.*, 2018).

对土耳其 Pozantı-Karsantı 蛇绿岩铬铁矿 Cr[#] 和 TiO₂ 的成分投图(图 3b) 显示, 只有部分铬铁矿落入玻安岩区域内, 不同岩性(方辉橄榄岩、纯橄岩、异剥橄榄岩、铬铁岩)的橄榄石 Li 同位素研究结果表明熔体的性质主要在 OIB、不成熟岛弧和成熟岛弧之间变化(Su *et al.*, 2018), 这些特征均表明富 Ca 的铬铁矿母岩浆更可能与初始俯冲的部分熔融有关. Pozantı-Karsantı 蛇绿岩北部和东部大量分布的同时期灰岩可能有部分参与了俯冲过程, 或者直接加入岩浆源区而被结晶的铬铁矿所包裹而出现方解石和菱镁矿的包裹体, 或者发生熔融以熔体形式加入岩浆源区, 从而为铬铁矿母岩浆直接提供了富 Ca 物质. 另一方面, 地幔橄榄岩或辉石岩中的单斜辉石也很有可能是 Ca 的来源之一. 对这一问题的厘定尚需进一步的同位素研究工作.

4.2.2 Ca 在铬铁矿成矿中的作用

结晶铬铁矿的高 Mg、富 Si、以及含水的高氧逸度镁铁质熔体中 Ca 的加入对铬铁矿成矿有重要作用, 主要体现在以下几个方面: (1) 硅酸盐熔体中 CaO 含量的升高利于 Cr³⁺ 在熔体中更加稳定(Berry *et al.*, 2006), 从而保证母岩浆中富 Ca 矿物(如方解石、硅灰石) 结晶时 Cr³⁺ 仍能稳定存在. Berry *et al.* (2006) 通过研

究不同熔体成分对 $\text{Cr}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$ 比值的影响发现,熔体 CaO 的含量与 $\log \gamma^{\#} \text{Cr}^{3+} \text{O}_{1.5}$ ($\text{Cr}^{3+} \text{O}_{1.5}$ 活度系数的对数) 之间呈明显的负相关,随着 CaO 含量的增加, $\log \gamma^{\#} \text{Cr}^{3+} \text{O}_{1.5}$ 逐渐降低,即 Cr^{3+} 在熔体中的稳定性增加. 然而,由于熔体中高 MgO 的影响,二者并未呈现线性关系. 同时, Berry *et al.* (2006) 的实验还表明熔体中 MgO 含量的增加也有利于 Cr^{3+} 在熔体中以八次配位的形式存在,该结论与铬铁矿母岩浆的高 Mg 特征相一致;(2) Ca 在硅酸盐熔体中主要以八次配位的形式存在,而在富 Ca 矿物中配位数则较低(如方解石中为六次配位),根据鲍林原则,在离子电价一定的情况下,其配位数越高键强越弱,因此铬铁矿母岩浆中 Ca 的离子键容易遭到破坏,从而进入富 Ca 矿物中以更稳定的低次配位存在. 同时,随着富 Ca 矿物的结晶,熔体中 Cr 元素含量升高而稳定性降低,有利于大量铬铁矿的结晶和富集.

5 结论

土耳其 Pozantı-Karsantı 蛇绿岩中的铬铁矿含有多钟类型的矿物包裹体,包括不含水硅酸盐矿物包裹体、含水硅酸盐矿物包裹体、复合型矿物包裹体和非常见矿物包裹体. 包裹体大小不一、形态各异,可呈自形一半自形短柱状、包裹体粒状、他形港湾状等多种形态. 其中方解石和硅灰石是蛇绿岩铬铁矿中的首次报道. 这些富 Ca 矿物组合以及其成分特征指示铬铁矿母岩浆具有富 Mg、富 H_2O 和富 Ca 的性质. 结合橄榄石的 Li 同位素研究结果 (Su *et al.*, 2018) 和蛇绿岩的产出特征,笔者认为该蛇绿岩形成于初始俯冲的构造环境. 俯冲板片中的灰岩可能为铬铁矿母岩浆中 Ca 的来源. 硅酸盐熔体中的高 CaO 含量有利于熔体中 Cr 的富集及铬铁矿的大量结晶.

致谢:土耳其黑海技术大学 Ibrahim Uysal 对野外工作给予了大力支持,三位评审人对本文提出了非常有建设性的建议,在此一并表示感谢!

References

Ahmed, A. H., Hanghøj, K., Kelemen, P. B., et al., 2006. Osmium Isotope Systematics of the Proterozoic and Phanerozoic Ophiolitic Chromitites; In Situ Ion Probe Analysis of Primary Os-Rich PGM. *Earth and Planetary Science Letters*, 245(3-4): 777-791. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.021>

Arai, S., Okamura, H., Kadoshima, K., et al., 2010. Chemical Characteristics of Chromian Spinel in Plutonic Rocks: Implications for Deep Magma Processes and Discrimination of Tectonic Setting. *Island Arc*, 20(1): 125-137. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2010.00747.x>

Arai, S., 1980. Dunit-Harzburgite-Chromitite Complexes as Refractory Residue in the Sangun-Yamaguchi Zone, Western Japan. *Journal of Petrology*, 21(1): 141-165. <https://doi.org/10.1093/petrology/21.1.141>

Arai, S., 1994. Characterization of Spinel Peridotites by Olivine-Spinel Compositional Relationships: Review and Interpretation. *Chemical Geology*, 113(3-4): 191-204. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90066-3)

Arai, S., Kadoshima, K., Morishita, T., 2006. Widespread Arc-Related Melting in the Mantle Section of the Northern Oman Ophiolite as Inferred from Detrital Chromian Spinels. *Journal of the Geological Society*, 163(5): 869-879. <https://doi.org/10.1144/0016-76492005-057>

Arai, S., Miura, M., 2016. Formation and Modification of Chromitites in the Mantle. *Lithos*, 264: 277-295. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.08.039>

Avcı, E., Uysal, I., Akmaz, R. M., et al., 2017. Ophiolitic Chromitites from the Klzlyyüksek Area of the Pozantı-Karsantı Ophiolite (Adana, Southern Turkey): Implication for Crystallization from a Fractionated Boninitic Melt. *Ore Geology Reviews*, 90: 166-183. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.08.033>

Bai, W. J., Robinson, P. T., Fang, Q. S., et al., 2004. The Platinum Element and Base Metal Alloy of Ophiolitic Podiform Chromite from Luobusa, Southern Tibet. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(4): 385-396 (in Chinese).

Bai, Y., Su, B. X., Chen, C., et al., 2017. Base Metal Mineral Segregation and Fe-Mg Exchange Inducing Extreme Compositions of Olivine and Chromite from the Xiadong Alaskan-Type Complex in the Southern Part of the Central Asian Orogenic Belt. *Ore Geology Reviews*, 90: 184-192. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.023>

Bao, P. S., 2009. Further Discussion on the Genesis of Podiform Chromite Deposits in the Ophiolites—Questioning about the Rock/Melt Interaction Metallogeny. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1742-1761 (in Chinese with English abstract).

Bao, P. S., Wang, X. B., 1997. Metallogenic Model of the Aluminium-Type Podiform Chromite Deposits. *Acta Geo-*

- scientia Sinica; Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 18(1): 25–40 (in Chinese with English abstract).
- Berry, A. J., O'Neill, H. S. C., Scott, D. R., et al., 2006. The Effect of Composition on $\text{Cr}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$ in Silicate Melts. *American Mineralogist*, 91(11–12): 1901–1908. <https://doi.org/10.2138/am.2006.2097>
- Borisova, A. Y., Ceuleneer, G., Kamenetsky, V. S., et al., 2012. A New View on the Petrogenesis of the Oman Ophiolite Chromitites from Microanalyses of Chromite-Hosted Inclusions. *Journal of Petrology*, 53(12): 2411–2440. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egs054>
- Chen, C., Su, B. X., Uysal, I., et al., 2015. Iron Isotopic Constraints on the Origin of Peridotite and Chromitite in the Klzlldağ Ophiolite, Southern Turkey. *Chemical Geology*, 417(6): 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.10.001>
- Dilek, Y., Moores, E. M., Panayiotou, A., 1990. Regional Tectonics of the Eastern Mediterranean Ophiolites, Ophiolites, Oceanic, Crustal Analogues, Proceedings of the Symposium “Troodos 1987”, Geological Survey Department, Ministry of Agriculture and Natural Resources, 295–309.
- Feig, S. T., Koepke, J., Snow, J. E., 2006. Effect of Water on Tholeiitic Basalt Phase Equilibria: An Experimental Study under Oxidizing Conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(5): 611–638. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0123-2>
- Ford, C. E., Biggar, G. M., Humphries, D. J., et al., 1972. Role of Water in the Evolution of the Lunar Crust; An Experimental Study of Sample 14310; An Indication of Lunar Calc-Alkaline Volcanism. Proceedings of 3rd Lunar Scientific Conference. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 3: 207–229.
- Guo, G. L., Yang, J. S., Liu, X. D., et al., 2016. In Situ Research on PGM in Luobusa Ophiolitic Chromitites, Tibet: Implications for the Crystallization of the Chromite. *Acta Petrologica Sinica*, 32(12): 3673–3684 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Z., Yang, J. S., Zhu, Y. W., et al., 2015. The Discovery of Diamonds and Deep Mantle Minerals in Chromitites of Hegenshan Ophiolite, Inner Mongolia. *Geology in China*, 42(5): 1493–1514 (in Chinese with English abstract).
- Kamenetsky, V. S., 2001. Factors Controlling Chemistry of Magmatic Spinel: An Empirical Study of Associated Olivine, Cr-Spinel and Melt Inclusions from Primitive Rocks. *Journal of Petrology*, 42(4): 655–671. <https://doi.org/10.1093/ptrology/42.4.655>
- Lian, D. Y., Yang, J. S., Dilek, Y., et al., 2017a. Geochemical, Geochronological, and Sr-Nd Isotopic Constraints on the Origin of the Mafic Dikes from the Pozanti-Karsanti Ophiolite: Implications for Tectonic Evolution. *The Journal of Geology*, 125(2): 223–239. <https://doi.org/10.1086/690222>
- Lian, D. Y., Yang, J. S., Yildirm, D., et al., 2017b. Diamond, Moissanite and Other Unusual Minerals in Podiform Chromitites from the Pozanti-Karsanti Ophiolite, Southern Turkey: Implications for Deep Mantle Origin and Ultra-Reducing Conditions in Podiform Chromitite. *American Mineralogist*, 102: 1101–1113.
- Maibam, B., Foley, S., Luguët, A., et al., 2017. Characterization of Chromites, Chromite Hosted Inclusions of Silicates and Metal Alloys in Chromitites from the Indo-Myanmar Ophiolite Belt of Northeastern India. *Ore Geology Reviews*, 90: 260–273. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.05.032>
- Matveev, S., Ballhaus, C., 2002. Role of Water in the Origin of Podiform Chromitite Deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(1): 235–243. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00860-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00860-9)
- Melcher, F., Grum, W., Simon, G., et al., 1997. Petrogenesis of the Ophiolitic Giant Chromite Deposits of Kempirsai, Kazakhstan: A Study of Solid and Fluid Inclusions in Chromite. *Journal of Petrology*, 38(10): 1419–1458. <https://doi.org/10.1093/ptrology/38.10.1419>
- Pagé, P., Barnes, S. J., 2009. Using Trace Elements in Chromites to Constrain the Origin of Podiform Chromitites in the Thetford Mines Ophiolite, Quebec, Canada. *Economic Geology*, 104: 997–1018. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.7.997>
- Paktunc, A. D., 1990. Origin of Podiform Chromite Deposits by Multistage Melting, Melt Segregation and Magma Mixing in the Upper Mantle. *Ore Geology Reviews*, 5(3): 211–222. [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(90\)90011-b](https://doi.org/10.1016/0169-1368(90)90011-b)
- Parlak, O., Höck, V., Delaloye, M., 2002. The Supra-Subduction Zone Pozanti-Karsanti Ophiolite, Southern Turkey: Evidence for High-Pressure Crystal Fractionation of Ultramafic Cumulates. *Lithos*, 65(1–2): 205–224. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(02\)00166-4](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00166-4)
- Parlak, O., Rızaoğlu, T., Bağcı, U., et al., 2009. Tectonic Significance of the Geochemistry and Petrology of Ophiolites in Southeast Anatolia, Turkey. *Tectonophysics*, 473(1–2): 173–187. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.08.002>
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Ele-

- ment Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956—983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Polat, A., Casey, J. F., 1995. A Structural Record of the Emplacement of the Pozanti-Karsanti Ophiolite onto the Mendere-Taurus Block in the Late Cretaceous, Eastern Taurides, Turkey. *Journal of Structural Geology*, 17(12): 1673—1688. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(95\)00061-h](https://doi.org/10.1016/0191-8141(95)00061-h)
- Robertson, A. H. F., 2002. Overview of the Genesis and Emplacement of Mesozoic Ophiolites in the Eastern Mediterranean Tethyan Region. *Lithos*, 65(1—2): 1—67. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(02\)00160-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(02)00160-3)
- Robinson, P. T., Trumbull, R. B., Schmitt, A., et al., 2015. The Origin and Significance of Crustal Minerals in Ophiolitic Chromitites and Peridotites. *Gondwana Research*, 27(2): 486—506. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.06.003>
- Rollinson, H., 2005. Chromite in the Mantle Section of the Oman Ophiolite: A New Genetic Model. *The Island Arc*, 14(4): 542—550. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2005.00482.x>
- Rollinson, H., 2008. The Geochemistry of Mantle Chromitites from the Northern Part of the Oman Ophiolite: Inferred Parental Melt Compositions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 156(3): 273—288. <https://doi.org/10.1007/s00410-008-0284-2>
- Rollinson, H., Adetunji, J., 2015. The Geochemistry and Oxidation State of Podiform Chromitites from the Mantle Section of the Oman Ophiolite: A Review. *Gondwana Research*, 27(2): 543—554. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.07.013>
- Saka, S., Uysal, I., Akmaz, R. M., et al., 2014. The Effects of Partial Melting, Melt-Mantle Interaction and Fractionation on Ophiolite Generation: Constraints from the Late Cretaceous Pozanti-Karsanti Ophiolite, Southern Turkey. *Lithos*, 202—203: 300—316. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.05.027>
- Schiano, P., Clocchiatti, R., Lorand, J. P., et al., 1997. Primitive Basaltic Melts Included in Podiform Chromites from the Oman Ophiolite. *Earth and Planetary Science Letters*, 146(3—4): 489—497. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(96\)00254-3](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(96)00254-3)
- Su, B. X., Teng, F. Z., Hu, Y., et al., 2015. Iron and Magnesium Isotope Fractionation in Oceanic Lithosphere and Sub-Arc Mantle: Perspectives from Ophiolites. *Earth and Planetary Science Letters*, 430: 523—532. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.08.020>
- Su, B. X., Zhou, M. F., Robinson, P. T., 2016. Extremely Large Fractionation of Li Isotopes in a Chromitite-Bearing Mantle Sequence. *Scientific Reports*, 6: 22370. <https://doi.org/10.1038/srep22370>
- Su, B. X., Chen, C., Pang, K. N., et al., 2018. Various Melt Penetration in Oceanic Lithosphere; Li Isotope Records in Pozanti-Karsanti Ophiolite in Southern Turkey. *Journal of Petrology*. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy023>.
- Tamura, A. S., 2005. Unmixed Spinel in Chromitite from the Iwanai-Dake Peridotite Complex, Hokkaido, Japan: A Reaction between Peridotite and Highly Oxidized Magma in the Mantle Wedge. *American Mineralogist*, 90: 473—480. <https://doi.org/10.2138/am.2005.1570>
- Tian, Y. Z., Yang, J. S., Zhang, Z. M., et al., 2015. Discovery and Implication of Unusual Mineral Group from Sarthay High-Al Chromitites, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12): 3650—3662 (in Chinese with English abstract).
- Uysal, I., Kaliwoda, M., Karsli, O., et al., 2007. Compositional Variations as a Result of Partial Melting and Melt-Peridotite Interaction in an Upper Mantle Section from the Ortaca Area, Southwestern Turkey. *The Canadian Mineralogist*, 45(6): 1471—1493. <https://doi.org/10.3749/canmin.45.6.1471>
- Wang, X. B., Bao, P. S., 1987. The Genesis of Podiform Chromitite Deposits—A Case Study of the Luobusa Ophiolitic Chromite Deposit, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, (2): 167—181 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. B., Hao, Z. G., Bao, P. S., et al., 1992. Genetic Types and Some Metallogenic Characteristics of Chromite Deposits in Ophiolites within Phanerozoic Orogenic Belts of China. *Mineral Deposits*, 11(1): 21—34 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, Y., Teng, F. Z., Su, B. X., et al., 2016. Iron and Magnesium Isotopic Constraints on the Origin of Chemical Heterogeneity in Podiform Chromitite from the Luobusa Ophiolite, Tibet. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(3): 940—953. <https://doi.org/10.1002/2015gc006223>
- Xiong, F. H., Yang, J. S., Robinson, P. T., et al., 2015. Origin of Podiform Chromitite, a New Model Based on the Luobusa Ophiolite, Tibet. *Gondwana Research*, 27(2): 525—542. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.04.008>
- Yamamoto, S., Komiya, T., Hirose, K., et al., 2009. Coesite and Clinopyroxene Exsolution Lamellae in Chromites: In-Situ Ultrahigh-Pressure Evidence from Podiform Chromitites in the Luobusa Ophiolite, Southern Tibet. *Lithos*, 109(3—4): 314—322. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.05.011>

- 1016/j. lithos. 2008. 05. 003
- Yang, J. S., Meng, F. C., Xu X. Z., et al., 2015a. Diamonds, Native Elements and Metal Alloys from Chromitites of the Ray-Iz Ophiolite of the Polar Urals. *Gondwana Research*, 27(2): 459–485. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.07.004>
- Yang, J. S., Robinson, P. T., Dilek, Y., 2015b. Diamond-Bearing Ophiolites and Their Geological Occurrence. *Episodes*, 38(4): 344–364. <https://doi.org/10.18814/epigsi/2015/v38i4/82430>
- Yang, J. S., Robinson, P. T., Dilek, Y., 2014. Diamonds in Ophiolites. *Elements*, 10(2): 127–130. <https://doi.org/10.2113/gselements.10.2.127>
- Zhou, M. F., Robinson, P. T., Bai, W. J., 1994. Formation of Podiform Chromitites by Melt/Rock Interaction in the Upper Mantle. *Mineralium Deposita*, 29(1): 98–101. <https://doi.org/10.1007/bf03326400>
- Zhou, M. F., Robinson, P. T., Malpas, J., et al., 1996. Podiform Chromitites in the Luobusa Ophiolite (Southern Tibet): Implications for Melt-Rock Interaction and Chromite Segregation in the Upper Mantle. *Journal of Petrology*, 37(1): 3–21. <https://doi.org/10.1093/petrology/37.1.3>
- Zhou, M. F., Robinson, P. T., Malpas, J., et al., 2005. REE and PGE Geochemical Constraints on the Formation of Dunites in the Luobusa Ophiolite, Southern Tibet. *Journal of Petrology*, 46(3): 615–639. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh091>
- Zhou, M. F., Robinson, P. T., Su, B. X., et al., 2014. Compositions of Chromite, Associated Minerals, and Parental Magmas of Podiform Chromite Deposits; The Role of Slab Contamination of Asthenospheric Melts in Suprasubduction Zone Environments. *Gondwana Research*, 26(1): 262–283. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.12.011>

附中文参考文献

- 白文吉, Robinson, P. T., 方青松, 等, 2004. 藏南罗布莎蛇绿岩豆荚状铬铁矿中的铂族元素和贱金属合金. *地球学报*, 25(4): 385–396.
- 鲍佩声, 2009. 再论蛇绿岩中豆荚状铬铁矿的成因—质疑岩石/熔体反应成矿说. *地质通报*, 28(12): 1742–1761.
- 鲍佩声, 王希斌, 1997. 富铝型豆荚状铬铁矿床的成矿模式. *地球学报*, 18(1): 25–40.
- 郭国林, 杨经绥, 刘晓东, 等, 2016. 西藏罗布莎铬铁矿中的原位铂族矿物研究: 铬铁矿结晶环境的指示. *岩石学报*, 32(12): 3673–3684.
- 黄竺, 杨经绥, 朱永旺, 等, 2015. 内蒙古贺根山蛇绿岩的铬铁矿中发现金刚石等深部地幔矿物. *中国地质*, 42(5): 1493–1514.
- 田亚洲, 杨经绥, 张仲明, 等, 2015. 新疆萨尔托海高铝铬铁矿中异常矿物群的发现及意义. *岩石学报*, 31(12): 3650–3662.
- 王希斌, 鲍佩声, 1987. 豆荚状铬铁矿床的成因——以罗布莎为例. *地质学报*, (2): 167–181.
- 王希斌, 郝梓国, 鲍佩声, 等, 1992. 中国造山带蛇绿岩中铬铁矿床的成因类型及其成矿的若干特征. *矿床地质*, 11(1): 21–34.

附表 1 土耳其 Pozantı-Karsantı 蛇绿岩中铬铁岩的代表性寄主铬铁矿和粒间橄榄石的主要元素成分

Appendix table 1 Representative major element data of chromite and interstitial olivine in chromitite in the Pozantı-Karsantı ophiolite in Turkey

样品编号	岩石类型	矿物类型	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	Total	Mg#	Cr#
PK 14-01	稀疏浸染状铬铁岩	铬铁矿	0.36	0.28	16.2	47.0	22.9	0.24	12.2	0.10	0.23	0.04	0.10	99.7	58.7	66.0
PK 14-27	稀疏浸染状铬铁岩	铬铁矿	0.08	0.20	12.3	58.1	15.9	0.25	13.8	0.03	0.00	0.00	0.11	100.8	65.1	76.0
PK 14-46	稀疏浸染状铬铁岩	橄榄石	41.8	0.00	0.00	0.02	5.30	0.07	51.5	0.04	0.00	0.00	0.50	99.3	94.6	
		铬铁矿	0.04	0.12	10.8	55.6	18.2	0.22	11.0	0.01	0.02	0.00	0.03	96.1	55.8	77.5
PK 14-54	稀疏浸染状铬铁岩	橄榄石	42.0	0.05	0.00	0.03	6.82	0.09	51.3	0.05	0.00	0.00	0.38	100.7	93.1	
		铬铁矿	0.04	0.21	11.4	53.2	18.7	0.24	11.7	0.02	0.00	0.01	0.05	95.5	58.8	75.8
PL 14-57	稀疏浸染状铬铁岩	橄榄石	41.8	0.00	0.02	0.02	6.19	0.12	51.2	0.08	0.00	0.00	0.40	99.8	93.7	
		铬铁矿	0.07	0.20	10.3	59.2	18.0	0.28	12.9	0.03	0.01	0.00	0.09	101.1	61.9	79.4
PK 14-41	豆荚状铬铁岩	橄榄石	42.4	0.00	0.01	0.05	5.46	0.08	52.7	0.10	0.00	0.00	0.40	101.2	94.5	
		铬铁矿	0.03	0.15	11.0	55.3	16.7	0.23	12.4	0.03	0.01	0.00	0.05	95.9	62.1	77.1
PK 14-25	稠密浸染状铬铁岩	橄榄石	42.1	0.00	0.00	0.01	5.31	0.08	51.9	0.02	0.00	0.00	0.49	99.9	94.6	
		铬铁矿	0.04	0.09	17.4	52.2	14.8	0.22	14.7	0.00	0.00	0.00	0.12	99.5	68.7	66.8
PK 14-64	稠密浸染状铬铁岩	橄榄石	41.4	0.00	0.00	0.06	5.13	0.09	51.6	0.03	0.01	0.00	0.44	98.7	94.8	
		铬铁矿	0.02	0.15	11.2	59.9	16.1	0.27	13.3	0.00	0.00	0.00	0.06	100.9	63.3	78.2
PK 14-74	稠密浸染状铬铁岩	铬铁矿	0.04	0.16	8.98	59.3	18.7	0.32	12.4	0.00	0.00	0.00	0.07	99.9	60.6	81.6
PK 14-02	块状铬铁岩	橄榄石	42.2	0.02	0.00	0.04	5.72	0.10	52.0	0.14	0.00	0.02	0.40	100.6	94.2	
		铬铁矿	0.02	0.31	17.9	49.1	16.6	0.14	16.0	0.00	0.00	0.00	0.14	100.2	72.7	64.8
PK 14-03	块状铬铁岩	铬铁矿	0.01	0.21	13.4	56.5	15.8	0.19	14.6	0.02	0.01	0.00	0.13	100.9	68.5	73.9
PK 14-09	块状铬铁岩	铬铁矿	0.06	0.20	11.5	57.2	15.4	0.20	14.1	0.00	0.03	0.01	0.05	98.8	68.0	77.0
PK 14-23	块状铬铁岩	铬铁矿	0.03	0.11	12.7	54.9	13.4	0.26	14.4	0.03	0.00	0.01	0.12	95.9	71.0	74.4
PK 14-56	块状铬铁岩	铬铁矿	0.02	0.32	15.3	51.2	19.2	0.22	14.4	0.02	0.00	0.01	0.12	100.8	66.7	69.2
PK 14-52	条带状铬铁岩	铬铁矿	0.04	0.17	10.4	54.9	16.2	0.18	13.1	0.02	0.00	0.00	0.05	95.1	66.0	78.0
		橄榄石	0.19	0.18	10.2	58.2	16.1	0.30	13.5	0.06	0.05	0.03	0.09	98.9	66.1	77.7
PK 14-60	条带状铬铁岩	铬铁矿	0.03	0.21	11.3	58.9	16.1	0.29	12.8	0.01	0.03	0.01	0.10	99.8	61.9	86.8
PK 14-66	条带状铬铁岩	橄榄石	41.3	0.00	0.19	1.85	4.87	0.10	51.1	0.09	0.00	0.00	0.41	99.9	94.9	
		铬铁矿	0.06	0.19	10.6	59.1	18.2	0.20	13.0	0.03	0.00	0.00	0.06	101.4	62.0	79.0
PK 14-67	条带状铬铁岩	铬铁矿	0.04	0.16	10.3	59.0	16.5	0.20	13.3	0.03	0.01	0.00	0.07	99.6	64.5	79.3
PK 14-69	条带状铬铁岩	铬铁矿	0.08	0.12	10.8	55.7	21.0	0.23	12.1	0.02	0.02	0.00	0.04	100.0	58.5	77.6
PK 14-75	条带状铬铁岩	铬铁矿	0.06	0.17	10.0	56.1	15.3	0.22	13.5	0.03	0.03	0.00	0.08	95.5	69.0	79.0
		橄榄石	41.3	0.01	0.00	0.01	4.72	0.07	52.4	0.09	0.00	0.01	0.44	99.0	95.2	

注: Mg# = 100 × [Mg / (Mg + Fe²⁺)]; Cr# = 100 × Cr / (Cr + AD).

附表 2 土耳其 Pozanti-Karsanti 蛇绿岩铬铁矿中的矿物包裹体主量元素分析结果

Appendix table 2 Major element compositions of mineral inclusions in chromite in the Pozanti-Karsanti ophiolite in Turkey

包裹体类型	样品编号	岩石类型	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	Total	Mg#	
橄榄石	PK 14-74	条带状铬铁矿	39.3	0.02	0.55	5.13	4.42	0.09	51.6	0.10	0.00	0.00	0.46	101.7	95.5	
	PK 14-31	块状铬铁矿	41.6	0.01	0.12	1.45	2.88	0.07	53.5	0.04	0.03	0.01	1.01	100.7	97.1	
	PK 14-52	条带状铬铁矿	40.5	0.00	0.16	1.62	3.48	0.06	53.3	0.08	0.00	0.02	0.49	99.7	96.5	
单斜辉石	PK 14-60	条带状铬铁矿	39.5	0.00	0.20	2.61	3.75	0.05	52.4	0.11	0.00	0.00	0.55	99.2	96.2	
			39.4	0.00	0.45	3.56	3.90	0.07	52.6	0.00	0.00	0.00	0.58	100.7	96.0	
	38.6	0.00	0.42	4.02	3.85	0.07	50.4	0.00	0.00	0.10	0.00	0.55	98.0	95.9		
	40.6	0.05	0.34	2.86	4.06	0.04	52.1	0.04	0.00	0.04	0.00	0.56	100.7	95.8		
	41.5	0.00	0.04	0.73	4.06	0.05	51.9	0.08	0.04	0.06	0.02	0.50	98.8	95.8		
	41.4	0.01	0.04	0.77	4.09	0.07	51.8	0.03	0.03	0.02	0.51	98.8	95.8			
PK 14-67	条带状铬铁矿	40.1	0.02	0.22	1.99	4.42	0.06	52.4	0.03	0.00	0.01	0.01	0.46	99.7	95.5	
		41.6	0.00	0.01	0.29	4.53	0.09	52.5	0.04	0.00	0.00	0.00	0.46	99.5	95.4	
PK 14-75	条带状铬铁矿	40.9	0.02	0.39	3.18	3.65	0.08	51.8	0.12	0.12	0.01	0.01	0.54	100.7	96.2	
		39.8	0.02	0.57	4.25	4.07	0.07	49.8	0.25	0.00	0.01	0.01	0.42	99.2	95.6	
单斜辉石	PK 14-01	稀疏浸染状铬铁矿	40.3	0.00	0.06	0.61	3.37	0.04	53.7	0.09	0.00	0.00	0.00	0.57	98.7	96.6
			38.5	0.00	0.35	3.25	3.52	0.07	53.2	0.06	0.00	0.01	0.01	0.57	99.6	96.4
	PK 14-57	稀疏浸染状铬铁矿	54.2	0.11	1.26	1.08	1.77	0.04	16.4	24.6	0.33	0.03	0.03	0.05	99.9	94.3
			51.2	0.04	1.15	4.97	2.18	0.04	17.2	23.0	0.27	0.01	0.13	0.01	100.1	99.8
	PK 14-25	稠密浸染状铬铁矿	45.4	0.08	2.19	11.1	3.93	0.08	17.1	20.1	0.21	0.21	0.13	0.05	100.4	99.6
			50.4	0.06	1.24	5.74	2.51	0.04	17.2	22.9	0.23	0.00	0.00	0.06	100.4	99.8
			48.1	0.09	1.60	9.19	3.43	0.03	17.1	21.7	0.25	0.00	0.00	0.04	101.6	99.9
单斜辉石	PK 14-25	稠密浸染状铬铁矿	47.7	0.07	1.55	9.12	3.30	0.06	17.3	21.5	0.23	0.01	0.02	100.9	99.7	
			52.2	0.05	0.98	3.93	1.91	0.05	16.7	22.7	0.27	0.00	0.00	0.08	98.9	99.8
	PK 14-74	稠密浸染状铬铁矿	51.4	0.03	1.70	3.82	1.92	0.04	17.4	23.0	0.09	0.01	0.01	0.06	99.4	99.8
			53.2	0.03	1.10	1.40	1.32	0.02	17.5	24.0	0.07	0.00	0.00	0.01	98.6	99.9
	PK 14-02	块状铬铁矿	51.7	0.06	1.75	4.11	2.04	0.06	17.3	22.8	0.11	0.01	0.01	0.04	100.0	99.8
			49.7	0.04	2.08	6.51	2.59	0.06	17.5	21.2	0.19	0.00	0.00	0.05	100.0	99.7
	PK 14-03	块状铬铁矿	46.7	0.06	2.91	9.34	3.11	0.06	17.0	20.5	0.12	0.00	0.00	0.06	99.8	99.7
			50.0	0.07	1.16	7.37	2.88	0.09	17.3	22.6	0.23	0.00	0.00	0.04	101.8	99.6
	PK 14-09	块状铬铁矿	52.5	0.06	0.96	4.26	1.75	0.03	17.9	23.1	0.22	0.03	0.03	0.03	100.8	99.9
			52.8	0.07	0.82	3.83	2.06	0.05	17.6	23.5	0.29	0.01	0.01	0.04	101.1	99.8
PK 14-03	块状铬铁矿	52.1	0.09	1.49	3.13	2.25	0.05	18.3	21.2	0.62	0.62	0.07	0.09	99.4	93.5	
		54.0	0.12	1.48	1.99	1.73	0.05	17.2	23.6	0.43	0.00	0.00	0.02	100.6	94.6	
PK 14-09	块状铬铁矿	53.8	0.13	1.72	1.69	2.00	0.08	17.7	23.4	0.43	0.00	0.00	0.04	100.9	94.0	
		50.2	0.09	7.77	2.54	1.40	0.01	21.4	12.4	2.75	0.14	0.14	0.16	99.1	96.4	
PK 14-28	条带状铬铁矿	52.2	0.07	1.07	2.62	1.36	0.04	17.6	24.3	0.20	0.02	0.02	0.05	99.5	95.8	
		51.5	0.05	1.18	2.83	1.39	0.03	17.2	24.2	0.19	0.00	0.00	0.08	98.7	95.7	
PK 14-52	条带状铬铁矿	48.9	0.09	1.64	7.78	2.55	0.08	17.7	22.1	0.15	0.00	0.00	0.07	100.9	92.5	
		50.2	0.10	1.42	6.45	2.25	0.03	17.6	22.6	0.18	0.00	0.00	0.05	100.8	93.3	
PK 14-52	条带状铬铁矿	48.6	0.08	1.71	8.78	2.74	0.08	17.7	21.8	0.17	0.00	0.00	0.05	101.7	92.0	
		51.4	0.06	1.21	5.14	2.12	0.05	17.5	23.1	0.15	0.03	0.03	0.02	100.7	93.6	
PK 14-52	条带状铬铁矿	50.0	0.00	1.84	7.74	2.51	0.05	18.2	20.9	0.25	0.00	0.00	0.06	101.4	99.8	
		52.4	0.03	1.01	4.81	1.98	0.05	17.5	23.4	0.32	0.05	0.05	0.04	101.5	99.8	
			52.0	0.05	1.13	5.18	2.16	0.06	17.6	23.0	0.33	0.00	0.04	101.5	99.8	

续表 2

包裹体类型	样品编号	岩石类型	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	Total	Mg#
角闪石	PK 14-69	条带状铬铁岩	53.3	0.05	0.83	2.29	1.33	0.06	17.1	23.9	0.49	0.04	0.06	99.5	99.8
	PK 14-75	条带状铬铁岩	53.2	0.03	1.02	3.13	2.03	0.03	17.4	23.9	0.25	0.02	0.06	101.1	93.9
	PK 14-57	稀疏浸染状铬铁岩	50.0	0.08	1.47	7.19	2.53	0.04	17.5	22.1	0.33	0.03	0.04	101.3	92.5
	PK 14-25	稠密浸染状铬铁岩	44.0	0.34	10.7	3.96	2.27	0.05	19.2	12.7	3.54	0.13	0.09	96.9	93.8
	PK 14-25	稠密浸染状铬铁岩	45.0	0.31	9.7	3.41	2.12	0.00	20.6	12.2	3.48	0.08	0.11	97.1	94.5
	PK 14-64	稠密浸染状铬铁岩	44.1	0.22	10.5	6.20	2.36	0.02	19.3	12.6	2.81	0.13	0.11	98.4	93.6
	PK 14-64	稠密浸染状铬铁岩	43.3	0.16	9.04	8.25	3.29	0.03	20.0	10.7	2.17	0.11	0.15	97.3	91.5
	PK 14-64	稠密浸染状铬铁岩	40.8	0.21	10.7	8.54	3.38	0.05	19.1	11.0	2.62	0.16	0.12	96.6	91.0
	PK 14-02	块状铬铁岩	41.3	0.24	9.24	9.03	3.51	0.07	18.9	10.5	2.07	0.07	0.12	95.0	90.6
	PK 14-02	块状铬铁岩	47.1	0.39	7.86	5.53	2.11	0.04	20.2	11.9	2.96	0.06	0.09	98.2	94.5
金云母	PK 14-03	块状铬铁岩	41.6	0.49	9.09	10.9	3.32	0.06	19.3	10.7	2.52	0.42	0.13	98.5	91.2
	PK 14-03	块状铬铁岩	41.3	0.54	9.66	11.3	3.50	0.05	19.5	10.8	2.68	0.40	0.12	99.8	90.8
	PK 14-56	块状铬铁岩	37.4	0.45	12.9	9.63	4.19	0.07	19.1	10.9	3.27	0.14	0.19	98.2	89.1
	PK 14-52	条带状铬铁岩	37.8	0.42	12.8	9.91	4.24	0.03	19.1	10.7	3.39	0.11	0.19	98.6	88.9
	PK 14-52	条带状铬铁岩	36.0	0.45	12.0	7.74	3.75	0.03	19.2	11.5	3.39	0.10	0.09	94.2	90.1
	PK 14-03	块状铬铁岩	37.8	0.44	12.0	7.60	3.51	0.03	19.2	11.4	3.45	0.13	0.16	95.7	90.7
	PK 14-03	块状铬铁岩	47.7	0.48	8.88	2.96	1.62	0.04	21.0	12.7	2.91	0.32	0.15	98.8	95.9
	PK 14-56	块状铬铁岩	47.4	0.42	9.01	3.11	1.62	0.02	21.3	12.6	3.02	0.18	0.13	98.8	95.9
	PK 14-56	块状铬铁岩	45.5	0.45	8.86	6.88	2.74	0.05	20.5	11.4	2.88	0.14	0.14	99.6	93.0
	PK 14-52	条带状铬铁岩	42.7	0.40	12.0	4.76	3.04	0.05	19.6	12.2	3.57	0.00	0.12	98.4	92.0
蛇纹石	PK 14-60	条带状铬铁岩	40.8	0.28	10.0	8.48	3.05	0.06	18.7	11.5	3.19	0.12	0.15	96.4	91.6
	PK 14-75	条带状铬铁岩	45.0	0.31	10.0	4.28	2.02	0.04	19.9	12.9	3.23	0.38	0.15	98.1	94.6
	PK 14-02	块状铬铁岩	42.3	0.28	10.6	6.40	2.54	0.04	19.8	11.9	3.45	0.19	0.11	97.5	93.3
	PK 14-60	条带状铬铁岩	41.0	0.32	10.3	6.63	2.64	0.01	19.6	11.5	3.23	0.10	0.14	95.5	93.0
	PK 14-75	条带状铬铁岩	48.8	0.26	5.98	4.00	1.90	0.05	22.3	11.1	2.24	0.09	0.12	96.8	95.4
	PK 14-02	块状铬铁岩	41.1	0.30	9.93	7.16	2.76	0.01	20.6	10.4	3.35	0.24	0.13	96.0	93.0
	PK 14-02	块状铬铁岩	45.5	0.30	9.55	4.29	1.97	0.03	20.7	12.0	3.67	0.18	0.10	98.3	94.9
	PK 14-67	条带状铬铁岩	39.4	0.55	14.6	2.16	2.40	0.06	25.9	1.01	0.23	6.82	0.30	93.5	
	PK 14-25	稠密浸染状铬铁岩	37.0	0.32	13.2	2.35	3.57	0.05	32.2	0.11	0.14	3.38	0.27	92.6	
	PK 14-25	稠密浸染状铬铁岩	38.3	0.01	0.36	3.18	3.26	0.07	38.9	0.13	0.00	0.01	0.50	84.7	
方解石	PK 14-09	块状铬铁岩	40.5	0.01	0.40	3.45	3.16	0.02	38.9	0.06	0.01	0.00	0.02	86.6	
	PK 14-09	块状铬铁岩	39.6	0.03	0.42	2.88	2.78	0.04	37.4	0.20	0.04	0.02	0.00	83.5	
	PK 14-09	块状铬铁岩	40.1	0.02	1.36	2.95	2.08	0.00	39.3	0.17	0.06	0.03	0.08	86.2	
	PK 14-09	块状铬铁岩	41.0	0.01	0.69	4.86	3.46	0.05	38.8	0.20	0.00	0.01	0.02	89.1	
	PK 14-74	稠密浸染状铬铁岩	24.2	0.02	0.21	2.20	8.46	0.25	46.2	0.33	0.04	0.00	0.26	82.2	
	PK 14-74	稠密浸染状铬铁岩	39.8	0.02	0.23	1.72	2.19	0.03	37.9	0.16	0.05	0.05	0.02	82.1	
	PK 14-09	块状铬铁岩	38.8	0.00	1.21	4.32	3.23	0.05	38.7	0.06	0.03	0.01	0.19	86.6	
	PK 14-09	块状铬铁岩	40.6	0.05	0.08	0.25	24.5	0.77	13.0	0.87	0.15	0.13	1.00	81.4	
	PK 14-02	块状铬铁岩	40.1	0.00	0.28	0.07	3.02	0.03	35.9	0.10	0.01	0.01	0.60	80.1	
	PK 14-03	块状铬铁岩	29.3	1.43	10.5	15.1	2.20	0.02	2.36	31.5	0.04	0.02	0.24	92.6	
钙铬榴石	PK 14-03	块状铬铁岩	37.4	0.87	9.22	13.0	4.53	0.04	0.49	34.4	0.00	0.01	0.02	100.0	