

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*

郭国林^{1,2,3} 杨经绥² 刘晓东^{1,3} 徐向珍² 武勇²

GUO GuoLin^{1,2,3}, YANG JingSui², LIU XiaoDong^{1,3}, XU XiangZhen² and WU Yong²

1. 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 南昌 330013

2. 中国地质科学院地质研究所, 中国地质调查局大陆构造与动力学创新研究中心, 地幔研究中心, 北京 100037

3. 东华理工大学地球科学学院, 南昌 330013

1. *Fundamental Science on Radioactive Geology and Exploration Technology Laboratory, East China University of Technology, Nanchang 330013, China*

2. *CARMA, Innovative Research Center of Continental Tectonics and Dynamics, CGS; Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China*

3. *Faculty of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China*

2016-06-01 收稿, 2016-09-20 改回.

Guo GL, Yang JS, Liu XD, Xu XZ and Wu Y. 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

Abstract This paper study on the in-situ distribution of PGM in three mining areas in the Luobusa deposit, various PGMs and its microstructure obtained so far from each mining area suggesting that PGM can record the evolutions of the host chromitites. In situ PGMs results from Luobusa mining area show that the parental melts in Luobusa chromitite have a condition with high temperature and low sulfur fugacity, suggesting the chromite forms during the process of melting rock reaction and/or crystallization differentiation. The PGM occurrence in Kangjinla mining area are mainly composite phase inclusions in chromitites, also a few single phase PGM host in the fracture, which implying the parental melts of Kangjinla chromite origin from the melt mingling process, and modified by hydrothermal fluid at the later stage. The PGM obtained from Xiangkashan chromitites sample mostly are awaruites, which occurred in the fracture or intercrystalline in chromitites. Maybe subjected to the process of serpentinisation and/or hydrothermal metamorphism after the chromite crystallization. Mineral associations and microstructure of platinum-group minerals (PGM) can provide an efficacious clue to understand the physical and chemical conditions during the crystallization of chromitite. Therefore, PGMs in situ study is significant for us to understand the formation of unusual mineral preserved in chromitite and the crystallization of chromitite, and the study on PGMs combining in-situ examination and mechanical separation can obtain both their abundance and textural information.

Key words Luobusa ophiolite; PGM; Chromitite; In situ

摘要 本文对罗布莎三个矿区的铬铁矿进行了详细的原位 PGM 研究, 发现罗布莎各个矿区的铬铁矿中 PGM 组合和显微结构不同, 暗示 PGM 能够记录铬铁矿形成与演化过程。罗布莎矿区的 PGM 显微特征显示铬铁矿结晶于高温、低硫逸度的环境中, 可能系岩石/熔体反应和结晶分异双重作用下的产物; 康金拉矿区的原位 PGM 主要为组合型包裹体, 有少量产于铬铁矿裂隙之间的贱金属硫化物和合金矿物, 为不同来源的熔体混合作用的结果, 并暗示铬铁矿成矿后还受到热液流体的改造; 香卡山矿区的 PGM 表明铬铁矿成矿之后遭受到还原性流体的交代作用, 铬铁矿中早期结晶出来的硫化物或者铂族矿物被还原改造, 形成铁镍矿等次生矿物, 保存于铬铁矿粒间或者铬铁矿的裂隙中, 这个过程可能与蛇纹石化或者晚期构造流体改造作用有关。罗布莎原位 PGM 研究表明, PGM 矿物贯穿于铬铁矿结晶成矿过程的始终, PGM 的矿物及其组合能够记录铬铁矿结晶时母熔体的物理化学条件, 甚至还能反映铬铁矿成矿后所经历的后构造热液事件。因此, 结合单矿物分选和原位调查两

* 本文受国家自然科学基金项目(41262002、41202036、41302053)、国家行业专项(SinoProbe-05-02)、中国地质调查局工作项目(DD20160023-01)和 ICGP-649 项目联合资助。

第一作者简介: 郭国林, 男, 1979 年生, 副教授, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事岩石学和矿物学的教学与研究, E-mail: gglobin@163.com

种方法,查明铬铁矿中 PGM 的赋存类型及微观结构,对全面理解铬铁矿的成矿过程有重要意义。

关键词 罗布莎蛇绿岩;铂族矿物;铬铁矿;原位

中图法分类号 P578.12

1 引言

在西藏罗布莎铬铁矿中首次发现金刚石(中国地质科学院地质研究所金刚石组,1981)以来,迄今已经在罗布莎铬铁矿矿石及围岩中发现了千余粒金刚石以及一批特殊的地幔矿物,它们包括代表极还原环境的碳硅石、氮化物、碳化物和自然元素等(Xu *et al.*, 2015; 徐向珍等, 2008),以及代表超高压环境的金刚石、八面体假象硅酸盐、富硅金红石、呈斯石英假象的柯石英等(Yang *et al.*, 2003, 2007, 2014; 杨凤英等, 1981),这些异常矿物的出现改变了此前铬铁矿浅部成因的认识,引起了国际研究人员的广泛关注。

豆荚状铬铁矿的成因一直颇有争议,早期有堆晶成因、岩浆熔离、地幔熔融残余以及熔体-岩石反应等观点(Arai and Yurimoto, 1994; Coleman, 1977; Nicolas and Prinzhofer, 1983; Zhou *et al.*, 1994; 鲍佩声等, 1999);近年来伴随着异常矿物的发现,又陆续提出了深部地幔部分熔融、铬铁矿重循环、板片断离等新的成因模式(Arai, 2013; McGowan *et al.*, 2015; Su *et al.*, 2016; Xiong *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2014, 2015; Zhou *et al.*, 2014)。

近年来还在罗布莎铬铁矿内的 Os-Ir-Ru 合金中发现了玻安质包体,它被证明是玻安岩质的尖晶石,推测其形成于 400~670km 的过渡带位置(白文吉等, 2005);在铬铁矿包裹的 Os-Ir 合金内还发现了金刚石包裹体,暗示其形成于 ca. 2.8~4.0GPa 条件下,认为该 Os-Ir 合金至少经历 120km 以下的深部地质过程;另外铬铁矿包裹的 Fe-Ti 合金的边部发现柯石英和未知硅酸盐矿物组合,柯石英呈现斯石英的晶体假象,推测形成压力 >9GPa,研究认为铬铁矿可能来自于深度大于 300km 的深部地幔(Yang *et al.*, 2007)。铬铁矿中这些铂族矿物和合金矿物中陆续发现的金刚石、玻安质尖晶石和呈斯石英假象的柯石英等高压矿物(Yang *et al.*, 2007; 白文吉等, 2005),说明他们蕴含较丰富的深部信息,同时说明铬铁矿内的金属矿物能够捕获超高压或极还原矿物,与铬铁矿成因密切相关,因此研究铬铁矿中的 PGM 矿物,有助于我们理解异常矿物在铬铁矿中的保存机制并进而探讨铬铁矿的深部成因。

研究表明,铬铁矿中原位产出 PGM 的晶体形态、颗粒大小、产出位置、成分、结构、共生矿物组合等可以指示其形成环境,特别是能够反映主矿物结晶过程中的热力学条件(Garuti *et al.*, 1999a, b; González-Jiménez *et al.*, 2009; 管涛等, 2004),因此铬铁矿中的 PGM 研究可以为铬铁矿成因提供依据(Augé and Johan, 1988a; Garuti *et al.*, 1999b; Uysal *et al.*, 2005)。基于这些认识,本文拟通过对罗布莎矿床中

不同矿区的铬铁矿进行原位的 PGM 矿物研究,全面调查铬铁矿中原位 PGM 的种类、产出状态、显微结构、形成世代、矿物组合等内容,尝试了解这些 PGM 矿物共生组合所反映的物理化学条件,探讨其隐含的成因信息,剖析 PGM 矿物组合与铬铁矿形成之间的成因联系,为讨论蛇绿岩型铬铁矿的深部成因问题提供新的矿物学证据。

2 地质背景

雅鲁藏布江缝合带西起印度河蛇绿岩带,东部与印度-缅甸蛇绿岩带相接(图 1),是印度板块与欧亚板块的分界线(Allégre *et al.*, 1984; Nicolas *et al.*, 1981; Tapponnier *et al.*, 1981),代表新特提斯洋盆古近纪期间的闭合,系晚侏罗世-白垩纪期间印度和欧亚两大板块汇聚、特提斯洋板块向北俯冲,并于始新世期间发生陆陆碰撞的产物(Aitchison *et al.*, 2000; McDermid *et al.*, 2002; Tapponnier *et al.*, 1981)。雅鲁藏布江缝合带内的蛇绿岩块按产出位置可分为西段(萨嘎以西至中印边境)、中段(昂仁-仁布)、东段(曲水-墨脱)三部分,主要出露的岩体从西到东依次有东波、普兰、休古嘎布、当穷、仲巴、萨嘎、桑桑、吉定、白朗、大竹卡、泽当、罗布莎等,其中罗布莎岩体是我国重要的铬铁矿产区(Dai *et al.*, 2011; 黄圭成等, 2006; 潘桂棠等, 1997; 杨经绥等, 2008)。

罗布莎铬铁矿发现了西藏第一颗蛇绿岩带中的金刚石(中国地质科学院地质研究所金刚石组,1981),后续的研究发现该矿床中还产出有大量的异常地幔矿物(白文吉等, 2001; 徐向珍等, 2008; 杨经绥等, 2008),是了解地球深部的重要研究场所,引起了世界各地地质工作者的持续关注(Dobrzhinetskaya *et al.*, 2009, 2014; McGowan *et al.*, 2015; Rollinson, 2016; Yamamoto *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2007; Lee and Anderson, 2015)。罗布莎蛇绿岩位于拉萨东侧约 200km 的曲松县境内,沿雅鲁藏布江展布,是雅鲁藏布江蛇绿岩带东段的最重要蛇绿岩体之一。岩体长约 40km,最宽处达 2~3.7km,面积约 70km²(图 2),沿走向和倾向形成一系列褶皱并向北凸出略呈弧形展布(王希斌等, 1987)。岩体变形强烈,平面上略呈一平置的反“S”形,岩体为向北倒转并向南倾的推覆体(白文吉等, 2000; 梁凤华等, 2011)。岩体南侧为泥砂质、钙质沉积岩和基性火山岩组成的上三叠统复理石建造,地层韵律清晰,交错层理和印模发育,与岩体呈断层接触。岩块北侧分布有冈底斯花岗岩岩基和第三纪磨拉石建造,亦与岩体呈断层接触。

罗布莎蛇绿岩主要由变质地幔橄辉岩和堆晶岩组成,岩体北侧有少量由火山岩和硅质岩构成的混杂岩(杨经绥等, 2004)。变质地幔橄辉岩以方辉橄辉岩和纯橄岩为主,占整

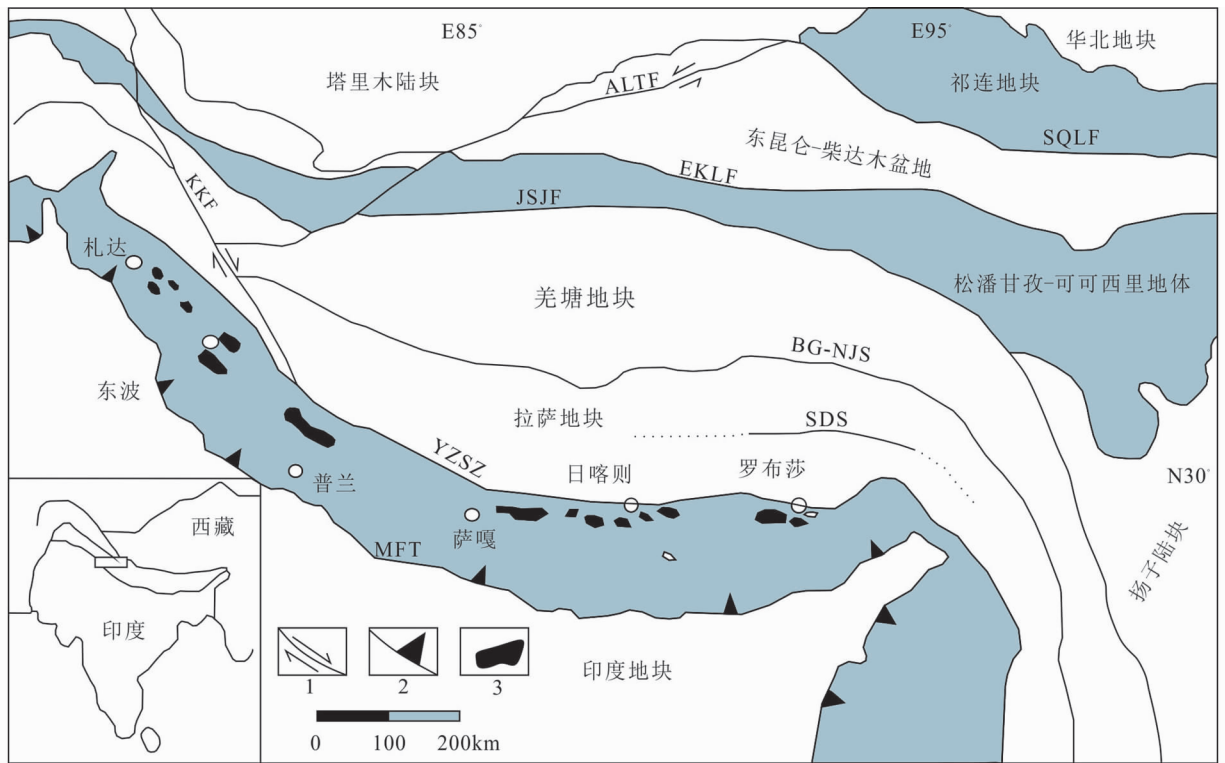


图1 青藏高原主要地质体地质简图(据刘飞等,2013)

1-走滑断裂;2-逆冲断裂;3-超基性岩块;ALTF-阿尔金断裂;SQLF-南祁连南缘断裂;KKF-喀喇昆仑缝合带;EKLK-东昆仑断裂;JSJF-金沙江缝合带;BG-NJS-班公怒江缝合带;SDS-松多缝合带;YZSZ-雅鲁藏布江缝合带;MFT-主前缘逆冲断裂

Fig.1 Sketch map of the Tibetan Plateau showing major tectonic units and research region (after Liu *et al.*, 2013)

个岩体出露面积的90%以上,夹有少量的二辉橄橄岩;堆晶岩由异剥橄橄岩、二辉石岩、异剥辉石岩、辉长岩等组成,占整个岩体出露面积的7%左右(王希斌等,1987)。罗布莎铬铁矿床产于纯橄岩-方辉橄橄岩内,为典型的阿尔卑斯型铬铁矿(王恒升等,1983)。

地幔橄橄岩岩石新鲜,质地坚硬,呈灰绿色,原生结构和构造清晰,具有中-粗粒粒状结构,碎斑结构和熔融代替结构,橄橄岩、辉石具有早晚两个世代(徐向珍,2009)。地幔橄橄岩尖晶石的 $Cr^{\#}$ ($Cr/Cr + Al$)值变化范围较大,矿物化学研究表明,罗布莎岩块保留了MOR型和SSZ型蛇绿岩双重特征,其形成过程可能经历了从MOR到SSZ两种构造环境的转变(白文吉等,2000;徐向珍,2009)。地球化学特征表明,罗布莎地幔橄橄岩具有低 Al_2O_3 和CaO,富Mg贫Ti、 ΣREE 的特征,与典型蛇绿岩中的方辉橄橄岩相似。辉长岩地球化学特征显示了洋脊拉斑玄武岩和大洋岛弧拉斑玄武岩双重特点,而玄武岩具有洋中脊玄武岩特征,指示罗莎蛇绿岩可能形成于边缘海盆地的海底慢速扩张环境(叶培盛等,2006)。年代学研究表明,枕状玄武岩Rb-Sr同位素年龄、辉长辉绿岩脉中斜长石、辉石及两个全岩的内部Sm-Nd等时线年龄以及辉绿岩的锆石SHRIMP U-Pb年龄等的结果表明,罗布莎蛇绿岩的形成年龄为 162.9 ± 2.8 Ma到 177 ± 3.1 Ma,属中晚侏罗纪(钟立峰等,2006;周肃等,2001)。然

而最新的罗布莎蛇绿岩体年代学数据表明,罗布莎岩体中切割蛇纹岩的辉长岩脉以及斜长角闪岩的锆石SIMS U-Pb年龄分别在 128.4 ± 0.9 Ma和 131.0 ± 1.2 Ma,与雅鲁藏布江西段蛇绿岩的年代又大致相同(Zhang *et al.*, 2016)。

3 研究方法

本次铬铁矿中的原位PGM研究采用矿相显微镜和电子探针相结合的方式。具体的研究方法是首先按要对研究用的铬铁矿样品进行取样,制作薄片和光片后在光学显微镜下查找PGM矿物,该过程可以大致确定PGM的大小和产出状态。接下来对PGM进行电子探针分析,对研究样品进行镀碳预处理工作后,在电子探针中对PGM矿物进行X-Ray射线能谱定性分析以确定矿物种类,最后对PGM矿物进行定量分析。电子探针定量分析在东华理工大学国家重点实验室培育基地进行,仪器型号为JEOL JXA-8100的电子探针,该仪器配备有3道波谱仪和1道X射线能谱仪。仪器工作参数加速电压为15.0kV,电子束流为20nA,束斑直径设为 $1\mu m$ 。参考标样选用天然或合成金属单质,或者硫化物矿物,并用电子探针仪器自带的在线校正程序进行各元素背景测量和重迭峰校正处理。PGM矿物各主要元素的检测极限均优于0.02%,相对误差优于2%。

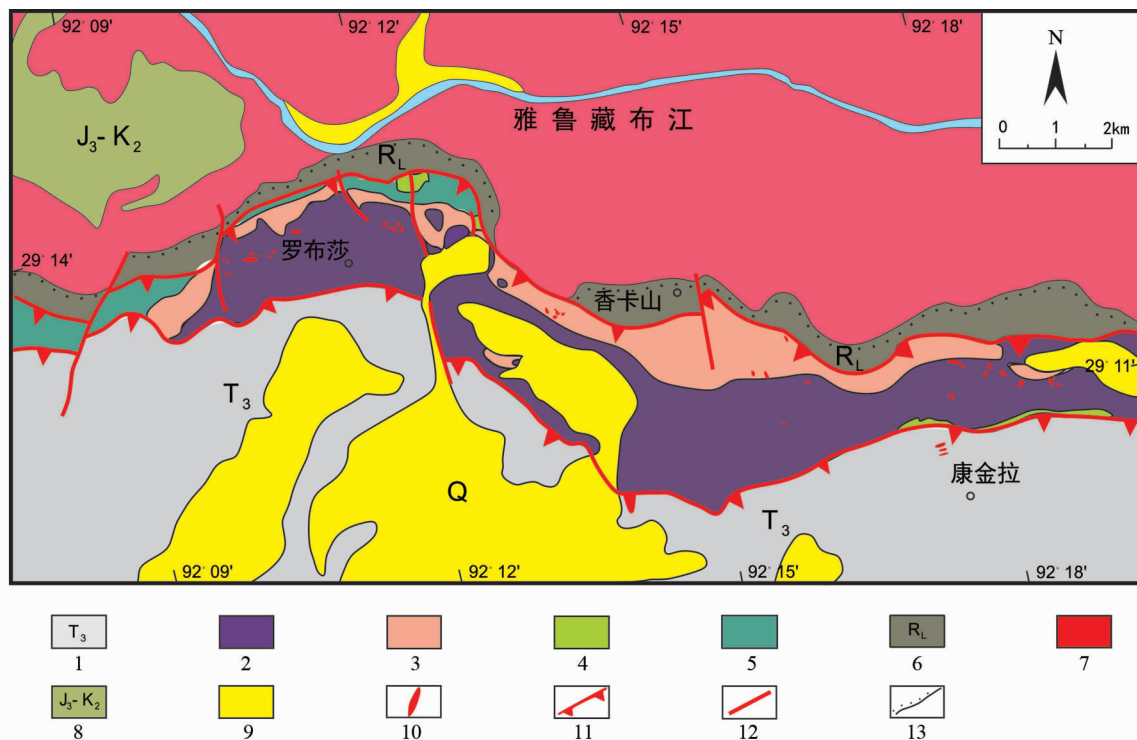


图2 罗布莎超镁铁质岩体及铬铁矿地质简图(据鲍佩声等, 1999 修改)

1-上三叠统;2-方辉橄榄岩;3-纯橄岩;4-滑石菱镁矿;5-堆晶岩;6-罗布莎群;7-花岗岩;8-上白垩统;9-第四纪;10-豆荚状铬铁矿点;11-逆冲断层;12-断层;13-不整合

Fig.2 Geological sketch map of Luobusa mafic-ultramafic complex and its chromitites, Tibet (after Bao *et al.*, 1999)

4 PGM 赋存状态

通常铬铁矿中 PGE 元素的丰度直接决定其中 PGM 矿物多少, 先前研究成果表明罗布莎铬铁矿的 PGE 丰度大多数都是在 300×10^{-9} 以上 (Zhou *et al.*, 1998; 熊发挥, 2013; 周美付和白文吉, 1994), 铬铁矿中的高 PGE 含量说明其中含 PGM 的矿物较多, 有利于 PGM 原位研究工作的顺利开展。考虑到 PGE 元素在铬铁矿中的分配系数远大于硅酸盐矿物, 为了尽可能找到多的原位 PGM 矿物, 研究的铬铁矿样品均挑选自致密块状矿石类型作为研究对象, 这也更有利于三个矿区的原位 PGM 进行矿物比对。此前的研究成果表明, 在罗布莎重矿物选矿研究工作中也发现了大量的 PGM 矿物 (白文吉等, 2003, 2004, 2007), 包括 Os-Ir 合金类矿物、PGE 元素硫化物、硫砷化合物、贱金属物等, 研究认为这些铂族矿物和合金可能形成于地幔深部, 而后被上升地幔柱带到地幔浅部并被铬铁矿所捕获, 最终在蛇绿岩侵位过程中遭到蚀变改造作用。

西藏罗布莎铬铁矿床包含罗布莎、香卡山和康金拉三个矿区, 各个矿区的铬铁矿矿体大小不一, 形态各异, 产出状态不尽相同。矿石类型丰富, 主要有浸染状、豆状、反豆状、脉状以及致密块状等 (图3)。矿区内的各个岩相带中均有矿

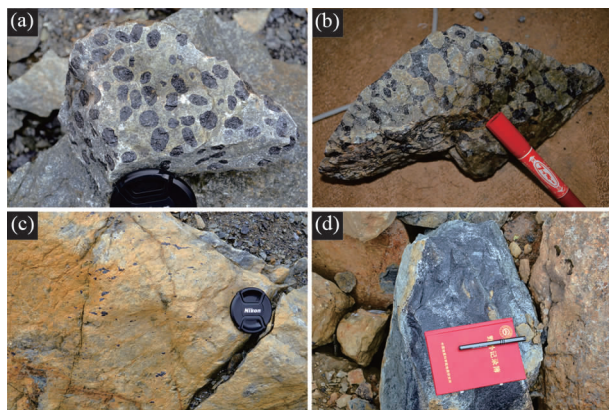


图3 罗布莎矿区铬铁矿的矿石结构类型

(a) 豆状矿石; (b) 反豆状矿石; (c) 浸染状矿石; (d) 块状矿石

Fig.3 Textures of chromite in Luobusa chromite deposit, Tibet

体产出, 形态复杂多变, 但绝大多数工业矿体产于方辉橄榄岩之中 (王希斌等, 2010), 以致密块状类型为主 (如罗布莎矿区、康金拉矿区), 而少量产于纯橄岩中的矿体多为浸染状矿石 (如香卡山矿区)。罗布莎矿区的样品主要是块状矿石以及少量的豆状矿石, 康金拉的研究样品以豆状矿石为主, 少量样品为块状, 香卡山矿区的铬铁矿样品主要是稠密浸染

表1 西藏罗布莎铬铁矿内 PGM 和其它金属矿物电子探针分析结果 (wt%)

Table 1 Representative microprobe analyses of PGM and other metal minerals from Luobusa ophiolitic chromitites (wt%)

| 分析号 | Os | Ir | Ru | Rh | Pt | Pd | Cu | Fe | Ni | Cr | S | As | Total | 备注 |
|-------------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|------|--------|----------|
| 罗布莎矿区 | | | | | | | | | | | | | | |
| L26-1.2 | 53.92 | 40.89 | 0.59 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.90 | 0.00 | 3.78 | 0.17 | 0.00 | 100.33 | Os-Ir 合金 |
| L15-2.4 | 57.72 | 37.11 | 0.50 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.13 | 1.21 | 0.00 | 2.06 | 0.02 | 0.01 | 98.79 | |
| L25-D.1 | 50.66 | 24.53 | 4.96 | 0.09 | 0.00 | 0.08 | 0.03 | 8.46 | 5.81 | 4.70 | 0.07 | 0.00 | 99.38 | |
| L25-D.2 | 47.85 | 31.17 | 1.97 | 0.03 | 0.00 | 0.08 | 0.14 | 6.66 | 9.95 | 2.33 | 0.02 | 0.04 | 100.23 | |
| L26-5.2 | 0.20 | 73.17 | 0.09 | 0.12 | 0.00 | 0.00 | 8.00 | 0.59 | 0.66 | 1.24 | 15.62 | 0.18 | 99.86 | 硫铱铜矿 |
| L26-1.1 | 0.00 | 75.14 | 0.19 | 0.29 | 0.52 | 0.01 | 7.10 | 1.29 | 0.07 | 4.95 | 10.54 | 0.13 | 100.24 | |
| L25-D.4 | 0.00 | 0.51 | 0.57 | 0.25 | 0.00 | 0.02 | 69.24 | 1.29 | 0.81 | 0.87 | 25.14 | 0.10 | 98.79 | 斯硫铜矿 |
| A13YL-3.1 | 0.04 | 0.12 | 0.03 | 0.07 | 0.03 | 0.01 | 0.13 | 20.77 | 43.96 | 2.34 | 32.13 | 0.00 | 99.64 | 针镍矿 |
| A13YL-3.2 | 10.91 | 8.04 | 40.72 | 0.76 | 0.00 | 1.09 | 0.00 | 0.47 | 0.14 | 1.94 | 35.83 | 0.00 | 99.91 | 硫钨矿 |
| A13YL-3.3 | 10.75 | 7.85 | 40.51 | 0.73 | 0.00 | 1.12 | 0.00 | 0.47 | 0.13 | 1.99 | 35.74 | 0.00 | 99.29 | |
| L15-2.2 | 24.20 | 5.45 | 31.44 | 0.33 | 0.00 | 0.75 | 0.03 | 0.66 | 0.02 | 2.73 | 34.13 | 0.00 | 99.74 | |
| L25-D.5 | 17.72 | 12.06 | 29.82 | 0.51 | 0.00 | 0.81 | 0.17 | 0.87 | 0.70 | 1.85 | 33.94 | 0.00 | 98.45 | |
| L26-1.3 | 29.34 | 11.96 | 21.02 | 0.14 | 0.00 | 0.57 | 0.18 | 2.11 | 0.32 | 4.22 | 28.97 | 0.18 | 99.00 | 硫钨矿 |
| L25-D.3 | 50.20 | 7.83 | 8.48 | 0.33 | 0.00 | 0.22 | 0.26 | 0.79 | 0.00 | 3.30 | 26.93 | 0.07 | 98.41 | |
| 康金拉矿区 | | | | | | | | | | | | | | |
| 13YKCr-7.1 | 9.17 | 7.41 | 43.66 | 0.24 | 0.00 | 1.01 | 0.01 | 0.35 | 0.09 | 1.83 | 37.05 | 0.00 | 100.82 | 硫钨矿 |
| 13YKCr-7.2 | 9.22 | 7.32 | 43.51 | 0.23 | 0.00 | 1.00 | 0.03 | 0.37 | 0.08 | 1.80 | 36.76 | 0.00 | 100.32 | |
| 13YK-55.1 | 21.72 | 4.75 | 33.42 | 1.16 | 0.00 | 0.86 | 0.13 | 0.41 | 0.00 | 2.01 | 32.41 | 1.59 | 98.46 | |
| 13YK-55.2 | 21.65 | 4.74 | 32.86 | 1.16 | 0.00 | 0.92 | 0.15 | 0.42 | 0.00 | 2.07 | 32.43 | 1.70 | 98.09 | |
| 13YK-55.12 | 22.97 | 11.09 | 25.74 | 1.15 | 0.00 | 0.92 | 0.71 | 0.88 | 1.61 | 2.18 | 30.10 | 1.23 | 98.57 | |
| 13YK-55.14 | 24.68 | 7.14 | 30.35 | 0.10 | 0.00 | 0.60 | 0.00 | 0.58 | 0.00 | 2.69 | 32.56 | 0.00 | 98.71 | |
| 13YK-56.6 | 20.81 | 10.99 | 27.85 | 1.63 | 0.00 | 1.03 | 0.34 | 0.71 | 0.31 | 2.71 | 30.49 | 1.36 | 98.22 | |
| 13YK-55.11 | 20.42 | 18.16 | 22.43 | 0.22 | 0.00 | 0.37 | 1.24 | 1.60 | 3.04 | 3.41 | 28.75 | 0.00 | 99.63 | |
| A13YK-51.1 | 40.88 | 5.36 | 18.92 | 0.17 | 0.00 | 0.46 | 0.03 | 0.62 | 0.00 | 2.47 | 29.64 | 0.00 | 98.54 | |
| A13YK-51.2 | 40.94 | 5.42 | 18.96 | 0.15 | 0.00 | 0.49 | 0.03 | 0.58 | 0.00 | 2.50 | 29.91 | 0.00 | 98.98 | |
| 13YK-56.5 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.10 | 0.01 | 0.07 | 3.47 | 61.11 | 4.07 | 31.87 | 0.03 | 100.83 | 针镍矿 |
| A13YK-51.4 | 1.56 | 1.66 | 0.09 | 0.51 | 0.00 | 0.00 | 7.53 | 9.17 | 47.89 | 1.71 | 29.32 | 0.09 | 99.52 | |
| A13YK-15.1 | 0.05 | 0.04 | 0.00 | 0.04 | 0.06 | 0.00 | 0.15 | 4.11 | 59.39 | 1.57 | 34.15 | 0.01 | 99.57 | |
| A13YK-15.6 | 55.31 | 40.07 | 1.07 | 0.06 | 0.00 | 0.04 | 0.14 | 0.23 | 1.00 | 1.94 | 0.00 | 0.00 | 99.86 | Os-Ir 合金 |
| 13YK-43.1 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 31.31 | 37.76 | 0.13 | 29.35 | 0.00 | 98.67 | 镍黄铁矿 |
| 13YK-91.4 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.55 | 20.98 | 75.37 | 3.00 | 0.01 | 0.11 | 100.04 | 铁镍矿 |
| 13YKCr-7.10 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.47 | 23.18 | 74.07 | 3.01 | 0.00 | 0.03 | 100.86 | |
| 13YKCr-5.1 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 1.66 | 21.77 | 75.51 | 0.74 | 0.02 | 0.00 | 99.75 | |
| 13YK-91.1 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.65 | 19.57 | 78.22 | 1.64 | 0.02 | 0.14 | 100.28 | |
| 13YK39-18 | 0.00 | 0.10 | 0.18 | 0.15 | 0.00 | 0.00 | 0.42 | 21.53 | 73.85 | 2.17 | 0.01 | 0.09 | 98.50 | |
| 13YK-55.17 | 0.23 | 8.11 | 0.00 | 0.23 | 0.00 | 0.00 | 0.54 | 20.03 | 66.64 | 3.91 | 0.02 | 0.49 | 100.19 | |
| A13YK-15.7 | 0.00 | 0.30 | 0.03 | 0.09 | 0.00 | 0.00 | 1.57 | 19.82 | 74.98 | 2.31 | 0.03 | 0.00 | 99.14 | |
| A13YK-27.1 | 0.00 | 1.18 | 0.06 | 0.34 | 0.03 | 0.00 | 1.26 | 19.85 | 73.49 | 3.23 | 0.04 | 0.26 | 99.73 | |
| 13YK-43.2 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.41 | 24.59 | 74.85 | 0.17 | 0.01 | 0.08 | 100.29 | |
| 13YK-43.3 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.06 | 0.00 | 0.13 | 25.17 | 75.48 | 0.52 | 0.00 | 0.04 | 101.47 | |
| 13YK-43.4 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 0.13 | 26.57 | 71.13 | 2.06 | 0.04 | 0.11 | 100.13 | |
| 13YK-56.9 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.09 | 0.00 | 0.35 | 23.68 | 75.20 | 2.13 | 0.01 | 0.00 | 101.50 | |
| 香卡山矿区 | | | | | | | | | | | | | | |
| 13YX-15.2 | 26.11 | 10.64 | 26.54 | 0.12 | 0.00 | 0.70 | 0.00 | 0.53 | 0.00 | 1.94 | 32.04 | 0.12 | 98.73 | 硫钨矿 |
| 13YX-15.3 | 26.66 | 10.84 | 26.39 | 0.18 | 0.00 | 0.73 | 0.01 | 0.57 | 0.00 | 1.95 | 32.82 | 0.01 | 100.15 | |

续表 1

Continued Table 1

| 分析号 | Os | Ir | Ru | Rh | Pt | Pd | Cu | Fe | Ni | Cr | S | As | Total | 备注 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|--------|-----|
| 13YX-31.1 | 0.03 | 0.05 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.09 | 23.64 | 72.96 | 0.93 | 0.00 | 0.00 | 97.71 | 铁镍矿 |
| 13YX-31.3 | 0.04 | 0.08 | 0.00 | 0.03 | 0.04 | 0.00 | 0.09 | 24.75 | 69.00 | 2.86 | 0.02 | 0.00 | 96.90 | |
| 13YX-31.4 | 0.00 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 24.55 | 70.64 | 4.98 | 0.04 | 0.03 | 100.39 | |
| 13YX-31.5 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 25.84 | 70.92 | 1.52 | 0.01 | 0.04 | 98.43 | |
| 13YX-33.1 | 0.00 | 0.04 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.13 | 20.50 | 76.38 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | 97.92 | |
| 13YX-33.2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 0.09 | 25.92 | 70.08 | 1.02 | 0.23 | 0.00 | 97.42 | |
| 13YX-33.3 | 0.09 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 0.11 | 23.66 | 72.67 | 1.36 | 0.00 | 0.07 | 98.01 | |
| 13YX-31.2 | 0.10 | 0.07 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.12 | 14.96 | 79.93 | 2.40 | 0.00 | 0.13 | 97.77 | |
| 13YX-9.9 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.04 | 0.18 | 16.28 | 80.81 | 2.33 | 0.01 | 0.00 | 99.67 | |
| 13YX-9.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.16 | 15.18 | 82.79 | 1.30 | 0.03 | 0.00 | 99.45 | |
| 13YX-9.11 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 17.45 | 79.79 | 1.33 | 0.01 | 0.00 | 98.71 | |
| 13YX-9.34 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.02 | 0.05 | 0.00 | 0.25 | 13.05 | 84.77 | 1.24 | 0.01 | 0.00 | 99.40 | |

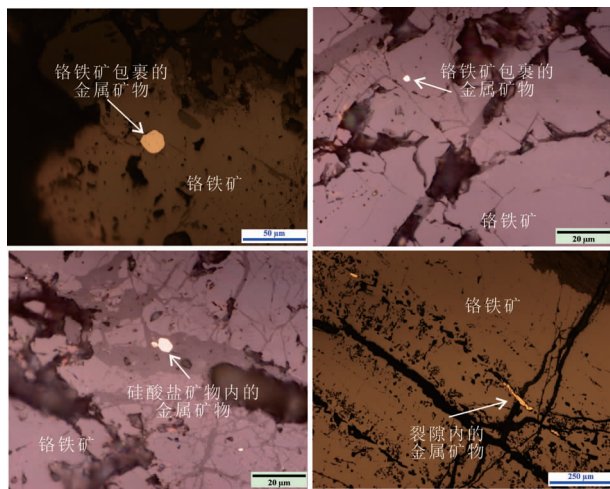


图4 铬铁矿中常见铂族矿物产出状态

(a, b) 铬铁矿内呈单颗粒自形包裹体的 PGM 矿物; (c) 在铬铁矿的硅酸盐矿物中呈包裹体存在的 PGM 矿物; (d) 沿铬铁矿内的裂隙分布的其他金属矿物

Fig. 4 Occurrence of PGM in chromitites

状, 少量为块状矿石。

本次研究表明, 罗布莎矿区铬铁矿中的 PGM 主要以单相或组合相包裹体形式存在, 它们形成于寄主相铬铁矿结晶之前(图4)。PGM 的粒径都在 $2 \sim 8 \mu\text{m}$ 之间, 多数在 $5 \mu\text{m}$ 左右, 主要有 Os-Ir 合金 (Osmium, (Os, Ir))、硫钼矿 (Erlichmanite, OsS_2)、硫钌矿 (Laurite, RuS_2)、硫铱铜矿 (Cuproiridsite, CuIr_2S_4)、斯硫铜矿 (Spionkopite, $\text{Cu}_{1.4}\text{S}$)、针镍矿 (Millerite, NiS) 等(图5), 各 PGM 矿物代表性电子探针分析结果见表1。

Os-Ir 合金矿物粒径小($1 \sim 3 \mu\text{m}$), 在铬铁矿中以独立相或者与硫铱铜矿(自形, 约 $2 \mu\text{m}$) 组成共生包裹体, 两者接触边界平直, 都呈自形晶, 为近乎同时晶出的结果(图5d, f)。电子探针分析表明, Os-Ir 合金成分变化较大, 都存在一定的 Fe、Ni、Cr 等元素混入, Os 的含量在 $47.8\% \sim 57.72\%$ 之间,

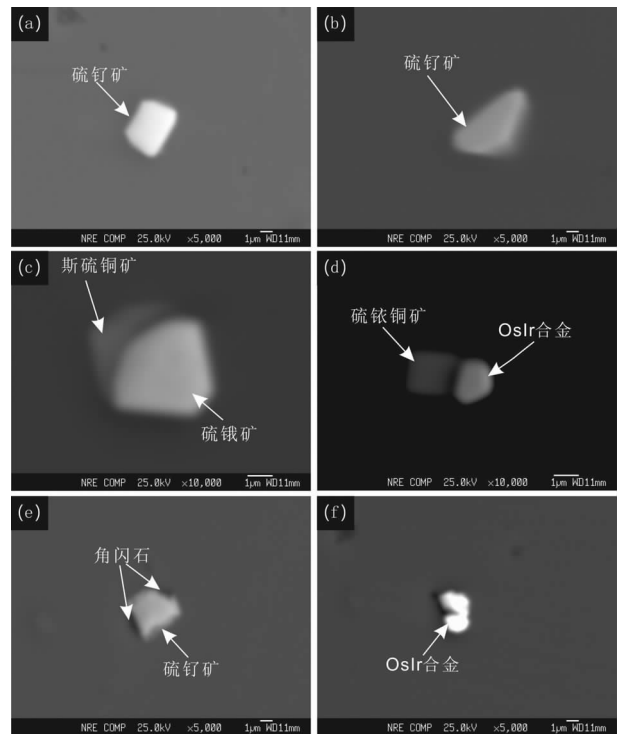


图5 西藏罗布莎铬铁矿中的 PGM 及其它相关矿物背散射图

Fig. 5 Back scattered electron (BSE) images showing morphology, texture and mineral assemblage of the discovered PGM, BMS and silicates in Luobusha chromitites, Tibet

平均为 52.54% , Ir 含量在 $24.53\% \sim 40.89\%$ 之间, 平均为 33.42% , 属于富钨的钨铱矿。硫钌矿在铬铁矿中呈自形晶或者与单斜辉石共生形成组合包裹体(图5a, b, e), 矿物粒径在 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 之间, Ru 含量在 $21.02\% \sim 40.72\%$ 之间, 平均为 32.7% , 计算化学式在 $(\text{Ru}_{0.72}, \text{Os}_{0.1}, \text{Ir}_{0.07})\text{S}_2 \sim (\text{Ru}_{0.43}, \text{Os}_{0.32}, \text{Ir}_{0.13})\text{S}_2$ 之间变化。硫钼矿与斯硫铜矿两者呈两相包

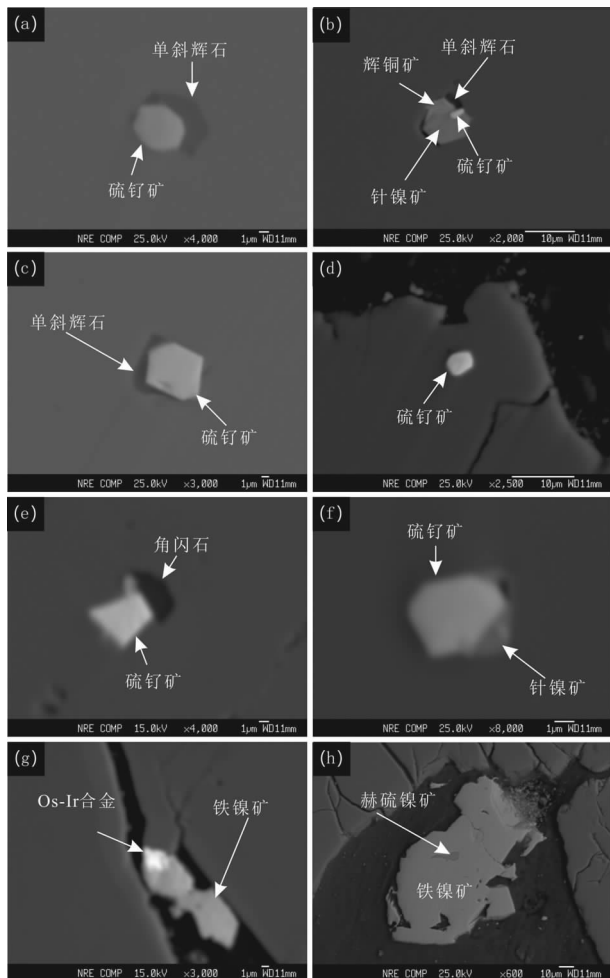


图6 西藏康金拉铬铁矿中的PGM及其它相关矿物背散射图

Fig. 6 Back scattered electron (BSE) images showing morphology, texture and mineral assemblage of the discovered PGM, BMS and silicates in Kangjinla chromitites, Tibet

裹体形式存在, 硫钌矿明显比斯硫铜矿更自形, 硫钌矿粒径(约 $5\mu\text{m}$)也比斯硫铜矿要大(图5c), 硫钌矿成分中也含有少量的Fe和Cr, 实际计算的化学式为 $(\text{Os}_{0.6}, \text{Ru}_{0.19}, \text{Ir}_{0.09})\text{S}_2$ 。斯硫铜矿从产出结构上来看, 应该是同时或者稍晚于硫钌矿。此外, 在罗布莎铬铁矿中还发现有自形产出的针镍矿等贱金属矿物。

上述显微结构表明罗布莎矿区铬铁矿中的PGM主要是包裹体形式产出, 其中Os-Ir合金和硫钌矿等铂族元素硫化物的形成时间应早于或近似于铬铁矿结晶, 这些原位PGM矿物组合能够映铬铁矿结晶之前或结晶早期的地幔环境。

康金拉矿区的PGM特征与罗布莎不同, 康金拉铬铁矿中的Os-Ir合金含量极少, 主要是硫钌矿和铁镍矿, 按发现的数量多少依次是硫钌矿(RuS_2)、铁镍矿(Awaruite, Ni_3Fe)、针镍矿(Millerite, NiS), 以及少量Os-Ir合金(Osmium, (Os,

Ir)、镍黄铁矿(Pentlandite, $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$)和辉铜矿(Chalcocite, Cu_2S)等(图6), 各矿物的电子探针分析结果见表1。

硫钌矿是康金拉铬铁矿中发现最多的一类PGM矿物, 主要在铬铁矿中呈包裹体形式存在, 其产出类型多样, 常见的有呈自形单晶包裹体(图6d), 也有与单斜辉石共生或与角闪石共生双相包裹体(图6a, c, e), 还有与辉铜矿、针镍矿、单斜辉石共生多相包裹体等(图6b, f)。硫钌矿粒径在 $5\sim 12\mu\text{m}$ 之间, Ru含量在 $18.92\%\sim 43.66\%$ 之间, 平均为 29.77% , 计算化学式在 $(\text{Ru}_{0.7}, \text{Os}_{0.1}, \text{Ir}_{0.1})\text{S}_2\sim (\text{Ru}_{0.4}, \text{Os}_{0.5}, \text{Ir}_{0.1})\text{S}_2$ 之间。铁镍矿是康金拉含量仅次于硫钌矿的金属矿物, 主要产在铬铁矿的裂隙中, 粒径最大者可达 $100\mu\text{m}$, 可见其与Os-Ir合金、镍黄铁矿等矿物共生, 形成时间明显晚于铬铁矿本身, 可能是后期被还原流体交代作用的结果。Os-Ir合金矿物粒径小($1\sim 3\mu\text{m}$), 可与铁镍矿共生, 多产于铬铁矿的裂隙内, 而针镍矿与辉铜矿、硫钌矿、单斜辉石以包裹体形式产于铬铁矿之内。

显微结构表明康金拉铬铁矿中的PGM主要是硫钌矿, 主要以铬铁矿包裹体形式产出, 形成时间应早于或近似于铬铁矿结晶, 斯硫钌矿多样的矿物共生组合表明铬铁矿早期结晶时的地幔环境是不均一的。而粒间铁镍矿的产出特征表明铬铁矿晚期还受到富含金属元素的流体交代作用的影响。

香卡山矿区的原位铬铁矿PGM调查中仅发现有一颗硫钌矿, 但有大量的铁镍矿(Awaruite, Ni_3Fe)金属矿物存在, 而在大量薄片的研究中并没有发现其它的PGM矿物等(图7)。硫钌矿呈单相自形晶包裹体, 粒径约为 $20\mu\text{m}$, 含少量的Cr, 计算化学式为 $(\text{Ru}_{0.52}, \text{Os}_{0.27}, \text{Ir}_{0.11}, \text{Cr}_{0.07}, \text{Fe}_{0.02}, \text{Pd}_{0.01})\text{S}_2$ 。而铁镍矿在常沿裂隙呈串珠柱分布(图7a, d), 或者充填在铬铁矿晶粒间(图7b, c), 成份均一(表1), 计算的矿物化学式在 $\text{Ni}_{2.763}\text{Fe}_{1.01}\sim \text{Ni}_{3.385}\text{Fe}_{0.548}$ 之间。香卡山的原位PGM调查表明, 这些铁镍矿是形成于铬铁矿结晶之后, 是铬铁矿形成后再次受到流体改造而成。

5 PGM与铬铁矿之间的联系

5.1 铬铁矿中PGM的控制因素

铬铁矿中原位PGM共生组合及显微结构可以为铬铁矿结晶过程提供矿物学依据, 如铬铁矿母熔体所处的物理化学状态, 如温度、硫逸度、氧逸度等参数(Garuti *et al.*, 1999b; Guo *et al.*, 2016)。铬铁矿中的PGM矿物常呈现自形的晶体形态, 分布极不均匀, 说明这些PGM在铬铁矿之前形成(至少是同时), 在铬铁矿的母熔体中结晶而成(Augé, 1985; Stockman and Hlava, 1984), 因此PGM矿物的形成过程, 至少部分能够反映铬铁矿的结晶环境, 与铬铁矿成因关系密切。如铬铁矿中PGM常与含水矿物相角闪石、金云母、绿泥石等组成原生组合包裹体, 指示铬铁矿结晶母熔体是一个富水的体系。此外, 铬铁矿结晶之后, PGM矿物在相对低的温度条

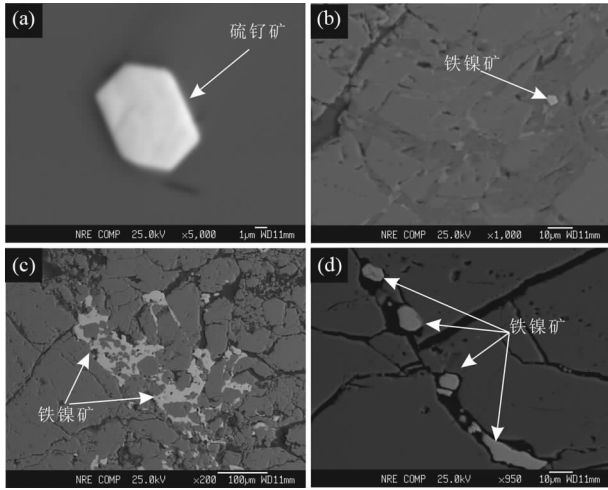


图7 西藏香卡山铬铁矿中的 PGM 及其它相关矿物背散射图

Fig. 7 Back scattered electron (BSE) images showing morphology, texture and mineral assemblage of the discovered PGM, BMS and silicates in Xiangkasan chromitites, Tibet

件下也会遭受蚀变改造 (Proenza *et al.*, 2008; Stockman and Hlava, 1984), 这些过程主要包括蛇纹石化、风化等 (Proenza *et al.*, 2007), 它们为铬铁矿就位之后经历的后期构造过程提供依据。

铬铁矿中 PGE 的地球化学行为是了解 PGM 矿物成因的重要前提, 不同成因的岩石具有不同的 PGE 球粒陨石配分型式 (Barnes *et al.*, 1985; 储雪蕾等, 2001): 地幔橄榄岩体和阿尔卑斯型橄榄岩的 PGE 球粒陨石配分型式为平坦型, 科马提岩为正斜率型 Pd/Ir 比值在 10 ~ 30 之间, 说明从地幔熔融到科马提岩形成过程中 PGE 发生了分异, 趋向于富集 PPGE; 大陆和大洋玄武岩呈陡的正斜率型, Pd/Ir 可达 100 左右, 反映低程度的部分熔融产生的岩浆 PGE 强烈分异, 熔体强烈富集 PPGE 元素; 典型的蛇绿岩 PGE 模式一般呈正斜率, Pd/Ir 比值变化大, 而蛇绿岩内铬铁矿的 PGE 分布型式却为特征的负斜率型, Pd/Ir 一般在 0.1 左右。周美付和白文吉 (1994) 统计了 13 个中国铬铁矿床的 PGE 数据, PGE 丰度在 136×10^{-9} 至 601×10^{-9} 之间, 整体表现为 Ru 正异常的负斜率型 PGE 球率陨石配分型式, 并进一步认为铬铁矿的 PGE 模式不取决于铬铁矿的化学成分 (高铬型与高铝型铬铁矿相似), 而取决于铬铁矿母岩性质和形成温度、硫逸度以及铂族元素的熔点特征。

Tredoux *et al.* (1995) 指出 PGE 是以纳米尺度大小的超显微金属微粒悬浮在熔体中, 这些金属微粒可以附着在 S 族元素离子团上形成配位键而稳定存在。如果熔体中的 S 族离子含量很低, 这些超显微的 PGE 金属微粒将继续留在熔体中直到聚结成合金矿物, 这一过程得到了铬铁矿的 LA-ICP-MS 分析结果的验证。同化混染作用、多期次的熔体抽

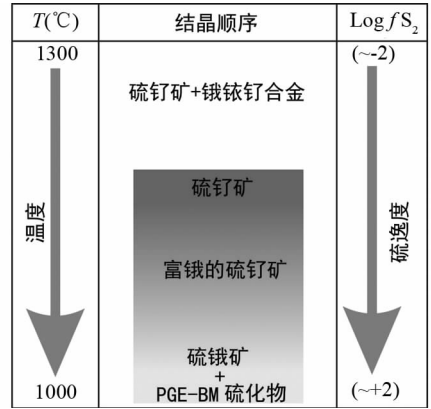


图8 金属硫化物热动力学结晶序次 (据 Uysal *et al.*, 2015)

Fig. 8 The thermodynamic context of crystallization conditions for melt-sulfide (after Uysal *et al.*, 2015)

取和熔体岩石反应的积累都会使地幔源区产生累进的、非线性的硫逸度下降, 促使源区的含 PGE 的贱金属硫化物发生分解, 形成硫钉矿或者是 Os-Ir 合金, 此时 PGM 的模式年龄代表了蛇绿岩形成的岩浆事件。这些残余的 PGM 矿物可以以超显微颗粒或者大颗粒在富水和挥发份的熔体中搬运, 此时环境处在一个高温低硫逸度 ($\log f_{\text{S}_2}$) 的条件 (Bockrath *et al.*, 2004; Grieco *et al.*, 2007)。此外, 熔体岩石反应过程中熔体本身也可以从围岩中直接物理捕获先存在的 PGM 矿物 (Hutchinson *et al.*, 1999; Lorand *et al.*, 2010; Lugué *et al.*, 2007)。

按照金属硫化物的结晶顺序 (Andrews and Brenan, 2002; Augé and Johan, 1988b; Bockrath *et al.*, 2004; Brenan and Andrews, 2001; Stockman and Hlava, 1984; Uysal *et al.*, 2015), Os-Ir-Ru 合金和硫钉矿结晶之后, 随着熔体中 S 的减少和 As 含量的上升, $f_{\text{As}}/f_{\text{S}}$ 比值将增大, 随后将陆续结晶出硫砷化物和双砷化物 (图 8)。当熔体的硫逸度很高时, 此时除了 PGE 元素, 大量的贱金属元素也与 S 结合形成大量的 BMS 矿物 (贱金属硫化物, 后同), 并包裹在铬铁矿内部, 此时铬铁矿母熔体具有很高的硫逸度 (f_{S_2}), 熔体在原地就达到了硫饱和状态。

PGM 结晶是随着硫逸度 (f_{S_2}) 上升和温度 T 下降依次进行的, PGM 矿物种类和矿物组合受结晶环境影响最为灵敏 (Augé and Johan, 1988b; Garuti *et al.*, 1999b; Uysal *et al.*, 2015)。通常铬铁矿原始产出的 PGM 矿物形成温度范围一般在 700 ~ 1300 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 由于地幔环境中温度变化极为缓慢, 而硫逸度的变化较为频繁, 因此对 PGM 晶出起决定性作用的因素主要是硫逸度 (f_{S_2})。岩浆/熔体体系的硫逸度影响因素很多, 与相应的地质过程有密切关系: ①如铬铁矿结晶时, 硅酸盐与氧化物发生分离, 会导致岩浆中 FeO 含量降低, 从而使得熔体中的 S 溶解度降低而呈现 S 饱和状态 (Maier, 2005); ②岩浆混染作用或者岩石熔体反应会在熔体中加入

更多的 S 和 Si, 使得熔体中的 S 达到过饱和状态 (Ripley *et al.*, 1999); ③此外, 不同成分岩浆或者熔体混合也会导致混合后的熔体达到 S 饱和状态 (Cawthorn *et al.*, 2002; Li and Ripley, 2009)。熔体中的 S 达到过饱和后, 熔体的 PGE 元素与 S 结合形成铂族矿物。

5.2 PGM 反映了罗布莎铬铁矿的结晶环境

罗布莎铬铁矿床中的三个矿区的 PGM 矿物种类、矿物组合以及产出特征不同, 这反映了 PGM 形成同铬铁矿结晶之间有密切的内在成因联系。罗布莎矿区铬铁矿中的 PGM 主要有 Os-Ir 合金 (Osmium, (Os, Ir))、硫钨矿 (Erlchmanite, OsS₂)、硫钼矿 (Laurite, RuS₂)、硫铱铜矿 (Cuproiridsite, CuIr₂S₄)、斯硫铜矿 (Spionkopite, Cu_{1.4}S)、针镍矿 (Millerite, NiS) 等, 以单相或组合相包裹体形式存在, 表明它们形成于寄主相铬铁矿结晶之前。结合原位 PGM 显微特征, 说明罗布莎铬铁矿中的 PGM 是在铬铁矿母熔体处于高温、低硫逸度的环境下结晶形成, 可能系岩石/熔体反应和结晶分异双重作用下的产物。

康金拉矿区铬铁矿中的原位 PGM 中, Os-Ir 含量极少, 主体是硫钨矿和铁镍矿, 按发现的数量多少依次是硫钨矿 (RuS₂)、铁镍矿 (Awaruite, Ni₃Fe)、针镍矿 (Millerite, NiS), 以及少量 Os-Ir 合金 (Osmium, (Os, Ir))、镍黄铁矿 (Pentlandite, (Fe, Ni)₉S₈) 和辉铜矿 (Chalcocite, Cu₂S) 等。原位 PGM 包裹体主要是组合相包裹体, 此外还有较多的产于裂隙之间的贱金属硫化物和合金, 结合这些显微特征, 本文认为康金拉矿区 PGM 产出的控制因素可能是不同来源的熔体混合致使 PGM 与贱金属硫化物同时晶出, 并且铬铁矿成矿后还受到热液流体的改造。

香卡山矿区铬铁矿的原位 PGM 仅发现有一颗硫钨矿, 但有大量的铁镍矿 (Awaruite, Ni₃Fe) 金属矿物存在。这些铁镍矿大多分布在铬铁矿的粒间或者裂隙内, 认为香卡山矿区是铬铁矿结晶成矿之后遭受了还原性流体的交代作用, 先形成的硫化物再次活化并经历脱硫作用, 在铬铁矿粒间或者铬铁矿的裂隙中形成了铁镍矿等矿物, 很可能与蛇纹石化或者晚期构造流体改造有关。

6 结论

PGM 矿物原位调查表明, 罗布莎三个矿区中的 PGM 矿物种类、共生组合和显微结构等均有差异, 说明每个矿区铬铁矿的 PGE 元素分异富集的地质过程并不相同, PGM 与铬铁矿本身结晶微环境密切联系。罗布莎铬铁矿中的原位 PGM 产出特征可暗示如下信息: 即铬铁矿结晶之前已有 Os-Ir 合金呈自形晶形式存在于铬铁矿母岩浆之中, 而在铬铁矿结晶过程中, 部分 PGM 硫化物 (如硫钨矿) 也与 Os-Ir 合金同时结晶; 因为 PGM 硫化物晶出需要长期而稳定的硫逸度环境, 因此 PGM 常常贯穿整个铬铁矿的结晶过程, 还可以伴有

单斜辉石、角闪石等矿物的共同晶出; 当体系硫逸度升高后是辉铜矿、针镍矿等贱金属硫化物晶出; 铬铁矿结晶成矿之后还可能遭受流体的交代作用, 在铬铁矿粒间或者铬铁矿的裂隙中形成了铁镍矿等矿物。

总体上来说, 铬铁矿中的 PGM 包裹体种类、显微结构、共生组合关系能够反映铬铁矿母熔体结晶环境, 单相的 PGM 包裹体以及由 PGE 合金与 PGE 硫化物、硫砷化物构成的组合相包裹体反映的是铬铁矿母熔体在熔体结晶分异或者是熔体/岩体反应过程; PGE 合金、PGE 硫化物、硫砷化物与贱金属硫化物矿物共生包裹体, 反映的是铬铁矿母熔体的结晶过程中, 具有不同来源的熔体加入, 导致熔体环境局部的温度 (*T*) 下降和硫逸度 (*f*S₂) 迅速升高, 贱金属硫化物矿物快速从熔体中晶出, 并与铂族矿物形成组合包裹体。

铬铁矿中 PGM 矿物贯穿于铬铁矿成矿过程的始终, 甚至包括铬铁矿成矿后经历的构造流体交代作用, 两者成因联系紧密。因此开展铬铁矿中 PGM 的精细矿物学研究工作, 查明 PGM 矿物形成的物理化学条件, 有助于我们深入理解铬铁矿的成矿过程。

致谢 感谢西藏地质二队的巴登珠高级工程师在罗布莎野外工作期间给予的帮助; 感谢审稿专家认真审阅了本文, 并提出了许多宝贵的修改意见; 论文在成文和修改过程中, 与中国地质科学院地质研究所的熊发挥博士进行了有益的讨论, 并致以谢意。

References

- Aitchison JC, Badengzhu, Davis AM, Liu JB, Luo H, Malpas JG, McDermid IRC, Wu HY, Ziabrev SV and Zhou MF. 2000. Remnants of a Cretaceous intra-oceanic subduction system within the Yarlung-Zangbo suture (southern Tibet). *Earth and Planetary Science Letters*, 183(1-2): 231-244
- Allégé C, Courtillot V, Tapponnier P *et al.* 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt. *Nature*, 307(5946): 17-22
- Andrews DRA and Brennan JM. 2002. Phase-equilibrium constraints on the magmatic origin of laurite + Ru Os Ir alloy. *The Canadian Mineralogist*, 40(6): 1705-1716
- Arai S and 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. 2013. Conversion of low-pressure chromitites to ultrahigh-pressure chromitites by deep recycling: A good inference. *Earth and Planetary Science Letters*, 379: 81-87
- Augé T. 1985. Platinum-group-mineral inclusions in ophiolitic chromitite from the Vourinos Complex, Greece. *The Canadian Mineralogist*, 23(2): 163-171
- Augé T and Johan Z. 1988a. Platinum-group minerals in the Tiebaghi and Vourinos ophiolitic complexes; Genetic implications. *The Canadian Mineralogist*, 26(1): 177-192
- Augé T and Johan Z. 1988b. Comparative study of chromite deposits from Troodos, Vourinos, North Oman and New Caledonia ophiolites. In: Boissonnas J and Omenetto P (eds.). *Mineral Deposits Within the European Community*. Berlin Heidelberg: Springer, 267-288
- Bai WJ, Zhou MF, Robinson PT, Fang QS, Zhang ZM, Yan BG, Hu SF and Yang JS. 2000. Origin of Podiform Chromitites, Diamonds and

- Associated Mineral Assemblage in the Luobusa Ophiolite, Tibet. Beijing: Seismological Press (in Chinese)
- Bai WJ, Yang JS, Fang QS, Yan BG and Zhang ZM. 2001. Study on a storehouse of ultrahigh pressure mantle minerals: Podiform chromite deposits. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 111 – 121 (in Chinese with English abstract)
- Bai WJ, Yang JS, Fang QS, Yan BG and Shi RD. 2003. An unusual mantle mineral group in ophiolites of Tibet. *Geology in China*, 30(2): 144 – 150 (in Chinese with English abstract)
- Bai WJ, Robinson PT, Fang QS, Yang JS, Yan BG, Zhang ZM, Hu SF and Zhou MF. 2004. The PGE and base-metal alloys in the podiform chromitites of the Luobusa ophiolite, southern Tibet. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(4): 385 – 396 (in Chinese with English abstract)
- Bai WJ, Yang JS, Fang QS, Ren YF, Yan BG and Rong H. 2005. A study on Os-Ir-Ru alloy and boninitic inclusion in the Luobusa ophiolite, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 814 – 822 (in Chinese with English abstract)
- Bai WJ, Tao SF, Yang JS, Fang QS, Shi NC and Li GW. 2007. A mineral assemblage of sulfides and sulfo-arsenides from the ophiolite mantle in Tibet. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(5): 418 – 428 (in Chinese with English abstract)
- Bao PS, Wang XB, Peng GY and Chen FY. 1999. Chromite Deposits in China. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Barnes SJ, Naldrett AJ and Gorton MP. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. *Chemical Geology*, 53(3–4): 303 – 323
- Bockrath C, Ballhaus C and Holzheid A. 2004. Stabilities of laurite RuS₂ and monosulfide liquid solution at magmatic temperature. *Chemical Geology*, 208(1–4): 265 – 271
- Brenan JM and Andrews D. 2001. High-temperature stability of laurite and Ru Os Ir alloy and their role in PGE fractionation in mafic magmas. *The Canadian Mineralogist*, 39(2): 341 – 360
- Cawthorn RG, Lee CA, Schouwstra RP and Mellowship P. 2002. Relationship between PGE and PGM in the Bushveld Complex. *The Canadian Mineralogist*, 40(2): 311 – 328
- Chu XL, Sun M and Zhou MF. 2001. The platinum-group element geochemistry in chemical geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 112 – 122 (in Chinese with English abstract)
- Coleman RG. 1977. Ophiolites: Ancient Oceanic Lithosphere? Berlin Heidelberg: Springer-Verlag
- Dai JG, Wang CS, Hébert R, Santosh M, Li YL and Xu JY. 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
- Dobrzhinetskaya LF, Wirth R, Yang JS, Hutcheon ID, Weber PK and Green II HW. 2009. High-pressure highly reduced nitrides and oxides from chromitite of a Tibetan ophiolite. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(46): 19233 – 19238
- Dobrzhinetskaya LF, Wirth R, Yang JS, Green HW, Hutcheon ID, Weber PK and Grew ES. 2014. Qingsongite, natural cubic boron nitride: The first boron mineral from the Earth's mantle. *American Mineralogist*, 99(4): 764 – 772
- Garuti G, Zaccarini F and Economou-Eliopoulos M. 1999a. Paragenesis and composition of laurite from chromitites of Othrys (Greece): Implications for Os-Ru fractionation in ophiolitic upper mantle of the Balkan peninsula. *Mineralium Deposita*, 34(3): 312 – 319
- Garuti G, Zaccarini F, Moloshag V and Alimov V. 1999b. Platinum-group minerals as indicators of sulfur fugacity in ophiolitic upper mantle: An example from chromitites of the Ray-Iz ultramafic complex, Polar Urals, Russia. *The Canadian Mineralogist*, 37(5): 1099 – 1115
- González-Jiménez JM, Gervilla F, Proenza JA, Augé T and Kerestedjian T. 2009. Distribution of platinum-group minerals in ophiolitic chromitites. *Applied Earth Science*, 118(3–4): 101 – 110
- Grieco G, Diella V, Chaplygina NL and Savelieva GN. 2007. Platinum group elements zoning and mineralogy of chromitites from the cumulate sequence of the Nurali massif (Southern Urals, Russia). *Ore Geology Reviews*, 30(3–4): 257 – 276
- Guan T, Huang ZL, Xie LH, Xu C and Li WB. 2004. Progresses on modes of occurrences of platinum-group elements in mantle derived rocks. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(1): 68 – 73 (in Chinese with English abstract)
- Guo GL, Yang JS, Robinson PT, Liu XD, Xu XZ and Xiong FH. 2016. Platinum-group Mineral (PGM) and Base-metal Sulphide (BMS) inclusions in chromitites of the Zedang ophiolite, southern Tibet, China and their petrogenetic significance. *Acta Geologica Sinica*, 90(3): 900 – 912
- Huang GC, Mo XX, Xu DM, Lei YJ and Li LJ. 2006. Origination and evolution of Daba-Xiugugabu ophiolite belt in the southwestern Tibet. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 1 – 9 (in Chinese with English abstract)
- Hutchinson D, Prichard HM and Macleod CJ. 1999. Evidence for partial melting and melt impregnation of mantle peridotites leading to PGM deposition; A comparison of samples from the Lizard and Troodos ophiolites and the Tonga Trench. In: 5th Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits (SGA) and the 10th Quadrennial Symposium of the International Association on the Genesis of Ore Deposits (IAGOD). Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 729 – 732
- Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. 1981. The discovery of alpine-type diamond bearing ultrabasic intrusions in Xizang (Tibet). *Geological Review*, 27(5): 455 – 457 (in Chinese with English abstract)
- Lee C-TA and Anderson DL. 2015. Continental crust formation at arcs, the arclogite “delamination” cycle, and one origin for fertile melting anomalies in the mantle. *Science Bulletin*, 60(13): 1141 – 1156
- Li C and Ripley EM. 2009. Sulfur contents at sulfide-liquid or anhydrite saturation in silicate melts; Empirical equations and example applications. *Economic Geology*, 104(3): 405 – 412
- Liang FH, Xu ZQ, Ba DZ, Xu XZ, Xiong FH and Jia Y. 2011. Tectonic occurrence and emplacement mechanism of ophiolites from Luobusha-Zedang, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3255 – 3268 (in Chinese with English abstract)
- Liu F, Yang JS, Chen SY, Liang FH, Niu XL, Li ZL and Lian DY. 2013. Ascertainment and environment of the OIB-type basalts from the Dongbo ophiolite in the western part of Yarlung Zangbo Suture Zone. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1909 – 1932 (in Chinese with English abstract)
- Lorand JP, Alard O and Luguet A. 2010. Platinum-group element micronuggets and refertilization process in Lherz orogenic peridotite (northeastern Pyrenees, France). *Earth and Planetary Science Letters*, 289(1–2): 298 – 310
- Luguet A, Shirey SB, Lorand JP, Horan MF and Carlson RW. 2007. Residual platinum-group minerals from highly depleted harzburgites of the Lherz massif (France) and their role in HSE fractionation of the mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(12): 3082 – 3097
- Maier WD. 2005. Platinum-group element (PGE) deposits and occurrences: Mineralization styles, genetic concepts, and exploration criteria. *Journal of African Earth Sciences*, 41(3): 165 – 191
- McDermid IRC, Aitchison JC, Davis AM, Harrison TM and Grove M. 2002. The Zedong terrane: A Late Jurassic intra-oceanic magmatic arc within the Yarlung-Tsangpo suture zone, southeastern Tibet. *Chemical Geology*, 187(3–4): 267 – 277
- McGowan NM, Griffin WL, González-Jiménez JM, Belousova E, Afonso JC, Shi RD, McCammon CA, Pearson NJ and O'Reilly SY. 2015. Tibetan chromitites: Excavating the slab graveyard. *Geology*, 43(2): 179 – 182
- Nicolas A, Girardeau J, Marcoux J, Dupre B, Wang XB, Cao YG, Zheng HX and Xiao XC. 1981. The Xigaze ophiolite (Tibet): A peculiar oceanic lithosphere. *Nature*, 294(5840): 414 – 417
- Nicolas A and Prinzhofer A. 1983. Cumulative or residual origin for the transition zone in ophiolites: Structural evidence. *Journal of*

- Petrology, 24(2): 188–206
- Pan GT, Chen ZL, Li XZ *et al.* 1997. Tectonic Evolution of Eastern Tethys. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Proenza JA, Zaccarini F, Lewis JF, Longo F and Garuti G. 2007. Chromian spinel composition and the platinum-group minerals of the PGE-rich Loma Peguera chromitites, Loma Caribe peridotite, Dominican Republic. *The Canadian Mineralogist*, 45(3): 631–648
- Proenza JA, Zaccarini F, Escayola M, Cábana C, Schalamuk A and Garuti G. 2008. Composition and textures of chromite and platinum-group minerals in chromitites of the western ophiolitic belt from Pampean Ranges of Córdoba, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 33(1): 32–48
- Ripley EM, Park YR, Li CS and Naldrett AJ. 1999. Sulfur and oxygen isotopic evidence of country rock contamination in the Voisey's Bay Ni-Cu-Co deposit, Labrador, Canada. *Lithos*, 47(1–2): 53–68
- Rollinson H. 2016. Surprises from the top of the mantle transition zone. *Geology Today*, 32(2): 58–64
- Stockman HW and Hlava PF. 1984. Platinum-group minerals in alpine chromitites from southwestern Oregon. *Economic Geology*, 79(3): 491–508
- Su BX, Zhou MF and Robinson PT. 2016. Extremely large fractionation of Li isotopes in a chromitite-bearing mantle sequence. *Scientific Reports*, 6: 22370
- Tapponnier P, Mercier JL, Proust F *et al.* 1981. The Tibetan side of the India-Eurasia collision. *Nature*, 294(5840): 405–410
- Tredoux M, Lindsay NM, Davies G and McDonald DL. 1995. The fractionation of platinum-group elements in magmatic systems, with the suggestion of a novel causal mechanism. *South African Journal of Geology*, 98(2): 157–167
- Uysal I, Sadiklar MB, Tarkian M, Karsli O and Aydin F. 2005. Mineralogy and composition of the chromitites and their platinum-group minerals from Ortaca (Muğla-SW Turkey): Evidence for ophiolitic chromitite genesis. *Mineralogy and Petrology*, 83(3–4): 219–242
- Uysal I, Akmaz RM, Kapsiotis A, Demir Y, Saka S, Avcı E and Müller D. 2015. Genesis and geodynamic significance of chromitites from the Orhaneli and Harmançik ophiolites (Bursa, NW Turkey) as evidenced by mineralogical and compositional data. *Ore Geology Reviews*, 65: 26–41
- Wang HS, Bai WJ, Wang BX *et al.* 1983. Chromite Deposits in China and Their Origin. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Wang XB, Bao PS, Deng WM and Wang FG. 1987. Tibet Ophiolite. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Wang XB, Zhou X and Hao ZG. 2010. Some opinions on further exploration for chromite deposits in the Luobusha area, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 105–114 (in Chinese with English abstract)
- Xiong FH. 2013. Formation process of the podiform chromitites. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese)
- Xiong FH, Yang JS, Robinson PT, Xu XZ, Liu Z, Li Y, Li JY and Chen SY. 2015. Origin of podiform chromitite: A new model based on the Luobusha ophiolite, Tibet. *Gondwana Research*, 27(2): 525–542
- Xu XZ, Yang JS, Ba DZ, Chen SY, Fang QS and Bai WJ. 2008. Diamond discovered from the Kangjinla chromitite in the Yarlung Zangbo ophiolite belt, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1453–1462 (in Chinese with English abstract)
- Xu XZ. 2009. Origin of the Kangjinla podiform chromite deposit and mantle peridotite, South Tibet. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English summary)
- Xu XZ, Yang JS, Robinson PT, Xiong FH, Ba DZ and Guo GL. 2015. Origin of ultrahigh pressure and highly reduced minerals in podiform chromitites and associated mantle peridotites of the Luobusha ophiolite, Tibet. *Gondwana Research*, 27(2): 686–700
- Yamamoto S, Komiya T, Hirose K and Maruyama S. 2009. Coesite and clinopyroxene exsolution lamellae in chromites: In-situ ultrahigh-pressure evidence from podiform chromitites in the Luobusha ophiolite, southern Tibet. *Lithos*, 109(3–4): 314–322
- Yang FY, Kang ZQ and Liu SC. 1981. A new octahedral pseudomorph of lizardite and its origin. *Acta Mineralogica Sinica*, (1): 51–55, 69 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Bai WJ, Fang QS *et al.* 2003. Silicon-rutile: An ultra-high pressure (UHP) mineral from an ophiolite. *Progress in Natural Science*, 13(7): 528–531
- Yang JS, Bai WJ, Fang QS, Yan BG, Rong H and Chen SY. 2004. Coesite discovered from the podiform chromitite in the Luobusha ophiolite, Tibet. *Earth Science*, 29(6): 651–660 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Dobrzynetska L, Bai WJ, Fang QS, Robinson PT, Zhang JF and Green HW. 2007. Diamond- and coesite-bearing chromitites from the Luobusha ophiolite, Tibet. *Geology*, 35(10): 875–878
- Yang JS, Zhang ZM, Li TF, Li ZL, Ren YF, Xu XZ, Ba DZ, Bai WJ, Fang QS, Chen SY and Rong H. 2008. Unusual minerals from harzburgite, the host rock of the Luobusha chromite deposit, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1445–1452 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Robinson PT and Dilek Y. 2014. Diamonds in ophiolites. *Elements*, 10(2): 127–130
- Yang JS, Meng FC, Xu XZ, Robinson PT, Dilek Y, Makeyev AB, Wirth R, Wiedenbeck M and 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
- Ye PS, Jiang W, Wu ZH *et al.* 2006. Geochemical characteristics of ophiolites in Zedang-Luobusha, Tibet and their tectonic significance. *Geoscience*, 20(3): 370–377 (in Chinese with English abstract)
- Zhang C, Liu CZ, Wu FY, Zhang LL and Ji WQ. 2016. Geochemistry and geochronology of mafic rocks from the Luobusha ophiolite, South Tibet. *Lithos*, 245: 93–108
- Zhong LF, Xia B, Zhou GQ, Zhang YQ, Wang L, Wei DL and Yang ZQ. 2006. SHRIMP age determination of the diabase in Luobusha ophiolite, southern Xizang (Tibet). *Geological Review*, 52(2): 224–229 (in Chinese with English abstract)
- Zhou MF and Bai WJ. 1994. Distribution characteristics of PGE in chromitites from China. *Acta Mineralogica Sinica*, 14(2): 157–163 (in Chinese with English abstract)
- Zhou MF, Robinson PT and Bai WJ. 1994. Formation of podiform chromitites by melt/rock interaction in the upper mantle. *Mineralium Deposita*, 29(1): 98–101
- Zhou MF, Sun M, Keays RR and Kerrich RW. 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 MF, Robinson PT, Su BX, Gao JF, Li JW, Yang JS and 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
- Zhou S, Mo XX, Mahoney JJ, Zhang SQ, Guo TY and Zhao ZD. 2001. Geochronology and Nd and Pb isotope characteristics of gabbro dikes in the Luobusha ophiolite, Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 47(2): 144–147

附中文参考文献

- 白文吉, 周美付, Robinson PT, 方青松, 张仲明, 颜秉刚, 胡旭峰, 杨经绥. 2000. 西藏罗布莎豆荚状铬铁矿、金刚石及伴生矿物成因. 北京: 地震出版社
- 白文吉, 杨经绥, 方青松, 颜秉刚, 张仲明. 2001. 寻找超高压地幔矿物的储存库——豆荚状铬铁矿. *地学前缘*, 8(3): 111–121
- 白文吉, 杨经绥, 方青松, 颜秉刚, 史仁灯. 2003. 西藏蛇绿岩中不寻常的地幔矿物群. *中国地质*, 30(2): 144–150

- 白文吉, Robinson PT, 方青松, 杨经绥, 颜秉刚, 张仲明, 胡旭峰, 周美付. 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
- 白文吉, 杨经绥, 方青松, 任玉峰, 颜秉刚, 戎合. 2005. 西藏罗布莎蛇绿岩的 Os-Ir-Ru 合金及其中玻安岩质包体的研究. 地质学报, 79(6): 814-822
- 白文吉, 陶淑凤, 杨经绥, 方青松, 施倪承, 李国武. 2007. 来自蛇绿岩地幔的硫(砷)化物矿物组合. 岩石矿物学杂志, 26(5): 418-428
- 鲍佩声, 王希斌, 彭根永, 陈方远. 1999. 中国铬铁矿床. 北京: 科学出版社
- 储雪蕾, 孙敏, 周美夫. 2001. 化学地球动力学中的铂族元素地球化学. 岩石学报, 17(1): 112-122
- 管涛, 黄智龙, 谢力华, 许成, 李文博. 2004. 几种幔源岩石铂族元素赋存状态研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 23(1): 68-73
- 黄圭成, 莫宣学, 徐德明, 雷义均, 李丽娟. 2006. 西藏西南部达巴-休古嘎布蛇绿岩带的形成与演化. 华南地质与矿产, (3): 1-9
- 梁凤华, 许志琴, 巴登珠, 徐向珍, 刘飞, 熊发挥, 贾毅. 2011. 西藏罗布莎-泽当蛇绿岩体的构造产出与侵位机制探讨. 岩石学报, 27(11): 3255-3268
- 刘飞, 杨经绥, 陈松永, 梁凤华, 牛晓露, 李兆丽, 连东洋. 2013. 雅鲁藏布江缝合带西段东波蛇绿岩 OIB 型玄武岩的厘定及其形成环境. 岩石学报, 29(6): 1909-1932
- 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振等. 1997. 东特提斯地质构造形成演化. 北京: 地质出版社
- 王恒升, 白文吉, 王炳熙等. 1983. 中国铬铁矿及成因. 北京: 科学出版社
- 王希斌, 鲍佩声, 邓万明, 王方国. 1987. 喜马拉雅岩石圈构造演化: 西藏蛇绿岩. 北京: 地质出版社
- 王希斌, 周详, 郝梓国. 2010. 西藏罗布莎铬铁矿床的进一步找矿意见和建议. 地质通报, 29(1): 105-114
- 熊发挥. 2013. 豆荚状铬铁矿的形成过程. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院
- 徐向珍, 杨经绥, 巴登珠, 陈松永, 方青松, 白文吉. 2008. 雅鲁藏布江蛇绿岩带的康金拉铬铁矿中发现金刚石. 岩石学报, 24(7): 1453-1462
- 徐向珍. 2009. 藏南康金拉豆荚状铬铁矿和地幔橄榄岩成因研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院
- 杨凤英, 康志勤, 刘淑春. 1981. 蛇纹石的八面体新假象及其成因的初步讨论. 矿物学报, (1): 51-55, 69
- 杨经绥, 白文吉, 方青松, 颜秉刚, 戎合, 陈松永. 2004. 西藏罗布莎豆荚状铬铁矿中发现超高压矿物柯石英. 地球科学, 29(6): 651-660
- 杨经绥, 张仲明, 李天福, 李兆丽, 任玉峰, 徐向珍, 巴登珠, 白文吉, 方青松, 陈松永, 戎合. 2008. 西藏罗布莎铬铁矿体围岩方辉橄榄岩中的异常矿物. 岩石学报, 24(7): 1445-1452
- 叶培盛, 江万, 吴珍汉等. 2006. 西藏泽当-罗布莎蛇绿岩的地球化学特征及其构造意义. 现代地质, 20(3): 370-377
- 中国地质科学院地质研究所金刚石组. 1981. 西藏首次发现含金刚石的阿尔卑斯型岩体. 地质论评, 27(5): 455-457
- 钟立峰, 夏斌, 周国庆, 张玉泉, 王冉, 韦栋梁, 杨之青. 2006. 藏南罗布莎蛇绿岩辉绿岩中锆石 SHRIMP 测年. 地质论评, 52(2): 224-229
- 周美付, 白文吉. 1994. 中国铬铁矿的铂族元素分布特征. 矿物学报, 14(2): 157-163
- 周肃, 莫宣学, Mahoney JJ, 张双全, 郭铁鹰, 赵志丹. 2001. 西藏罗布莎蛇绿岩中辉长辉绿岩 Sm-Nd 定年及 Pb, Nd 同位素特征. 科学通报, 46(16): 1387-1390