

蛇绿岩豆荚状铬铁矿床研究进展与展望

阮涛^{1,2}, 钟宏^{1,2*}, 柏中杰^{1*}, 朱维光¹

1. 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, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 赋存于蛇绿岩中的豆荚状铬铁矿床是全球铬资源的主要来源之一, 具有重要战略及经济价值。目前关于豆荚状铬铁矿床的成因尚存分歧。本文总结了全球豆荚状铬铁矿床在矿床地质和矿床地球化学方面的共性特征, 以及豆荚状铬铁矿床的成矿模型。这些模型在解释豆荚状铬铁矿床成因时还存在一些问题, 如成矿母岩浆的地幔源区特征、形成条件、性质, 难以限定成矿母岩浆的流量, 如何精细刻画地幔中 Cr 及铬铁矿迁移-富集过程, 俯冲动力学过程对成矿有何贡献, 等。针对这些问题, 未来的工作可聚焦于熔体包裹体研究、探索矿体下部是否存在深部岩浆房、熔-岩反应及流体搬运铬铁矿的实验岩石学及热力学模拟研究, 以及探索与俯冲过程密切相关的成矿因素。

关键词: 豆荚状铬铁矿床; 成矿模型; 蛇绿岩; 地球化学

中图分类号: P618.3 文章编号: 1007-2802(2023)05-1078-23 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2023.42.111

Progress and prospect for researches of podiform chromite deposits in ophiolite

RUAN Tao^{1,2}, ZHONG Hong^{1,2*}, BAI Zhong-jie^{1*}, ZHU Wei-guang¹

1. State Key Laboratory of Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The podiform chromite deposit hosted in ophiolites is one of main sources of global Cr resources, with great strategic and economic values. Currently, its metallogenesis is still disputed. In this paper, we have summarized the common features of global podiform chromite deposits in terms of deposit geology and deposit geochemistry and have reviewed metallogenic models of podiform chromite deposits. Current metallogenic models for podiform chromite deposits could not be used to thoroughly explain the formation of podiform chromite deposits. The following issues should be further resolved in future. They include characteristics of mantle source, formation conditions and natures of metallogenic parental melts, the hardly constrained fluxes of metallogenic parental melts, how to finely depict migration and enrichment processes of Cr metal and chromite in the mantle, what kind of contributions of the slab-subduction dynamic process to the formation of podiform chromite deposits. To answer these questions, future researches should be focused on studying the melt inclusion, exploring whether there was large magma chamber beneath ore bodies, undertaking experimental petrology and thermodynamic modeling regarding the melt-rock interaction and the chromite transportation by fluids, and exploring ore-forming factors that are closely related to the subduction process.

Key words: podiform chromite deposits; metallogenic models; ophiolite; geochemistry

0 引言

铬(Cr)是军工航天、冶金化工及新兴科技等领域广泛应用的金属元素, 是重要的战略性矿产资源。全球铬资源主要来源于两类铬铁矿床: 赋存于

壳层基性-超基性侵入岩体中的层状铬铁矿床和赋存于蛇绿岩地幔橄榄岩中的豆荚状铬铁矿床(又称阿尔卑斯型; Thayer, 1960, 1964)。尽管层状铬铁矿床提供了全球铬铁矿床约 70% 的资源量(王焰等, 2020), 但分布极不均, 目前仅在全球少数几个超大

收稿编号: 2023-100, 2023-5-18 收到, 2023-8-31 改回

基金项目: 青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0806-02); 国家自然科学基金资助项目(42121003, 42122024)

第一作者简介: 阮涛(1994—), 男, 博士, 研究方向: 蛇绿岩豆荚状铬铁矿床成因。E-mail: ruantao@mail.gyig.ac.cn.

* 通信作者简介: 钟宏(1971—2023), 男, 研究员, 研究方向: 岩浆矿床。E-mail: zhonghong@vip.gyig.ac.cn.

柏中杰(1983—), 男, 研究员, 研究方向: 矿床地球化学。E-mail: baizhongjie@vip.gyig.ac.cn.

型侵入体中有发现,如南非的 Bushveld (Naldrett et al., 2012; Eales and Costin, 2012)、津巴布韦的 Great Dyke (Wilson, 1982; Oberthür et al., 2003) 和美国的 Stillwater (Campbell and Murck, 1993; Spandler et al., 2005) 等。相反,全球蛇绿岩豆荚状铬铁矿床分布广泛,数量众多(图 1),在全球铬资源供给中占有重要地位,因此备受关注 (Thayer, 1960, 1964; Dickey, 1975; Lago et al., 1982; Zhou et al., 1994, 2014; Arai and Yurimoto, 1994; González-Jiménez et al., 2014; Arai and Miura, 2016)。根据美国地质调查局历年矿产品年度报告 (<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/chromium-statistics-and-information>), 蛇绿岩豆荚状铬铁矿床过去十年的年产量占据全球 35% 以上(图 2; 统计数据见表 1)。我国铬资源极度匮乏,总储量仅占全球千分之一左右,且 Cr 金属需求量的 99% 以上都依赖进口 (余良晖等, 2006; 王焰等, 2020)。我国地壳层位中基性-超基性侵入体规模较小,几乎不发育层状铬铁矿床,蛇绿岩豆荚状铬铁矿床是我国铬资源的主要来源 (王焰等, 2020)。因此,加强蛇绿岩铬铁矿床的研究,有助于我国的资源增储,缓解对外依存度极高的困境。

近年来,国内外学者对蛇绿岩豆荚状铬铁矿床的成岩成矿作用开展了深入研究并取得了大量重要进展,但对其成因机制仍不够明晰。例如,全球蛇绿岩分布广泛,但并非所有蛇绿岩都有铬铁矿床产出,而且同一蛇绿岩带中铬铁矿床的产出也不均。

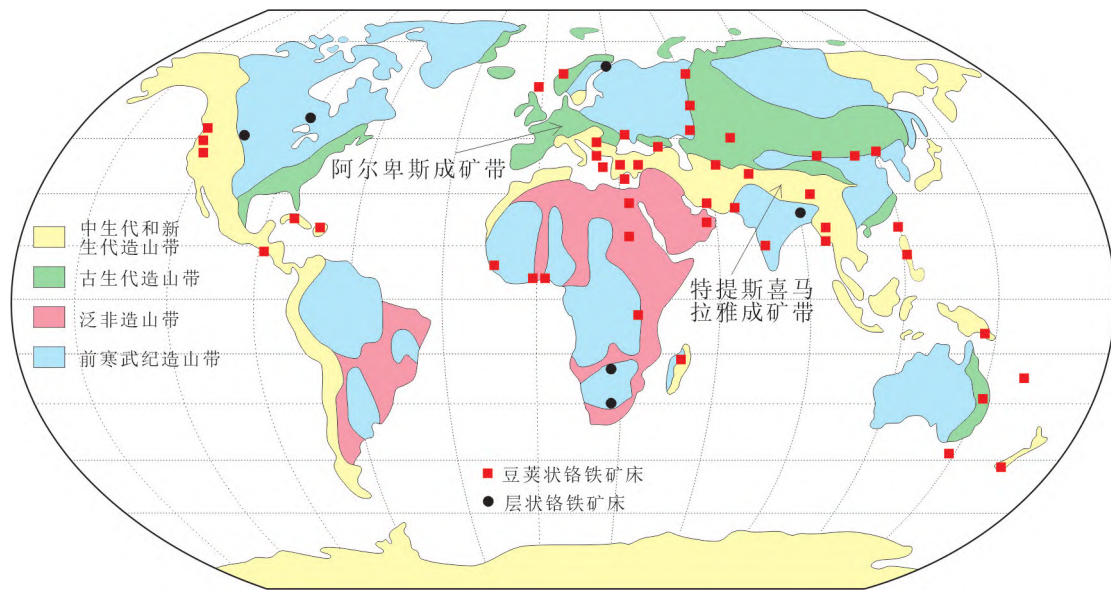
表 1 全球豆荚状铬铁矿床历年产量占比 (据美国地质调查局)

Table 1 The proportions of annual production of commercial ores from global podiform chromite deposits (according to USGS)

年份	豆荚状铬铁矿床年产量/kt			总产量/kt	占比/%
	哈萨克斯坦	土耳其	其他		
2008	3630		6540	23 800	26. 24
2009	3300		5340	19 300	28. 17
2010	3830		5170	23 700	24. 89
2011	3800		5450	23 300	25. 67
2012	4000		6700	25 600	26. 09
2013	4000		7100	26 000	26. 31
2014	3700	2600	4590	26 400	30. 82
2015	5490	3500	4220	30 400	35. 13
2016	5380	2800	4160	30 200	32. 60
2017	4580	6500	4580	35 700	36. 17
2018	6690	8000	4250	43 100	38. 03
2019	6700	10 000	5110	44 800	41. 84
2020	7000	8000	3980	37 000	44. 84
2021	6500	6960	3620	42 200	35. 33
2022	6500	6900	3500	41 000	36. 10

注:占比=(哈萨克斯坦+土耳其+其他×0.4)/总产量,这里假设“其他”项目中有 40% 的产量为豆荚状铬铁矿床的贡献。

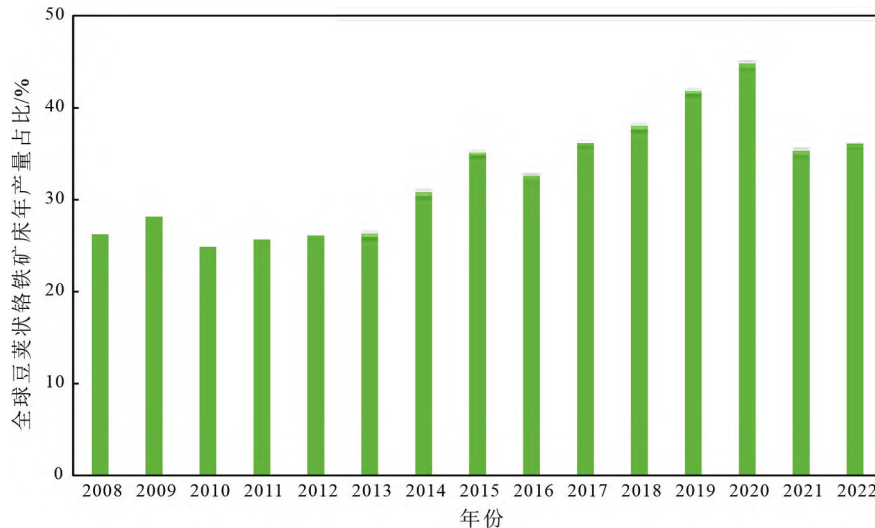
匀。例如我国在雅鲁藏布江缝合带、班公湖-怒江缝合带上有大面积蛇绿岩出露,但迄今仅在雅鲁藏布江蛇绿岩带东段的罗布莎岩体中发现了唯一的大型豆荚状铬铁矿床。世界上面积最大的 Oman 蛇绿岩,大多数铬铁矿体仅集中在南部的 Maqсад 岩体 (面积约 80 km²) 及北部的 Rajmi 岩体中,其他区域



修改自熊发挥等 (2013)

图 1 全球主要铬铁矿床分布

Fig. 1 The distribution of major chromite deposits in the world



据美国地质调查局;数据见表1

图2 全球蛇绿岩豆荚状铬铁矿床年产量占比

Fig. 2 The proportions of annual productions of global ophiolitic podiform chromite deposits

出露面积达几十平方公里的蛇绿岩中铬铁矿体却少见(Nicolas and Azri, 1991)。世界上规模最大的豆荚状铬铁矿床赋存于出露面积相对较小(约2000 km²)的哈萨克斯坦 Kempirsai 蛇绿岩中(Melcher et al., 1997)。新喀里多尼亚蛇绿岩出露面积达8000 km²,但超过80%的铬铁矿床却聚集在面积仅占2%的Tiébaghi岩体中(Moutte, 1982)。因此,目前的研究对铬铁矿床成矿的关键控制因素还不十分清楚。原始幔源岩浆中的Cr含量较低(一般小于1500×10⁻⁶),而豆荚状铬铁矿床中铬铁矿的C₂O₃含量一般高于30%,因此地幔中的Cr要富集270~430倍才能形成一定规模的矿床(Zhou et al., 1998)。目前对Cr及铬铁矿高效富集成矿的物理、化学过程仍不明晰。鉴于目前仅在与俯冲相关的蛇绿岩中发现了具有经济价值的铬铁矿床,而在现代深海大洋地幔及MOR蛇绿岩中仅发现了局部铬铁矿化现象,部分学者对豆荚状铬铁矿床的成矿构造背景也存在争议(Rollinson and Adetunji, 2013; Arai and Miura, 2015)。因此,本文以蛇绿岩豆荚状铬铁矿床的研究现状为切入点,从矿床地质特征、矿床地球化学特征及成矿模型三个方面进行综述。在此基础上,从成矿母岩浆性质及其通量、Cr及铬铁矿迁移-富集机制、成矿构造背景3个方面展开讨论并对下一步的研究进行展望。

1 矿床地质特征

绝大多数具有经济价值的豆荚状铬铁矿体呈透镜状、扁豆状、板状、长柱状或不规则状产于莫霍

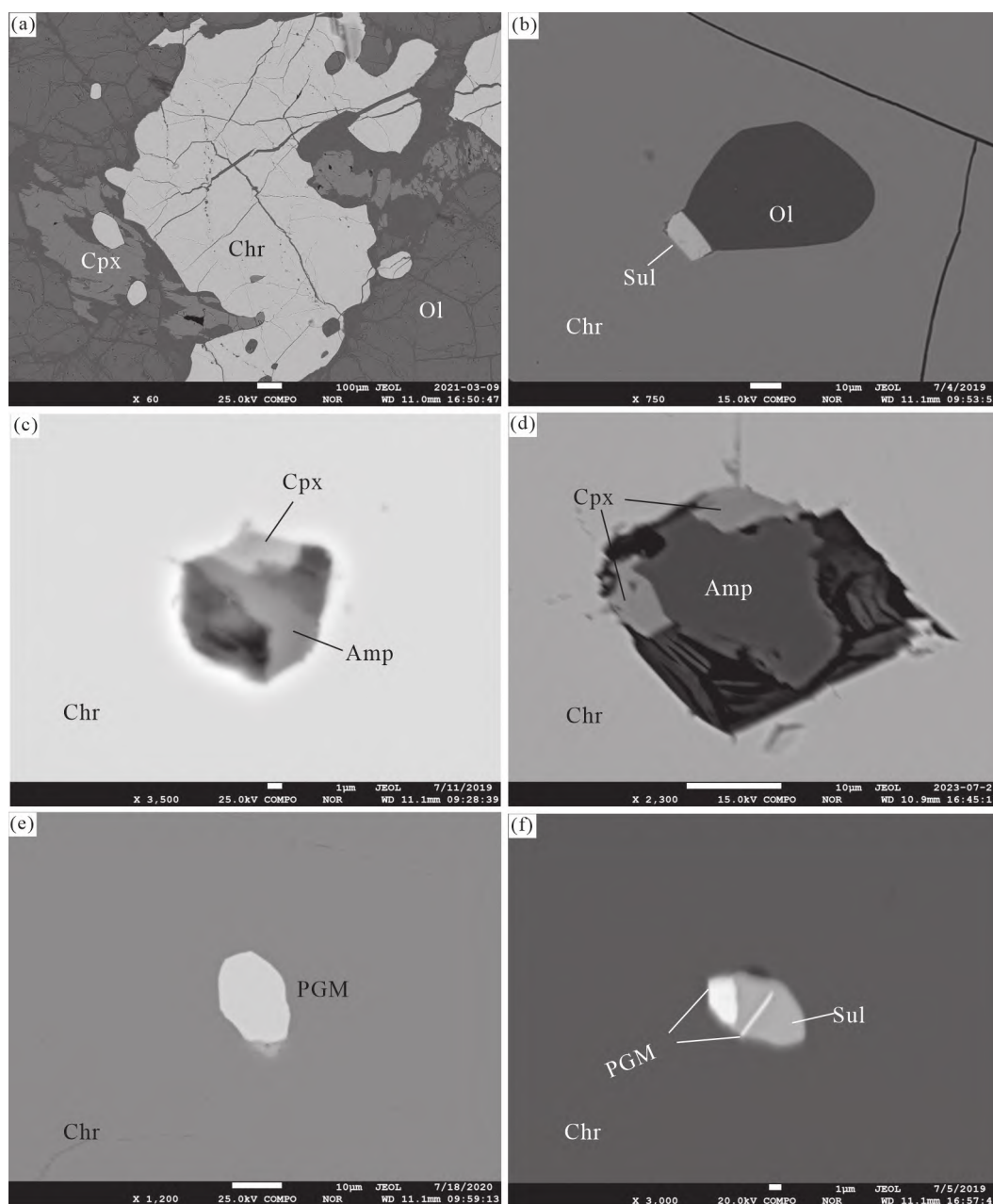
面附近(Thayer, 1964; Dickey, 1975; Greenbaum, 1977; Lago et al., 1982),并在水平方向延展(如罗布莎工业矿体沿莫霍面水平展布16~17 km,鲍佩声等,1999),纵向上较少发育(González-Jiménez et al., 2014; Arai and Miura, 2016)。矿体常独立分布、成群出现。矿体中基性-超基性侵入岩少见,偶见辉长岩及辉石岩脉夹层(鲍佩声等,1999; González-Jiménez et al., 2014; 熊发挥等,2014)。矿体大小不一,如罗布莎单矿体一般长5~300 m、宽1~250 m、厚1~10 m(鲍佩声等,1999),而已报道的世界上规模最大的单矿体长1500 m、宽200~300 m、厚145 m(哈萨克斯坦 Kempirsai 蛇绿岩中的Melodezhnoe矿床)(Arai and Miura, 2016)。豆荚状铬铁矿床的矿石品位一般较高, Mosier 等(2012)统计得到全球619个豆荚状铬铁矿床的平均品位为45%(Cr₂O₃)。

典型的豆荚状矿体一般位于地幔序列上部较亏损的方辉橄榄岩内,而少见下部的二辉橄榄岩中(Nicolas and Azri, 1991; Leblanc and Nicolas, 1992; Arai, 1997; González-Jiménez et al., 2014; Arai and Miura, 2016)。部分似层状矿体位于顶部壳幔过渡带纯橄岩中,这类矿体在Oman和土耳其Bursa蛇绿岩中较常见(Augé, 1987; Borisova et al., 2012; Rollinson and Adetunji, 2013; Chen et al., 2020)。矿体和围岩之间常有一层纯橄岩壳(Thayer, 1964; Greenbaum, 1977; Cassard et al., 1981; Lago et al., 1982),被认为是熔-岩反应的证据(Zhou et al., 1994; Arai and Yurimoto, 1994)。壳体的厚度变化较大,从几厘米到几米,且厚度与矿体的大小无关

(González-Jiménez et al., 2014)。铬铁矿体-纯橄岩壳-方辉橄榄岩是豆荚状铬铁矿床典型的岩性组合,三者之间呈截然或渐变接触(Cassard et al. 1981; Zhou et al., 1996, 2005; González-Jiménez et al., 2014; Johan et al., 2017)。

豆荚状铬铁矿床矿石的原生矿物组成简单,主要由橄榄石和铬铁矿组成(>99%), 粒间偶见单斜辉石(Su et al., 2020)(图3a)、角闪石(Melcher et al., 1997; Pan et al., 2022)等。在蚀变强烈的矿石中,部分橄榄石被蛇纹石、绿泥石取代,在铬铁矿边

缘可能出现磁铁矿。矿石中的铬铁矿常含矿物包裹体,以橄榄石、辉石、角闪石最常见,其次是铂族元素矿物(Platinum group minerals, PGM)及金云母等(图3b~3f)。近年来,在中国罗布莎(白文吉等, 2001; Yang et al., 2007; Griffin et al., 2016)、土耳其Pozanti-Karsanti(Lian et al., 2017)、阿尔巴尼亚Mirdita(Wu et al., 2019)等蛇绿岩豆荚状铬铁矿床矿石的铬铁矿中发现了金刚石、柯石英等超高压矿物包裹体。此外,在中国罗布莎(McGowan et al., 2015; Robinson et al., 2015; Griffin et al., 2016)、俄



矿物符号: Chr—铬铁矿; Ol—橄榄石; Cpx—单斜辉石; Amp—角闪石; PGM—铂族元素矿物; Sul—硫化物

图3 罗布莎豆荚状铬铁矿床矿石中的粒间矿物(a)和包裹体矿物(b~f)

Fig. 3 Interstitial (a) and enclosed (b~f) minerals in ores from the Luobusa podiform chromite deposit

罗斯 Ray-Iz (Robinson et al., 2015)、保加利亚 Dobromirski (González-Jiménez et al., 2015) 等蛇绿岩豆荚状铬铁矿床矿石的铬铁矿中发现了锆石、石英、长石、磷灰石、金红石等壳源矿物包裹体。豆荚状铬铁矿床的矿石结构丰富多样,如浸染状、条带状、块状、豆状及反豆状等(图 4)。其中,豆状(及反豆状)是蛇绿岩豆荚状铬铁矿床区别于层状铬铁矿床特有的矿石结构(Thayer, 1960, 1964; Zhou et al., 2001; Prichard et al., 2015)。

2 矿床地球化学特征

2.1 矿物地球化学特征

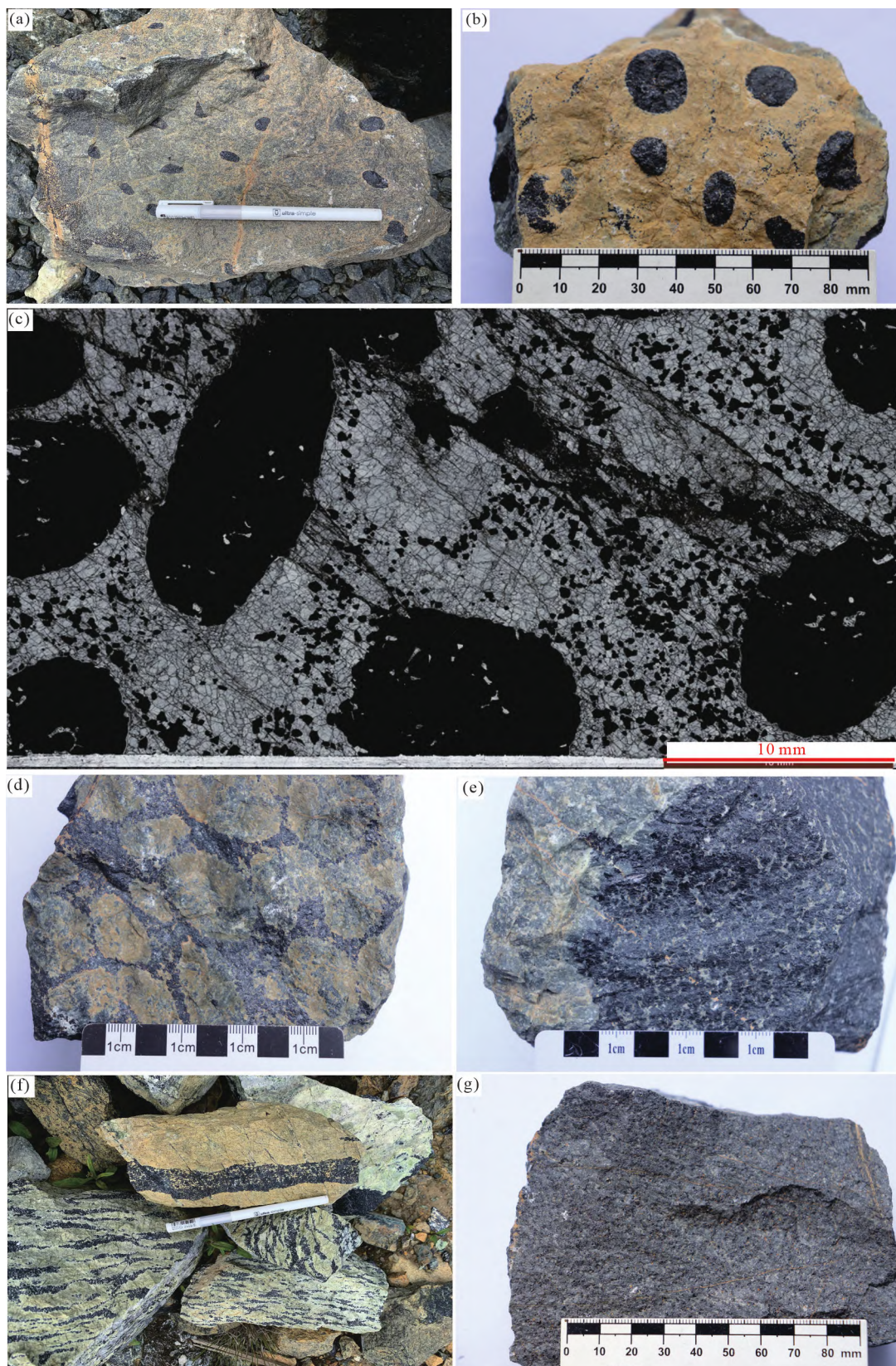
铬铁矿属尖晶石族矿物,其化学式为 $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})(\text{Al}, \text{Cr}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$, 是由 Al、Cr、Fe 和 Mg 的氧化物构成,常用 $\text{Cr}^\# [\text{mol } 100\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})]$ 、 $\text{Mg}^\# [\text{mol } 100 \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})]$ 、 TiO_2 表征其主要成分。根据铬铁矿的 $\text{Cr}^\#$ 值,通常将豆荚状铬铁矿床分为高 Cr 型(冶金级, metallurgical; $\text{Cr}^\# > 60$) 和高 Al 型(耐火级, refractory; $\text{Cr}^\# < 60$) (Leblanc and Violette, 1983; Hock et al., 1986; Leblanc and Nicolas, 1992; Zhou et al., 1994; González-Jiménez et al., 2014; Lian et al., 2017; Chen et al., 2019a; Farré-de-Pablo et al., 2020; Bai et al., 2023)。我们收集了全球典型的高 Cr 型、高 Al 型豆荚状铬铁矿床和 Bushveld 层状铬铁矿床中铬铁矿成分,并与幔源岩浆(MORB、岛弧玄武岩和玻安岩)中铬铁矿斑晶及深海橄榄岩中副矿物铬铁矿进行对比(图 5)。如图 5a 所示,高 Cr 型铬铁矿的 Cr_2O_3 含量为 45%~65%, Al_2O_3 含量为 5%~20%;高 Al 型铬铁矿 Cr_2O_3 含量在 30%~45%, Al_2O_3 含量在 20%~35%。高 Cr 型铬铁矿较高 Al 型铬铁矿具有更宽的 $\text{Cr}^\#$ (60~90 vs. 40~60) 和 $\text{Mg}^\#$ (40~80 vs. 55~80) 变化范围,两者的 $\text{Cr}^\#$ 和 $\text{Mg}^\#$ 均不存在相关性。而层状铬铁矿床、深海橄榄岩及 MORB 中铬铁矿的 $\text{Cr}^\#$ 和 $\text{Mg}^\#$ 具有明显的负相关关系(图 5b)。高 Cr 型铬铁矿的 TiO_2 含量一般低于 0.4%,且 $\text{Cr}^\#$ 与 TiO_2 含量呈微弱的负相关。个别豆荚状铬铁矿床中的铬铁矿富 Ti,如克罗地亚 Loma Caribe 蛇绿岩中的高 Cr 型豆荚状铬铁矿床(最高达 1.25%,图 5c 和 5d 中的空心正方形;Farré-de-Pablo et al., 2020);高 Al 型铬铁矿 TiO_2 高达 1.0%,且 $\text{Cr}^\#$ 与 TiO_2 无明显相关性(图 5c),但高 Al 型铬铁矿的 $\text{Mg}^\#$ 与 TiO_2 呈微弱的负相关(图 5d)。

蛇绿岩豆荚状铬铁矿床中的铬铁矿能够容纳微量的过渡族金属元素(如 Sc、Ti、V、Co、Ni、Zn、Ga

等)。近年来,随着高精度 LA-ICP-MS 分析技术的快速发展,铬铁矿的微区原位微量元素分析成为解密豆荚状铬铁矿床成因的另一重要手段。例如, Pagé 和 Barnes (2009) 利用 LA-ICP-MS 技术获得了加拿大 Thetford Mines 蛇绿岩中高 Cr 型铬铁矿床中铬铁矿的微量元素成分,并将这些高 Cr 型铬铁矿与该蛇绿岩顶部玻安岩中的高 Cr 型铬铁矿、日本 Bonin Island 玻安岩中高 Cr 型铬铁矿及东太平洋隆 MORB 中的高 Al 型铬铁矿进行成分对比,发现 Thetford Mine 豆荚状铬铁矿床中铬铁矿的微量元素组成与该蛇绿岩顶部玻安岩中的铬铁矿相似(图 6a),因此认为成矿母岩浆为玻安质岩浆。我们统计了全球多个典型的高 Cr 和高 Al 型豆荚状铬铁矿床中的铬铁矿的微量元素组成,并以东太平洋隆 MORB 铬铁矿成分(Pagé and Barnes, 2009)进行标准化,制成铬铁矿元素配分曲线。如图 6a 所示, $\text{Cr}^\#$ 较低($\text{Cr}^\# = 65 \sim 75$)的高 Cr 型豆荚状铬铁矿床,其铬铁矿元素配分曲线较为集中,且和 Thetford Mines 玻安岩中的铬铁矿成分类似;而铬铁矿 $\text{Cr}^\#$ 较高的矿床($\text{Cr}^\# = 75 \sim 85$),铬铁矿成分差异较大,其元素配分曲线不同程度地偏离 Thetford Mines 玻安岩铬铁矿和 Bonin Island 玻安岩铬铁矿配分曲线(图 6b),尤其是克罗地亚 Dominican Republic 铬铁矿床(Farré-de-Pablo et al., 2020)的偏离程度更甚。对于高 Al 型豆荚状铬铁矿床,部分矿床的铬铁矿具有较为平坦的元素配分曲线,如古巴的 Mayari—Cristal、中国的萨尔托海、菲律宾的 Coto 铬铁矿床,而某些高 Al 型铬铁矿床的铬铁矿元素配分曲线也较大程度地偏离 MORB 曲线,如希腊 Othris、保加利亚 Dobromirski 铬铁矿床(图 6c)。

2.2 PGE 地球化学特征

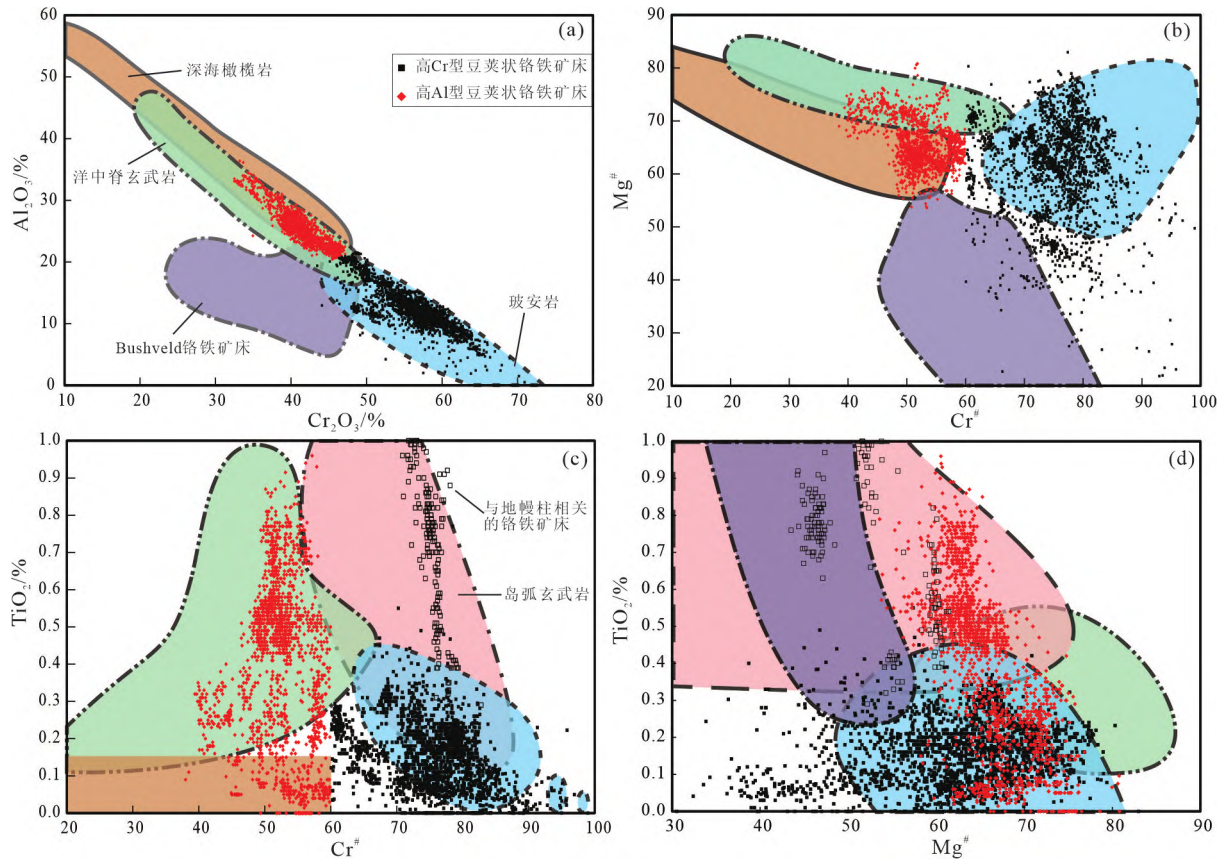
蛇绿岩豆荚状铬铁矿床中矿石的 PGE 地球化学特征可反映岩浆的硫饱和状态(Zhou et al., 1998; Prichard et al., 2008)以及铬铁矿结晶的物理化学条件(郭国林等, 2016; González-Jiménez and Reich, 2017),因而成为揭示豆荚状铬铁矿床成因的另一重要地球化学依据。对高 Al 及高 Cr 型豆荚状铬铁矿床中矿石的 PGE 分析表明,高 Al 型铬铁矿床是硫饱和的拉斑玄武质岩浆与方辉橄榄岩反应形成,而高 Cr 型铬铁矿床则是硫不饱和的玻安质岩浆与更加亏损的方辉橄榄岩反应形成(Zhou et al., 1998)。此外,矿石的 PGE 含量异常还能反演岩浆演化过程。一般 Pt-Pd 亏损的负斜率配分曲线,且 PGE 总含量低($< 1000 \times 10^{-9}$, 平均 $300 \times 10^{-9} \sim 400 \times$



(a~c)豆状矿石;(d)反豆状矿石;(e)块状矿石;(f)脉状(上)和条带状(下)矿石;(g)浸染状矿石

图4 罗布莎豆荚状铬铁矿床的矿石类型

Fig. 4 The different types of ores from the Luobusa chromite deposit



高 Cr 型豆荚状铬铁矿床铬铁矿主量元素数据引自 Gervilla 等(2005), Uysal 等(2005, 2009, 2016), Pagé 和 Barnes(2009), González-Jiménez 等(2011), Derbyshire 等(2013, 2019), Akmaz 等(2014), Colás 等(2014), Kozlu 等(2014), Zhou 等(2014), Brough 等(2015), Akbulut 等(2016), Avci 等(2016), Günay 和 Çolakoglu(2016), Khedr 和 Arai(2016), González-Jiménez 等(2017), Habtoor 等(2017), Tzamos 等(2017), Xiong 等(2017c, 2018), Liu 等(2019), Su 等(2019), Abuamarah 等(2020), Farrde-de-Pablo 等(2020), Ullah 等(2020), Zhang 等(2020), Nayak 等(2021), Saveliev(2021), Pujol-Solà 等(2021); 高 Al 型豆荚状铬铁矿床铬铁矿主量元素数据引自 Uysal 等(2009), González-Jiménez 等(2011, 2015), Borieva 等(2012), Derbyshire 等(2013), Zhou 等(2014), Colás 等(2014), Akmaz 等(2014), Kozlu 等(2014), Zagrtednov 等(2018), Kapsiotis 等(2019), Pujol-Solà 等(2021), Zhu 和 Zhu(2021); Bushveld 层状铬铁矿床铬铁矿主量元素数据引自 Mathez 和 Mey(2005), Veksler 等(2015), Kaufmann 等(2019), Langa 等(2020); 洋中脊玄武岩铬铁矿主量元素数据引自 Kamenetsky 等(2001), Li 等(2021); 玻安岩数据引自 Kamenetsky 等(2001), Li 等(2013), Koutsovitis 和 Magganis(2016), Golowin 等(2017), Coulthard(2018), Slovenec 和 Šegvić(2018), Woelki 等(2018), Whattam 等(2020), Scholpp(2020), Scholpp 等(2022); 岛弧玄武岩铬铁矿主量元素数据引自 Kamenetsky 等(2001), Nekrylov 等(2018); 深海橄榄岩铬铁矿主量元素数据引自 Warren(2016)

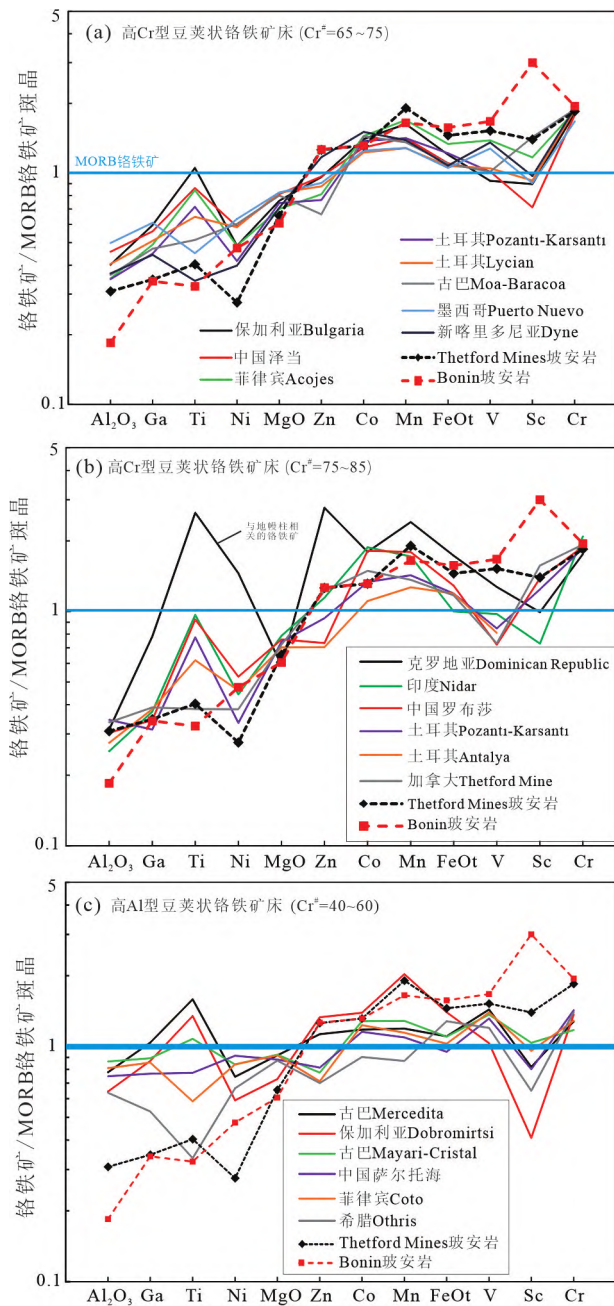
图5 全球蛇绿岩豆荚状铬铁矿床、Bushveld 层状铬铁矿床、深海橄榄岩、洋中脊玄武岩、玻安岩、岛弧玄武岩中铬铁矿成分变化

Fig. 5 Compositional variations of chromites from global ophiolitic podiform chromite deposits, the Bushveld stratiform chromite deposit, abyssal peridotites, MORBs, boninites and arc basalts

10^{-9}) 是全球多数蛇绿岩豆荚状铬铁矿床的共有特征 (Melcher et al., 1997; Zhou et al., 1998; Proenza et al., 1999; Su, 2022), 但也有部分豆荚状铬铁矿床异常富集 PGE。例如, Prichard 等(2008) 报道了高度富集 PGE 的沙特阿拉伯 Al ‘Ays 蛇绿岩铬铁矿床 (PGE 总含量高达 $17\ 000 \times 10^{-9}$, 平均 1500×10^{-9}), 并认为这种 PGE 富集特征反映了地幔源区的熔融程度刚好处于能够完全抽取 PGE 的临界点, 导致母岩浆富集 PGE。在岩浆演化晚期阶段, 当结晶的铬

铁矿 Cr_2O_3 的含量在 48%, 且 $\text{Cr}/\text{Al} = 1 \sim 3$ 时, 岩浆的硫达到饱和, 并形成不混溶的硫化物流体, 进而在矿石中结晶出含 Pt、Pd 硫化物及贱金属硫化物。此时铬铁矿中 Cr_2O_3 含量(48%) 低于 Pt-Pd 略亏损 (即此时岩浆中的硫接近于饱和但是尚未饱和) 矿石中的铬铁矿 (Cr_2O_3 为 53% ~ 61%), 表明成矿母岩浆是朝着硫逐渐饱和、Cr 含量逐渐降低的方向演化, 早期晶出高 $\text{Cr}^\#$ 铬铁矿, 晚期晶出低 $\text{Cr}^\#$ 铬铁矿。

近年来, 蛇绿岩豆荚状铬铁矿床铬铁矿中的纳



标准化值据 Pagé 和 Barnes (2009); 高 Cr 型豆荚状铬铁矿床铬铁矿微量元素数据引自 Pagé 和 Barnes (2009), Colás 等 (2014), Zhou 等 (2014), González-Jiménez 等 (2015, 2017), Akbulut 等 (2016), Avci 等 (2016), Uysal 等 (2016), Xiong 等 (2017), Liu 等 (2019), Farrde-de-Pablo 等 (2021), Nayak 等 (2021); 高 Al 型豆荚状铬铁矿床铬铁矿微量元素数据引自 Zhou 等 (2014), Colás 等 (2014), González-Jiménez 等 (2015), Kapsiotis 等 (2019), Zhu 和 Zhu (2021)

图6 全球典型豆荚状铬铁矿床中铬铁矿元素配分曲线
Fig. 6 MORB chromite-normalized elemental patterns of chromites from global podiform chromite deposits

米 PGM 包裹体引起了广泛关注,被用于示踪铬铁矿床地幔源区不均一性 (Shi et al., 2007; Marchesi et al., 2011; González-Jiménez et al., 2014)、刻画铬铁

矿结晶的物理化学条件 (郭国林等, 2016; González-Jiménez and Reich, 2017)、限定铬铁矿深部地幔过程时限 (见 4.5 节) 等。例如, Shi 等 (2007) 对西藏罗布莎和东巧铬铁岩中分选的铂族元素合金进行了 PGE 含量、Re-Os 同位素分析。结果表明, 这些合金可分为两类: 第一类合金具有较陡的负斜率 PGE 配分曲线、均一的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (0.12645 ± 4) 且 Os 模式年龄 t_{RD} 为 90~280 Ma, 暗示此类合金及铬铁矿母岩浆的地幔源区为较为均一的、富集的软流圈地幔; 第二类合金具有平缓的 PGE 配分曲线、不均一的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ($0.12003 \sim 0.12194$) 且 Os 模式年龄 t_{RD} 为 850~1140 Ma, 暗示这类合金及铬铁矿的母岩浆与古老的大陆岩石圈地幔熔融事件有关。此外, 对古巴 Mayarí-Cristal 蛇绿岩铬铁矿床中铬铁矿的 PGM 包裹体原位 Os 同位素分析表明, 即使在同一铬铁岩样品中, 其 Os 同位素组成也不均一 ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 为 $0.1185 \sim 0.1274$), 暗示其寄主铬铁矿母岩浆的地幔源区在小尺度 (10~100 m) 内具有高度的不均一性 (Marchesi et al., 2011)。这种不均一性, 可能反映其成矿母岩浆的地幔源区在岩性、部分熔融程度上存在差异 (González-Jiménez et al., 2014)。此外, PGM 包裹体还能反映铬铁矿的结晶环境。González-Jiménez 和 Reich (2017) 系统总结了赋存于蛇绿岩铬铁矿床铬铁矿中的纳米 PGM 包裹体岩相学、矿物学、结晶学特征, 并结合前人实验岩石学研究结果, 认为这些 PGM 包裹体可能同时或早于铬铁矿结晶, 形成于压力为 1.0~0.5 GPa、温度为 ~1200 °C、氧逸度为 $\text{FMQ} \pm 1$ 的上地幔环境。

2.3 非传统金属稳定同位素特征

近年来, 非传统金属稳定同位素如 Li、Fe、Mg 等被逐渐用于揭示蛇绿岩铬铁矿床成因 (Chen et al., 2015; Su et al., 2016; Zhang et al., 2017; 苏本勋等, 2018b, 2021)。罗布莎铬铁岩中橄榄石 $\delta^7\text{Li}$ 为 $-18.63\text{‰} \sim 6.16\text{‰}$ (平均为 -10.20‰), 暗示了铬铁岩的母岩浆具有轻 Li 同位素特征 (Su et al., 2016), 可能和板片熔融 (Su et al., 2016) 或者富水岩浆体系中的流体活动 (苏本勋等, 2021) 有关。罗布莎及土耳其 Kizildağ、Kop 铬铁岩中铬铁矿 $\delta^{56}\text{Fe}$ 为 $-0.247\text{‰} \sim 0.067\text{‰}$, 橄榄石 $\delta^{56}\text{Fe}$ 为 $-0.146\text{‰} \sim 0.294\text{‰}$, 且同一铬铁岩样品中铬铁矿 $\delta^{56}\text{Fe}$ 总是小于橄榄石 $\delta^{56}\text{Fe}$ (Chen et al., 2015; Xiao et al., 2016; Zhang et al., 2017, 2019)。罗布莎和土耳其 Kizildağ 铬铁岩中铬铁矿 $\delta^{26}\text{Mg}$ 为 $-0.41\text{‰} \sim 0.78\text{‰}$, 橄榄石 $\delta^{26}\text{Mg}$ 为 $-0.20\text{‰} \sim -0.29\text{‰}$ (Xiao et al., 2016, 2023)。Chen 等 (2015) 发现, Kizildağ 铬铁岩中铬铁

矿 $\delta^{56}\text{Fe}$ 和 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 正相关但与 FeO 含量负相关, 暗示了铬铁岩的形成受控于成矿体系氧逸度的改变。而罗布莎铬铁岩中铬铁矿 $\delta^{56}\text{Fe}$ 不仅与 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 及 MgO 含量具有正相关性 (Xiao et al., 2016) 还与 $\delta^{26}\text{Mg}$ 呈负相关性 (苏本勋等, 2018b), 因此罗布莎铬铁岩 Fe 同位素组成受控于矿物之间的 Fe-Mg 交换 (Xiao et al., 2016; 苏本勋等, 2018b)。考虑到铬铁岩中铬铁矿的占比及 FeO 含量均较高 (例如块状矿石中的铬铁矿), 因此对于某些铬铁矿异常富集轻 Fe 同位素现象可能无法用 Fe-Mg 交换来解释, 但是这可能反映了流体活动对矿物 Fe 同位素组成的影响 (苏本勋等, 2021)。非传统金属稳定同位素对揭示蛇绿岩铬铁矿床成因具有一定的潜力, 但目前的研究主要集中于中国罗布莎以及土耳其 Kizildag 铬铁矿床中, 对其他矿床研究较少, 尚需进一步研究。单一同位素 (如 Fe 或 Mg) 数据在解释铬铁岩成因中可能存在一定局限性, 联合多元同位素 (如 Fe 和 Mg) 组成或许能更好地揭示蛇绿岩铬铁矿床成因。

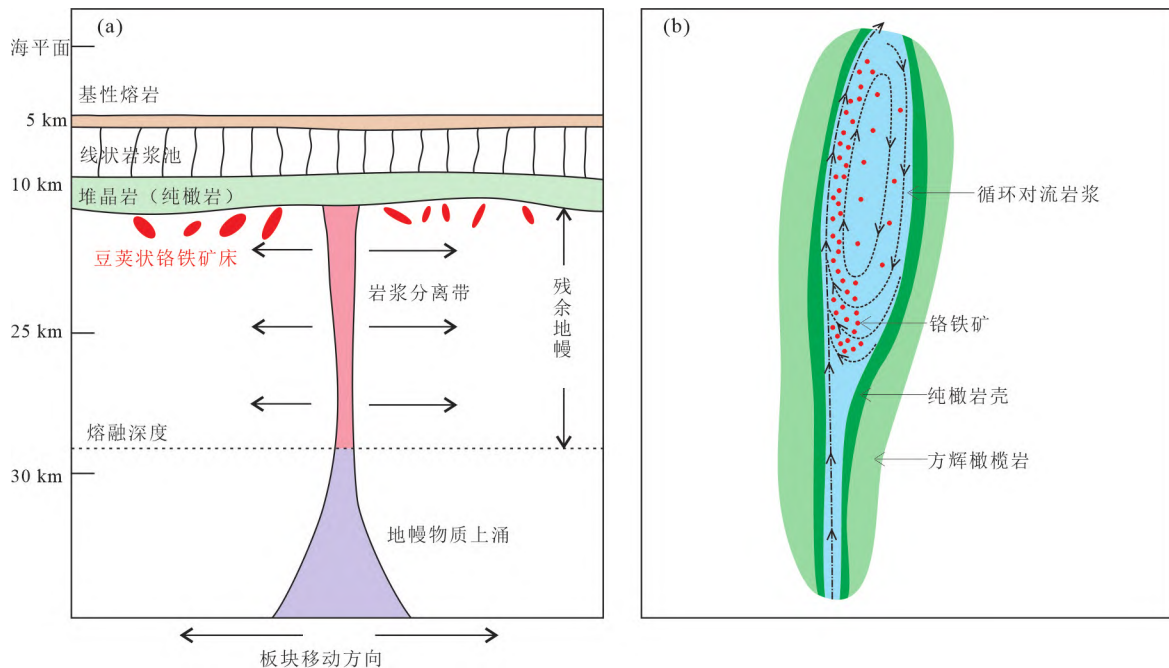
与蛇绿岩铬铁矿床相关的非传统金属稳定同位素研究在揭示地幔部分熔融及岩浆分离结晶过程中的同位素分馏尺度 (如 Cr 同位素, Chen et al., 2019b; Mg 同位素, Xiao et al., 2023)、同位素不平衡分馏过程 (如 Mg 同位素, Xiao et al., 2016; Fe 同位素, Zhang et al., 2019)、限定地幔储库同位素组成

(如 Cr 同位素, Farkaš et al., 2013) 以及地幔同位素组成不均一性 (如 Li 同位素: Su et al., 2016; Cr 同位素: Chen et al., 2019b) 方面也具有积极意义。

3 蛇绿岩豆荚状铬铁矿床成矿模型

3.1 基性岩浆分离结晶

早期研究认为, 豆荚状铬铁矿床由基性岩浆分离结晶形成 (Thayer, 1964; Dickey, 1975; Greenbaum, 1977; Cassard et al., 1981; Lago et al., 1982; Ceuleneer and Nicolas, 1985; Augé, 1987)。狭长或板状矿体可能是位于莫霍面纯橄岩上部线状岩浆池分离结晶形成, 并在重力作用下沉直至插入下方的地幔橄榄岩中, 而豆状铬铁矿石可能是微小铬铁矿晶体通过滚雪球方式不断增长形成于地幔橄榄岩中的岩浆分离带中 (图 7a)。Lago 等 (1982) 则认为蛇绿岩中的铬铁矿床并不是由上部岩浆房结晶出的铬铁矿体通过构造褶皱活动或者重力沉降插入橄榄岩内部形成, 而是橄榄岩内部的岩浆房原位结晶形成, 而豆状矿石形成于幔源岩浆在橄榄岩内部岩浆房中的循环对流 (图 7b)。在分离结晶的基础上, 部分学者注意到矿体的几何形态、赋存位置以及矿石结构构造和围岩的应力变形组构 (如方辉橄榄岩的层理-线理) 具有一定的相关性 (Cassard et al., 1981; Ceuleneer and Nicolas, 1985), 如铬铁矿床 (体) 的分布具有定向性并和围岩线理方向平行, 因



(a) 修改自 Dickey (1975); (b) 修改自 Lago 等 (1982)

图 7 豆荚状铬铁矿床的分离结晶成矿模型

Fig. 7 The fractional crystallization model for the podiform chromite deposits

此围岩的应力变形特征对找矿具有积极意义(Cas-sard et al., 1981)。

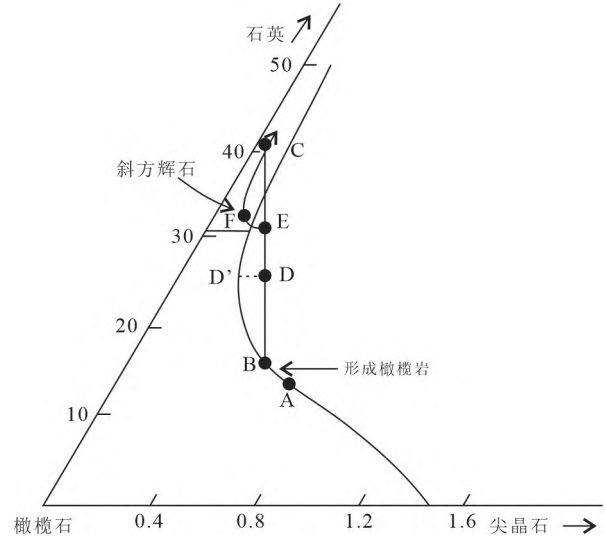
3.2 高程度地幔部分熔融的残余

20世纪70年代,随着板块构造理论的发展,人们逐渐认识到蛇绿岩是古老的大洋岩石圈的残片(Anonymous, 1972),地幔橄榄岩是部分熔融后的残余(Dick, 1977)。基于蛇绿岩中铬铁矿体与围岩之间的矿物地球化学关系及其产出位置,逐渐形成豆荚状铬铁矿床是地幔高程度部分熔融残余的观点。例如,日本 Sangun-Yamaguchi 阿尔卑斯型超基性岩带中的一套具有均一铬铁矿成分($Cr^{\#} = 50$, $Mg^{\#} = 78 \sim 80$)的纯橄岩-方辉橄岩-铬铁矿岩石组合,被认为是地幔高程度熔融后的残余(Arai, 1980)。在罗布莎铬铁矿床中,从远端围岩到铬铁矿体,各岩相中辉石和橄榄石的 $Mg^{\#}$ 以及铬铁矿 $Cr^{\#}$ 和 $Mg^{\#}$ 逐渐升高,而辉石 Al_2O_3 含量逐渐降低,表明部分熔融程度由围岩向矿体逐渐升高(王希斌和鲍佩声, 1987)。因此,罗布莎豆荚状铬铁矿床可能是二辉橄岩岩熔融转变成纯橄岩过程中,由辉石出溶形成的细粒铬铁矿和橄岩中副矿物铬铁矿在地幔剪切作用下聚集而成(王希斌和鲍佩声, 1987; 鲍佩声等, 1999; 鲍佩声, 2009)。此外,地幔高程度部分熔融(如在快速扩张的洋中脊环境下)导致 Cr 活化也是铬铁矿床形成的重要原因,这也解释了为什么豆荚状铬铁矿床一般赋存于较为亏损的方辉橄岩中而较少出现在二辉橄岩中(Nicolas and Azri, 1991; Leblanc and Nicolas, 1992)。实验岩石学研究显示,部分熔融过程中地幔橄岩中富 Al 铬铁矿会与辉石释放的 Cr 结合形成富 Cr 铬铁矿(Cr_2O_3 可达 38%~47%)(金振民等, 1996),表明部分熔融对铬铁矿的预富集有重要作用。

3.3 熔-岩反应

熔-岩反应成矿模型起源于层状铬铁矿床研究中的岩浆混合模型,即原始的基性岩浆与经历一定程度演化的相对富 Si 岩浆混合,导致铬铁矿大量结晶并堆积形成铬铁矿层(Irvine, 1977)。基于此,Zhou 等(1994)、Arai 和 Yurimoto(1994)建立了熔-岩反应成矿理论用于解释蛇绿岩中豆荚状铬铁矿床的成因。前者认为,原始玄武质岩浆在上升过程中会和围岩地幔橄岩反应,溶解辉石并沉淀橄岩,使岩浆愈加富 Si,最终导致岩浆进入铬铁矿结晶域而晶出大量铬铁矿。后者认为,原始幔源基性岩浆 A 与方辉橄岩反应,形成纯橄岩壳及富 Si 熔体 B;熔体 B 与原始熔体 A 混合形成位于铬铁矿结晶

域的熔体 C,导致单矿物铬铁矿结晶并堆积成矿(图 8; Arai and Miura, 2016)。此外,实验岩石学研究表明,两种 Si 活度不同的岩浆混合可形成豆状铬铁矿石(Ballhaus, 1998),从侧面证实了熔-岩反应成矿模型的有效性。



修改自 Arai 和 Miura(2016)

图 8 豆荚状铬铁矿床的熔-岩反应成矿模型

Fig. 8 The melt-rock interaction model for the podiform chromite deposit

经典的熔-岩反应模型常用于解释赋存于地幔方辉橄岩中豆荚状铬铁矿床的成因。在某些蛇绿岩中,部分铬铁矿体位于壳层基性侵入体中,因此部分学者提出岩浆-围岩同化混染的成矿机制。如位于 Bay of Islands 蛇绿岩下地壳层位基性-超基性侵入体中的细脉状铬铁矿,被认为是铬铁矿饱和的幔源岩浆同化混染了地壳中辉长质侵入体所形成(Bédard and Hébert, 1998)。

3.4 与流体相关的成矿模型

蛇绿岩铬铁矿床的铬铁矿中普遍含有角闪石、金云母等含水矿物包裹体(Lorand and Ceuleneer, 1989; McElduff and Stumpfl, 1991; Melcher et al., 1997; Schiano et al., 1997; Matveev and Ballhaus, 2002; Johan et al., 2017; 刘霞等, 2018),体现了成矿母岩浆的富水特征(苏本勋等, 2018a, 2021)。Matveev 和 Ballhaus(2002)认为成矿母岩浆的含水量可达 4%,因此母岩浆在演化过程中可能出溶形成流体相(Su et al., 2020)。此外,野外地质观察及岩相学、矿物学、地球化学分析均表明,蛇绿岩铬铁矿床成矿过程中存在流体活动:①矿石中硅酸盐矿物的蚀变程度要高于纯橄岩壳及方辉橄岩围岩(苏本勋等, 2018a, 2021);②矿石中的铬铁矿含有

富碱(Na)流体包裹体(McElduff and Stumpfl, 1991; Melcher et al., 1997)或富H₂O、CO₂和CH₄的流体包裹体(Johan et al., 2017);③铬铁矿物中出现粒间角闪石(Pan et al., 2022);④铬铁矿物中粒间单斜辉石具有富水的特征(H₂O含量为66×10⁻⁶~801×10⁻⁶)(Su et al., 2020);⑤铬铁矿中橄榄石包裹体具有高Mg(Fo=97)、NiO(0.25%~1.05%)的特征(Johan et al., 2017)等。流体在成矿过程中具体作用有以下三点:①促进铬铁矿的结晶。流体和基性岩浆混合导致铬铁矿结晶并成矿(Lorand and Ceuleneer, 1989)。流体加入改变了岩浆体系的氧逸度,促进铬铁矿结晶(Melcher et al., 1997; Proenza et al., 1999);②促进地幔橄榄岩中Cr的活化迁移。地幔中富Cl⁻、SO₄²⁻、CO₃²⁻离子的酸性流体会溶解原生的铬铁矿,并以络合物形式迁移并富集成矿(Arai and Akizawa, 2014)。由于熔体中Cr³⁺具有高的八面体择位能会强烈选择八面体配位位置,而含水熔体较无水熔体具有更多的八面体位置,因此含水的熔体较无水熔体具有更高载Cr能力(Edwards et al., 2000);③促进铬铁矿的迁移-富集。实验研究表明,在铬铁矿-橄榄石饱和玄武质熔体和富水流体共存的体系中,橄榄石趋向赋存于熔体中,而铬铁矿趋向聚集在流体相中(Matveev and Ballhaus, 2002),因此流体对铬铁矿的迁移富集具有重要意义(Matveev and Ballhaus, 2002; Su et al., 2020; 苏本勋等, 2021)。

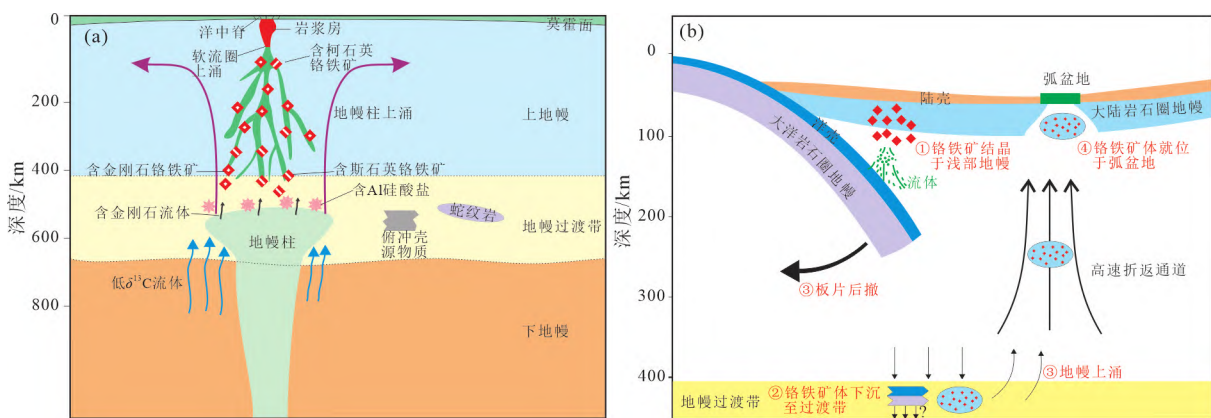
3.5 与超高压矿物有关的地幔深部成矿模型

近年来,大量研究相继报道了蛇绿岩豆荚状铬铁矿床矿石铬铁矿中的超高压和超还原矿物包裹体(如金刚石、柯石英、碳化硅、自然铁等; Bai et al., 1993; 白文吉等, 2001, 2004; Yang et al., 2007, 2014,

2015; Lian et al., 2017; Wu et al., 2019),引发了众多学者对豆荚状铬铁矿床成因展开了新一轮的研究热潮,并建立了以“深部地幔过程”为核心的成矿理论。

实验岩石学研究表明,在地幔过渡带(mantle transition zone, MTZ, >380 km)高压条件(12~16 GPa)下,铬铁矿能转变成CaFe₂O₄结构(Chen et al., 2003; Zhang et al., 2017)或(Fe, Mg)₂(Al, Cr)₂O₅结构(Xu et al., 2013)的超高压矿物相,这些超高压物质能够容纳1%~2.44%的SiO₂(Xu et al., 2013; Zhang et al., 2017)。因此,铬铁矿及其包裹的超高压矿物柯石英可能是这些超高压矿物相在上升过程中发生减压的结果(Yamamoto et al., 2009)。岩石圈俯冲至MTZ后,在温度为1600℃、压力为15~16 GPa条件下熔融产生熔体,这些熔体晶出的铬铁矿会捕获金刚石、碳化硅等超高压矿物,随后铬铁矿在地幔柱的驱动下上涌至浅部地幔并沉淀成矿(Yang et al., 2014, 2015; 图9a)。

为了解决“铬铁矿于浅部地幔结晶”和“超高压矿物包裹体深部地幔来源”之间的矛盾,地幔深循环的成矿模型逐步确立,并通过铬铁矿中PGM包裹体Os模式年龄及锆石包裹体U-Pb年龄,限定“铬铁矿床深部循环”的时限(Arai, 2013; McGowan et al., 2015; Griffin et al., 2016; González-Jiménez et al., 2017)。如图9b所示,大量铬铁矿在375 Ma结晶于俯冲带浅部地幔环境并堆积形成罗布莎铬铁矿床,铬铁矿结晶的同时捕获了壳源矿物包裹体;随后矿体及橄榄岩俯冲至MTZ(>400 km)并滞留150 Ma,在此期间铬铁矿捕获了超高压及超还原矿物。板块后撤以及深部地幔的加热,导致包裹矿体的橄榄岩具有相当的浮力,最终折返至浅部地



(a)修改自 Yang 等(2014); (b)修改自 Griffin 等(2016)

图9 豆荚状铬铁矿床的深部地幔过程

Fig. 9 Deep mantle processes related to the formation of the podiform chromite deposits

幔 (McGowan et al., 2015; Griffin et al., 2016)。此外, Zhou 等 (2014) 提出了板片脱离 (或板片撕裂, Robinson et al., 2015) - 软流圈上涌混染俯冲板片成矿模型: 携带超高压矿物的软流圈熔体上涌, 同化混染俯冲板片并触发铬铁矿结晶形成豆荚状铬铁矿床, 同时这些铬铁矿也会捕获软流圈熔体中的超高压矿物和随板片俯冲而来的壳源矿物包裹体。

4 讨论

4.1 成矿母岩浆的性质

20 世纪 90 年代之前, 尽管缺乏足够的矿床地球化学数据, 大多数学者都认为豆荚状铬铁矿床的母岩浆为玄武质岩浆 (Thayer, 1960, 1964; Dickey, 1975; Greenbaum, 1977; Lago et al., 1982; Leblanc and Nicolas, 1992)。目前大量地球化学数据显示, 豆荚状铬铁矿床矿石中的铬铁矿成分差异非常大, 且高 Cr 型铬铁矿主、微量元素特征显示玻安质岩浆的地球化学亲和性, 而高 Al 型铬铁矿主、微量元素特征则和 MORB 铬铁矿斑晶类似 (图 5、6)。这些现象暗示高 Al 型豆荚状铬铁矿床的成矿母岩浆为玄武质岩浆, 而高 Cr 型铬铁矿床成矿母岩浆为玻安质岩浆。

由于铬铁矿的 FeO/MgO 值、Al₂O₃ 及 TiO₂ 含量与熔体的成分密切相关 (Maurel and Maurel, 1982; Kamenetsky et al., 2001), 部分学者利用 $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{chr}} - (\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{melt}}$ 、 $\text{Al}_{\text{chr}} - \text{Al}_{\text{melt}}$ 及 $\text{Ti}_{\text{chr}} - \text{Ti}_{\text{melt}}$ (下标 chr 表示铬铁矿, 下标 melt 表示熔体) 之间的线性关系得出与之平衡的母岩浆的 FeO/MgO 值、Al₂O₃ 及 TiO₂ 含量。常见的线性公式包括:

$$\ln(\text{FeO}/\text{MgO})_{\text{chr}} = 0.47 - 1.07 \times X\text{Al}_{\text{chr}} + 0.64 X\text{Fe}_{\text{chr}}^{3+} + \ln(\text{FeO}/\text{MgO})_{\text{melt}} \quad (1)$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3_{\text{melt}} = 5.2253 \ln \text{Al}_2\text{O}_3_{\text{chr}} + 1.1232 \quad (2)$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3_{\text{melt}} = 4.1386 \ln \text{Al}_2\text{O}_3_{\text{chr}} + 2.2828 \quad (3)$$

$$\text{TiO}_2_{\text{melt}} = 1.0897 \ln \text{TiO}_2_{\text{chr}} + 0.0892 \quad (4)$$

$$\text{TiO}_2_{\text{melt}} = 0.708 \ln \text{TiO}_2_{\text{chr}} + 1.6436 \quad (5)$$

式(1)来自 Maurel 和 Maurel (1982), $X\text{Al}_{\text{chr}} = \text{Al}/(\text{Al} + \text{Cr} + \text{Fe}^{3+})$, $X\text{Fe}_{\text{chr}}^{3+} = \text{Fe}^{3+}/(\text{Al} + \text{Cr} + \text{Fe}^{3+})$ 。式(2)至式(5)来自 Zaccarini 等 (2011)。(2)(4)式用于高 Cr 型铬铁矿, (3)(5)式用于高 Al 型铬铁矿。此外, Rollinson (2008)、Pagé 和 Barnes (2009) 在 Kamenetsky 等 (2001) 统计数据的基础上也发展了其它线性回归等式, 这里不再赘述。根据线性关系计算出来的高 Cr 型铬铁矿的母岩浆和玻安质岩浆类似, 而高 Al 型铬铁矿的母岩浆和 MORB 类似 (Melcher et

al., 1997; Rollinson, 2008; Pagé and Barnes, 2009; Zaccarini et al., 2011; Zhou et al., 2014; Hu et al., 2022)。

蛇绿岩铬铁矿床矿石的铬铁矿中常见多相硅酸盐矿物包裹体。这些包裹体的结晶学和形态学特征表明它们为铬铁矿捕获的熔体结晶而成 (McElduff and Stumpfl, 1991; Schiano et al., 1997; Borisova et al., 2012; 苏本勋等, 2021)。通过对这些包裹体进行均一化高温加热实验, 分析淬火之后的玻璃成分以限定成矿母岩浆性质。例如, Schiano 等 (1997) 利用该方法获得 Oman 蛇绿岩南部 Maqsad 岩体中壳幔过渡带纯橄岩中的高 Al 型 (铬铁矿 Cr[#] = 50~60) 铬铁矿床的母岩浆成分和原始玄武质岩浆类似。然而, Rollinson 等 (2018) 对同一区域内成分相似的矿石样品 (铬铁矿 Cr[#] = 49~58) 采用扫描电镜方法分析了铬铁矿中熔体包裹体成分, 结果显示成矿母岩浆具有含水、富 Mg (20%~22%)、富 Cs、Rb、Ba 等亲水性元素 (10 倍原始地幔值) 等特征, 体现了玻安质岩浆的亲水性。目前对铬铁矿中熔体包裹体的研究主要集中于 Oman 蛇绿岩铬铁矿床, 缺少对其它矿床的研究, 需进一步加强对熔体包裹体的研究。

随着超高压矿物包裹体在蛇绿岩豆荚状铬铁矿床矿石铬铁矿中的发现, 成矿母岩浆也可能与深部熔体 (MTZ) (见 3.5 节; Yang et al., 2014, 2015)、软流圈熔体 (见 3.5 节; Zhou et al., 2014; Robinson et al., 2015)、地幔柱熔体 (Farré-de-Pablo et al., 2020) 有关。例如, 克罗地亚 Loma Caribe 蛇绿岩中异常富 Ti (平均为 0.74%; 图 5c、5d 中的空心正方形)、PGE (矿石 PGE 含量可达 4548×10^{-6}) 的高 Cr 型豆荚状铬铁矿床被认为是富 Cr 地幔柱熔体与地幔橄榄岩反应形成 (Farré-de-Pablo et al., 2020)。此外, 矿石铬铁矿中的壳源矿物包裹体暗示了豆荚状铬铁矿床成矿母岩浆中可能含有俯冲沉积物组分 (McGowan et al., 2015; Robinson et al., 2015; González-Jiménez et al., 2015; González-Jiménez and Reich, 2017), 但是缺乏量化母岩浆中沉积物含量的相关研究。总而言之, 目前对于蛇绿岩豆荚状铬铁矿床成矿母岩浆性质的认识仍存在一定的分歧, 对于成矿母岩浆的地幔源区 (如原岩的岩性、是否经历了变质作用、是否含有俯冲壳源物质、是否为地幔柱源区等)、形成条件 (如熔融时的温度、压力、深度等) 仍不明晰。

4.2 岩浆通量的限定

由于 Cr 在基性熔体中的含量较低, 如原始洋中

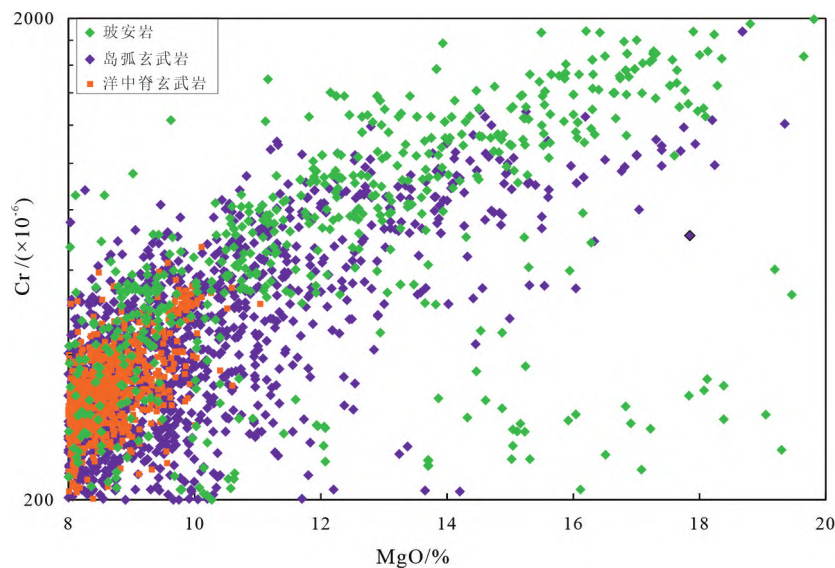
脊玄武岩浆平均 Cr 含量为 350×10^{-6} 、岛弧玄武岩浆平均 Cr 含量为 450×10^{-6} ，而原始玻安岩浆平均 Cr 含量为 780×10^{-6} (图 10; 仅统计全岩 MgO 含量大于 8% 的样品)，若要形成品位高 ($\text{Cr}_2\text{O}_3 > 50\%$)、规模大 ($> 1 \text{ Mt}$) 的铬铁矿床，所需要的母岩浆通量非常大。然而，如何有效限定成矿母岩浆通量是蛇绿岩豆荚状铬铁矿床研究中一个棘手的问题，而且目前在这方面的相关研究也较少。

以罗布莎铬铁矿床为例，其储量为 800 万 t (陈艳虹和杨经绥, 2018)，平均 Cr_2O_3 含量为 53% (鲍佩声等, 1999)。假设玻安质岩浆 Cr 含量为 780×10^{-6} ，罗布莎铬铁矿中的铬铁矿全部由玻安质岩浆通过分离结晶形成，那么至少需要的玻安质岩浆为 3700 Mt (假设岩浆中的 Cr 全部进入铬铁矿)。假设玻安质岩浆密度为 2.5 g/cm^3 ，铬铁矿密度为 4.5 g/cm^3 ，则玻安岩的体积至少应为矿体体积的 870 倍。然而雅江蛇绿岩地壳层位中的基性岩严重缺失，仅在局部地区发现少量火山岩 (吴福元等, 2013)。此外，若进一步考虑熔-岩反应过程中辉石对 Cr 的贡献，首先要确定熔/岩比例以及熔体溶解辉石的效率等因素。pMELTS 模拟结果显示，在不

同的熔/岩比例 (最高为 2 : 1) 下，基性岩浆与地幔橄榄岩之间反应最高仅能形成 2.5% (体积比例) 的铬铁矿 (陈艳虹和杨经绥, 2018)。这表明仅靠热力学模拟难以限定辉石对成矿的贡献，许多精确的数据可能需要借助实验岩石学研究。

在层状铬铁矿床研究中，通常将岩浆通量和岩体体积比较以确定当前矿床规模和岩体规模是否平衡。例如，若要形成 Bushveld 岩体中 Critical Zone (CZ) 9.5 m 厚的铬铁矿层，所需岩浆厚度 (13 km) 远高于 CZ 岩体厚度 (1.2~1.7 km)，暗示部分成矿母岩浆已逃逸并可能形成附近其他岩体 (Naldrett et al., 2012)。而在豆荚状铬铁矿床中，矿体周围除了纯橄岩壳并不存在其他岩浆产物 (仅有少量的辉石岩脉或者辉长岩夹层)，岩浆通量和岩体规模之间的不平衡性暗示了绝大多数母岩浆可能位于深部。

前人研究表明，豆荚状铬铁矿床成矿体系的尺度可能要远大于矿体甚至整个矿区的出露规模，以保障岩浆可提供充足 Cr 金属以成矿 (Arai and Miura, 2016; Hu et al., 2022)。在 Bushveld 层状铬铁矿床研究中，为了解决现有岩体规模和铬铁矿层



洋中脊玄武岩 Cr 含量数据引自 Gale 等 (2013); 岛弧玄武岩 Cr 含量数据引自 Lee and Tang (2020); 玻安岩 Cr 含量数据引自 Hickey 和 Frey (1982), Cameron (1985), Bloomer 和 Hawkins (1987), Falloon 等 (1991, 2008), Pearce 等 (1992a, 1992b), Sobolev 等 (1994), Taylor 等 (1994), Bédard (1999), Manikyamba 等 (2005), König 等 (2008, 2010), Reagan 等 (2010, 2017), Saccani 等 (2011), Osozawa 等 (2012), Li 等 (2013), Expedition 和 Scientists (2015), Dobson 等 (2016), Koutsovitis 和 Magganis (2016), Gianola 等 (2017), Golowin 等 (2017), Haugen (2017), Slovenec 和 Šegvić (2018), Woelki 等 (2018), Patriat 等 (2019), Li 等 (2019), Ishizuka 等 (2020), Shervais 等 (2020), Li 等 (2022)

图 10 全球原始幔源岩浆 ($\text{MgO} > 8\%$) Cr 的含量

Fig. 10 Cr contents in global mantle-derived primary melts ($\text{MgO} > 8\%$)

体积之间的不平衡性,采用晶粥模型以解释大量铬铁矿层的来源(Eales,2000;Eales and Costin,2012):即在 Bushveld 岩体下方存在一个含铬铁矿晶粥的大岩浆房,晶粥向上迁移过程中发生晶体沉降,形成铬铁矿层。这些研究启示我们,尽管豆荚状铬铁矿床普遍分布在壳幔过渡带位置,但是成矿过程可能并不局限于壳幔过渡带的空间内。在矿体下部是否存在深部岩浆房以及晶粥模型是否可用于豆荚状铬铁矿床也是未来值得探索的问题之一,这可能也是解决豆荚状铬铁矿床中岩浆通量和矿体体积之间不对称的有效方案之一。

4.3 Cr 及铬铁矿的迁移-富集机制

前已述及,大多数豆荚状铬铁矿床赋存于中等亏损的方辉橄榄岩(见第1节),暗示成矿所需的 Cr 来自地幔橄榄岩中的辉石,熔-岩反应溶解辉石释放 Cr 也被认为是 Cr 在上地幔中的迁移-富集的有效机制(Zhou et al.,1994;Arai,1997;Edwards et al.,2000;Pagé and Barnes,2009;Rollinson and Adeptunji,2013;Arai and Miura,2016;Johan et al.,2017;Hu et al.,2022)。雅江蛇绿岩带中的地幔岩普遍以亏损程度较高的方辉橄榄岩为主(Dubois-Côté et al.,2005;吴福元等,2013;Griffin et al.,2016),且矿物和全岩地球化学特征显示它们经历了广泛的熔-岩反应过程(Dubois-Côté et al.,2005;Zhou et al.,2005;Dai et al.,2011;Bao et al.,2014;Xu et al.,2020;Zhao et al.,2021;胡杰等,2022),这暗示雅江蛇绿岩带可能具有良好的成矿潜力。然而目前仅在东部罗布莎岩体中发现了大型高 Cr 型豆荚状铬铁矿床,而在日喀则、东波、普兰等岩体中仅存在局部矿化(Xiong et al.,2017a,2017b,2018)。熔-岩反应过程可能是造成铬铁矿矿化和成矿最主要的控制因素。影响熔-岩反应过程的关键因素包括熔体/岩石比例、岩浆中初始 Si 和 H₂O 含量等。适当熔体/岩石比例可能是熔体高效萃取辉石中 Cr 的关键因素。如果熔体/岩石比例过高,则不能有效增加熔体中 Cr 的含量。如果熔体/岩石比例过低,则熔体可能不会完全溶解辉石。熔体/岩石比例可能也会影响铬铁矿的化学组分。这是由于辉石中 Al 属于易熔组分且含量远高于 Cr,熔体溶解辉石萃取 Cr 的同时,熔体中 Al 的含量也会增加,而熔体中的 Al 含量在分离结晶过程中对铬铁矿成分的影响甚大(Kamenetsky et al.,2001),可能导致最终形成 Cr[#] 变化范围较大的铬铁矿,如普兰、东波岩体中同时出现高 Cr 和高 Al 型铬铁矿化的现象(Xiong et al.,2017b,2018)。因此,适当的熔体/岩石比例对地幔

中 Cr 的迁移-富集,以及铬铁矿化学成分的影响可能尤为关键。此外,熔体中的 Si 和 H₂O 含量也会影响熔体萃取地幔中 Cr 的效率。由于辉石中 Si 含量很高,熔体 Si 含量过高则会抑制熔-岩反应进行,降低辉石溶解效率。Shi 等(2007)认为,玻安质岩浆作为一种斜方辉石饱和的富 Si 岩浆,难以与橄榄岩再次发生反应溶解辉石;与贫 H₂O 熔体相比,含 H₂O 熔体溶解辉石的效率更高(Arai and Akizawa,2014;Johan et al.,2017),且具有更高载 Cr³⁺ 能力(Edwards et al.,2000),因为更有利于 Cr 在地幔中迁移-富集。总而言之,熔-岩反应在化学层面上解释了地幔中 Cr 是如何迁移-富集的,但是对熔-岩反应认识还不够细致,需要进一步加以完善。

目前普遍认为流体对铬铁矿迁移-富集至关重要(Matveev and Ballhaus,2002;Su et al.,2020;苏本勋等,2021)。流体的浮力效应导致其能有效地携带高密度金属矿物在岩浆中迁移并富集成矿,这在岩浆磁铁矿(Knippling et al.,2015)及硫化物(Mungall et al.,2015)矿床形成中都起到了重要作用。Matveev 和 Ballhaus(2002)的研究表明,岩浆中的流体附着于铬铁矿微晶上形成水泡,当水泡体积大于铬铁矿体积时,整体密度小于玄武岩浆,从而导致铬铁矿晶体上浮并汇聚上部岩浆池中,直至密度大于玄武质岩浆,铬铁矿在下方堆积成矿。傅里叶变化红外光谱分析结果表明,土耳其 Kizildag 铬铁矿床矿石中粒间单斜辉石的 H₂O 含量高达 801×10^{-6} ,并被解释为形成于熔体和附着于铬铁矿微晶表面流体的混合(Su et al.,2020),从而支持了流体运移铬铁矿的观点(Matveev and Ballhaus,2002)。此外,苏本勋等(2021)提出流体不混溶成矿模型以解释蛇绿岩豆荚状铬铁矿床形成:早期岩浆中的铬铁矿微晶会和流体结合形成小液滴并向上运移,当小液滴不断聚合直到形成含铬铁矿的不混溶大液滴,这些大液滴最终上升至莫霍面附近并大量聚集形成“不混溶铬铁矿液滴池”,最终沉淀形成铬铁矿床。尽管这些研究都表明流体在铬铁矿的迁移-富集过程中起到了重要作用,但是目前对岩浆-流体体系中铬铁矿迁移-富集机制的研究尚不完善,实验岩石学的研究极为匮乏,控制流体搬运铬铁矿的关键因素仍不明确,如岩浆中流体的来源及含量、流体出溶的物理条件(温度、压力、氧逸度、酸碱度等)、流体搬运铬铁矿的效率(能搬运多大的晶体以及迁移速度、频次等)。

4.4 豆荚状铬铁矿床成矿构造背景

在 Oman 蛇绿岩研究中,其构造背景(MOR 和

SSZ) 颇受争议。早期的研究认为 Oman 蛇绿岩中的地幔橄辉岩及铬铁矿形成于 MOR 环境 (Nicolas and Azri, 1991; Kelemen et al., 1995)。然而,越来越多的地球化学数据表明豆荚状铬铁矿床更倾向形成于 SSZ 环境。基于此, Rollinson 和 Adetunji (2013) 对 Oman 北部 Maqsad 蛇绿岩壳幔过渡带纯橄岩中的铬铁矿床进行了研究, 结果表明 Maqsad 铬铁矿床在矿物学及地球化学方面无法体现出 MORB 的亲性和, 例如, 成矿母岩浆的 TiO_2 含量 ($<1.2\%$) 远低于典型的 MORB、母岩浆氧逸度高于 MORB、矿石的铬铁矿中含有 MORB 铬铁矿中不常见的含水矿物包裹体等。因此这些铬铁矿床并非形成于洋中脊扩张背景。由于目前在 MOR 蛇绿岩及现代大洋地幔中没有发现具有经济价值的铬铁矿床, Rollinson 和 Adetunji (2013) 认为豆荚状铬铁矿床无法形成于 MOR 环境。

尽管目前在现代大洋地幔中尚未发现豆荚状铬铁矿床, 但在东太平洋隆 Hess Deep 纯橄岩 (Arai and Matsukage, 1998)、西南印度洋 Atlantis II Fracture Zone 纯橄岩 (Morishita et al., 2007) 以及大西洋北纬 $14^{\circ}97'$ 洋中脊纯橄岩 (周翔等, 2022) 中都发现了局部聚集的细粒铬铁矿集合体。这些铬铁矿和蛇绿岩豆荚状铬铁矿床矿石中的铬铁矿都具有相似的特征 (Arai and Matsukage, 1998; Morishita et al., 2007; 周翔等, 2022); 铬铁矿化现象和纯橄岩密切相关, 围岩方辉橄辉岩较为亏损, 铬铁矿集合体具有细小豆状 (micropod 或者 pod-like) 结构, 铬铁矿的 $\text{Cr}^{\#}$ 为 $50 \sim 60$ 、 $\text{Mg}^{\#}$ 为 $45 \sim 70$, 铬铁矿中有含水矿物 (如角闪石) 包裹体等。这些现象暗示铬铁矿能够在 MOR 环境下结晶并聚集 (Arai and Miura, 2015, 2016)。在洋中脊扩张环境下, 玄武质岩浆在抽离地幔源区的过程中会与橄辉岩发生反应并溶解辉石形成纯橄岩通道 (Kelemen et al., 1995), 因此纯橄岩中的局部铬铁矿化现象可能是小尺度上的玄武质岩浆和地幔橄辉岩反应的结果 (Arai and Matsukage, 1998; Morishita et al., 2007; 周翔等, 2022)。这也是 Arai 和 Miura (2015) 认为豆荚状铬铁矿床能形成于 MOR 环境下最核心的依据, 即豆荚状铬铁矿床的形成与构造背景无关, 而受控于熔-岩反应过程。

目前对“蛇绿岩豆荚状铬铁矿床能否形成于 MOR 环境”尚无定论。Rollinson 和 Adetunji (2016) 重申了熔-岩反应在蛇绿岩豆荚状铬铁矿床形成中重要意义, 但指出“豆荚状铬铁矿床无法形成于 MOR 环境”包含两层含义: ①经济价值。含铬铁矿

化纯橄岩中铬铁矿含量太低, 在经济价值层面远不能与大规模的蛇绿岩豆荚状铬铁矿床相比; ②俯冲过程。豆荚状铬铁矿床的形成可能与岩浆成分 (如弧前玄武岩、玻安岩等)、通量以及含水量有关, 而这些条件与俯冲过程密切相关。例如, 俯冲流体的加入提升了地幔楔部分熔融程度, 相较于洋中脊环境, 俯冲带可形成更多且更加富 Cr 的基性岩浆 (图 10)。俯冲带产生的岛弧基性岩浆的水含量普遍要高于 MORB 岩浆 (Yang et al., 2021), 富水岩浆在 Cr 及铬铁矿的迁移-富集等方面具有重要意义 (详见 3.4 节)。总而言之, 相较于洋中脊扩张背景, 俯冲带环境可能为铬铁矿成矿创造了更加良好的物理化学条件, 因而更有利于大规模豆荚状铬铁矿床的形成。但是这种认知大多停留在定性阶段, 精确限定成矿的物理化学条件的相关研究甚少, 如岩浆体系具体的氧逸度变化、母岩浆的含水量 (以及酸性成分含量) 等与俯冲动力学背景密切相关的成矿因素尚不明晰。

5 研究展望

本文系统总结了全球蛇绿岩豆荚状铬铁矿床的矿床地质特征和矿床地球化学特征, 回顾了蛇绿岩豆荚状铬铁矿床的理论成矿模型。在此基础上, 我们详细讨论了成矿母岩浆性质及其通量、Cr 及铬铁矿的迁移-富集机制以及成矿构造背景。当前研究还不能完全解释蛇绿岩豆荚状铬铁矿床的成因, 尚未完全解决的科学问题包括: ①对成矿母岩浆的地幔源区特征、形成条件及性质存在分歧; ②难以限定成矿母岩浆通量; ③如何精细刻画地幔中 Cr 迁移-富集的化学反应过程 (即熔-岩反应过程) 以及铬铁矿迁移-富集的物理过程; ④如何准确限定俯冲动力学背景对成矿的贡献。鉴于此, 未来的研究可聚焦以下三个方面: ①熔体包裹体研究。虽然部分学者对熔体包裹体进行了研究, 但都主要集中于 Oman 蛇绿岩铬铁矿床, 对其它矿床上的研究甚少。此外, 对含壳源矿物包裹体的矿石样品进行熔体包裹体研究, 在揭示成矿母岩浆性质以及壳-幔循环等方面具有积极意义; ②矿体周围侵入体 (以及地表火山岩) 的缺失可能暗示成矿体系的尺度并不局限于壳幔过渡带。探索矿体下部是否存在深部岩浆房以及晶粥模型是否适用于豆荚状铬铁矿床可能对解决巨量铬铁矿和岩浆通量之间的不平衡性有积极意义; ③地幔条件下 Cr 及铬铁矿迁移-富集机制的实验岩石学以及热力学模拟 (如 pMELTS) 研究。目前对地幔中 Cr 迁移-富集的熔-岩反应机制

的认知不够深入,影响熔体萃取地幔中 Cr 的效率以及晶出铬铁矿成分变化的关键因素不够明确(如熔体/岩石比例,熔体中 Si 和 H₂O 的含量等);对地幔中铬铁矿迁移-富集的流体搬运机制的认知还不够深入,影响流体搬运铬铁矿的关键因素仍不明确(如岩浆中流体的来源及含量、流体出溶的物理条件、流体搬运铬铁矿的效率等)。这些问题可尝试用实验岩石学手段并加以热力学模拟解决;④精确刻画与俯冲动力学背景密切相关的成矿因素,如利用铬铁矿中的变价元素(如 Fe、V)探索成矿过程中岩浆体系的氧逸度变化、利用傅里叶变化红外光谱手段获取铬铁矿中硅酸盐矿物含水量,或者利用硅酸盐矿物中亲水性微量元素(如 Rb、Sr、Cs、Ba 等)的含量以反演成矿母岩浆中的含水量。

致谢:感谢审稿人对本文提出的宝贵修改意见和建议。

参考文献 (References):

- Abuamarah B A, Asimow P D, Azer M K, Ghrefat H. 2020. Suprasubduction-zone origin of the podiform chromitites of the Bir Tuluwah ophiolite, Saudi Arabia, during Neoproterozoic assembly of the Arabian Shield. *Lithos*, 360–361: 105439
- Akmaz R M, Uysal I, Saka S. 2014. Compositional variations of chromite and solid inclusions in ophiolitic chromitites from the southeastern Turkey: Implications for chromitite genesis. *Ore Geology Reviews*, 58: 208–224
- Akbulut M, González-Jiménez J M, Griffin W L, Belousova E, O'Reilly S, McGowan N, Pearson N J. 2016. Tracing ancient events in the lithospheric mantle: A case study from ophiolitic chromitites of SW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 119: 1–19
- Anonymous. 1972. Penrose field conference on ophiolites. *Geotimes*, 17: 24–25
- Arai S. 1980. Dunite-harzburgite-chromitite complexes as refractory residue in the Sangun-Yamaguchi Zone, Western Japan. *Journal of Petrology*, 21(1): 141–165
- Arai S, Yurimoto H. 1994. Podiform chromitites of the Tari-Misaka ultramafic complex, southwestern Japan, as mantle-melt interaction products. *Economic Geology*, 89(6): 1279–1288
- Arai S. 1997. Control of wall-rock composition on the formation of podiform chromitites as a result of magma/peridotite interaction. *Resource Geology*, 47(4): 177–187
- Arai S, Matsukage K. 1998. Petrology of a chromitite micropod from Hess Deep, equatorial Pacific: A comparison between abyssal and alpine-type podiform chromitites. *Lithos*, 43: 1–14
- Arai S. 2013. Conversion of low-pressure chromitites to ultrahigh-pressure chromitites by deep recycling: A good inference. *Earth and Planetary Science Letters*, 379: 81–87
- Arai S, Akizawa N. 2014. Precipitation and dissolution of chromite by hydrothermal solutions in the Oman ophiolite: New behavior of Cr and chromite. *American Mineralogist*, 99(1): 28–34
- Arai S, Miura M. 2015. Podiform chromitites do form beneath mid-ocean ridges. *Lithos*, 232: 143–149
- Arai S, Miura M. 2016. Formation and modification of chromitites in the mantle. *Lithos*, 264: 277–295
- Augé T. 1987. Chromite deposits in the northern Oman ophiolite: Mineralogical constraints. *Mineralium Deposita*, 22(1): 1–10
- Avci E, Uysali, Akmaz R M, Saka S. 2016. Ophiolitic chromitites from the Kizilyüksek area of the Pozanti-Karsanti ophiolite (Adana, southern Turkey): Implication for crystallization from a fractionated boninitic melt. *Ore Geology Reviews*, 90: 166–183
- Bai W J, Zhou M F, Robinson P T. 1993. Possibly diamond-bearing mantle peridotites and podiform chromitites in the Luobusa and Donqiao ophiolites, Tibet. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 30(8): 1650–1659
- Bai Y, Su B X, Wang J, Liu X, Zhang H F, Robinson P T. 2023. Formation and implication of a Cr-bearing spinel seam by interaction between alkali basaltic melt and lherzolite. *Ore Geology Reviews*, 158: 105485
- Ballhaus C. 1998. Origin of podiform chromite deposits by magma mingling. *Earth and Planetary Science Letters*, 156(3–4): 185–193
- Bao P S, Su L, Wang J, Zhai Q G. 2014. Origin of the Zedang and Luobusa ophiolites, Tibet. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(2): 669–698
- Bédard J H, Hébert R. 1998. Formation of chromitites by assimilation of crustal pyroxenites and gabbros into peridotitic intrusions: North Arm Mountain massif, Bay of Islands ophiolite, Newfoundland, Canada. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B3): 5165–5184
- Bédard. 1999. Petrogenesis of boninites from the Betts Cove ophiolite, Newfoundland, Canada: Identification of subducted source components. *Journal of Petrology*, 40(12): 1853–1889
- Bloomer S H, Hawkins J W. 1987. Petrology and geochemistry of boninite series volcanic rocks from the Mariana trench. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97: 361–377
- Borisova A Y, Ceuleneer G, Kamenetsky V S, Arai S, Bějina F, Abily B, Bindeman I N, Polvé M, De Parseval P, Aigouy T, Pokrovski G S. 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
- Brough C P, Prichard H M, Neary C R, Fisher P C, McDonald I. 2015. Geochemical variations within podiform chromitite deposits in the Shetland ophiolite: Implications for petrogenesis and PGE concentration. *Economic Geology*, 110: 187–208
- Cameron W E. 1985. Petrology and origin of primitive lavas from the Troodos ophiolite, Cyprus. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89: 239–255
- Campbell I H, Murck B W. 1993. Petrology of the G and H chromitite zones in the Mountain View Area of the Stillwater Complex, Montana. *Journal of Petrology*, 34(2): 291–316
- Cassard D, Nicolas A, Rabinovitch M, Moutte J, Leblanc M, Prinzhofer A. 1981. Structural classification of chromite pods in southern New

- Caledonia. *Economic Geology*, 76(4): 805–831
- Ceuleneer G, Nicolas A. 1985. Structures in podiform chromite from the Maqsad district (Sumail ophiolite, Oman). *Mineralium Deposita*, 20(3): 177–184
- Chen C, Su B X, Uysal I, Avci E, Zhang P F, Xiao Y, He Y S. 2015. Iron isotopic constraints on the origin of peridotite and chromitite in the Kizildağ ophiolite, southern Turkey. *Chemical Geology*, 417: 115–124
- Chen C, Su B X, Xiao Y, Pang K N, Robinson P T, Uysal I, Lin W, Qin K Z, Avci E, Kapsiotis A. 2019a. Intermediate chromitite in Kizildağ ophiolite (SE Turkey) formed during subduction initiation in Neo-Tethys. *Ore Geology Reviews*, 104: 88–100
- Chen C, Su B X, Xiao Y, Sakyi P A, He X Q, Pang K N, Uysal I, Avci E, Qin L P. 2019b. High-temperature chromium isotope fractionation and its implications: Constraints from the Kizildağ ophiolite, SE Turkey. *Lithos*, 342–343: 361–369
- Chen C, De Hoog J C M, Su B X, Wang J, Uysal İ, Xiao Y. 2020. Formation process of dunites and chromitites in Orhaneli and Harmancik ophiolites (NW Turkey): Evidence from in-situ Li isotopes and trace elements in olivine. *Lithos*, 376–377: 105773
- Chen M, Shu J F, Mao H K, Xie X D, Hemley R J. 2003. Natural occurrence and synthesis of two new postspinel polymorphs of chromite. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(25): 14651–14654
- Colás V, González-Jiménez J M, Griffin W L, Fanlo I, Gervilla F, O'Reilly S Y, Pearson N J, Kerestédjian T, Proenza J A. 2014. Fingerprints of metamorphism in chromite: New insights from minor and trace elements. *Chemical Geology*, 389: 137–152
- Coulthard-Jr D J. 2018. Subduction initiation and igneous petrogenesis: characterizing melt generation at a new convergent boundary through the geochemical analysis of volcanic glass. *University of Iowa*: 1–63
- Dai J G, Wang C S, Hébert R, Santosh M, Li Y L, Xu J Y. 2011. 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. *Chemical Geology*, 288(3–4): 133–148
- Derbyshire E J, O'Driscoll B, Lenaz D, Gertisser R, Kronz A. 2013. Compositionally heterogeneous podiform chromitite in the Shetland Ophiolite Complex (Scotland): Implications for chromitite petrogenesis and late-stage alteration in the upper mantle portion of a supra-subduction zone ophiolite. *Lithos*, 162–163: 279–300
- Derbyshire E J, O'Driscoll B, Lenaz D, Zanetti A, Gertisser R. 2019. Chromitite petrogenesis in the mantle section of the Ballantrae Ophiolite Complex (Scotland). *Lithos*, 344–345: 51–67
- Dick H J B. 1977. Partial melting in the Josephine Peridotite; I, The effect on mineral composition and its consequence for geobarometry and geothermometry. *American Journal of Science*, 277(7): 801–832
- Dickey J S Jr. 1975. A hypothesis of origin for podiform chromite deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(6–7): 1061–1074
- Dobson P F, Blank J G, Maruyama S, Liou J G. 2006. Petrology and geochemistry of boninite-series volcanic rocks, ChichiJima, Bonin Islands, Japan. *International Geology Review*, 48(8): 669–701
- Dubois-Côté V, Hébert R, Dupuis C, Wang C S, Li Y L, Dostal J. 2005. Petrological and geochemical evidence for the origin of the Yarlung Zangbo ophiolites, southern Tibet. *Chemical Geology*, 214(3–4): 265–286
- Eales H V. 2000. Implications of the chromium budget of the Western Limb of the Bushveld Complex. *South African Journal of Geology*, 103(2): 141–150
- Eales H V, Costin G. 2012. Crustally contaminated komatiite: Primary source of the chromitites and Marginal, Lower, and Critical Zone Magmas in a staging chamber beneath the Bushveld Complex. *Economic Geology*, 107(4): 645–665
- Edwards S J, Pearce J A, Freeman J. 2000. New insights concerning the influence of water during the formation of podiform chromitite. In: Dilek Y, Moores E M, Elthon D, Nicolas A, eds. *Ophiolites and Oceanic Crust: New Insights from Field Studies and the Ocean Drilling Program*. Boulder: Colorado. Geological Society of America, 349: 139–147
- Expedition 352 Scientists. 2015. Izu-Bonin-Mariana fore arc: Testing subduction initiation and ophiolite models by drilling the outer Izu-Bonin-Mariana fore arc. *International Ocean Discovery Program Preliminary Report*, 352. <http://dx.doi.org/10.14379/iodp.pr.352.2015>
- Falloon T J, Crawford A J. 1991. The petrogenesis of high-calcium boninite lavas dredged from the northern Tonga ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 102: 375–394
- Falloon T J, Danyushevsky L V, Crawford A J, Meffre B, Woodhead J D, Bloomer S H. 2008. Boninites and adakitites from the northern termination of the Tonga trench: implications for adakite petrogenesis. *Journal of Petrology*, 49(4): 697–715
- Farkaš J, Chrastrný V, Novák M, Čadkova E, Pašava J, Chakrabarti R, Jacobsen S B, Ackerman L, Bullen T D. 2013. Chromium isotope variations ($\delta^{53}/^{52}\text{Cr}$) in mantle-derived sources and their weathering products; Implications for environmental studies and the evolution of $\delta^{53}/^{52}\text{Cr}$ in the Earth's mantle over geologic time. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 123: 74–92
- Farré-de-Pablo J, Proenza J A, González-Jiménez J M, Aiglsperger T, Garcia-Casco A, Escuder-Viruet J, Colás V, Longo F. 2020. Ophiolite hosted chromitite formed by supra-subduction zone peridotite-plume interaction. *Geoscience Frontiers*, 11(6): 2083–2102
- Gale A, Dalton C A, Langmuir C H, Su Y J, Schilling J-G. 2013. The mean composition of ocean ridge basalts. *Geochemistry Geophysics Geosystem*, 14: 489–518
- Günay K, Çolakoglu A R. 2016. Spinel compositions of mantle-hosted chromitite from the Eastern Anatolian ophiolite body, Turkey: Implications for deep and shallow magmatic processes. *Ore Geology Reviews*, 73: 29–41
- Gervilla F, Proenza J A, Frei R, González-Jiménez J M, Garrido C J, Melgarejo J C, Meibom A, Díaz-Martínez R, Lavaut W. 2005. Distribution of platinum-group elements and Os isotopes in chromite ores from Mayarí-Baracoa Ophiolitic Belt (eastern Cuba). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150: 589–607
- Gianola O, Schmidt M W, Jagoutz O, Sambuu O. 2017. Incipient boninitic arc crust built on denudated mantle: the Khantashir ophiolite

- (western Mongolia). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172: 92
- Golowin R, Portnyagin M, Hoernle K, Sobolev A, Kuzmin D, Werner R, 2017a. The role and conditions of second-stage mantle melting in the generation of low-Ti tholeiites and boninites; the case of the Manihiki Plateau and the Troodos ophiolite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172:104
- Golowin R, Portnyagin M, Hoernle K, Hauff F, Gurenko A, Garbeschönberg D, Werner R, Turner S. 2017b. Boninite-like intraplate magmas from Manihiki Plateau require ultra-depleted and enriched source components. *Nature Communications*, 8: 14322
- González-Jiménez J M, Proenza J A, Gervilla F, Melgarejo J C, Blanco-Moreno J A, Ruiz-Sánchez R, Griffin W L. 2011. High-Cr and high-Al chromitites from the Sagua de Tánamo district, Mayarí-Cristal ophiolitic massif (eastern Cuba): Constraints on their origin from mineralogy and geochemistry of chromian spinel and platinum-group elements. *Lithos*, 125: 101–121
- González-Jiménez J M, Griffin W L, Proenza J A, Gervilla F, O'Reilly S Y, Akbulut M, Pearson N J, Arai S. 2014. Chromitites in ophiolites: How, where, when, why? Part II. The crystallization of chromitites. *Lithos*, 189: 140–158
- González-Jiménez J M, Locmelis M, Belousova E, Griffin W L, Gervilla F, Kerestedjian T N, O'Reilly S Y, Pearson N J, Sergeeva I. 2015. Genesis and tectonic implications of podiform chromitites in the metamorphosed ultramafic massif of Dobromirsi (Bulgaria). *Gondwana Research*, 27(2): 555–574
- González-Jiménez J M, Campubí A, Colás V, Griffin W L, Proenza J A, O'Reilly S Y, Centeno-García E, García-Casco A, Belousova E, Talavera C, Farré-de-Pablo J, Satsukawa T. 2017. The recycling of chromitites in ophiolites from southwestern North America. *Lithos*, 294–295: 53–72
- González-Jiménez J M, Reich M. 2017. An overview of the platinum-group element nanoparticles in mantle-hosted chromite deposits. *Ore Geology Reviews*, 81: 1236–1248
- Greenbaum D. 1977. The chromitiferous rocks of the Troodos ophiolite complex, Cyprus. *Economic Geology*, 72(7): 1175–1194
- Griffin W L, Afonso J C, Belousova E A, Gain S E, Gong X H, González-Jiménez J M, Howell D, Huang J X, McGowan N, Pearson N J, Satsukawa T, Shi R, Williams P, Xiong Q, Yang J S, Zhang M, O'Reilly S Y. 2016. Mantle recycling: Transition zone metamorphism of Tibetan ophiolitic peridotites and its tectonic implications. *Journal of Petrology*, 57(4): 655–684
- Habtoor A M, Ahmed A H, Akizawa N, Harbi H, Arai S. 2017. Chemical homogeneity of high-Cr chromitites as indicator for widespread invasion of boninitic melt in mantle peridotite of Bir Tuluha ophiolite, Northern Arabian Shield, Saudi Arabia. *Ore Geology Reviews*, 90: 243–259
- Haugen E A. 2017. Magmatic evolution of early subduction zones: geochemical modeling and chemical stratigraphy of boninite and fore arc basalt from the Bonin fore arc. *Utah State University*, 1–166
- Hickey R L, Frey F A. 1982. Geochemical characteristics of boninite series volcanics; implications for their source. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46: 2099–2115
- Hock M, Friedrich G, Plüger W L, Wichowski A. 1986. Refractory- and metallurgical-type chromite ores, Zambales ophiolite, Luzon, Philippines. *Mineralium Deposita*, 21(3): 190–199
- Hu W J, Zhou M F, Yudovskaya M A, Vikentyev I V, Malpas J, Zhang P F. 2022. Trace elements in chromite as indicators of the origin of the giant podiform chromite deposit at Kempirsai, Kazakhstan. *Economic Geology*, 117(7): 1629–1655
- Li H Y, Taylor R N, Prytulak J, Kirchenbaur M, Shervais J W, Ryan J G, Godard M, Reagan M K, Pearce J A. 2019. Radiogenic isotopes document the start of subduction in the Western Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 518: 197–210
- Li H, Arculus R J, Ishizuka O, Hickey-Vargas R, Yogodzinski G M, McCarthy A, Kusano Y, Brandl P A, Savov I P, Tepley III F J, Sun W D. 2021. Basalt derived from highly refractory mantle sources during early Izu-Bonin-Mariana arc development. *Nat Communication*, 12: 1723
- Li H Y, Li X, Ryan J G, Zhang C, Xu Y G. 2022. Boron isotopes in boninites document rapid changes in slab inputs during subduction initiation. *Nature Communications*, 13: 993
- Irvine T N. 1977. Origin of chromitite layers in the Muskox intrusion and other stratiform intrusions: A new interpretation. *Geology*, 5(5): 273–277
- Ishizuka O, Taylor R N, Umino S, Kanayama K. 2020. Geochemical evolution of arc and slab following subduction initiation: a record from the Bonin Islands, Japan. *Journal of Petrology*, 61(5): ega050
- Johan Z, Martin R F, Ettler V. 2017. Fluids are bound to be involved in the formation of ophiolitic chromite deposits. *European Journal of Mineralogy*, 29(4): 543–555
- Kaufmann F E D, Hoffmann M C, Bachmann K, Veksler I V, Trumbull R B, Hecht L. 2019. Variations in composition, texture, and platinum group element mineralization in the Lower Group and Middle Group chromitites of the Northwestern Bushveld Complex, South Africa. *Economic Geology*, 114(3): 569–590
- Kamenetsky V S, Crawford A J, Mefre 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
- Kapsiotis A, Economou-Eliopoulos M, Zheng H, Su B X, Lenaz D, Jing J J, Antonelou A, Velicogna M, Xia B. 2019. Refractory chromitites recovered from the Eretria mine, East Othris massif (Greece): Implications for metallogeny and deformation of chromitites within the lithospheric mantle portion of a forearc-type ophiolite. *Geochemistry* 79: 130–152
- Kelemen P B, Shimizu N, Salters V J M. 1995. Extraction of mid-ocean-ridge basalt from the upwelling mantle by focused flow of melt in dunite channels. *Nature*, 375(6534): 747–753
- Khedr M Z, Arai S. 2016. Chemical variations of mineral inclusions in Neoproterozoic high-Cr chromitites from Egypt: Evidence of fluids during chromitite genesis. *Lithos*, 240–243: 309–326
- Koutsovitis P, Magganis A. 2016. Boninitic and tholeiitic basaltic lavas and dikes from dispersed Jurassic East Othris ophiolitic units, Greece: petrogenesis and geodynamic implications. *International Geology Review*, DOI: 10.1080/00206814.2016.1198278

- Knipping J L, Bilenker L D, Simon A C, Reich M, Barra F, Deditius A P, Lundstrom C, Bindeman I, Munizaga R. 2015. Giant Kiruna-type deposits form by efficient flotation of magmatic magnetite suspensions. *Geology*, 43(7): 591–594
- Kozlu H, Prichard H, Melcher F, Fisher P, Brough C, Stueben D. 2014. Platinum group element (PGE) mineralisation and chromite geochemistry in the Berit ophiolite (Elbistan/Kahramanmaraş), SE Turkey. *Ore Geology Reviews*, 60: 97–111
- König S, Münker C, Schuth S, Garbe-Schönberg D. 2008. Mobility of tungsten in subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters*, 274: 82–92
- König S, Münker C, Schuth S, Luguët A, Hoffmann J E, Kuduon J. 2010. Boninites as windows into trace element mobility in subduction zones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 684–704
- Langa M M, Jugo P J, Leybourne M I, Grobler D F, Adetunji J, Skogby H. 2020. Chromite chemistry of a massive chromitite seam in the northern limb of the Bushveld Igneous Complex, South Africa: correlation with the UG-2 in the eastern and western limbs and evidence of variable assimilation of footwall rocks. *Mineralium Deposita*, 56: 31–44
- Lago B L, Rabinowicz M, Nicolas A. 1982. Podiform chromite ore bodies: A genetic model. *Journal of Petrology*, 23(1): 103–125
- Leblanc M, Violette J F. 1983. Distribution of aluminum-rich and chromium-rich chromite pods in ophiolite peridotites. *Economic Geology*, 78(2): 293–301
- Leblanc M, Nicolas A. 1992. Ophiolitic chromitites. *International Geology Review*, 34(7): 653–686
- Lee C T, Tang M. 2020. How to make porphyry copper deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 529: 115868
- Li Y B, Kimura J I, Machida S, Ishii T, Ishiwatari S, Maruyama S, Qiu N N, Ishikawa T, Kato Y, Haraguchi S, Takahata N, Hirahara Y, Miyazaki T. 2013. High-Mg sdakite and low-Ca boninite from a Bonin fore-arc seamount: Implications for the reaction between slab melts and depleted mantle. *Journal of Petrology*, 54: 1149–1175
- Lian D Y, Yang J S, Dilek Y, Wu W W, Zhang Z M, Xiong F H, Liu F, Zhou W D. 2017. Deep mantle origin and ultra-reducing conditions in podiform chromitite: Diamond, moissanite, and other unusual minerals in podiform chromitites from the Pozanti-Karsanti ophiolite, southern Turkey. *American Mineralogist*, 102(5): 1101–1113
- Liu X, Su B X, Xiao Y, Chen C, Uysal I, Jing J J, Zhang P F, Chu Y, Lin W, Sakyi P A. 2019. Initial subduction of Neo-Tethyan ocean: Geochemical records in chromite and mineral inclusions in the Pozanti-Karsanti ophiolite, southern Turkey. *Ore Geology Reviews*, 110: 102926
- Lorand J P, Ceuleneer G. 1989. Silicate and base-metal sulfide inclusions in chromites from the Maqсад area (Oman ophiolite, Gulf of Oman): A model for entrapment. *Lithos*, 22(3): 173–190
- Manikyamba C, Naqvi S M, Rao D V S, Mohan M R, Khanna T C, Rao T G, Reddy G L N. 2005. Boninites from the Neoproterozoic Gadwal Greenstone belt, Boninites from the Neoproterozoic Gadwal Greenstone belt, Eastern Dharwar Craton, India: implications for Archaean subduction processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 230: 65–83
- Marchesi C, González-Jiménez J M, Gervilla F, Garrido C J, Griffin W L, O'Reilly S Y, Proenza J A, Pearson N J. 2011. In situ Re-Os isotopic analysis of platinum-group minerals from the Mayarí-Cristal ophiolitic massif (Mayarí-Baracoa Ophiolitic Belt, eastern Cuba): Implications for the origin of Os-isotope heterogeneities in podiform chromitites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161(6): 977–990
- Mathez E A, Mey J L. 2005. Character of the UG2 chromitite and host rocks and petrogenesis of its pegmatoidal footwall, Northeastern Bushveld Complex. *Economic Geology*, 110: 1617–1630
- Matveev S, Ballhaus C. 2002. Role of water in the origin of podiform chromitite deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(1): 235–243
- Maurel C, Maurel P. 1982. Étude expérimentale de la distribution de l'aluminium entre bain silicaté basique et spinelle chromifère. Implications pétrogénétiques; Teneur en chrome des spinelles. *Bulletin de Mineralogie*, 105: 197–202
- McElduff B, Stumpfl E F. 1991. The chromite deposits of the Troodos complex, cyprus-evidence for the role of a fluid phase accompanying chromite formation. *Mineralium Deposita*, 26(4): 307–318
- McGowan N M, Griffin W L, González-Jiménez J M, Belousova E, Afonso J C, Shi R D, McCammon C A, Pearson N J, O'Reilly S Y. 2015. Tibetan chromitites: Excavating the slab graveyard. *Geology*, 43(2): 179–182
- Melcher F, Grum W, Simon G, Thalhammer T V, Stumpfl E F. 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
- Morishita T, Maeda J, Miyashita S, Kumagai H, Matsumoto T, Dick H J B. 2007. Petrology of local concentration of chromian spinel in dunite from the slow-spreading Southwest Indian Ridge. *European Journal of Mineralogy*, 19(6): 871–882
- Mosier D L, Singer D A, Moring B C, Galloway J P. 2012. Podiform chromite deposits-database and grade and tonnage models. U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2012–5157; 1–45
- Moutte J. 1982. Chromite deposits of the Tiebaghi ultramafic massif, New Caledonia. *Economic Geology*, 77(3): 576–591
- Mungall J E, Brenan J M, Godel B, Barnes S J, Gaillard F. 2015. Transport of metals and sulphur in magmas by flotation of sulphide melt on vapour bubbles. *Nature Geoscience*, 8(3): 216–219
- Naldrett A J, Wilson A, Kinnaird J, Yudovskaya M, Chunnett G. 2012. The origin of chromitites and related PGE mineralization in the Bushveld Complex: New mineralogical and petrological constraints. *Mineralium Deposita*, 47(3): 209–232
- Nayak R, Pal D, Chinnasamy S S. 2021. High-Cr chromitites of the Nidar Ophiolite Complex, northern India: Petrogenesis and tectonic implications. *Ore Geology Reviews*, 129: 103942
- Nekrylov N, Portnyagin M V, Kamenetsky V S, Mironov N L, Churikova T G, Plechov P Y, Abersteiner A, Gorbach N V, Gordeychik B N, Krashennnikov S P, Tobelko D P, Shur M Y, Tetroeva S A, Volynets A O, Hoernle K, Wörner G. 2018. Chromium spinel in

- Late Quaternary volcanic rocks from Kamchatka: Implications for spatial compositional variability of subarc mantle and its oxidation state. *Lithos*, 322: 212–224
- Nicolas A, Azri H A. 1991. Chromite-rich and chromite-poor ophiolites: The Oman case. In: Peters T J, Nicolas A, Coleman R G, eds. *Ophiolite Genesis and Evolution of the Oceanic Lithosphere*. Dordrecht: Springer, 261–274
- Oberthür T, Weiser T W, Gast L, Kojonen K. 2003. Geochemistry and mineralogy of platinum-group elements at Hartley Platinum Mine, Zimbabwe. *Mineralium Deposita*, 38(3): 344–355
- Osozawa S, Shinjo R, Lo C H, Jahn B M, Hoang N, Sasaki M, Ishikawa K, Kano H, Hoshi H, Xenophontos C, Wakabayashi J. 2012. Geochemistry and geochronology of the Troodos ophiolite: An SSZ ophiolite generated by subduction initiation and an extended episode of ridge subduction? *Lithosphere* 4(6): 497–510
- Pagé P, Barnes S J. 2009. Using trace elements in chromites to constrain the origin of podiform chromitites in the Thetford Mines ophiolite, Québec, Canada. *Economic Geology*, 104(7): 997–1018
- Pan Q Q, Xiao Y, Su B X, Liu X, Robinson P T, Uysal I, Zhang P F, Sakyi P A. 2022. Amphibole as a witness of chromite formation and fluid metasomatism in ophiolites. *American Mineralogist*, 107(2): 294–305
- Patriat M, Falloon T, Danyushevsky L, Collot J, Jean M M, Hoernle K, Hauff F, Maas M, Woodhead J D, Feig S T. 2019. Subduction initiation terranes exposed at the front of a 2Ma volcanically-active subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 508: 30–40
- Pearce J A, van der Laan S R, Arculus R J, Murton B J, Ishii T, Peate D W, Parkinson I J. 1992a. Boninite and harzburgite from Leg 125 (Bonin-Mariana forearc): a case study of magma genesis during the initial stages of subduction. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 125: 623–659
- Pearce J A, Thirlwall M F, Ingram G, Murton B J, Arculus R J, van der Laan S R. 1992b. Isotopic evidence for the origin of boninites and related rocks drilled in the Izu-Bonin (Ogasawara) forearc, Leg 125. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 125: 623–659
- Prichard H M, Neary C R, Fisher P C, O'Hara M J. 2008. PGE-rich podiform chromitites in the Al 'Ays ophiolite complex, Saudi Arabia: An example of critical mantle melting to extract and concentrate PGE. *Economic Geology*, 103(7): 1507–1529
- Prichard H M, Barnes S J, Godel B, Reddy S M, Vukmanovic Z, Halfpenny A, Neary C R, Fisher P C. 2015. The structure of and origin of nodular chromite from the Troodos ophiolite, Cyprus, revealed using high-resolution X-ray computed tomography and electron backscatter diffraction. *Lithos*, 218–219: 87–98
- Proenza J, Gervilla F, Melgarejo J, Bodinier J L. 1999. Al- and Cr-rich chromitites from the Mayari-Baracoa ophiolitic belt (eastern Cuba): Consequence of interaction between volatile-rich melts and peridotites in suprasubduction mantle. *Economic Geology*, 94(4): 547–566
- Pujol-Solà N, Domínguez-Carretero D, Proenza J A, Haissen F, Ikenne M, González-Jiménez J M, Colás V, Maacha L, García-Casco A. 2021. The chromitites of the Neoproterozoic Bou Azzar ophiolite (central Anti-Atlas, Morocco) revisited. *Ore Geology Reviews*, 134: 104166
- Reagan M K, Ishizuka O, Stern R J, Kelley K A, Ohara Y, Blichert-Toft J, Bloomer S H, Cash J, Fryer P, Hanan B B, Hickey-Vargas R, Ishii T, Kimura J I, Peate D W, Rowe M C, Woods M. 2010. Fore-arc basalts and subduction initiation in the Izu-Bonin-Mariana system. *Geochemistry Geophysics Geosystem*, 11(3): 1–17
- Reagan M K, Pearce J A, Petronotis K, Almeev R R, Avery A J, Carvalho C, Chapman T, Christeson G L, Ferré E C, Godard M, Heaton D E, Kirchenbaur M, Kurz W, Kutterolf S, Li H Y, Li Y B, Michibayashi K, Morgan S, Nelson W R, Prytulak J, Python M, Robertson A H F, Ryan J G, Sager W W, Sakuyama T, Shervais J W, Shimizu K, Whattam S A. 2017. Subduction initiation and ophiolite crust: new insights from IODP drilling. *International Geology Review*, DOI: 10.1080/00206814.2016.1276482
- Robinson P T, Trumbull R B, Schmitt A, Yang J S, Li J W, Zhou M F, Erzinger J, Dare S, Xiong F H. 2015. The origin and significance of crustal minerals in ophiolitic chromitites and peridotites. *Gondwana Research*, 27(2): 486–506
- 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
- Rollinson H, Adetunji J. 2013. Mantle podiform chromitites do not form beneath mid-ocean ridges: A case study from the Moho transition zone of the Oman ophiolite. *Lithos*, 177: 314–327
- Rollinson H, Adetunji J. 2016. Comment on 'Podiform chromitites do form beneath mid-ocean ridges' by Arai S and Miura M. *Lithos*, 254–255: 131–133
- Rollinson H, Mameri L, Barry T. 2018. Polyminerale inclusions in mantle chromitites from the Oman ophiolite indicate a highly magnesian parental melt. *Lithos*, 310–311: 381–391
- Saccani E, Beccaluva L, Photiades A, Zeda O. 2011. Petrogenesis and tectono-magmatic significance of basalts and mantle peridotites from the Albanian-Greek ophiolites and sub-ophiolitic mélanges. New constraints for the Triassic-Jurassic evolution of the Neo-Tethys in the Dinaride sector. *Lithos*, 124: 227–242
- Saveliev D E. 2021. Chromitites of the Kraka ophiolite (South Urals, Russia): geological, mineralogical and structural features. *Mineralium Deposita*, 56: 1111–1132
- Scholpp J L. 2020. Pre-eruptive evolution of Izu-Bonin Boninite melts: mixing, cooling, and crystallization. *Utah State University*: 1–159
- Scholpp J L, Ryan J G, Shervais J W, Stremtan C, Rittner M, Luna A, Hill S A, Atlas Z D, Mack B C. 2022. Petrologic evolution of boninite lavas from the IBM Fore-arc, IODP Expedition 352: Evidence for open-system processes during early subduction zone magmatism. *American Mineralogist*, 107: 572–586
- Schiano P, Clocchiatti R, Lorand J P, Massare D, Delouie E, Chaussidon M. 1997. Primitive basaltic melts included in podiform chromitites from the Oman ophiolite. *Earth and Planetary Science Letters*, 146(3–4): 489–497
- Shervais J W, Reagan M K, Godard M, Prytulak J, Ryan J G, Pearce J A, Almeev R R, Li H Y, Haugen E, Chapman T, Kurz W, Nelson

- W R, Heaton D E, Kirchenbaur M, Shimizu K, Sakuyama T, Vetter S K, Li Y B, Whattam S. 2020. Magmatic response to subduction initiation, Part II: Boninites and related rocks of the Izu-Bonin arc from IODP Expedition 352. *Geochemistry Geophysics Geosystem*, 22: e2020GC009093
- Slovenec D, Šegvić B. 2018. Boninite volcanic rocks from the mélangé of NW Dinaric-Vardar ophiolite zone (Mt. Medvednica, Croatia)-record of Middle to Late Jurassic arc-forearc system in the Tethyan subduction factory. *Mineralogy and Petrology*, 113: 17-37
- Shi R D, Alard O, Zhi X C, O'Reilly S Y, Pearson N J, Griffin W L, Zhang M, Chen X M. 2007. Multiple events in the Neo-Tethyan oceanic upper mantle: Evidence from Ru-Os-Ir alloys in the Luobusa and Dongqiao ophiolitic podiform chromitites, Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(1-2): 33-48
- Sobolev A V, Danyushevsky L V. 1994. Petrology and geochemistry of boninites from the north termination of the Tonga trench: Constraints on the generation conditions of primary high-Ca boninite magmas. *Journal of Petrology*, 35(5): 1183-1211
- Spandler C, Mavrogenes J, Arculus R. 2005. Origin of chromitites in layered intrusions: Evidence from chromite-hosted melt inclusions from the Stillwater Complex. *Geology*, 33(11): 893-896
- Su B X, Zhou M F, Robinson P T. 2016. Extremely large fractionation of Li isotopes in a chromite-bearing mantle sequence. *Scientific Reports*, 6: 22370
- Su B X, Robinson P T, Chen C, Xiao Y, Melcher F, Bai Y, Gu X Y, Uysal I, Lenaz D. 2020. The occurrence, origin, and fate of water in chromitites in ophiolites. *American Mineralogist*, 105(6): 894-903
- Su B X, Zhou M F, Jing J J, Robinson P T, Chen C, Xiao Y, Liu X, Shi R D, Lenaz D, Hu Y. 2019. Distinctive melt activity and chromite mineralization in Luobusa and Purang ophiolites, southern Tibet: Constraints from trace element compositions of chromite and olivine. *Science Bulletin*, 64(2): 108-121
- Su B X. 2022. Cretaceous meteorite impact-induced initial subduction: Records of highly siderophile element abundances and Re-Os isotopes in ophiolites. *Journal of Earth Science*, 33(6): 1526-1534
- Taylor R N, Nesbitt R W, Vidal P, Harmon R S, Auvray B, Croudace I W. 1994. Mineralogy, chemistry, and genesis of the boninite series volcanics, Chichijima, Bonin Islands, Japan. *Journal of Petrology*, 35(3): 577-617
- Thayer T P. 1960. Some critical differences between alpine-type and stratiform peridotite-gabbro complexes. In: *Proceedings of the 21st International Geological Congress Copenhagen*, 247-259
- Thayer T P. 1964. Principal features and origin of podiform chromite deposits, and some observations on the Guelman-Soridağ district, Turkey. *Economic Geology*, 59(8): 1497-1524
- Tzamos E, Kapsiotis A, Filippidis A, Koroneos A, Grieco G, Rassios A E, Kantiranis N, Papadopoulos A, Gamaletsos P N, Godelitsas A. 2017. Metallogeny of the Chrome Ores of the Xerolivado-Skoumtsa Mine, Vourinos Ophiolite, Greece: Implications on the genesis of IPGE-bearing high-Cr chromitites within a heterogeneously depleted mantle section. *Ore Geology Reviews*, 90: 226-242
- Ullah Z, Li J W, Robinson P T, Wu W W, Khan A, Dac N X, Adam M A. 2020. Mineralogy and geochemistry of peridotites and chromitites in the Jijal Complex ophiolite along the Main Mantle Thrust (MMT or Indus Suture Zone) North Pakistan. *Lithos*, 366-367: 105566
- Uysal I, Sadiklar M B, Tarkian M, Karsli O, Aydin F. 2005. Mineralogy and composition of the chromitites and their platinum-group minerals from Ortaca (Muğla-SW Turkey): evidence for ophiolitic chromite genesis. *Mineralogy and Petrology*, 83: 219-242
- Uysal I, Tarkian M, Sadiklar M B, Zaccarini F, Meisel T, Garuti G, Heidrich S. 2009. Petrology of Al- and Cr-rich ophiolitic chromitites from the Muğla, SW Turkey: implications from composition of chromite, solid inclusions of platinum-group mineral, silicate, and base metal mineral, and Os-isotope geochemistry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158: 659-674
- Uysal I, Akmaz R M, Saka S, Kapsiotis A. 2016. Coexistence of compositionally heterogeneous chromitites in the Antalya-Isparta ophiolitic suite, SW Turkey: A record of sequential magmatic processes in the sub-arc lithospheric mantle. *Lithos*, 248-251: 160-174
- Veksler I V, Reid D L, Dulski P, Keiding J K, Schannor M, Hecht L, Trumbull R B. 2015. Electrochemical processes in a crystal mush: cyclic units in the Upper Critical Zone of the Bushveld Complex, South Africa. *Journal of Petrology*, 56(6): 1229-1250
- Warren. 2016. Global variations in abyssal peridotite compositions. *Lithos*, 248-251: 193-219
- Whattam S A, Shervais J W, Reagan M K, Coulthard D A, Pearce J A, Jones P, Seo J, Putirka K, Chapman T, Heaton D, Li H Y, Nelson W R, Shimizu K, Stern R J. 2020. Mineral compositions and thermobarometry of basalts and boninites recovered during IODP Expedition 352 to the Bonin forearc. *American Mineralogist*, 105: 1490-1507
- Wilson A H. 1982. The geology of the Great 'Dyke', Zimbabwe: The ultramafic rocks. *Journal of Petrology*, 23(2): 240-292
- Woelki D, Regelous M, Haase K M, Romer R H W, Beier C. 2018. Petrogenesis of boninitic lavas from the Troodos Ophiolite, and comparison with Izu-Bonin-Mariana fore-arc crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 498: 203-214
- Wu W W, Yang J S, Wirth R, Zheng J P, Lian D Y, Qiu T, Milushi I. 2019. Carbon and nitrogen isotopes and mineral inclusions in diamonds from chromitites of the Mirdita ophiolite (Albania) demonstrate recycling of oceanic crust into the mantle. *American Mineralogist*, 104(4): 485-500
- Xiao Y, Teng F Z, Su B X, Hu Y, Zhou M F, Zhu B, Shi R D, Huang Q S, Gong X H, He Y S. 2016. Iron and magnesium isotopic constraints on the origin of chemical heterogeneity in podiform chromite from the Luobusa ophiolite, Tibet. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(3): 940-953
- Xiao Y, Yuan M, Su B X, Chen C, Bai Y, Ke S, Sun Y, Robinson P T. 2023. The chromite crisis in the evolution of continental magmas and the initial high $\delta^{26}\text{Mg}$ reservoir. *Journal of Petrology*, 64(4): ega019
- Xiong F H, Yang J S, Robinson P T, Gao J, Chen Y H, Lai S M. 2017a. Petrology and geochemistry of peridotites and podiform chromite in the Xigaze ophiolite, Tibet: Implications for a suprasu-

- duction zone origin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 146: 56–75
- Xiong F H, Yang J S, Robinson P T, Xu X Z, Liu Z, Zhou W D, Feng G Y, Xu J F, Li J, Niu X L. 2017b. High-Al and high-Cr podiform chromitites from the western Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet: Implications from mineralogy and geochemistry of chromian spinel, and platinum-group elements. *Ore Geology Reviews*, 80: 1020–1041
- Xiong Q, Henry H, Griffin W L, Zheng J P, O' Satsukawa T, Pearson N J, O' Reilly S Y. 2017. High- and low-Cr chromite and dunite in a Tibetan ophiolite: evolution from mature subduction system to incipient forearc in the Neo-Tethyan Ocean. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172: 45
- Xiong F H, Yang J S, Xu X Z, Kapsiotis A, Hao X L, Liu Z. 2018. Compositional and isotopic heterogeneities in the Neo-Tethyan upper mantle recorded by coexisting Al-rich and Cr-rich chromitites in the Purang peridotite massif, SW Tibet (China). *Journal of Asian Earth Sciences*, 159: 109–129
- Xu M J, Wu Y, Jin Z M. 2013. Experimental constraints on the origin of podiform chromitites. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 87 (Supplementary): 196
- Xu Y, Liu J G, Xiong Q, Su B X, Scott J M, Xu B, Zhu D C, Pearson D G. 2020. The complex life cycle of oceanic lithosphere: A study of Yarlung-Zangbo ophiolitic peridotites, Tibet. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 277: 175–191
- Yamamoto S, Komiya T, Hirose K, Maruyama S. 2009. Coesite and clinopyroxene exsolution lamellae in chromites: *In-situ* ultrahigh-pressure evidence from podiform chromitites in the Luobusa ophiolite, southern Tibet. *Lithos*, 109(2–4): 314–322
- Yang A Y, Langmuir C H, Cai Y, Michael P, Goldstein S L, Chen Z. 2021. A subduction influence on ocean ridge basalts outside the Pacific subduction shield. *Nature Communications*, 12(1): 4757
- Yang J S, Dobrzynetska L, Bai W J, Fang Q S, Robinson P T, Zhang J F, Green II H W. 2007. Diamond- and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet. *Geology*, 35(10): 875–878
- Yang J S, Robinson P T, Dilek Y. 2014. Diamonds in ophiolites. *Elements*, 10(2): 127–130
- Yang J S, Meng F C, Xu X Z, Robinson P T, Dilek Y, Makeyev A B, Wirth R, Wiedenbeck M, Cliff J. 2015. Diamonds, native elements and metal alloys from chromitites of the Ray-Iz ophiolite of the Polar Urals. *Gondwana Research*, 27(2): 459–485
- Zaccarini F, Garuti G, Proenza Fernandez J A, Campos L, Thalhammer O A R, Aiglsperger T, Lewis J F. 2011. Chromite and platinum group elements mineralization in the Santa Elena ultramafic nappe (Costa Rica): Geodynamic implications. *Geologica Acta*, 9(3–4): 407–423
- Zagrdenov N R, Ceuleneer G, Rospabé M, Borisova A Y, Toplis M J, Benoit M, Abily B. 2018. Anatomy of a chromite dyke in the mantle/crust transition zone of the Oman ophiolite. *Lithos*, 312–313: 343–357
- Zhang P F, Zhou M F, Su B X, Uysal I, Robinson P T, Avcı E, He Y S. 2017. Iron isotopic fractionation and origin of chromitites in the paleo-Moho transition zone of the Kop ophiolite, NE Turkey. *Lithos*, 268–271: 65–75
- Zhang P F, Zhou M F, Liu Q Y, Malpas J, Robinson P T, He Y S. 2019. Modification of mantle rocks by plastic flow below spreading centers: Fe isotopic and fabric evidence from the Luobusa ophiolite, Tibet. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 253: 84–110
- Zhang Y F, Jin Z M, Griffin W L, Wang C, Wu Y. 2017. High-pressure experiments provide insights into the Mantle Transition Zone history of chromite in Tibetan ophiolites. *Earth and Planetary Science Letters*, 463: 151–158
- Zhang P F, Zhou M F, Malpas J, Robinson P T. 2020. Origin of high-Cr chromite deposits in nascent mantle wedges: Petrological and geochemical constraints from the Neo-Tethyan Luobusa ophiolite, Tibet. *Ore Geology Reviews*, 123: 103581
- Zhao M S, Chen Y X, Zheng Y F. 2021. Geochemical evidence for forearc metasomatism of peridotite in the Xigaze ophiolite during subduction initiation in Neo-Tethyan Ocean, south to Tibet. *Lithos*, 380–381: 105896
- Zhu Q M, Zhu Y F. 2021. Chromite genesis based on chrome-spinels and their inclusions in the Sartohay podiform chromitites in west Junggar of northwest China. *Ore Geology Reviews*, 119: 103401
- 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
- Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, Li Z J. 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
- Zhou M F, Sun M, Keays R R, Kerrich R W. 1998. Controls on platinum-group elemental distributions of podiform chromitites: A case study of high-Cr and high-Al chromitites from Chinese orogenic belts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(4): 677–688
- Zhou M F, Malpas J, Robinson P T, Sun M, Li J W. 2001. Crystallization of podiform chromitites from silicate magmas and the formation of nodular textures. *Resource Geology*, 51(1): 1–6
- Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, Edwards S J, Qi L. 2005. REE and PGE geochemical constraints on the formation of dunites in the Luobusa ophiolite, southern Tibet. *Journal of Petrology*, 46(3): 615–639
- Zhou M F, Robinson P T, Su B X, Gao J F, Li J W, Yang J S, Malpas J. 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
- 白文吉, 杨经绥, Robinson P, 方青松, 张仲明, 颜秉刚, 胡旭峰. 2001. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中金刚石的研究. *地质学报*, 75(3): 404–409
- 白文吉, 杨经绥, 施倪承, 方青松, 代明泉, 熊明, 颜秉刚. 2004. 西藏罗布莎蛇绿岩地幔岩中首次发现超高压矿物方铁矿和自然铁. *地质论评*, 50(2): 184–188
- 鲍佩声, 王希斌, 彭根永. 1999. 中国铬铁矿床. 北京: 科学出版社
- 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): 1741–1761
- 陈艳虹, 杨经绥. 2018. 豆荚状铬铁矿床研究回顾与展望. *地球科*

- 学, 43(4): 991-1010
- 郭国林, 杨经绥, 刘晓东, 徐向珍, 武勇. 2016. 西藏罗布莎铬铁矿床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
- 胡杰, 钟宏, 阮涛, 郑石基, 柏中杰. 2022. 雅鲁藏布江缝合带西段普兰地幔源区特征. 矿物学报, 42(5): 590-604
- 金振民, Bai Q, Kohlstedt D L, 金淑燕. 1996. 铬铁矿预富集和上地幔部分熔融关系的实验研究. 地质论评, 42(5): 424-429
- 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
- 苏本勋, 白洋, 陈晨, 刘霞, 肖燕, 唐冬梅, 梁子, 崔梦萌, 彭青山. 2018a. 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
- 苏本勋, 肖燕, 陈晨, 白洋, 刘霞, 梁子, 彭青山. 2018b. 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
- 苏本勋, 刘霞, 陈晨, Robinson P T, 肖燕, 周美夫, 白洋, Uysal I, 张鹏飞. 2021. 蛇绿岩铬铁矿成矿新模型: 流体不混溶作用. 中国科学: 地球科学, 51(2): 250-260
- 王希斌, 鲍佩声. 1987. 豆荚状铬铁矿床的成因—以西藏自治区罗布莎铬铁矿床为例. 地质学报, (2): 166-181
- 王焰, 钟宏, 曹勇华, 魏博, 陈晨. 2020. 我国铂族元素、钴和铬主要矿床类型的分布特征及成矿机制. 科学通报, 65(33): 3825-3838
- 吴福元, 刘传周, 张亮亮, 张畅, 王建刚, 纪伟强, 刘小驰. 2013. 雅鲁藏布蛇绿岩—事实与臆想. 岩石学报, 30(2): 293-325
- 熊发挥, 杨经绥, 刘钊. 2013. 豆荚状铬铁矿多阶段形成过程的讨论. 中国地质, 40(3): 820-839
- 熊发挥, 杨经绥, 巴登珠, 刘钊, 徐向珍, 冯光英, 牛晓露, 许继峰. 2014. 西藏罗布莎不同类型铬铁矿的特征及成因模式讨论. 岩石学报, 30(8): 2137-2163
- 余良晖, 王海军, 于银杰. 2006. 我国铬铁矿战略储备构思. 国土资源, (8): 24-25
- 周翔, 郑建平, 熊庆, 刘文龙, Dick H J B. 2022. 慢速扩张脊下的复杂熔—岩相互作用: 来自大西洋北纬 14°97' 区段洋中脊含铬铁矿纯橄岩的记录. 地质学报, 92(12): 4242-4256

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)

·亮点速读·

大氧化事件后再循环沉积物引发的弧下地幔氧逸度变化

虽然大气、地壳和地幔之间的物质交换主要经俯冲过程中沉积物的循环来实现, 但受大气组成影响的沉积物对地幔氧逸度的影响如何随时间的递进而变化却鲜为人知。由于地核形成过程中金属铁的加入和随后的均质化作用, 地幔氧逸度(f_{O_2})可能在地球早期发生变化, 但对于氧逸度如何随时间变化却并未形成共识。地幔 f_{O_2} 要么被描述为基本不变, 要么认为随着时间的推移几乎保持恒定的增长速度。在板块构造主导的现代地球, 大量经历表生氧化作用的沉积物以板片流体和俯冲沉积物的形式进入地幔, 最终影响了地幔楔和弧岩浆的氧化状态。发生于~2.45 Ga 和 2.20 Ga 之间的地球大氧化事件代表了地球历史上地表环境最剧烈的改变, 对地球的宜居性产生了深远的影响, 也为了解与地表-地幔间相互作用有关的岩浆活

动提供了一个重要窗口。认识岩浆氧化还原状态随时间的改变不仅有助于澄清海洋-大气对地幔氧化还原电位的影响, 而且对于阐明深海氧化作用是否局限于显生宙时期也具有重要的意义。作为岩浆中的常见副矿物, 磷灰石可以同时容纳氧化硫和还原硫, 拥有记录岩浆氧逸度的突出能力。

最近, 以法国蒙彼利埃大学 Hugo Moreira 为首的一个科研团队对巴西米内罗带 2.4~2.1 Ga 期间的 TTG 和赞岐岩开展了研究, 其母岩浆形成于年轻地壳的熔融并有弧下地幔楔再循环沉积物的加入。应用 K 缘微 X 射线吸收近边结构光谱, 团队成员分析了锆石中磷灰石包体 S^{6+} , S^{4+} 和 S^{2-} 的相对丰度, 并用经过试验校正的磷灰石氧压力计估算了氧逸度。结果显示, TTG 和赞岐岩形成于不同的氧化还原条件。其中, 2.35 Ga 的 TTG 中磷灰石包

裹体三个最精确的测量值介于 $\Delta FMQ - 0.75 \pm 0.30$ 和 -0.28 ± 0.38 之间, 而 2.13 Ga 赞岐岩形成于大氧化事件之后, 其磷灰石包裹体的测量范围为 $\Delta FMQ + 0.80 \pm 0.16$ 至 $+1.24 \pm 0.36$, 明显比大氧化事件前形成的磷灰石更加氧化。这一结果也得到锆石微量元素数据的证实。

上述事实反映了早元古时期大氧化事件前后磷灰石包裹体组成经历了由还原向更氧化状态的改变。作者认为该变化过程是氧化的沉积物向深部俯冲的直接结果, 反映了大氧化事件前后地幔-大气间相互作用的差异。这一发现表明, 始于太古代的沉积物循环推动大气和地幔间的反应, 早期氧气的“气息”可能已经促成了地球上钙碱性岩浆活动和相关矿床的局部增加。

[以上成果发表在著名学术期刊 *Nature Geoscience*: Moreira H, Storey C, Bruand E, Darling J, Fowler M, Cotte M, et al. 2023. Sub-arc mantle fugacity shifted by sediment recycling across the Great Oxidation Event. *Nature Geoscience*. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01258-4>]

(袁超 编译)

专题作者简介



钟宏, 1971—2023.4, 生前系中国科学院地球化学研究所副所长, 研究员, 中国科学院大学岗位教授, 博士生导师。主要从事与镁铁-超镁铁质岩相关的成岩成矿作用研究。先后主持国家杰出青年基金、国家重点研发计划、国家自然科学基金委创新团体、973 项目等重要课题。发表 SCI 论文 100 余篇。在峨眉山地幔柱相关的镁铁-超镁铁层状岩体中 Fe-Ti-V 和 Cu-Ni-PGE 成矿时限、规律和机制、与层状岩体相关的酸性岩浆活动规律及其与地幔柱活动的耦合机制、玄武岩 PGE 亏损和与 Cu-Ni-PGE 富集的成因联系等方面有较深入研究。



纪伟强, 1981 年生, 中国科学院地质与地球物理研究所研究员, 博士生导师, 挥发分析实验室主任。台湾大学和美国南加州大学访问学者。曾主持国家自然科学基金青年和面上项目, 参与科技部重点研发计划和国家自然科学基金委基础科学中心项目, 现主持第二次青藏高原综合科学考察研究新增项目“铷钽资源现状与远景评估”。现任 *Frontiers in Earth Science* 杂志副主编。曾获中国科学院院长优秀奖、第十三届青藏高原青年科技奖。主要从事岩浆作用及资源环境效应研究。发表 SCI 论文 70 余篇, SCI 引用 5000 多次 (H-Index 37)。主要学术成果包括: 1) 厘定了藏南冈底斯岩基的年代学格架及其独特的岩石学与地球化学特征, 并提出其是制约印度-亚洲大陆碰撞时间和约束亚洲大陆剥露-侵蚀历史的重要岩石学标志; 2) 限定了雅江新特提斯洋板片的断离时间, 提出软流圈来源岩浆是识别俯冲板片断离的岩石学标志; 3) 提出喜马拉雅淡色花岗岩可以由高 Sr/Y 岩浆经分离结晶和同化混染作用形成的新观点, 更新了对其成因类型的认识。



王枫, 1984 年生, 吉林大学地球科学学院教授, 自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室教授, 博士生导师。国家自然科学基金优秀青年科学基金项目获得者 (2020)。现为中国矿物岩石地球化学化学学会第十届理事会化学地球动力学专业委员会和青年工作委员会委员, *Journal of Earth Science* 等三个学术期刊青年编委。主要从事火成岩成因、俯冲带岩石地球化学-同位素地球化学和造山带岩石圈演化等方面的研究。主要学术成果包括: 1) 在中亚造山带东段松嫩地块东缘发现新元古代地质体, 揭示了松嫩地块的基底属性, 重塑了兴蒙造山带东部古生代演化历史; 2) 利用火成岩组合时空变异, 结合沉积物源变化, 揭示了古亚洲洋最终闭合时间与方式, 确定了古太平洋板块在欧亚大陆下俯冲的起始时间和俯冲变化过程; 3) 提出了深部地幔流驱动东北亚陆缘新生代周期性弧后伸展的动力学机制。发表 SCI 检索论文 70 余篇。曾获得吉林省自然科学一等奖 2 项 (2017 年, R3; 2021 年, R4)。



张少华,1995年生,矿物学、岩石学、矿床学博士,中国科学院地质与地球物理研究所工程师。英国爱丁堡大学访问学者(2022年6月—2023年5月)。目前以第一作者在 *Lithos*, *Lithosphere* 和《岩石学报》等期刊发表 SCI 论文三篇,曾获中国科学院大学三好学生,硕士研究生国家奖学金。主要研究方向是大规模火山爆发及其气候效应。



李振新,1995年生,2022年在中国科学技术大学地球化学专业获博士学位,现在中国科学技术大学地球和空间科学学院从事博士后研究工作,主要研究方向为岩石地球化学和前寒武纪地质学。在 *Precambrian Research* 和 *Lithos* 杂志上发表第一作者文章2篇。



阮涛,1994年生,中国科学院地球化学研究所在读博士研究生。研究方向为蛇绿岩豆荚状铬铁矿床成矿过程及弧下岩石圈地幔过程。



王学颖,1998年生,硕士毕业于南京大学地球科学与工程学院,主要研究方向为火成岩岩石学。