

doi: 10.12029/gc20170202

章奇志, 巴登珠, 熊发挥, 杨经绥. 2017. 西藏罗布莎豆荚状铬铁矿床深部找矿突破与成因模式讨论[J]. 中国地质, 44(2): 224–241.
Zhang Qizhi, Ba Dengzhu, Xiong Fahui, Yang Jingsui. 2017. Discussion on genesis process and deep prospecting breakthrough of Luobusa chromitite, Tibet [J]. Geology in China, 44(2): 224–241(in Chinese with English abstract).

西藏罗布莎豆荚状铬铁矿床深部找矿突破与成因模式讨论

章奇志¹ 巴登珠^{2,3} 熊发挥² 杨经绥²

(1. 西藏自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队, 西藏 堆龙德庆 851400; 2. CARMA, 大陆构造与动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 3. 西藏矿业发展股份有限公司, 西藏 拉萨 850000)

摘要:中国铬铁矿资源的瓶颈状态已持续多年。最近, 在西藏罗布莎蛇绿岩地幔橄榄岩的深部勘探发现 200 万 t 致密块状铬铁矿床, 这是中国近 50 年来铬铁矿找矿的重大突破, 对今后继续寻找同类型的铬铁矿床具有重要指导意义。蛇绿岩地幔橄榄岩中产出的豆荚状铬铁矿床是工业需求铬的重要来源。研究豆荚状铬铁矿的成矿作用和矿体围岩地幔橄榄岩地质特征, 建立铬铁矿的成矿模型和找矿标志, 是开展寻找同类型矿床的重要保证。随着近些年在豆荚状铬铁矿及围岩地幔橄榄岩中金刚石等深部矿物的不断发现和深入研究, 人们对蛇绿岩型铬铁矿的物质来源和形成过程, 有了新的认识, 提出了铬铁矿的深部成因模式。研究认为深部成因铬铁矿床主要经历了 4 个阶段: (1) 早期俯冲到地幔过渡带(410~660 km)的陆壳和洋壳物质被脱水 and 肢解, 过渡带产生的热和流体促成了地幔的熔融和 Cr 的释放和汇聚; (2) 铬铁矿浆在地幔柱驱动下, 运移到过渡带顶部冷凝固结, 并有强还原的流体进入, 后者携带了深部形成的金刚石、斯石英等高压矿物, 进入“塑性—半塑性”地幔橄榄岩中; (3) 随着物质向上移动, 深度降低, 早期超高压相矿物发生相变, 如斯石英转变成柯石英, 高压相的铬铁矿中出溶成柯石英和单斜辉石; (4) 在侵位过程和俯冲带环境下, 含水熔体与方辉橄榄岩反应形成了不含超高压矿物的规模相对较小的浸染状铬铁矿及纯橄岩岩壳。进一步研究表明, 同处雅鲁藏布江缝合带西段的几个大型地幔橄榄岩岩体与罗布莎岩体可以对比, 经历了相同的构造背景和豆荚状铬铁矿的成矿作用, 存在较大的找矿空间。

关键词: 豆荚状铬铁矿; 蛇绿岩; 多阶段; 深部成因; 雅鲁藏布江缝合带

中图分类号: P618.33; P611; P612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2017)02-0224-17

Discussion on genesis process and deep prospecting breakthrough of Luobusa chromitite, Tibet

ZHANG Qizhi¹, BA Dengzhu^{2,3}, XIONG Fahui², YANG Jingsui²

收稿日期: 2017-03-31; 改回日期: 2017-04-12

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160023)、国家自然科学基金(41502062, 41672046, 41541017, 41641015)和 IGCP-649 项目联合资助。

作者简介: 章奇志, 男, 1970 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事铬铁矿找矿研究; E-mail: 240062612@qq.com。

通讯作者: 熊发挥, 男, 1985 年生, 博士, 副研究员, 主要从事蛇绿岩和铬铁矿及地幔矿物学研究; E-mail: xiongfahui@126.com。

(1.No. 6 Geological Party, Tibet Bureau of Geological Exploration and Exploitation of Mineral Resources, Doilungdegen 8751400, Tibet, China; 2. CARMA, Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Tibet Ore Industry Co., Ltd., Lhasa 8750000, Tibet, China)

Abstract: The chromitite bottleneck has been going on for many years in China. In October 2015, Bureau of Land and Resources of Tibet announced the discovery of a 200 million tons of massive chromite deposit in deep exploration at Luobusa in Tibet, which achieved a major breakthrough in China's chromite prospecting, and the direction of finding more chromite deposits in the future was also pointed out. The podiform chromite produced in the ophiolitic mantle peridotite is the main source of chromium. The study of podiform chromite mineralization and mantle peridotite is necessary for further finding the chromite deposit and relieve the bottleneck of the chromitite resources in China. Podiform chromite produced in the ophiolite is the main source of chromium and an important strategic resource for China. Research on the genesis of the podiform chromitite and mantle peridotite is necessary for further finding the chromite deposit and relieve the bottleneck of the chromitite resources in China. With the discovery of deep minerals such as diamonds in podiform chromite and mantle peridotites in recent years, researchers have also begun to question the theory of formation of podiform chromite. With the first discovery of 200 million tons of massive chromite orebody, the new understanding that podiform chromite is formed in the depth was raised, and its formation process mainly has gone through four stages. The crust and oceanic crust material of the early subduction to the mantle transition zone (410–660 km) is dehydrated and dismembered, and the heat and fluid produced by the transition zone contribute to the melting of the mantle and the release and aggregation of chromium. The chromitite ore slurry is driven by the mantle plume and is transported to the top of the transition zone for condensation and consolidation. The authors have reached the conclusion that the formation of ophiolites is a multi-stage process involving subduction of lithospheric slabs into the transition zone, crystallization of chromian spinel and some massive chromitites at depth, incorporation of UHP and highly reduced phases into the chromitites, and entrapment of oceanic lithospheric slabs above subduction zones where they undergo varying degrees of interaction or reaction with MORB melts and SSZ melts. Several large massifs in the western part of the Yarlung Zangbo suture are similar to Luobusa in many aspects. They have experienced the same tectonic setting and the mineralization of podiform chromite, and there is a large prospecting space.

Key words: podiform chromitite; ophiolite; multi-stage; deep process; Yarlung Zangbo suture zone

About the first author: ZHANG Qizhi, male, born in 1970, senior engineer, engages in chromitite exploration; E-mail: 240062612@qq.com.

About the corresponding author: XIONG Fahui, male, born in 1985, associate researcher, majors in ophiolites and chromitites; E-mail: xiongfahui@126.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey (No. DD20160023), NSF China (No. 41502062, 41672046, A1602-4d, 41541017, 41641015) and IGCP-649.

1 引言

中国的铬铁矿床找矿经历了曲折艰苦的探索过程。自20世纪60年代陆续发现了新疆萨尔托海、西藏罗布莎大型铬铁矿床和新疆鲸鱼、内蒙古贺根山、青海玉石沟等中型铬铁矿床以来,经过近50年的铬铁矿研究和找矿探索,取得了一些进展,但没有大的突破(董必谦, 1980; 王恒升等, 1983; 王希斌等, 1987; 郝梓国等, 1985, 1991; 张旗等, 2003; 鲍佩声等, 2009; 杨经纬等, 2010, 2011)。罗布莎铬铁矿于1959年经当地群众报矿发现。在长达半个

世纪的漫长岁月里,先后有西藏煤田地质队、西藏地质局藏南地质队、西藏地勘局(原地矿局)第二地质大队、西藏地矿局物探大队、西藏地勘局(原地矿局)地热地质大队、西藏地勘局第六地质大队等单位及科研院所在此开展过各种工作。其中,西藏地勘局(原地矿局)第二地质大队,从1966年开始在藏南超基性岩带及罗布莎岩体上长期从事铬铁矿勘查,作了大量卓有成效的工作,勘查评价了罗布莎铬铁矿床; 1984—1985年,西藏地勘局第二地质大队对罗布莎矿区 I、II 矿群进行地质勘探工作,施工钻探工作量 5668 m。2011年,西藏地勘局第六地质大队和西

藏矿业发展股份有限公司勘探分公司合作,罗布莎矿区 I、II 矿群进行地质补充勘探工作,施工钻探工作量 9411.43 m。对部分勘查线进行了钻孔加密,并向南部延伸,新发现 Cr-80 号矿体。目前罗布莎铬铁矿总储量逾 700 万 t,品位(Cr_2O_3)介于 43%~50%。随着近些年西藏铬铁矿找矿和勘探投入力度的加大,在 2015 年 10 月,西藏第六地质大队和西藏矿业终于取得了西藏罗布莎深部勘探铬铁矿找矿的重大突破,发现 200 万 t 致密块状铬铁矿床,为在青藏高原蛇绿岩中进一步寻找更多的铬铁矿床具有重要指导意义。

蛇绿岩是豆荚状铬铁矿的专属岩石,也是大陆造山带中残存的古代大洋岩石圈残片,记录了大洋岩石圈的岩浆演化、构造演化过程,提供了古洋盆形成、发展和消亡等方面的重要信息。蛇绿岩形成环境主要存在两种类型,一为形成于大洋扩张脊(MOR型),二为板块俯冲消减带上的岛弧及大陆边缘小洋盆等多种构造环境中(SSZ型)(Pearce et al., 1984);随着近年来对蛇绿岩的深入研究,认为蛇绿岩在形成和构造成就位的过程受到不同阶段的部分熔融作用、熔体淬取、岩石-熔体反应和地幔交代等多种作用的影响(Ionov et al., 1997; Pearce, 2000; Seyler et al., 2001; Coltorti et al., 2004; Paulick et al., 2006)。

豆荚状铬铁矿床主要赋存于地幔橄榄岩中,而地幔橄榄岩普遍被认为是蛇绿岩套的重要组成部分。豆荚状铬铁矿产于蛇绿岩的地幔橄榄岩中,常保留丰富的上地幔岩浆活动痕迹及后期高温变形的构造。铬铁矿赋存于蛇绿岩中的两个层位中,一是堆积杂岩底部的橄榄岩中,二是 MOHO 面以下的橄榄岩中。前者通常形成小型铬铁矿床,而后者多形成具工业价值的豆荚型铬铁矿床。与蛇绿岩形成环境的观点类似,豆荚状铬铁矿床形成环境目前也存在争议,但大多数学者认为俯冲带之上是豆荚状铬铁矿形成最有利的构造环境(SSZ)(Pearce et al., 1984; Yumul and Balce, 1994; Zhou et al., 1998; 2005)。在日本岛弧西南部新生代 Takarashima 碱性玄武岩内发现有豆荚状铬铁矿捕虏体,并且具有典型的仅产于蛇绿岩地幔橄榄岩中的豆状结构,表明日本岛弧的上地幔中存在有豆荚状铬铁矿,直接证明了豆荚状铬铁矿可以形成于岛弧环境(Arai and

Abe, 1994)。另有在赤道附近东太平洋扩张脊大洋深钻中找到了原位铬铁矿,证明豆荚状铬铁矿也可以形成于现代大洋扩张中心(Arai and Matsukage, 1998)。近年来,铬铁矿作为深部地幔超高压异常矿物载体的发现(白文吉, 2000, 2001, 2002; 杨经绥等, 2008a, b),扩大了对铬铁矿形成环境的了解,铬铁矿的形成环境可以位于过渡带(410~600 km)(杨经绥等, 2007; 2008a, b)。

综上所述,豆荚状铬铁矿主要被认为可能形成于在 3 种环境中: MOR、SSZ 和地幔过渡带。然而无论形成于 MOR 还是 SSZ 环境的蛇绿岩及其地幔橄榄岩中的豆荚状铬铁矿均被认为是在上地幔浅部,局部熔融发生在大洋下 60~100 km 深度(Lambert and Wyllie, 1970),或者俯冲带上 <50 km 的深度(Zhou et al., 1996)。因此,铬铁矿的形成环境的最大差别还在于浅成和深成的环境,以及以下诸多科学问题:蛇绿岩地幔橄榄岩和铬铁矿中的金刚石等强还原矿物究竟是如何形成的?究竟可达多少深度,其意义何在?金刚石等深部矿物的物质是来自地幔深部,还是早期俯冲下去的地壳物质?形成金刚石的超还原环境的含 C 流体是如何产生的?铬铁矿如何形成及与强还原深部矿物的成因关系?如果深部矿物形成在地幔过渡带深度,如何识别地幔过渡带的物质组成和俯冲下去的地壳物质?地幔过渡带中的熔体或流体是如何产生,深部矿物如何形成并运移到浅部地壳被保留?显生宙蛇绿岩中和现代大洋岩石圈中是否也同样普遍存在金刚石等深部矿物?即全球不同年代、不同地区和不同构造背景的蛇绿岩中是否会普遍找到金刚石等深部矿物,或不同矿物组合?蛇绿岩可以产在不同的构造背景,有些蛇绿岩经历了 MOR 和 SSZ 两个阶段,含金刚石的蛇绿岩究竟是与 MOR 构造背景有关,还是与 SSZ 构造背景有关,或与两者均有关?

显然,开展宏观上蛇绿岩和铬铁矿的深部研究,是探讨这些矿物的成因及其保留和侵位的动力学机制不可或缺的重要组成部分。只有微观深入研究与宏观空间展布结合,才能够较为全面、客观地认识地幔的性质和运动规律,建立地球动力学模型。总的来看,蛇绿岩地幔橄榄岩和铬铁矿中出现金刚石等超高压矿物,表明它们可能形成于地幔深部,不同于现有的浅部成因模型。因此,基于铬铁

矿深部成因观点认识,来探讨铬铁矿的成矿模式和成矿规律,能更好地指导中国铬铁矿的勘查与找矿工作。

2 地质背景

雅鲁藏布江蛇绿岩带位于特提斯喜马拉雅与拉萨地块之间,岩带宽不足15 km,长度超过2000 km(王希斌等,1987),是青藏高原南部最重要的大地构造界线,印度板块与欧亚大陆的最后一道缝合带,代表新特提斯洋盆的残余。较早的研究始于20世纪60—70年代,在80年代第一次中法国际合作后提出了雅鲁藏布江蛇绿岩带代表印度—欧亚大陆的俯冲—碰撞界线,其北侧为欧亚板块的中—新生代弧前盆地火山—沉积建造、冈底斯岩浆弧和拉萨地块,而其南侧的构造沉积单元则属于印度板块的被动大陆边缘沉积建造和结晶基底,两者之间在中生代时曾经存在数千乃至近万千米宽的大洋新特提斯洋(Coleman, 1977; 常承法, 1973; 肖序常, 1984)(图1)。之后被认为雅鲁藏布江蛇绿岩带代表喜马拉雅陆弧与拉萨地块之间的狭长弧后裂陷盆地,新特提斯洋可能是弧后或者弧间小洋盆(肖序常, 1984; 耿全如等, 2011)。西藏罗布莎蛇绿岩体位于拉萨市东南约200 km的雅鲁藏布江缝合带东

段。雅鲁藏布江蛇绿岩带是喜马拉雅特提斯洋壳和地幔的残余,呈近东西向,断续延伸约2000 km。罗布莎岩体沿雅鲁藏布江谷地展布,东西延伸约42 km,最宽处约3.7 km,面积达70 km²,平面略呈一平置的反“S”形(图1)。该岩体的南侧为上三叠统复理石沉积,与岩体呈断层接触关系,北侧被罗布莎群不整合覆盖。罗布莎蛇绿岩岩块主要由地幔橄榄岩和堆晶岩组成,以及少量被肢解的火山岩和硅质岩构成的混杂岩出露在堆晶岩的北侧(图2)(杨经绥等, 2004),并见有少量的球壳状玄武岩。地幔橄榄岩主要为方辉橄榄岩和纯橄岩,堆晶岩主要由异剥橄榄岩、辉石岩、纯橄岩和辉长岩组成(王希斌等, 1987)。罗布莎铬铁矿床分布于纯橄岩—方辉橄榄岩内,为典型的阿尔卑斯型铬铁矿,即豆荚状铬铁矿床(王希斌等, 1987)。矿体边缘一般具有一层薄的纯橄岩外壳,矿体和纯橄岩之间不属断层接触,但岩性界线清楚(Zhou et al., 1996)。铬铁矿矿体多呈似板状、透镜状以及其他不规则形态,并具成群分布,成带集中,侧向延伸有限的特征。根据铬铁矿的开采和地形等因素,罗布莎铬铁矿床自西向东分为罗布莎、香卡山、康金拉3个矿区。目前为止,罗布莎铬铁矿床共编排15个矿群,除香卡山矿区XI矿群产于堆晶结构纯橄岩相带中外,主要工业矿体

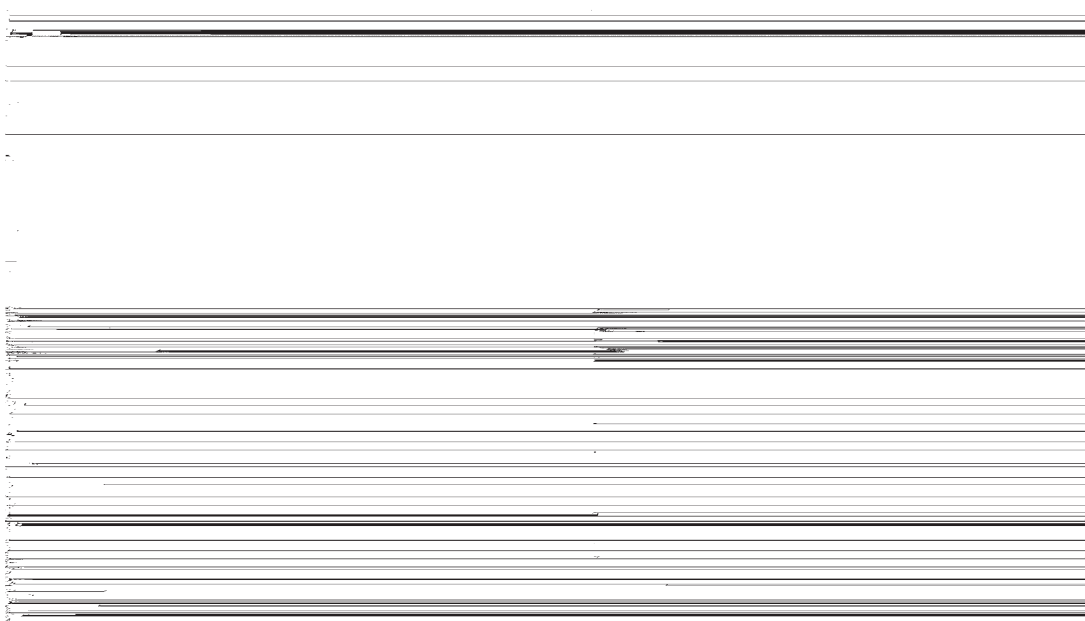


图1 研究区区域地质简图(据熊发挥等, 2014)

Fig.1 Geological sketch map of the study area (after Xiong et al., 2014)

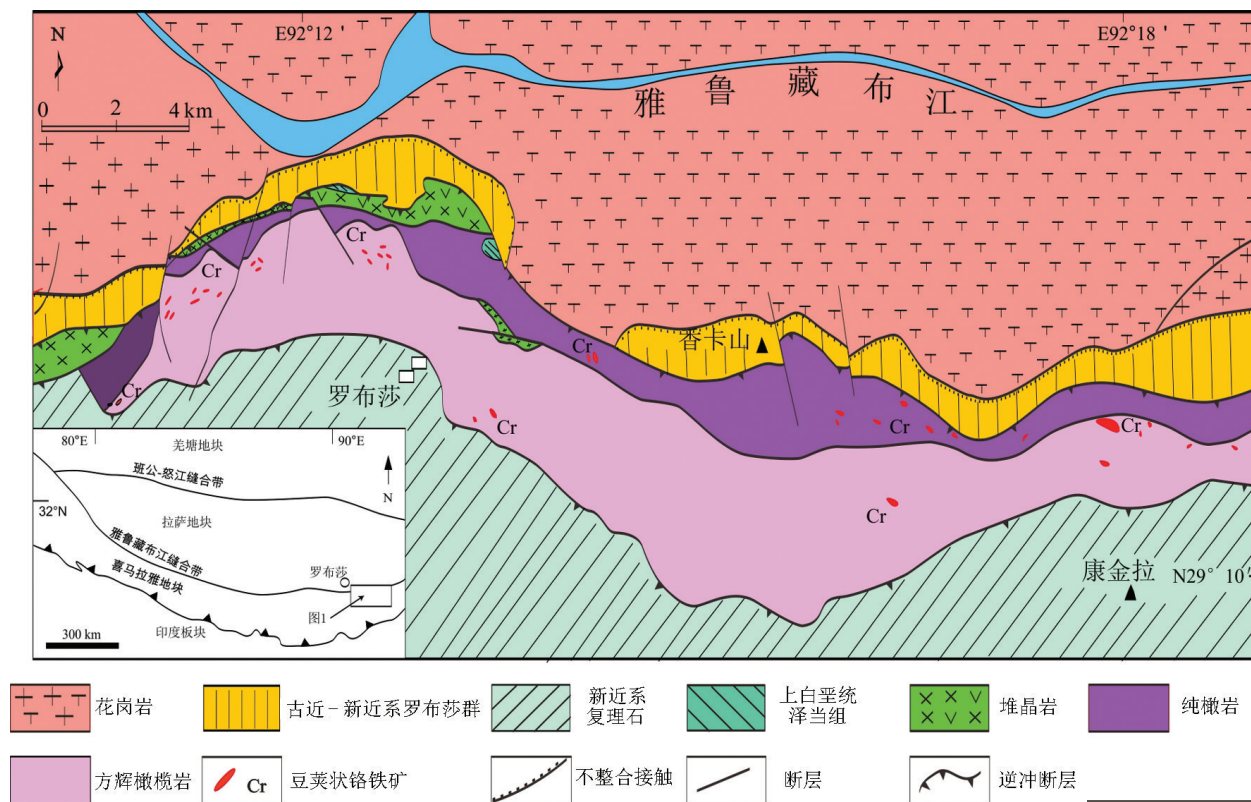


图2 西藏罗布莎岩体及铬铁矿地质简图(据野外工作和白文吉等, 2001)

Fig.2 Geological map of the Luobusa ophiolite, Tibet (after Bai et al., 2001 and this work)

多集中产于蛇绿岩壳-幔边界以下(即岩石莫霍面)方辉橄榄岩相与堆晶状纯橄岩相接触界面之下的方辉橄榄岩相带一侧。

前人基于蛇绿岩岩体中不同岩石类型的地球化学、年代学、矿物学等特征,初步表明了罗布莎蛇绿岩形成过程至少存在两个阶段。包括第一个阶段的MORB型地幔和辉长岩墙Sm-Nd等时线年龄为(177±33) Ma (Zhou et al., 2002), 第二阶段具俯冲带(SSZ)性质蛇绿岩的锆石SHRIMP年龄为(126±2) Ma (Malpas et al., 2003)。罗布莎地幔橄榄岩的矿物学,岩石地球化学性质指示,岩体开始形成于MOR阶段,后受不同程度的SSZ环境改造(Xu et al., 2011; 李金阳等, 2012)。在该岩体的地幔橄榄岩和铬铁矿中发现的地幔超高压矿物,表明可能还有更早一期阶段来源于地幔深部过程,深度可能达到>400 km (Yang et al., 2007, 2015a; 杨经绥等, 2008a, b; 徐向珍, 2009; Xiong et al., 2015)。

3 矿床特征

从区域地质简图1可知,罗布莎地幔橄榄岩中

铬铁矿呈透镜状,主要分布在岩体南部大面积的方辉橄榄岩中。罗布莎铬铁矿体的分布十分广泛,截至目前共发现600个大小不等、形态各异的铬铁矿矿体,各岩相带中均有铬铁矿体产出,但分布特征不同。第一类是分布于矿区北部纯橄岩岩相带中。除东西向的矿体外,还有东北、北西向分布的矿体,以各种浸染状矿石为主,局部有致密块状矿石。除个别矿体规模较大,大多为条带状或不规则透镜状的小矿体,且由于品位较低,分布不集中,一般不具有工业价值。第二类是分布于中部和南部方辉橄榄岩夹纯橄岩岩相带中的矿体,矿体主要以岩体走向相似的东西向、近东西向为主。另有少量的为北东向,矿体总体向南倾,与蛇绿岩构造岩片的倾向一致,沿倾向方向有较大的延伸,多个矿体以雁行式(迭瓦式)排列为特征。并以致密块状矿石为主,这类矿体也是罗布莎铬铁矿主要采集的工业矿体。第三类,分布于基性-超基性杂岩岩相带中的矿体。矿体产于岩体底部与上白垩统炭质板岩接触带附近的片状蛇纹岩内,具岩体边界仅0.3~0.5 m,有8~10个矿体,均呈不规则团块状,长轴平行岩

体边界,单个矿体规模不大,一般长1~6 m,宽0.4~1.4 m,矿体最长的可达15 m,宽5~7 m。这类矿体数量很少,在矿区内不占主要地位(熊发挥等,2014)。

本次罗布莎深部找矿工作中,在罗布莎 I、II 矿群南部西 32~西 3 排之间圈定了 16 个铬铁矿矿体。其中 Cr-80、Cr-88、Cr-89 等 3 个矿体为主要矿体, Cr-81~87、Cr-90、Cr-M1~M5 等矿体为次要矿体(图 3,图 4,表 1)。这些铬铁矿体均位于罗布莎 I、II 矿群的东南部,矿体赋存于罗布莎超基性岩体的斜辉辉橄岩夹纯橄岩岩相带。在剖面上,位于中央含矿构造岩相带的中下部。Cr-80、Cr-88、Cr-89 等 3 个主矿体呈叠瓦状分布。已知矿体在地表均无出露,属于隐伏矿体,埋藏深度一般在 226~470 m,最大埋深为 477.29 m。矿体赋存标高一般为 4100~3780 m。

3.1 矿体特征

Cr-80、Cr-88、Cr-89 矿体均呈近东西向展布,向南倾伏,空间上基本呈叠瓦式,形态变化基本一致。这 3 个主要矿体规模较大,总资源量为 198.45 万 t (均为致密块状矿石)。

Cr-80 矿体:该矿体近东西走向,走向延伸长 200 m,倾向南南东,倾角 28°~42°,控制标高为 4040~3780 m,高程垂深 260 m,倾向最大延深 380 m,在成矿期由于受到塑性流变影响,矿体沿倾向方向呈“S”形,沿走向方向也显示微波状起伏和分支、厚度变薄的特征。矿体上部向北具有倾角变缓厚度快速变薄尖灭的现象,而在深部出现矿体厚度变大现象。该矿体向 150°方向倾伏,总体倾伏角在 40°左右。该矿体估算的铬铁矿矿石资源量为 114.67 万 t,是目前罗布莎铬铁矿床最大的矿体,矿石类型为致密块状,矿体平均品位 Cr₂O₃ 为 50.04%。在斜辉辉橄岩含纯橄岩岩相带的岩相中,矿体与围岩接触边缘往往有蛇纹石化纯橄岩或矿化纯橄岩,这些岩石大多都具有碎裂构造岩石显示破碎特征。

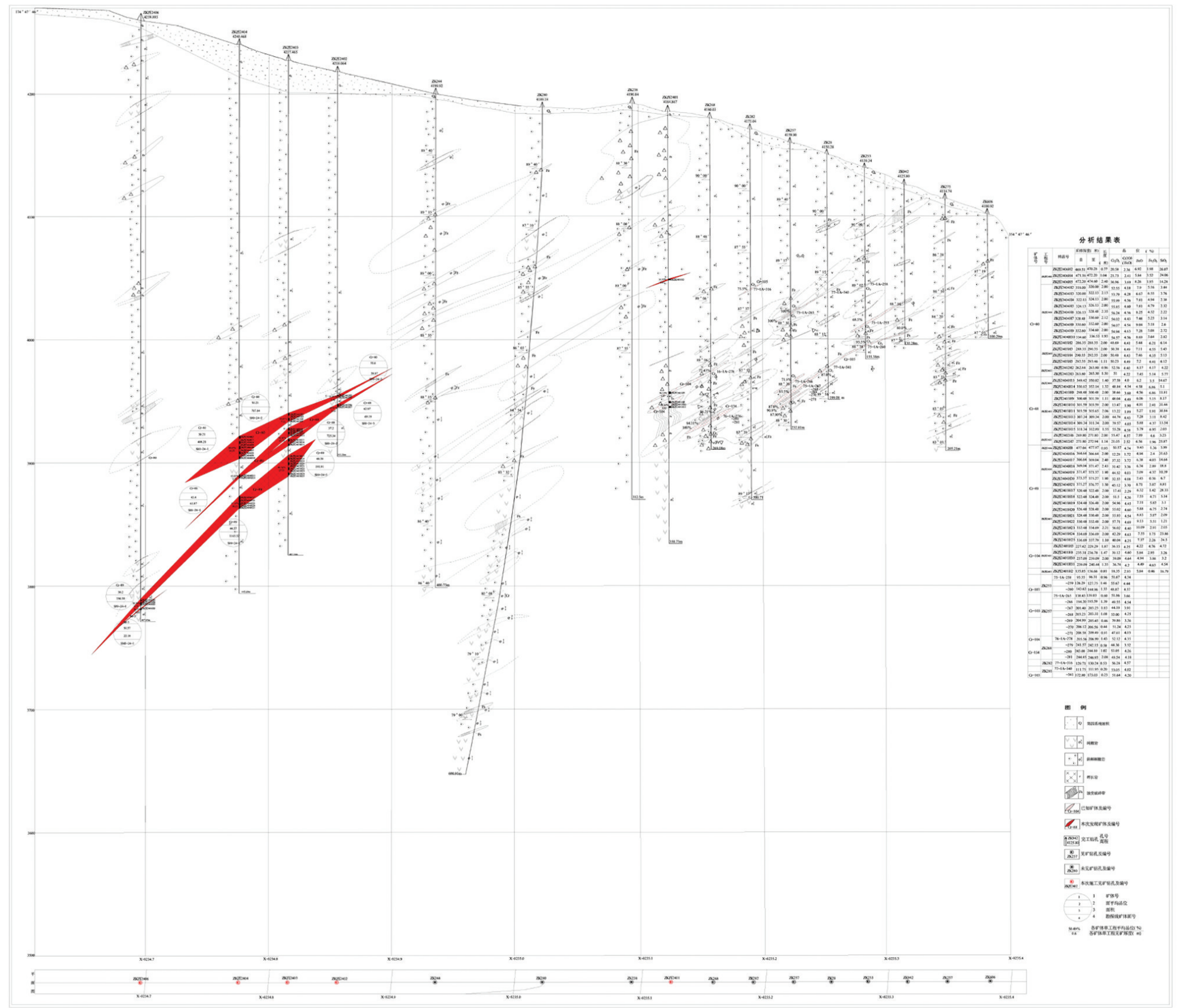


图 3 罗布莎铬铁矿 I、II 群西 24 排勘探线剖面图
Fig.3 Geological section along west No. 24 row exploration line of Group I, II in the Luobusha chromitite deposit

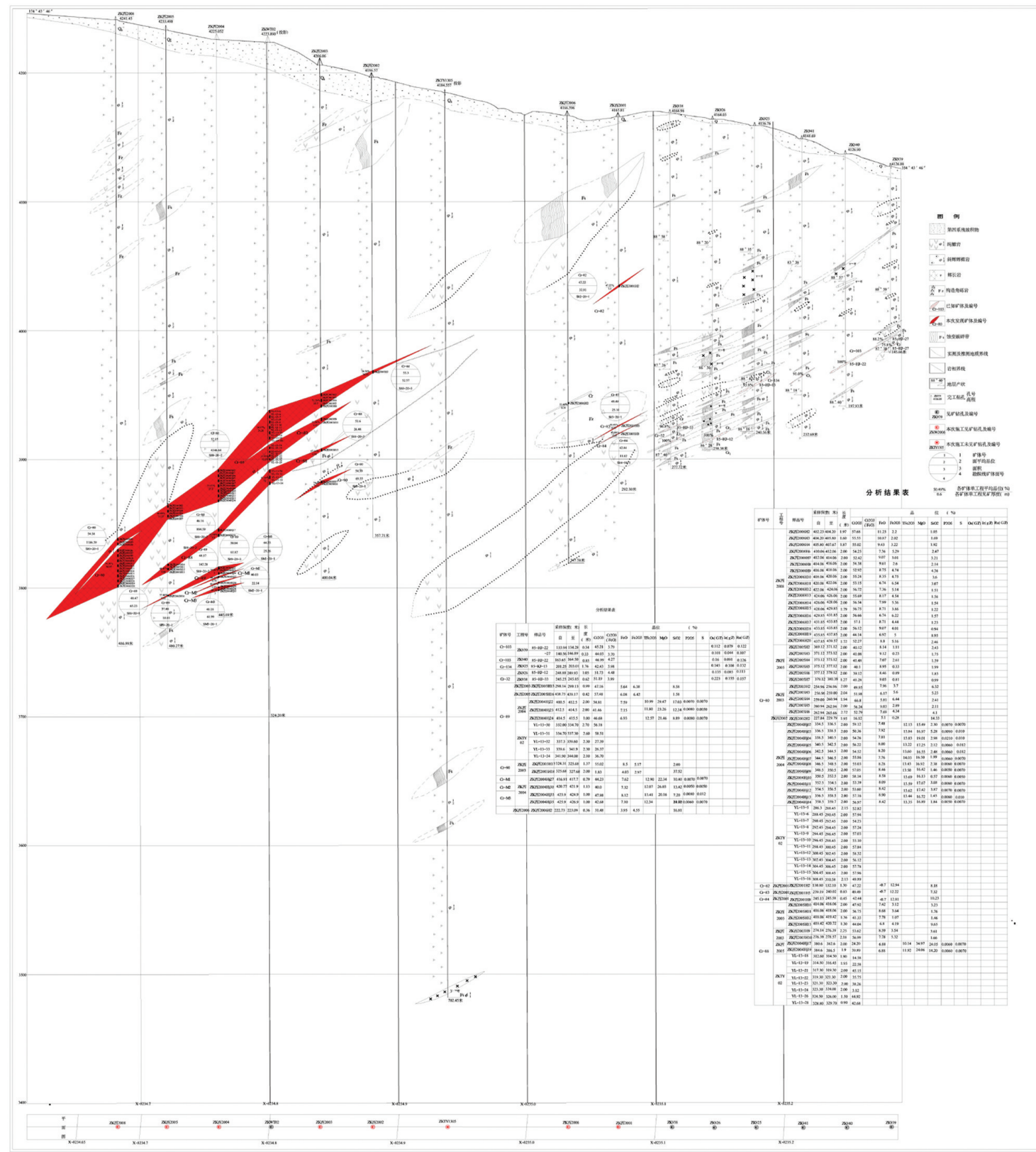


图4 罗布莎铬铁矿矿I、II群西20排勘探线剖面图
 Fig.4 Geological section along west No. 20 row exploration line of Group I, II in the Luobusa chromitite deposit

表1 罗布莎铬铁矿床主要矿体特征
Table 1 Feature of major chromitite deposits from Luobusa ophiolite

矿体号	规模/m×m	形态	产状	单工程见矿厚度/m	赋存标高/m	品位(Cr ₂ O ₃)/%
Cr-80	200×380	致密块状	150°∠31°~42°	5.82~34.95	4040~3780	50.04
Cr-88	240×208	致密块状	170°∠31°~43°	5.65~14.58	3950~3800	43.73
Cr-89	200×272	致密块状	175°∠29°~45°	4.64~14.18	3900~3800	43.31
Cr-81	40×40	透镜状	180°∠29°	0.45	3960~3975	42.92
Cr-82	70×40	细脉状	175°∠36°	1.3	3950~4050	47.22
Cr-83	30×30	透镜状	175°∠29°	0.83	3920~3935	49.49
Cr-84	30×30	细脉状	175°∠28°	0.45	3915~3929	42.44
Cr-85	80×40	透镜状	175°∠32°	0.6~2.47	3995~4035	54.40
Cr-86	40×40	透镜状	185°∠30°	1.4	4000~4024	44.92
Cr-87	40×30	透镜状	174°∠29°	0.51	3920~3935	47.53
Cr-90	40×40	透镜状	175°∠36°	2.87	3970~3895	54.39
Cr-M1	40×40	透镜状	176°∠22°	0.79	3800~3820	44.23
Cr-M2	40×40	透镜状	179°∠22°	1.13	3795~3820	40.03
Cr-M3	40×40	透镜状	185°∠25°	0.93~3	3790~3810	48.71
Cr-M4	40×40	透镜状	172°∠23°	0.82	3820~3830	51.05

Cr-88矿体: Cr-88位于Cr-80矿体下面5~30 m不等, 和Cr-80矿体基本呈平行产出, 矿体近东西走向, 走向延伸长240 m, 有小的波状起伏; 倾向南南东, 倾角31°~43°, 控制标高为3950~3800 m, 倾向最大延深208 m, 整个矿体呈一饼状, 具有中间厚四周逐渐变薄的特征, 就总体而言矿体的厚度、形态都比较稳定。Cr-88矿体本次估算的铬铁矿矿石资源量为49.36万t, 占本次提交铬铁矿矿石资源量的24.46%, 矿石类型为致密块状, 矿体平均品位Cr₂O₃为43.73%。矿体产在斜辉辉橄岩岩相带中, 在矿体周边都存在着蛇纹石化矿化纯橄岩, 岩石也具有碎裂构造, 后经过蛇纹石沿着岩石碎块充填交代使岩性变为完整。

Cr-89矿体: Cr-89位于Cr-88矿体下面5~25 m不等, 和Cr-80和Cr-88矿体基本呈平行产出, 矿体近东西走向, 走向延伸长200 m; 倾向南南东, 倾角29°~45°, 控制标高为3900~3800 m, 倾向最大延深272 m, 整个矿体呈一板状, 矿体厚度比较稳定。Cr-89矿体本次估算的铬铁矿矿石资源量为34.42万t, 占本次提交铬铁矿矿石资源量的17.06%, 矿石类型为致密块状, 矿体平均品位Cr₂O₃为43.31%。

3.2 矿石类型

罗布莎铬铁矿矿石的主要金属矿物是铬尖晶石。在致密块状铬铁矿石中, 铬尖晶石多呈他形晶, 晶粒以中粗粒为主, 少数呈伟晶, 铬尖晶石含量在90%以上; 在浸染状铬铁矿石中, 铬尖晶石的自形晶程度较高, 粒度自极细粒至中粒, 铬尖晶石含

量10%~80%; 脉石矿物主要为绿泥石、蛇纹石、钙铬榴石和铬绿泥石等, 绿泥石是块状铬铁矿石的主要脉石矿物, 由橄榄石蚀变而成; 蛇纹石常见于浸染状矿石中, 呈灰色, 亦由橄榄石蚀变而成。橄榄石有两种, 一为呈机械双晶出现, 具波状消光; 另一是呈微粒包裹于铬尖晶石中。钙铬榴石呈翠绿色、透明; 铬绿泥石呈淡紫色, 鳞片状。此外, 还有少量透辉石、绢石、滑石和水镁石。

罗布莎铬铁矿的矿石类型丰富, 包括稀疏浸染状铬铁矿, 条带浸染状铬铁矿, 豆状, 反豆状, 以及中等稠密浸染状和致密块状铬铁矿等。不同的矿石类型, 其脉石矿物含量不同, 其中浸染状铬铁矿(包括稀疏浸染状、豆状、反豆状等)中橄榄石含量30%~70%, 致密块状铬铁矿中脉石矿物橄榄石为5%~15%。并且在浸染状铬铁矿中未见单斜辉石和斜方辉石, 然而在致密块状铬铁矿内, 发现有粒度在20~200 μm呈包裹体状产出的单斜辉石和斜方辉石。因此, 基于它们之间的差别, 将罗布莎铬铁矿分为两大类: 致密块状铬铁矿和浸染状铬铁矿。矿石结构与构造(图5): 矿石的结构主要有四种, 即他形晶中粗粒结构、自形-半自形晶细粒结构、碎裂结构和包橄结构。他形晶中粗粒结构: 多为致密块状、浸染状结构, 粒径1~5 mm, 个别达10 mm以上, 以粗粒为主, 呈他形晶紧密镶嵌成块体。在中粗粒铬尖晶石颗粒间, 还有微粒自形铬尖晶石被橄榄石所包裹; 自形-半自形精细微粒结构: 多为中等至稀疏浸染状铬铁矿石的结构形式。以自形晶为主, 粒

径0.1~1 mm, 铬尖晶石的外表常有0.01~0.05 mm厚的绿泥石蚀边。

4 讨 论

4.1 西藏罗布莎铬铁矿成矿模式的建立

针对阿曼、新喀里多尼亚等地蛇绿岩及豆荚状铬铁矿的研究提出了豆荚状铬铁矿形成于大洋中脊或弧后盆地扩张中心(MOR)的观点(Leblanc and Nicolas, 1992; Nicolas, 1989), 并在赤道东太平洋大洋中脊上开展的深海钻探中首次获得了现代洋中脊环境的豆荚状铬铁矿样品(Arai and Matsukage, 1998)。而基于许多蛇绿岩形成于小洋盆的新认识, 研究者认为大洋俯冲带环境(SSZ)(弧后盆地、岛弧及弧前环境)也是豆荚状铬铁矿形成的有利环境(Pearce et al., 1984; Zhou et al., 1998; Proenza et al., 1999)。但无论形成于MOR还是SSZ环境的蛇绿岩及其地幔岩中的豆荚状铬铁矿均被认为是在上地幔浅部形成, 局部熔融发生在大洋下60~100 km深度(Lambert and Wyllie, 1970), 或俯冲带上<50 km的深度(Zhou et al., 1996)。总结全球蛇绿岩区的豆荚

状铬铁矿的地质特征发现, 它们之间有较多的共性, 可以简要概况为如下4点: ①豆荚状铬铁矿矿体形态独特, 明显不同于层状铬铁矿稳定延伸的层状特征, 多呈狭窄的扁豆状、透镜状、岩墙状, 由于压扁拉长褶皱变形, 构造形态不规则而且分布无规律(Leblanc and Nicolas, 1992; Thayer, 1964; Arai, 1997; Cassard et al., 1981; Lago et al., 1982), 其宏观构造特征类似变质变形构造。矿体横向上延伸有限, 最大长度很少大于几十米, 厚度多小于5 m。在同一蛇绿岩中零散分布的豆荚状铬铁矿体可达数十到上百个, 并且具有相对一致的矿物成分与矿石结构。豆荚状铬铁矿普遍显示他形, 与自形较好的层状铬铁矿区别显著; ②世界各地含铬地幔橄榄岩体因经历了不同程度的部分熔融作用而具有明显的垂直分带特征, 即在剖面上从下到上随着部分熔融程度的不同, 依次为二辉橄榄岩→方辉橄榄岩→纯橄岩, 具有上部偏基性、下部偏酸性的特征, 这与蛇绿岩套中莫霍面上部岩相特征具有下部偏基性、上部偏酸性特征具有明显的不同(鲍佩声等, 2009); ③豆荚状铬铁矿大多出现于蛇绿岩套的辉长

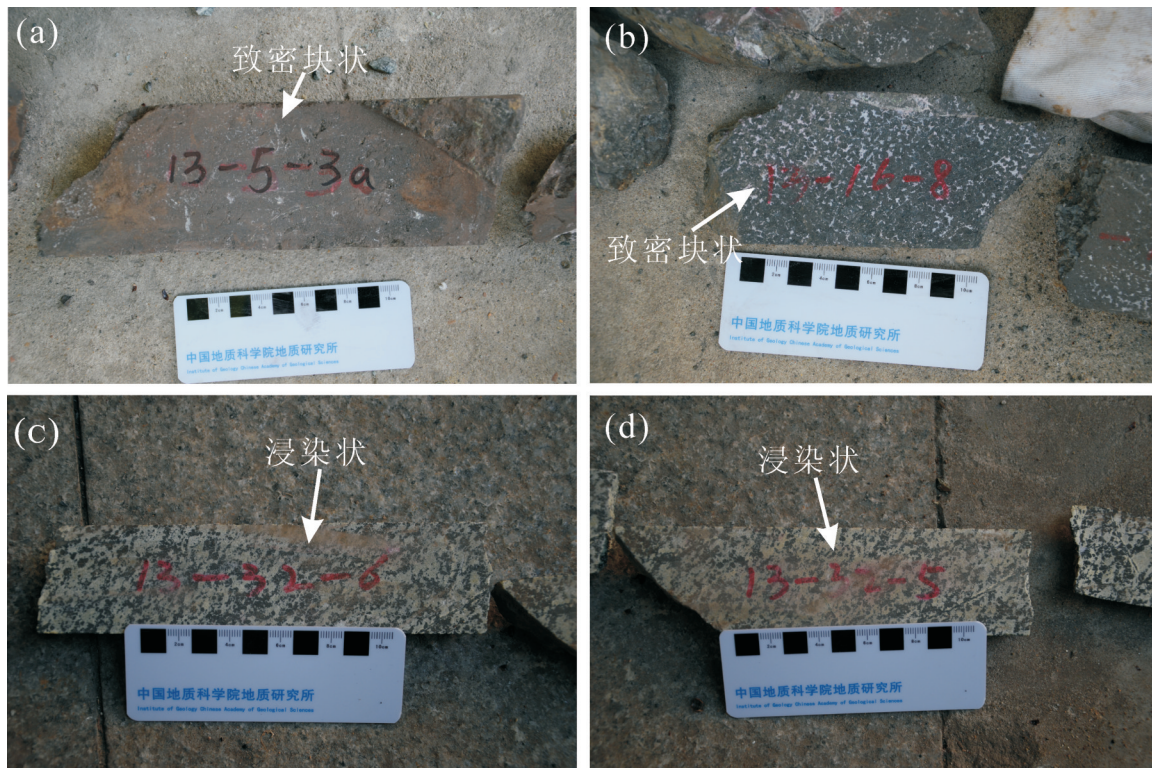


图5 罗布莎地幔橄榄岩中不同类型的矿石结构

Fig.5 Different textures of the chromitite in Luobusa mantle peridotite

质堆晶岩与地幔橄榄岩界面(莫霍面)以下1000~1500 m的垂直深度范围内,它们多呈不规则形态出现于方辉橄榄岩内。这一位置被认为是大洋地壳与亏损上地幔之间的过渡带(Nicolas, 1989),常在不同介质内发生强烈的岩浆动力作用过程,涉及地幔熔体的形成、聚集、渗滤及其向上迁移,以及高温构造变形,包括纯橄岩经历的强烈剪切变形,发生强烈的熔体/地幔岩作用及高温固态变形,在地幔橄榄岩内出现与豆荚状铬铁矿形成相关的多种小型岩脉(Leblanc and Nicolas, 1992; Proenza et al., 1999; Lago, 1982; Zhou et al., 1996); ④豆荚状铬铁矿床的一个最明显特征是其主要赋存于方辉橄榄岩中,或赋存于以方辉橄榄岩为主的地幔岩之上的壳-幔转换带的纯橄岩中(Nicolas and Prinzhofer, 1983; Arai et al., 1997)。矿体仅产于几乎不含单斜辉石的方辉橄榄岩中,如东阿尔卑斯带的希腊、塞浦路斯、土耳其以及伊朗等。而二辉橄榄岩中几乎不含豆荚状铬铁矿床,即便在有大量纯橄岩存在的情况下,以二辉橄榄岩占主要地位的橄榄杂岩体中也很少产出豆荚状铬铁矿床(Leblanc and

Temagouh, 1989)。

20世纪80年代初,中国在西藏雅鲁藏布江缝合带罗布莎蛇绿岩铬铁矿中发现了金刚石(中国地质科学院地质研究所金刚石组, 1981)。但此后的30多年,受研究经费和人员匮乏的影响,该研究工作断断续续,几近停顿。近10年来,由于研究经费的投入和年轻科研人员的不断加入,罗布莎铬铁矿和其他蛇绿岩的研究工作得以展开。尤其国际合作的加强,研究成果逐渐获得国际同行的认可,研究工作可以分为3个阶段。第一个阶段,打开研究地幔矿物的新窗口(1980—2005年)。在罗布莎铬铁矿金刚石发现的基础上,又发现了60余种包括金刚石在内的其他矿物,包括自然元素矿物C、Cu、Ni、Cr、Fe、Ir、Os、Ru、Au、Pb、W以及Si等;合金矿物Fe-Ni、Fe-Si、Ag-Au、SiC、CrC、Ir-Os、W-Co和Fe-Mn等;另外还有硫(砷)混合物、氧化物、硅酸岩和碳酸岩类矿物(Bai et al., 1993; 白文吉等, 2001, 2002, 2004; 杨经绥等, 2004)。该阶段的工作未能够在国内外获得普遍认可,质疑的理由是无法排除人工重砂矿物被污染的可能性。第二个阶段(2006—2009年)研究取得重要进展,引起国际同行重视。此阶段在罗布莎铬铁矿中发现呈斯石英假象的柯石英,认为是>300 km的深部矿物(Yang et al., 2007);并且在罗布莎铬铁矿围岩地幔橄榄岩中也发现了金刚石(杨经绥等, 2008a, b; Xu et al., 2009),尤其罗布莎康金拉铬铁矿和围岩地幔橄榄岩中的金刚石数量很大,各达千余粒(徐向珍, 2008; Xu et al., 2009),为开展深入工作和寻找原位金刚石奠定了基础;一些新矿物获得了国际新矿物委员会的正式批准(白文吉等, 2007; Li et al., 2009; Li et al., 2011);并在西藏西部和俄罗斯乌拉尔铬铁矿中也发现金刚石等相同矿物组合(杨经绥等, 2007; 2011a, b; Yang et al., 2015a)。第三阶段(2009—2014年)研究取得了里程碑式的突破。此阶段的进展包括在铬铁矿中发现了原位产出的金刚石,证实金刚石等深部矿物为天然产出,为铬铁矿的深部成因提供了关键性证据(Yang et al., 2014, 2015a);测得金刚石的C同位素、矿物包裹体和微量元素十分不同于金伯利岩型金刚石和超高压俯冲变质型金刚石,认为是一种新的金刚石产出类型,命名为蛇绿岩型金刚石(Yang et al., 2014; 杨经绥等, 2011, 2013),国际新矿物委员会

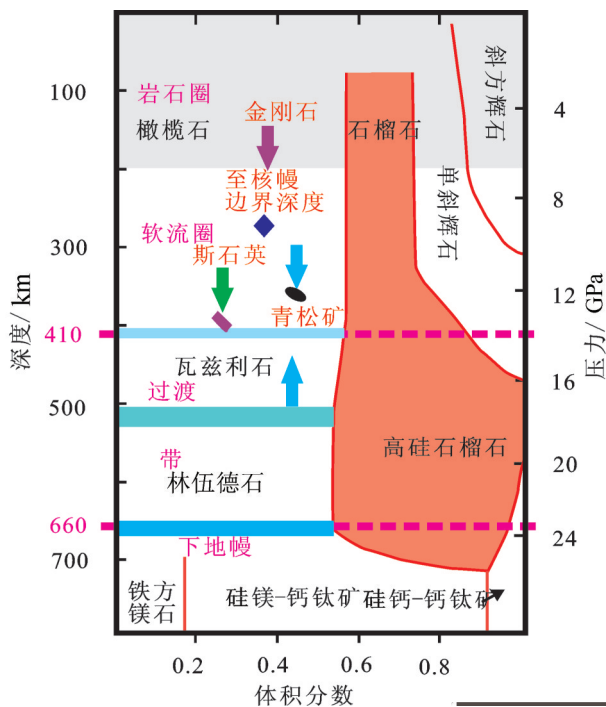


图6 铬铁矿中金刚石等矿物的压力图解(据杨经绥等, 2013)
Fig.6 Diagrams of such minerals as diamond in the chromitite
(after Yang et al, 2013)

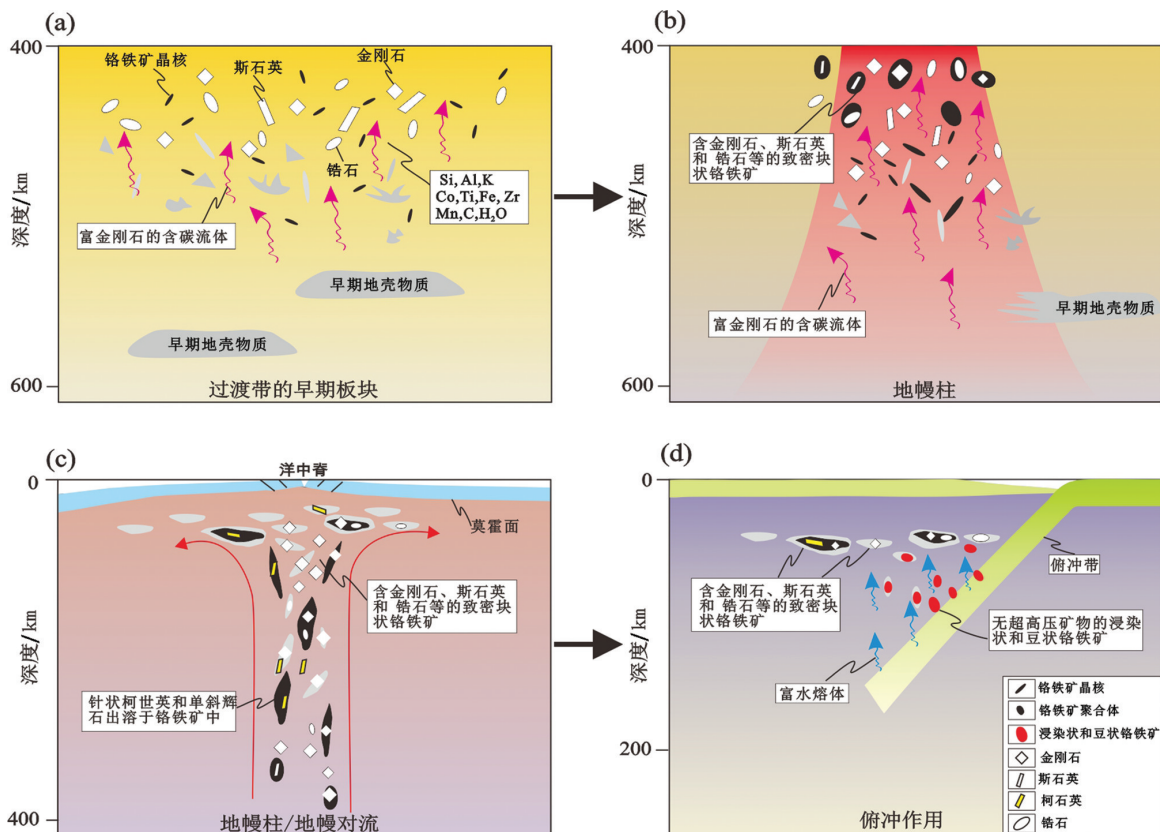


图7 豆荚状铬铁矿的形成模式 (Xiong et al., 2015)

Fig. 7 The new model illustrating the formation of the podiform chromite (after Xiong et al., 2015)

2013年批准了我们与国外研究人员合作发现的氮化硼 (BN) 矿物为新矿物, 命名为青松矿 (Qingsongite) (批准号: IMA No. 2013-30)。青松矿是为了纪念中国地质科学院地质研究所的方青松研究员(1939—2010年)而命名的新矿物, 他在罗布莎铬铁矿石中找到第一粒金刚石中做出了杰出贡献。实验结果表明, 青松矿的形成温度为 1300°C , 压力为 $10\sim 15\text{ GPa}$, 即形成深度大于 300 km (图6) (Dobrzhinetskaya et al., 2014)。除了西藏外, 在新疆、内蒙古和全球多处蛇绿岩中发现金刚石(杨经绥等, 2011; Huang et al., 2015; Tian et al., 2015; Yang et al., 2015b; Xiong et al., 2017; Lian et al., 2017), 认为蛇绿岩地幔橄榄岩中含有金刚石等深部矿物可能是一个普遍规律, 需要重新评估板块构造经典的蛇绿岩和铬铁矿的浅部成因理论。

近几年国内外铬铁矿对比研究, 提出了豆荚状铬铁矿的深部成因理论。大洋扩张脊下的地幔保留了深部物质, 说明存在深部通道。金刚石等超

压矿物有可能与铬铁矿均在深部形成并被后者包裹, 其后, 深部形成的铬铁矿随地幔柱上涌到浅部地幔被保留。地球化学和地震层析证据显示整个地幔对流是地幔演化的重要过程, 提供了在下地幔形成的深部地幔矿物被运移到地球表面的可能性。因此, 罗布莎和乌拉尔发现的一些超高压矿物不排除可能来自下地幔, 被包裹在铬铁矿中通过地幔柱被带到浅部地幔 (Yang et al., 2014, 2015a, b; Xiong et al., 2015)。

因此, 在总结乌拉尔、罗布莎、普兰和东波铬铁矿和地幔橄榄岩的特征, 及对比其他地幔橄榄岩和铬铁矿的基础上, 认为豆荚状铬铁矿与地幔橄榄岩的形成过程是经历了不同期次的结果, 提出4个阶段的成因模式(图7)(Yang et al., 2015; Xiong et al., 2015)。第一阶段: 早期俯冲的陆壳和洋壳物质到达地幔过渡带后成分被分解, 岩石脱水, 产生大量流体, 地壳中放射性物质生热, 导致地幔熔融, Cr等成矿元素从矿物中释放并聚集; 第二阶段: 在地幔柱

作用下熔融物质上涌,在过渡带顶部,熔体开始结晶,铬铁矿聚集成矿,独立的携带微粒金刚石等超高压矿物的强还原性流体进入开始固化的铬铁矿和围岩,呈半固化的铬铁矿和熔融体继续向上运移;第三阶段:在向上运移至洋中脊的过程中,压力不断降低,超高压相矿物转变成低压相矿物,溶解在铬铁矿矿浆中物质出溶成柯石英和单斜辉石等,铬铁矿矿浆进一步聚集形成致密块状铬铁矿;第四阶段:在俯冲环境下,含水熔体与方辉橄榄岩的反应,并改造了地幔橄榄岩的地球化学特征,形成不含超高压矿物、规模相对较小的浸染状和豆状铬铁矿及纯橄岩壳。

4.2 西藏蛇绿岩带中铬铁矿的找矿前景

世界上著名的大型豆荚状铬铁矿床的特征指示大多数铬铁矿床产在规模较大的蛇绿岩体内,如中生代古巴的Camaguey岩体为1200 km²,菲律宾的Acoje岩体大于4500 km²,阿尔巴尼亚的Bulqiza岩体面积为350 km²,土耳其的Guleman-Soridag岩体达200 km²。古生代俄罗斯的Ray-IZ岩体400 km²,Saranov岩体为1950 km²,哈萨克斯坦的Kempirsai岩体为1000 km²。而普兰地幔橄榄岩接近600~700 km²,类似的雅鲁藏布江缝合带西段几个大岩体,还包括东波岩体400 km²和休古嘎布岩体700 km²。另外岩体的部分熔融程度的高低也是成矿的一个重要标注,豆荚状铬铁矿的产出多出现在方辉橄榄岩型蛇绿岩中,而基本上不存在于二辉橄榄岩内(Nicoals et al., 1981),这是由于铬主要赋存在辉石内,部分熔融的增加,铬才能被大量释放而聚集成矿,地幔橄榄岩经历不同构造背景的形成过程,其辉石大量的被熔融,铬铁矿也可能经历多期次叠加,以至于富集大型的铬铁矿矿床;依据世界上豆荚状铬铁矿的产出规律可知其主要是位于堆积杂岩底部的橄榄岩中和MOHO面以下的橄榄岩中。例如阿曼铬铁矿、菲律宾的阿科杰铬铁矿都产于堆积杂岩之下的1~2 km的纯橄岩-方辉橄榄岩的过渡带,两类铬铁矿同时存在的土耳其Mugla岩体中高铝型铬铁矿位于含单斜辉石的方辉橄榄岩岩相内,而高铬型类位于MOHO面以下的亏损地幔橄榄岩中。古巴Sagua铬铁矿中两类铬铁矿都位于方辉橄榄岩-纯橄岩相带内,是不同期次不同性质的熔体与岩石反应的结果。阿尔巴尼亚Bulqiza铬铁矿呈

现最为明显的特征,其高铝型铬铁矿处于堆晶纯橄岩相内,而高铬型铬铁矿位于岩体下层部位的方辉橄榄岩-纯橄岩岩相中;除上述规律外,豆荚状铬铁矿中致密块状铬铁矿矿体多与方辉橄榄岩之间呈截然的接触关系,偶见宽度在0.5~1 m的蛇纹岩带,而浸染状和豆荚状铬铁矿矿体多与纯橄岩壳呈渐变过渡的关系,这是由于铬铁矿的多期形成过程中,较完整的痕迹都是最晚期的特征。豆荚状铬铁矿的最大延伸方向常与岩体展布方向,以及单斜辉石的叶理方向一致,这是由于洋中脊之下的地幔软流圈向上运移的过程(Pearce and Deng, 1988),造成大量的透镜状纯橄岩、方辉橄榄岩和辉石岩的变形所致。罗布莎岩体是个倒转岩体,整个岩体的辉石含量较低,部分熔融程度较高,少见二辉橄榄岩。而阿里大量分布的超基性岩体,其岩相学,地球化学,矿体特征都可类似比于世界典型铬铁矿床的岩体特征,并已发现大量的铬铁矿野外露头 and 转石矿点,存在较大的找矿空间。

此外,班公怒江缝合带中丁青岩体和东巧岩体存在大量的铬铁矿矿化点,同样具有较大的找矿前景。

世界上目前仅在少数岩体中报道了同一岩体内出现两种类型的豆荚状铬铁矿,其中有古巴的Mayari-Cristal超基性岩和阿尔巴尼亚的Bulqiza岩体。中国的几个主要铬铁矿床均为单一型,其中罗布莎、东巧、玉石沟等为高铬型铬铁矿;而贺根山、萨尔托海等为高铝型铬铁矿。普兰和东波地幔橄榄岩中均发现了高铬型和高铝型两类铬铁矿在国内属首次。经国内外对比研究,将两类铬铁矿的特征归纳为以下4点:①两类铬铁矿的铬尖晶石矿物化学组分特征不同。高铝型铬尖晶石的Cr[#]=11~55、Mg[#]=60~85,而高铬型铬铁矿的铬尖晶石为Cr[#]=65~80、Mg[#]=40~65。两者位于不同的演化区间,例如,东波高铝型铬铁矿落在橄榄岩演化趋势上,其Cr[#]与Mg[#]呈负相关性,而高铬型铬铁矿落在Mg[#]和Cr[#]的正相关趋势线上。②无论是高铬型还是高铝型铬铁矿,其围岩不一定存在纯橄岩壳(熊发挥等, 2013)。罗布莎高铬型铬铁矿的野外特征显示,规模较大的致密块状铬铁矿围岩更多的为方辉橄榄岩,表明部分铬铁矿的形成可能并不是按岩石-熔体反应的观点所描述的那样形成矿体与纯橄岩壳(Xiong et al., 2015)。罗布莎铬铁矿和围岩的矿物学

特征显示致密块状铬铁矿矿体与其围岩特征并不相同,也不具渐变的过程,普兰岩体中高铬型致密块状铬铁矿进一步佐证了这一特征。③浸染状铬铁矿常与纯橄岩壳伴生,并呈现两者之间渐变连续的过程。该特征在罗布莎高铬型浸染状铬铁矿尤为明显,纯橄岩壳-浸染状铬铁矿之间表现为渐变过渡关系,橄榄石与铬尖晶石的矿物组分变化指示岩石-熔体反应的特征(Xiong et al., 2015),而东波高铝型浸染状铬铁矿及其围岩纯橄岩也具此特点。④不同岩体的高铬型铬铁矿的围岩通常显示轻稀土元素富集,认为是后期流体改造特征;东波高铝型铬铁矿的围岩显示轻稀土元素亏损特征,与岩体中呈透镜状的二辉橄岩特征相同,属亏损地幔特征(例如罗布莎、普兰及东波、萨尔托海等)。

地幔橄橄榄岩和铬铁矿的Re-Os特征表明除特罗多斯橄橄榄岩具有典型壳源物质混染外,其余岩体的地幔橄橄榄岩较多的位于第三象限小于PUM值(0.1296),与实验证实的深海地幔橄橄榄岩的比值范围0.120~0.129一致。雅江西段两类铬铁矿的Re-Os同位素也具有此特征,它们的 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 、 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的值区间基本相似,其中罗布莎高铬型铬铁矿与普兰高铬型铬铁矿、古巴Sagua高铬型铬铁矿比值接近,都位于第三象限的残余相内;东波高铬型铬铁矿与土耳其Mugla高铬型铬铁矿都大于0.1296的值。此外,高铝型铬铁矿也可分为两组,其中古巴Sagua和萨尔托海高铝型铬铁矿 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值较低,与其地幔橄橄榄岩相同;另外一组是东波、普兰以及土耳其Mugla高铝型铬铁矿明显大于0.1296,东波个别高铝型铬铁矿甚至达到0.180,表明地壳物质混染的现象明显,指示此类铬铁矿的形成过程有地壳流体的加入(熊发挥等, 2013)。因此,两类铬铁矿Re-Os同位素特征上有较大的差别,显示来源于不同岩浆的演化过程。尤其是东波岩体和普兰岩体中的两类铬铁矿,不仅仅有含富集IPGE的铂族矿物(PGM),还存在富集PPGE的PGM矿物,进一步佐证了这一特征。

豆荚状铬铁矿的形成过程与蛇绿岩的形成过程紧密相连。近些年的研究认为高铬型铬铁矿形成于SSZ (Robert, 1988; Robinson et al., 1997; Schiano et al., 1997),并得到了一些实验岩石学的支持。例如原始橄橄榄石和铬尖晶石饱和的熔体在水

富集的条件下,能形成蛇绿岩型铬铁矿,而这正是SSZ环境所具有的特征。在研究西藏罗布莎高铬型铬铁矿和新疆萨尔托海高铝型铬铁矿后,Zhou et al. (1998)等提出了高铬型铬铁矿形成于俯冲带(SSZ)构造背景下,而高铝型铬铁矿形成在弧后盆地或者洋中脊的环境,并提出两类铬铁矿是由两种不同的熔体与岩石(方辉橄橄榄岩)反应形成,其中高铬型铬铁矿是俯冲带富水的玻安质熔体,而高铝型铬铁矿是在洋中脊/弧后盆地由拉斑玄武质熔体与岩石(方辉橄橄榄岩)反应而成。Malpas et al. (1997)在研究Sagua高铝型和高铬型铬铁矿后,认为它们形成于弧前的环境。Gervilla et al. (2005)研究了同一缝合带上相邻的Mayari岩体、Sagua岩体和Moa-Baracoa岩体,指出两岩体形成在一个“过渡性”的大地构造环境内,从“早期岛弧”演化成弧后盆地,分多阶段形成。俯冲的第一阶段为,Mayari高铬型铬铁矿形成于“早期岛弧”玻安质岩浆的反应;第二阶段,Sagua高铬和高铝型铬铁矿的岩体形成于“过渡性”大地构造背景下,即从“早期的岛弧”到新生的弧后盆地的阶段。Moa-Baracoa富铝型的铬铁矿形成于最后,即弧后盆地阶段。土耳其的Mugla两类铬铁矿中被解释为两期,其中第一期高铝型铬铁矿形成初期洋中脊环境,第二期高铬型的铬铁矿在俯冲带形成(Uysal et al., 2009),与岩体伴生的火山岩提供了这类构造背景的佐证(Marchesi et al., 2006)。

在总结罗布莎、普兰和东波铬铁矿和地幔橄橄榄岩的特征,及对比其他地幔橄橄榄岩和铬铁矿的基础上,初步认为豆荚状铬铁矿与地幔橄橄榄岩的形成过程是经历了不同期次的结果,提出多阶段的成因模式(杨经绥等, 2011; 熊发挥等, 2011, 2014; Xiong et al., 2015):早期俯冲的陆壳和洋壳物质到达地幔过渡带后成分被分解,岩石脱水,产生大量流体,地壳中放射性物质生热,导致地幔熔融,Cr等成矿元素从矿物中释放并聚集,在地幔柱作用下熔融物质上涌,在过渡带顶部,熔体开始结晶,铬铁矿聚集成矿,独立的携带微粒金刚石等超高压矿物的强还原性流体进入开始固化的铬铁矿和围岩,呈半固化的铬铁矿和熔融体继续向上运移,而这一阶段的形成时代可能大于300 Ma,数据基于McGowan等获得的290~630 Ma的年龄和铬铁矿中选出的大量锆石的U-Pb年龄为(376±7) Ma (McGowan et al., 2015),

以及Robinson等获得大于500 Ma的锆石U-Pb年龄(Robinson et al., 2015);在向上运移至洋中脊的过程中,压力不断降低,超高压相矿物转变成低压相矿物,溶解在铬铁矿矿浆中物质出溶成柯石英和单斜辉石等,铬铁矿矿浆进一步聚集形成致密块状铬铁矿,此阶段的时代主要限定来源于洋中脊环境下形成的各种基性岩脉,其年龄变化于120~170 Ma(熊发挥等, 2015; 吴福元等, 2014);在俯冲环境下,含水熔体与方辉橄榄岩的反应,并普遍改造了地幔橄榄岩的地球化学特征,提高了橄榄岩的部分熔融程度,而其发生蛇绿岩仰冲在88 Ma(Malpas et al., 1997)。以罗布莎岩体为例子,其具有早阶段MORB型地幔和辉长岩墙Sm-Nd等时线年龄为(177±33) Ma(周肃等, 2001),晚期为俯冲带(SSZ)性质蛇绿岩的锆石SHRIMP年龄为(126±2) Ma(Malpas et al., 1997)。并且罗布莎地幔橄榄岩的矿物学,岩石地球化学性质指示,岩体开始形成于MOR阶段,后受不同程度的SSZ环境改造(Xu et al., 2009),同样的现象出现于雅江西段的岩体内(连东洋等, 2015)。然而在该岩体的地幔橄榄岩和铬铁矿中发现的地幔超高压矿物,表明可能还有更早一期阶段来源于地幔深部过程,深度可能达到>400 km(Yang et al., 2007, 2015)。因此,雅鲁藏布缝合带蛇绿岩及铬铁矿可能普遍经历了多阶段的演化过程,每一阶段对铬铁矿富集程度及贡献还有待进一步的研究,每个岩体其经历的部分熔融程度及俯冲流体改造的规模尚需明确。西段的几个大型岩体与罗布莎存在较多相似之处,均经历了多阶段的构造背景演化和成矿过程,存在较大的找矿潜力,特别是岩体的深部空间。

5 结 语

经典的板块构造理论认为蛇绿岩和其中的豆荚状铬铁矿,无论是产在MOR或SSZ环境,均是形成在软流圈之上的上地幔顶部。地幔中异常矿物和超高压矿物的发现是对上述传统理念提出挑战,需重新审视蛇绿岩和铬铁矿的成因。多年来人们通过金伯利岩金刚石中的包裹体矿物探讨深部地幔的物质组成、地幔的物质循环和动力学机制。尤其是近些年地幔柱和深部地幔对流的观念越来越引起人们的重视,地幔物质组成和地幔动力学成为固体地球科学研究的前沿。蛇绿岩铬铁矿和地幔

橄榄岩中金刚石等超高压矿物的发现引起国际同行的高度关注,已经成为探讨深部地幔作用一个新的窗口和研究方向。本次与金刚石伴生的罗布莎铬铁矿床勘探新发现,为深入研究铬铁矿的深部成因,指导中国铬铁矿勘探,进一步寻找大型铬铁矿床,提供了重要的实践和理论支持。

致谢:感谢西藏自治区国土资源厅和中国地质调查局等有关部门对罗布莎铬铁矿找矿项目的指导和支持,同时也十分感谢西藏矿业公司在各方面的大力支持。匿名审稿专家、主编及编辑老师对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并致以诚挚的谢意。

References

- Arai S, Abe N. 1994. Podiform chromitite in the arc mantle: Chromitite xenoliths from the Takashima alkali basalt Southwest Japan arc[J]. *Mineralium Deposita*, 29(5): 434-438.
- Arai S, Matsukage K. 1998. Petrology of a chromitite micropod from Hess Deep, equatorial Pacific: a comparison between abyssal and alpine-type podiform chromitite[J]. *Lithos*, 43: 1-4.
- Arai S. 1997. Origin of podiform chromitites[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 15(2): 303-310.
- Bai Weiji, Shi Nicheng, Yang Jingsui, Fang Qingsong, Dai Mingquan, Xiong Ming, Yan Binggang. 2002. Two new varieties of iron nickel from ophiolites, Tibet[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 22(3): 201-206 (in Chinese with English abstract)
- Bai Weiji, Yang Jingsui, Fang Qingsong, Yan Binggang, Zhang Zhongming. 2001. Study on a store house of ultrahigh pressure mantle minerals-Podiform chromite deposits [J]. *Arthritis Science Frontiers*, 8(3): 111-121(in Chinese with English abstract)
- Bai Weiji, Yang Jingsui, Shi Nicheng, Fang Qingsong, Dai Mingquan, Xiong Ming, Yan Binggang. 2004. A discovery of ultrahigh pressure minerals - Wustite and native Iron from the mantle ophiolite, at Luobusa, Xizang. *Geological Review*, 50(2): 184-187.
- Bai Weiji, Zhou Meifu, Robinson P T, Fang Qingsong, Zhang Zhongming, Yan Binggang, Hu Xufeng, Yang Jingsui. 2000. Origin of Podiform Chromitites, Diamond and Associated Mineral assemblage in the Luobusa ophiolite, Tibet [M]. Beijing: Seismological Press, 2000: 1-98 (in Chinese with English abstract)
- Bai Wenji, Shi Nicheng, Yang Jingsui, Fang Qingsong, Ren Yufeng, Rong He, Li Guowu, Ma Zhesheng. 2007. An assemblage of simple oxide minerals from ophiolitic podiform chromitites in Tibet and Their ultrahigh pressure origin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1538-1549.
- Bai W J, Zhou M F, Robinson P J. 1993. Possibly diamond - bearing mantle peridotites and podiform chromitites in the Luobusa and Dongqiao ophiolites, Tibet[J]. *Canadian Journal of Earth Science*, 30: 1650-1659.

- Bao Peisheng. 2009. Further discussion on the genesis of the podiform chromite deposits in the ophiolites—questioning about the rock/melt interaction metallogeny[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28 (12): 1741–1761(in Chinese with English abstract).
- Bao Peisheng, Wang Xibin, Peng Genyong. Chromite Deposit in China[M]. Beijing: Science Press, 1999: 98–142 (in Chinese with English abstract).
- Cassard D, Nicolas A, Rabinovitch M, Moutte J, Leblanc M, Prinzhofer A. 1981. Structural classification of chromite pods in southern New Caledonia[J]. *Economic Geology*, 76: 805–831.
- Chang Cengfa, Zheng Xilan. Tectonic features of the Mount Jolmo Lungma region in southern Tibet, China[J]. *Sci. Geol. Sinica*, 1973, 8 (1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Coleman R G. 1977. Ophiolites: Ancient oceanic lithosphere?[M]. New York: Springer-Verlag, 229.
- Coltorti M, Beccaluva L, Bonadiman C, Faccin B, Ntaflos T and Siena F. 2004. Amphibole genesis via metasomatic reaction with clinopyroxene in mantle xenoliths from Victoria Land, Antarctica [J]. *Lithos*, 75(1): 115–139.
- Dong Biqian. 1980. Discussion on tectonic types and ore – controlling structural features of ultra – massif rocks in yushigou, Qinghai province[J]. *Northwestern Geology*, 10 – 18 (in Chinese with English abstract).
- Geng Quanru, Peng Zhiming, Zhang Zhang. 2011. Geochronological study of the yarlung Tsangpo ophiolite in the region of the eastern Himalayan syntaxis[J]. *Acta Geol. Sinica*, 85 (7): 1116 – 1127(in Chinese with English abstract).
- Gervilla F, Proenza JA, Frei R, González – Jiménez J M, Garrido C J, Melagarejo J C, Meibom A, Diaz – Martínez R, Lavaut W. 2005. Distribution of platinum – group elements and Os isotopes in chromite ores from Mayari – Baracoa Ophiolite Belt (eastern Cuba) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150(6): 589–607.
- Hao Ziguang. 1985. Research Status of Podiform Chromitite Deposits[D]. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1–65 (in Chinese with English abstract).
- Hao Ziguang, Wang Xibin, Bao Peisheng, Peng Genyong, Jin Yuanxin. 1991. Study of mineralogy of the metamorphic peridotite in the two types of ophiolite in the western Zhungeer, Xinjiang[J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 21(1): 33 – 54 (in Chinese with English abstract)
- Huang Zhu, Yang Jingsui, Zhu Yongwang, Xiong Fahui, Liu Zhao, Zhang Zhongming, Xu Wei. 2015. The Discovery of diamonds in chromitites of the Hegenshan ophiolite, Inner Mongolia, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(2): 341–350.
- Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. 1981. The discovery of alpine-type diamond bearing ultrabasic intrusions in Xizang (Tibet) [J]. *Geological Review*, 27(5): 445 – 447 (in Chinese with English abstract).
- Ionov D A, Griffin L W, O’Reilly S Y. 1997. Volatile-bearing minerals and lithophile trace elements in the upper mantle [J]. *Chemical Geology*, 141(3): 153–184.
- Lago L, Rabinowicz M, Nicolas A. 1982. Podiform chromite ore bodies: A genetic model[J]. *Jour. Petrol.*, 23: 123–124.
- Lambert L B, Wyllie P J. 1970. Low – velocity zone of the earth’s mantle: Incipient melting caused by water [J]. *Science*, 169(3947): 764.
- Leblanc M, Nicolas A. 1992. Ophiolitic chromitites[J]. *International Geological Review*, 34(7): 653–686.
- Leblanc M, Temagout A. 1989. Chromite pods in a lherzolite massif (Collo, Algeria): Evidence of oceanic-type mantle rocks along the west Mediterranean Alpine Belt [J]. *Lithos*, 23(3): 153–162.
- Li JinYang. 2012. Petrogenesis of the Peridotite in Luobusha, Tibet[D]. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1–170 (in Chinese with English abstract).
- Lian D Y, Yang J S, Dilek Y, Zhang Z M, Xiong F H, Liu F, Wu W W. 2017. Diamond, Moissanite and other unusual minerals in podiform chromitites from the Pozanti–Karsanti ophiolite, southern Turkey: Implications for the deep mantle origin and ultra-reducing conditions in podiform chromitite[J]. *American Mineralogist*, 102: 1101–1113.
- Lian Dongyang, Yang Jingsui, Xiong Fahui, Liu Fei, Wang Yunpeng. 2015. Platinum – group element characteristics of the peridotite and podiform chromitite from Dajiweng ophiolite of the western segment of Yarlung – Zangbo suture zone, Tibet[J]. *Geology in China*, 42(2): 525– 546(in Chinese with English abstract).
- Malpas J, Robinson P T, Zhou M F. 1997. Chromitite and ultramafic rock compositional zoning through a paleotransform fault, Pouv New Caledonia—a discussion[J]. *Econ. Geol.*, 92: 502–504.
- Malpas J, Zhou M F, Robinson P T, Reynolds P. 2003. Geochemical and geochronological constraints on the origin and emplacement of the Yarlung – Zangbo ophiolites, Southern Tibet[C] // Dilek Y, Robinson P T (eds.). *Ophiolites Through Earth History*. Geological Society, London, Special Publications, 218: 191–206.
- Marchesi C, Garrido C J, Godard M, Proenza J A, Gervilla F, Blanco – Moreno J. 2006. Petrogenesis of highly depleted peridotites and gabbroic rocks from the Mayari – Baracoa ophiolite belt (Eastern Cuba)[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(6): 717–736.
- McGowan N M, Griffin W L, González – Jiménez J M, Belousova E, Afonso J G, Shi R D, McCammon C A, Pearson N J, O’Reilly S Y. 2015. Tibetan chromitites: Excavating the slab graveyard[J]. *Geology*, 43: 179–182.
- Nicolas A, Girardeau J, Marcoux J, Duprè B, Wang X B, Cao YG, Zeng H X, Xiao X C. 1981. The Xigaze ophiolite (Tibet): a peculiar oceanic lithosphere[J]. *Nature*, 294: 414–417.
- Nicolas A, Prinzhofer A. 1983. Cumulative or residual origin for the

- transition zones in ophiolites, structural evidence [J]. *Journal of Petrology*, 24(2): 188–206.
- Nicolas A. 1989. Structures of Ophiolite and Dynamics of Oceanic Lithosphere[M]. Doedrecht: Kluwer Academic Publishers, 223 – 252.
- Paulick H, Bach W, Godard M, Dehoog J C M, Suhr G, Harvey J. 2006. Geochemistry of abssal peridotites (Mid–AtlanticRidge, 15° 20'N, ODP Leg 209): implications for fluid/rock interaction in slow spreading environments[J]. *Chemical Geology*, 234(3): 179–210.
- Pearce J A, Barker P F, Edwards S J, Parkinson I J, Leat P T. 2000. Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc – basin system, South Atlantic [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(1): 36–53.
- Pearce J A, Deng W M. 1988. The Ophiolites of the Tibet Geotraverses, Lhasa to Golmud (1985) and Lhasa to Kathmandu (1986) [M]. *Phil. Trans. Royal Soc. London*, 327A: 215 – 238.
- Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. 1984. Characteristics and tectonic significance of supra–subduction zone ophiolites. Kokelaar BP and Howells M F. Marginal basin geology. Geological Society of London Special Publication[J]. London, Blackwell Scientific Publications, 16(1): 77–94.
- Proenza J, Gervilla F, Melgarejo J, Bodinier J L. 1999. Al and Cr rich chromitites from the Mayarí – Baracoa Ophiolitic Belt, (eastern Cuba): consequence of interaction between volatile–rich melts and peridotites in suprasubduction mantle[J]. *Economic Geology*, 94 (4): 547–566.
- Roberts S R. 1988. Ophiolitic chromitite formation: A marginal basin phenomenon?[J]. *Economic Geology*, 83(5): 1034–1036.
- 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[J]. *Gondwana Research*, 27: 486–506.
- Robinson P T, Zhou M F, Malpas J, Bai W J. 1997. Podiform chromitites: their composition, origin and environment of formation[J]. *Episodes*, 20: 247–252.
- Schiano P, Clocchiatti R, Lorand J P. 1997. Primitive basaltic melts included in podiform chromites from the oman ophiolite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 146(3): 489–497.
- Seyler M, Michael J T, Lorand J P, Luguét A, Cannat M. 2001. Clinopyroxene microtextures reveal incompletely extracted melts in abyssal peridotites[J]. *Geology*, 29(2): 155–158.
- Thayer T P. 1964. Principal features and origin of podiform chromite deposits, and some observations on the Gulemen–Soridag district, Turkey[J]. *Economic Geology*, 59(8): 1497–1524.
- Tian Y Z, Yang J S, Robinson P T, Xiong F H, Li Y, Zhang Z M, Liu Z, Liu F, Niu X L. 2015. Diamond discovered from chromitites in the Sartohay ophiolite, Xinjiang Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 89(2): 801–809.
- Uysal İ, Tarkian M, Sadiklar MB, Zaccarini F, Meisel T C, 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[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158 (5), 659–674.
- Wang Hengsheng, Bai Wenji, Wang Bingxi. 1983. Chromite Deposits in China and Their Origin[M]. Beijing: Science Press, 1 – 227 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xibin, Bao Peisheng, Deng Wanming. 1987. Tibet Ophiolite[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 336 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xibing, Bao Peisheng, Xiao Xuchang. 1987. Ophiolites of the Yarlung Zangbo (Tsangbo) River, Xizang (Tibet) [M]. Beijing: Pub. House Survey. Map, 1–118 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Liu Chuanzhou, Zhang Liangliang, Zhang Chang, Wang Jiangang, Ji Weiqiang, Liu Xiaochi. 2014. Yarlung Zangbo ophiolite: A critical updated view[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 293–325 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Xuchang. 1984. The Xigaze Ophiolite of sSouthern Xizang (Tibet) and Its Relevant Tectonic Problems[M]//Li G C, Mercier J L (eds.). Sino – French Cooperative Investigation in Himalayas, Geol. Pub. House, 1984, 143 – 168 (in Chinese with English abstract).
- Xiong F H, Yang J S, Robinson P T, Xu X Z, Liu Z, Li Y, Li J Y, Chen S Y. 2015. Origin of podiform chromitite, a new model based on the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Gondwana Research*, 27: 525–542.
- Xiong Fahui, Yang Jingsui, Ba Dengzhu, Liu Zhao, Xu Xiangzhen, Feng Guangying, Niu Xiaolu, Xu Jifeng. 2014. Different type of chromitite and genetic model from Luobusa ophiolite Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2137 – 2163 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Fahui, Yang Jingsui, Li Yuan, Liu Zhao, Guo Guolin, Zhou Wenda, Chen Songyong, Li Yibing, Xu Xiangzhen, Niu Xiaolu. 2015. Tectonic setting of Dongbo ophiolite in the western portion of the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet[J]. *Earth Science*, 36(1): 31–40 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Fahui, Yang Jingsui, Liang Fenghua, Ba Dengzhu, Zhang Jian, Xu Xiangzhen, Li Yuan, Liu Zhao. 2011. Zircon U–Pb ages of the Dongbo ophiolite in the western Yarlung Zangbo Suture Zone and their Geological Significance[J]. *Acta Petrol. Sinica*, 27(11): 3223–3238 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Fahui, Yang Jingsui, Robinson Paul T, Dilek Yildirim, Milushi Ibrahim, Xu Xiangzhen, Zhou Wenda, Zhang Zhongming, Rong He. 2017. Diamonds discovered from High – Cr podiform chromitites of Bulqiza, Eastern Mirdita Ophiolite (EMO), Albania[J]. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 91(2): 455 –

- 468.
- Xiong FH, Yang JS, Liu Zhao, Guo Guolin, Chen Songyong, Xu Xiangzhen, Li Yuan, Liu Fei. 2013. High - Cr and high - Al chromitite found in western Yarlung - Zangbo suture zone in Tibet[J]. *Acta Petrol. Sinica*, 29(6): 1878 - 1908 (in Chinese with English abstract).
- Xu X Z, Yang J S, Chen S Y, Fang Q S, Bai W J, Ba D Z. 2009. Unusual mantle mineral group from chromitite orebody Cr - 11 in Luobusa ophiolite of the Yarlung - Zangbo suture zone, Tibet[J]. *Journal of Earth Sciences*, 20: 284-302.
- Xu xiangzhen, Yang Jingsui, Ba Dengzhu, Chen Songyong, Fang Qingsong, Bai Wenji. 2008. Diamond discovered from the Kangjinla chromitite in the Yarlung Zangbo ophiolite belt, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1453-1462.
- Xu Xiangzhen. 2009. Study on the Genesis of the Podiform Chromite and Peridotite in Kangjinla, Tibet[M]. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1-165 (in Chinese with English abstract).
- Yang J S, Dobrzhinetskaya L, Bai WJ, Fang QS, Robinson PT, Zhang J F, Green II HW. 2007. Green II. Diamond- and coesite- bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Geology*, 35: 875-878.
- Yang J S, Meng F C, Xu X Z, Robinson P T, Dilek Y, Makeyev AB, Wirth R, Wiedenbeck M, Cliff J. 2015. Diamonds, native elements and metal alloys from chromitites of the Ray-Iz ophiolite of the Polar Urals[J]. *Gondwana Research*, 27: 459-485.
- Yang Jingsui, Ba Dengzhu, Xu Xiangzhen, Li Zhaoli. 2010. A restudy of podiform chromite deposits and their ore-prospecting vista in China[J]. *Geology in China*, 37, 1141 - 1150(in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, Meng Fancong, Chen Songyong, Zhang Zhongming, Rong He. 2007. . Discovery of diamond and an unusual mineral group from the podiform chromite, Polar Ural[J]. *Geology in China*, 34(5): 950 - 952 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, Rong He. 2008. Ultrahigh-pressure minerals and new minerals from the Luobusa ophiolitic chromitites in Tibet: A review[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(3): 263-274.
- Yang jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, Yan Binggang, Rong He, Chen Songyong. 2004. Coesite discovered from the podiform chromitite in the Luobusha ophiolite, Tibet[J]. *Earth Science*, 2004, 29(6): 651-660 (in Chinese with English abstract).
- Yang J S, Robinson P T, Dilek Y. 2015b, Diamond-bearing ophiolites and their geological occurrence[J]. *Element*, 38 (4), 344-364.
- Yang Jingsui, Xiong Fahui, Guo Guoling, Liu Fei, Liang Fenghua, Chen Songyong, Li Zhaoli, Zhang Liwen. 2011a. The Dongbo ultramafic massif: A mantle peridotite in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet, with excellent prospects for a major chromite deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3207-3222(in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Li Yuan, Li Jinyang, Ba Dengzhu, Rong He, Zhang Zhongming. 2011b. Diamonds recovered from peridotite of the Purang ophiolite in the Yarlung-Zangbo suture of Tibet: A proposal for a new type of diamond occurrence[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11) : 3171-3178 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Zhang Zhongming, Rong He, Li Yuan, Xiong Fahui, Liang Fenghua, Liu Zhao, Liu Fei, Li Jinyang, Li Zhaoli, Chen Songyong, Guo Guoling, Paul Robinson. 2013. Ophiolite-type Diamond and Deep Genesis of Chromite[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(6): 643 - 653(in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Zhang Zhongming, Li Tianfu, Li Zhaoli, Ren Yufeng, Xu Xiangzhen, Ba Dengzhu, Bai Wenji, Fang Qingsong, Chen Songyong, Rong He. 2008. Unusual minerals from harzburgite, the host rock of the Luobusa chromite deposit, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (7): 1545-1552.
- Yumul J R G P, Balee G R. 1994. Supra-subduction zone ophiolites as favorable hosts for chromitite, platinum and massive sulfide deposits [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 10(1): 65-79.
- Zhang Qi, Zhou Guoqing, Wang Yan. 2003. The distribution of time and space of Chinese ophiolites, and their tectonic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 1-8 (in Chinese with English abstract)
- Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, Edwards SJ, Qi L. 2005. REE and PGE geochemical constraints on the formation of dunites in the Luobusa ophiolite, southern Tibet[J]. *Journal of Petrology*, 46(3): 615-639.
- Zhou M F, Robinson PT, Malpas J, Li Z. 1996. Podiform chromitites in the Luobusa Ophiolite (southern Tibet): implications for melt - rock interaction and chromite segregation in the upper mantle[J]. *Journal of Petrology*, 37 (1): 3-21.
- Zhou M F, Sun M, Keays R R and Kerrich R. 1998. Controls on platinum -group elemental distributions of podiform chromitites: a case study of high-Cr and high-Al chromitites from Chinese orogenic belts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(4): 677-688.
- Zhou S, Mo XX, Mahoney JJ, Zhang Shuanquan, Guo Tiejing, Zhao Zhidan. 2001. Geochronology and Nd and Pb isotope characteristics of gabbro dikes in the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(16): 1387-1390 (in Chinese).

附中文参考文献

白文吉, 施倪承, 杨经绥, 方青松, 代明泉, 熊明, 颜秉刚. 2002. 西藏

- 蛇绿岩中二种合金矿物新变种[J]. 矿物学报, 22(3): 201-206.
- 白文吉, 施倪承, 杨经绥, 方青松, 任玉峰, 戎合, 李国武, 马喆生. 2007. 西藏蛇绿岩豆荚状铬铁矿中简单氧化物矿物组合及其超高压成因[J]. 地质学报, 81(11), 1538-1549.
- 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[J]. 地学前缘, 8(3): 111-121.
- 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[J]. 地质论评, 50(2), 184-187.
- 白文吉, 周美付, Robinson P T, 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[M]. 北京: 地震出版社, 1-98.
- 鲍佩声, 王希斌, 彭根永. 1999. 中国铬铁矿床[M]. 北京: 科学出版社, 98-142.
- 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[J]. 地质通报, 28(12): 1741-1761.
- 常承法, 郑锡澜. 1973. 中国西藏南部珠穆朗玛峰地区构造特征[J]. 地质科学, 8(1): 1-12.
- 董必谦. 1980. 青海玉石沟含铬超基性岩体控岩构造型式及控矿构造特征之探讨[J]. 西北地质, 10-18.
- 耿全如, 彭智敏, 张璋. 2011. 喜马拉雅东构造结地区雅鲁藏布江蛇绿岩地质年代学研究[J]. 地质学报, 85(7): 1116-1127.
- 郝梓国, 王希斌, 鲍佩声, 彭根永, 金远新. 1991. 新疆西准噶尔地区两类蛇绿岩中橄榄岩的矿物学研究[J]. 长春地质学院学报, 21(1): 33-54.
- 郝梓国. 1985. 豆荚型铬铁矿床的研究现状[D]. 中国地质科学院博士论文, 1-65.
- 李金阳. 2012. 西藏罗布莎地幔橄榄岩的成因——科钻LSD-1岩心的研究[D]. 中国地质科学院博士论文, 1-170.
- 连东洋, 杨经绥, 熊发挥, 刘飞, 王云鹏. 2015. 雅鲁藏布缝合带西段达机翁地幔橄榄岩及铬铁矿的铂族元素特征[J]. 中国地质, 42(2): 525-546.
- 王恒升, 白文吉, 王炳熙. 1983. 中国铬铁矿床及成因[M]. 北京: 科学出版社, 1-227.
- 王希斌, 鲍佩声, 邓万明. 1987. 西藏蛇绿岩[M]. 北京: 地质出版社, 1-336.
- 王希斌, 鲍佩声, 肖序常. 1987. 雅鲁藏布蛇绿岩[M]. 测绘出版社, 1-118.
- 吴福元, 刘传周, 张亮亮, 张畅, 王建刚, 纪伟强, 刘小驰. 2014. 雅鲁藏布蛇绿岩——事实与臆想[J]. 岩石学报, 30(2): 293-325.
- 肖序常. 1984. 藏南日喀则蛇绿岩及有关的大地构造问题[M]. 见: 中法喜马拉雅考察成果(1980), 李广岑和 Mercier JL (主编). 北京: 地质出版社, 143-168.
- 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[J]. 岩石学报, 30(8): 2137-2163.
- 熊发挥, 杨经绥, 刘钊, 郭国林, 陈松永, 徐向珍, 李源, 刘飞. 2013. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段发现高铬型和高铝型豆荚状铬铁矿体[J]. 岩石学报, 29(6): 1878-1908.
- 熊发挥, 杨经绥, 李源, 刘钊, 郭国林, 周文达, 陈松永, 李毅兵, 徐向珍, 牛晓露. 2015. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段东波蛇绿岩的构造背景特征[J]. 地球学报, 36(1): 31-40.
- 熊发挥, 杨经绥, 梁凤华, 巴登珠, 张健, 徐向珍, 李源, 刘钊. 2011. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段东波蛇绿岩中锆石U-Pb定年及地质意义[J]. 岩石学报, 27(11): 3223-3238.
- 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[J]. 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[D]. 中国地质科学院博士论文, 1-165.
- 杨经绥, 巴登珠, 徐向珍, 李兆丽. 2010. 中国铬铁矿的再研究及找矿前景[J]. 中国地质, 37, 1141-1150.
- 杨经绥, 白文吉, 方青松, 颜秉刚, 戎合, 陈松永. 2004. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中发现超高压矿物柯石英[J]. 地球科学, 29(6): 651-660.
- 杨经绥, 熊发挥, 郭国林, 刘飞, 梁凤华, 陈松永, 李兆丽, 张隶文. 2011a. 东波超镁铁岩体: 西藏雅鲁藏布江缝合带西段一个甚具铬铁矿前景的地幔橄榄岩体[J]. 岩石学报, 27(11): 3207-3222.
- 杨经绥, 张仲明, 李天福, 任玉峰, 徐向珍, 巴登珠, 方青松, 陈松永, 戎合. 2008a. 西藏罗布莎铬铁矿体围岩方辉橄榄岩中的异常矿物[J]. 岩石学报, 24(7): 1545-1552.
- 杨经绥, 白文吉, 方青松, 孟繁聪, 陈松永, 张仲明, 戎合. 2007. 极地乌拉尔豆荚状铬铁矿中发现金刚石和一个异常矿物群[J]. 中国地质, 34(5): 950-952.
- 杨经绥, 白文吉, 方青松, 戎合. 2008b. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中的超高压矿物和新矿物(综述)[J]. 地球学报, 29(3): 263-274.
- 杨经绥, 徐向珍, 李源, 李金阳, 戎合, 巴登珠, 张仲明. 2011. 西藏雅鲁藏布江缝合带的普兰地幔橄榄岩中发现金刚石及其意义[J]. 岩石学报, 27(11): 3171-3178.
- 杨经绥, 徐向珍, 张仲明, 戎合, 李源, 熊发挥, 梁凤华, 刘钊, 刘飞, 李金阳, 李兆丽, 陈松永, 郭国林, Paul ROBINSON. 2013. 蛇绿岩型金刚石和铬铁矿深部成因[J]. 地球学报, 34(6): 643-653.
- 张旗, 周国庆, 王焰. 2003. 中国蛇绿岩的分布、时代及其形成环境[J]. 岩石学报, 19(1): 1-8.
- 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[J]. 地质论评, 22(5): 455-457.
- 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[J]. 科学通报, 46(16): 1387-1390.