

中国铬铁矿床的再研究及找矿前景

杨经绥 巴登珠 徐向珍 李兆丽

(中国地质科学院地质研究所,国土资源部大陆动力学重点实验室,北京 100037)

摘要: 铬铁矿是生产不锈钢不可替代的原材料,中国目前是世界最大不锈钢消费国。铬铁矿一直是中国的短缺矿种,几乎完全依靠进口。铬铁矿床分为层状和豆荚状两种类型矿床。中国已知的铬铁矿床均属于豆荚状铬铁矿床,主要分布在西藏、新疆和内蒙古等地。该类矿床主要产于蛇绿岩型地幔橄榄岩或相关的堆晶杂岩中。最近在西藏罗布莎和俄罗斯乌拉尔豆荚状铬铁矿中发现深部地幔矿物,认为铬铁矿来自深部地幔,不是产自浅部地幔橄榄岩。认为深部来源的铬铁矿可以成大矿,小岩体也可以成大矿,因此,十分有必要对中国境内的蛇绿岩地幔橄榄岩开展新一轮的调查。

关键词: 铬铁矿;蛇绿岩;地幔岩;罗布莎;乌拉尔

中图分类号: P618.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2010)04-1141-10

1 中国对铬铁矿的需求

铬的利用主要集中在 3 个领域:冶金工业、化工工业及耐火材料和铸造业,其中 80%用于冶金工业,主要基于铬的抗腐蚀性、硬度、强度和明亮光泽等特点。铬铁矿经过熔炼成为铬铁(Ferro chrome),铬铁主要生产不锈钢和耐热钢,尤其是生产不锈钢不可替代的原材料^[1]。以前洗相片抛光时常用“克洛米”金属板,原来也是外来语 Chrome 的译音。

世界现有的铬矿储量 74 亿 t (1995 年统计数据),可保证全球百年以上的生产与需求,但其分布不均衡,主要集中于南部非洲和哈萨克斯坦。南非可供开采的铬矿储量和探明的铬矿储量均居世界第 1 位,占世界总储量的 60%;哈萨克斯坦居第 2 位,占 20%;其他铬矿储量较多的国家有俄罗斯、津巴布韦、古巴、印度、芬兰、巴西、土耳其、菲律宾和阿尔巴尼亚等国。2007 年统计数据显示,世界上铬矿石年产量约 900 万 t,其中南非产量居首,占 35%;其次为俄罗斯,占 24%,阿尔巴尼亚占 13%,菲律宾占 6%,

津巴布韦占 6%,土耳其占 5%,芬兰占 2%;其他国家占 8.84%,中国仅占 0.16%(图 1)。除少数国家生产富铬铁矿外,大多数国家仍以开采 Cr_2O_3 低于 20% 的贫铬铁矿为主^[1]。

近些年,不锈钢需求的飞速增长和不锈钢工业的快速扩张甚至导致了世界范围内的铬铁矿石短缺,中国是主要的铬铁矿石消费国。国内不锈钢的消费量大幅度增长,2001 年为 225 万 t,超过美国和日本,成为世界最大不锈钢消费国。2006 年中国不锈钢产量为 560 万 t,居世界第一。中国从 1990 年以来年均消费 100 多万 t 铬铁矿,由于供需严重失衡,近几年铬铁矿进口量增长显著(图 2)^[2]。仅 2007 年 12 月,中国进口铬铁矿石超过 600 万 t,金额达 16 亿美元。其中来自南非的占 16%,其余来自印度、伊朗、土耳其、巴基斯坦、阿尔巴尼亚、越南、菲律宾和阿曼^[1]。发展中国家如中国和印度的巨大需求使得 2002—2007 年全球出口年均增速达到 5.4%,其中仅中国就吸纳了全球不锈钢产品增长量的 60%。中国近年来两位数的 GDP 增长率则对 2000 年以来的全球不锈

收稿日期:2010-07-12;改回日期:2010-08-12

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(1212010918013)、深部探测专项(SinoProbe)和国家自然科学基金重点项目(40930313)资助。

作者简介:杨经绥,男,1950 年生,研究员,从事岩石学结合大地构造学的研究,重点研究青藏高原地体边界、中央碰撞造山带的超高压变质岩石及地幔矿物和地幔动力学;E-mail: yangjingsui@yahoo.com.cn。

①北京华灵四方投资咨询公司. 2008 年铬矿及铬铁行业研究报告,2008.

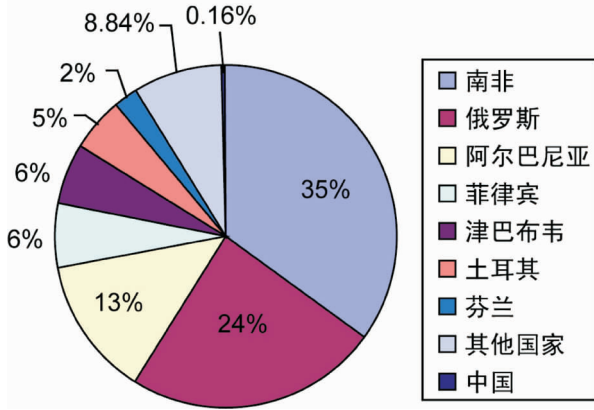


图1 2007年世界铬铁矿年产量比例图(根据●数据)
Fig.1 Annual output proportions of chromite in the world in 2007

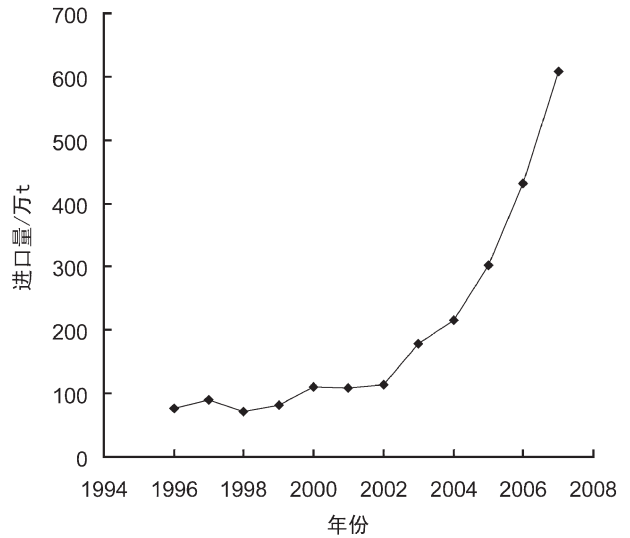


图2 近年来我国铬铁矿进口情况(据张友平等,2008)
Fig.2 Imports of chromite into China in recent years (after Zhang et al., 2008)

钢产业增长贡献达到约80%。

总体来看,全球对铬铁矿的需求2000—2008期间年均增长率达到4%,铬铁消费量也以相同速度增加。中国铬铁生产原材料铬铁矿石基本依赖进口。受2008年中全球金融危机的冲击,铬铁矿的价格和需求都有了较大下挫,但预计很快即可走出阴影。预计在2009年铬铁和铬铁矿价格显著下降之后,至2010年市场需求增加则可能产生20%~30%的增长^[9]。

与中国巨大需求呈现反差的是,铬铁矿一直是中国短缺矿种,铬铁矿储量仅占世界储量千分之一左右。长期以来,中国在铬铁矿勘查方面投入了大量的人力物力,但始终未取得重大突破。截止2004年底,全国拥有铬铁矿矿区53个,矿石储量221.33万t,查明资源储量990万t,主要分布在西藏、新疆、甘肃3省区。中国铬铁矿生产存在品位低、矿山规模小、冶炼成本高的特点,铬铁矿生产能力约22万t/a^[10]。从已掌握的资料分析,中国铬铁矿资源前景不容乐观。按约20万t年生产能力计算,在不考虑采矿损失率和贫化率的情况下,中国目前的铬铁矿储量最多能开采12年。

2 铬铁矿床的主要类型和产出特征

世界上原生铬铁矿床主要包括两种基本类型:一类为层状铬铁矿床,主要产于古老地台的层状镁铁-超镁铁杂岩中;另一类为豆荚状铬铁矿床,主要产在显生宙蛇绿岩中。

2.1 层状铬铁矿床

层状铬铁矿床是指产于大型层状镁铁-超镁铁

侵入杂岩体内的具有成层分布特征的铬铁矿床,主要位于前寒武纪稳定大陆地台区。层状铬铁矿床所在镁铁-超镁铁层状侵入杂岩通常下部以超基性岩为主,上部以基性岩为主,一般在岩体底部发育高温的铬铁矿,中间依次发育铜镍和铂族矿物矿床,钒钛磁铁矿一般在较上部出现^[5]。杂岩体内产出的铬铁矿也具典型层状堆积特征,矿层由浸染状和块状铬尖晶石集合体与橄榄石和辉石等造岩矿物构成,常常形成稳定延伸的矿层,彼此互相平行,也与层状火成岩平行,极少遭受变形改造。铬铁矿层的厚度可从数厘米至超过4m,延伸距离最长超过50km。

层状铬铁矿床规模巨大,总储量占世界储量的70%以上,典型例子包括南非的布什维尔德(Bushveld)、津巴布韦的大岩墙(Great Dyke)、美国Montana的斯蒂尔沃特(Stillwater)、巴西巴伊亚州的坎坡莫索、印度奥里萨邦的库塔克、芬兰的凯米等铬铁矿床^[6-11]。

布什维尔德杂岩体产有世界上最大的层状铬铁矿床,同时也是世界上最大的铂族(PGE)矿床,岩体厚度最大可达9000m,由下至上,分为下部带(厚1700m),主要含矿层的关键带(Critical Zone,厚1450m),厚度最大的主带(4710m),上部带(厚1140m)。关键带中又分出几个含矿层。如东布什维尔德Lebowa矿山的UG2层为纯铬铁矿,厚80cm,

倾角约 5°, 延伸达 200 km。杂岩体内许多铬铁矿床同时也是铂族元素矿床, 矿产储量规模巨大。

位于美国蒙大拿州西南部熊牙山的斯蒂尔沃特(Stillwater)杂岩体也是世界上比较著名的层状侵入体, 岩体延伸近 50 km, 厚 6 km。其岩石特征、地化特征均与布什维尔杂岩体十分相似, 形成时代为 2.7 Ga^[12], 侵入体及其围岩在 1.6~1.8 Ga 期间均遭受低级区域变质作用^[13]。侵入体可以分为 3 个主要层状体: (1) 主要由苏长岩组成的薄岩层; (2) 超基性岩系列, 底部是从铬铁矿岩、方辉橄榄岩到斜方辉石岩的多个旋回层, 上部是块状的斜方辉石岩; (3) 条带状系列, 主要为苏长岩、斜长岩和其他含斜长石堆晶的岩石^[14]。

津巴布韦大岩墙(Great Dyke)为一延伸很长的墙状镁铁质和超镁铁质侵入体, 走向 NNE, 长达 550 km, 宽 4 m~11 km, 侵入津巴布韦克拉通内^[15]。其以富含高品位铬矿而著名, 也是重要的铂族元素成矿地带, 其中铂族元素矿床规模居世界第二, 仅次于南非的布什维尔^[16]。大岩墙呈层状产出, 总体呈向斜状, 两边岩层向中间轴部呈缓倾斜状, 岩墙深部有明显的岩浆通道, 分南、北两个岩浆房, 切过一系列太古宙岩层, 包括太古宙中期的片麻岩, 太古宙晚期绿岩带和花岗岩等。岩墙主要由 5 套层状基性-超基性杂岩体组成。每套杂岩体都可分为两段: 上部由苏长岩、辉长岩、橄榄辉长岩等一系列富斜长石岩石组成的基性岩; 下部由纯橄岩、方辉橄榄岩、橄榄古铜岩、辉石岩和铬铁矿薄层组成的超基性岩, 构成底部旋回单元^[17-18]。

布什维尔杂岩体、津巴布韦大岩墙、斯蒂尔沃特杂岩体有很多相似特点, 在众多研究基础上, 不同的研究者对层状铬铁矿的成因有了初步共识, 认为是典型的岩浆矿床, 由侵位于地壳的玄武质岩浆经过火成堆积作用或结晶分异作用形成^[6-11, 19]。

2.2 豆荚状铬铁矿

豆荚状铬铁矿床(podiform chromite deposit)产于蛇绿岩的超镁铁质杂岩体内, 与蛇绿岩地幔橄榄岩体密切伴生。主要见于显生宙以来各造山带中, 少数见于前寒武纪稳定地区, 被认为是蛇绿岩的特征性矿产之一。豆荚状铬铁矿的特征与层状铬铁矿迥然不同, 矿体侧向延伸有限, 其形态也非常不规则, 可以呈透镜状、板状和宽窄不等的脉状和雪茄状, 但以断续出露的豆荚状最为特征, 故以此得名。

豆荚状铬铁矿在全球的分布具有明显不均一性, 主要产在喜马拉雅—阿尔卑斯造山带、地中海周围、中东、东南亚、北美西部等地。典型的豆荚状铬铁矿产在哈萨克斯坦、俄罗斯、古巴、纽芬兰、日本、新喀里多尼亚、菲律宾、澳大利亚、印度、巴基斯坦、伊朗、土耳其、阿曼、西班牙、希腊、阿尔巴尼亚、南斯拉夫、芬兰、埃及、沙特阿拉伯、摩洛哥、埃塞俄比亚及中国西藏、新疆、内蒙古等地的蛇绿岩内^[20-26]。

这类矿床的特征是储量小, 通常<1000 万 t、品位高(Cr₂O₃ 含量 50%~60%), 世界级的超大型豆荚状铬铁矿少, 已知乌拉尔山最南端的肯皮尔赛铬铁矿床储量已超过 3 亿 t^[21, 27], 俄罗斯极地乌拉尔的拉依—依兹等矿床远景储量约 6 亿 t^[28], 其他还有一些规模较大的同类型矿床。

典型的蛇绿岩剖面自上而下由含放射虫的硅质岩、枕状熔岩、辉绿岩墙、均质辉长岩、堆积杂岩和变质橄榄岩组成。豆荚状铬铁矿在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, 二是变质橄榄岩中。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。

南乌拉尔蛇绿岩为古生代, 肯皮尔赛是其中最大的超镁铁岩体, 时代为 420~400 Ma。肯皮尔赛岩体包括一套完整的古生代蛇绿岩: (1) 含少量纯橄岩和二辉橄榄岩的厚层方辉橄榄岩残余地幔; (2) 层状橄榄石辉长岩、橄长岩和纯橄岩; (3) 席状岩墙群(辉长岩、辉绿岩); (4) MORB 的枕状熔岩; (5) 由异剥橄榄岩、辉石岩和辉长岩组成的晚期岩脉和侵入体^[29]。肯皮尔赛岩体被一条主要 N-S 向的剪切带切分成两部分, 有人将其作为乌拉尔主断裂带的一部分^[30]: 西北部为玄武质熔融物形成的富铝铬铁矿; 东南部即为著名世界级豆荚状低铝镁铬铁矿床。岩体南部为主要矿床位置, 其铬铁矿具有一致性的高 Cr ([100Cr/(Cr+Al), 78~84]、高镁 ([100 Mg/(Mg+Fe²⁺), 51~85])。较小的富铝尖晶石在北部和西部, 具有多变的 Cr 指数(38~60)和镁指数(50~88)^[21]。脉体和豆状矿体内的闪石 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为 365~385 Ma, 表明在来自洋壳和沉积物俯冲板片的大量流体和熔融物作用下, 肯皮尔赛部分岩体层普遍发生交代变质作用, 俯冲发生在形成古生代萨克马拉(Sakmara)典型蛇绿岩套的熔融事件之后至少 15~35 Ma^[21, 27]。

蛇绿岩形成的构造背景可以分为两大类:(1)洋中脊(MOR, Middle Ocean Ridge);(2)俯冲带上(SSZ, Supra-subduction Zone)的弧前和弧后盆地等^[31-33]。

20世纪80年代末期根据阿曼、新喀里多尼亚等地蛇绿岩及豆荚状铬铁矿的野外构造研究,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的观点^[34-36]。并在赤道东太平洋大洋中脊上开展的深海钻探,首次获得了现代洋中脊环境的豆荚状铬铁矿样品^[37],与蛇绿岩豆荚状铬铁矿在结构、构造及其成分上完全可以对比,这一发现为豆荚状铬铁矿形成于大洋中脊上地幔扩张位置提供了最直接的地质依据。

近年来,基于许多蛇绿岩形成于小洋盆的新认识,认为大洋环境的俯冲带上(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^[31,38-40]。研究认为富含Os-Ir铂族元素合金的块状铬铁矿形成在俯冲带上的构造背景(SSZ),是由于H₂O饱和的玻安岩熔融体与呈地幔楔产出的方辉橄榄岩在地幔浅部发生反应而形成,即“地幔-熔体相互作用”的模式^[41-45],并认为铬铁矿形成在浅部地幔的证据来自铬铁矿的结构和成分,以及它们的纯橄岩外圈和脆性变形^[46]。

总的来看,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^[47],或俯冲带上<50 km的深度^[48]。

2.3 豆荚状铬铁矿的矿床地质特征

蛇绿岩是侵位于造山带中的古代大洋岩石圈残片,它的分布主要受板块缝合线控制。蛇绿岩的地幔橄榄岩控制矿体分布,矿体主要赋存于纯橄岩和方辉橄榄岩构成的杂岩带中。这些与成矿有关的蛇绿岩来源于地幔,如罗布莎蛇绿岩中的铬铁矿床主要赋存在地幔橄榄岩中。罗布莎超镁铁岩体由方辉橄榄岩、纯橄岩及少量的二辉橄榄岩等组成。由纯橄岩(Fo91~93)到方辉橄榄岩(Fo90~91)直到含单斜辉石的方辉橄榄岩(Fo89~90),Mg[#]依次降低;Mg[#]值与SiO₂、Al₂O₃、CaO含量呈负相关,岩石曾发生过局部熔化作用^[49]。岩石的轻重稀土元素丰度均较低,Nd元素丰度较高,稀土元素球粒陨石标准化型图解呈“V”字形。岩体中辉长辉绿岩脉的 $\epsilon_{Nd}(t)=+8$,Nd、Pb同位素特征表明该岩脉源于印度洋型地幔^[45]。岩体壳层熔岩的Sr-Nd-Pb同位素特征表明罗布莎

蛇绿岩壳层玄武岩是由具亏损地幔端员(DMM)性质的岩浆和具EM II型富集地幔端员性质的岩浆在源区混合形成的^[50]。罗布莎岩体各矿区的MgO及M/F值都高于同一构造带上的泽当、仁布、日喀则等岩体,Fe₂O₃和Al₂O₃的含量低于上述各岩体,表明罗布莎地幔橄榄岩的基性程度高于其他岩体,因此其含矿性也优于其他岩体。罗布莎蛇绿岩的形成时代主要为晚侏罗世—早白垩世^[45,51-53],铬铁矿床与罗布莎蛇绿岩密切相关,暗示其成矿时代也可能为晚侏罗世—早白垩世。

罗布莎铬铁矿具有两种矿床类型,浸染状矿石组成的堆晶矿床和致密块状矿石及豆状矿石组成的豆荚状矿床。两种矿床中主要矿物为高铬铬铁矿,在矿石中占80%以上,其余15%~20%为脉石矿物,包括叶蛇纹石、富铬斜绿辉石、铬绿泥石,其次为微量的磁铁矿、赤铁矿、六方硫镍矿、针镍矿、阳起石、蒙脱石、橄榄石、钙铬铝榴石等。堆晶矿床的围岩为过渡带的纯橄岩。矿石主要以不同稠密度的浸染状铬尖晶石组成,矿石品位较低。根据铬铁矿(铬尖晶石)的稠密度不同可分为稀疏浸染、中等浸染和稠密浸染等3种类型。在罗布莎地区,堆晶岩相叠覆于橄榄岩相之上,矿体的产状基本与纯橄岩相带的产状一致。矿体主要由各种浸染状矿石组成,局部有块状矿石出现。矿体与围岩呈渐变过渡的接触关系,个别矿体呈迅速过渡关系。致密块状矿石矿床的围岩主要为方辉辉橄岩,一般矿体具有纯橄岩外壳。矿石类型以块状和浸染状为主,矿石品位较高。矿体与近矿围岩的接触关系明显,这说明矿体与围岩不具有渐变过渡那种原始岩浆分异现象,矿体可能是异地来源的再就位产物。

铬铁矿主要赋存于变质地幔橄榄岩中,并且大多数岩体中的铬铁矿体沿着韧性剪切带分布,或沿切割变质地幔橄榄岩中的流劈理产出,同时又被晚期贯入的铁质-超镁铁质脉岩所切割。堆晶成因的浸染状铬铁矿的矿体主要分布在纯橄岩岩相带的底部。豆荚状矿床的矿体往往成段集中,成群产出,矿体及其赋存的含矿杂岩带往往产在距堆晶岩几百米至1~2 km层位处。堆晶成因的浸染状铬铁矿与围岩呈渐变过渡的接触关系,且矿床的产出层位、矿石结构、矿石构造等均与豆荚状铬铁矿床存在明显不同,表明该类型矿床在成因上可能与豆荚状铬铁矿有所不同,它们是堆晶岩的岩浆房内分凝结晶的铬

尖晶石的沉积产物。

3 豆荚状铬铁矿床的新进展

西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中最初在 20 世纪 80 年代年发现金刚石^[54-55],并在铬铁矿中发现八面体假象蛇纹石^[56],认为有可能曾是林伍德石。而林伍德石目前仅在陨石中见到^[57],实验表明其形成深度达 400 km,代表地幔过渡带深度的矿物。但由于这些矿物十分罕见,并且是从铬铁矿的人工重砂中选出的,未见它们的原位产出,国内外不少人怀疑这些矿物是混染造成^[58]。

最近,在国家自然科学基金委员会和中国地质调查局项目资助下,笔者对西藏雅鲁藏布江缝合带中的罗布莎豆荚状铬铁矿及其围岩地幔岩的研究取得重要进展:

(1)罗布莎铬铁矿中发现呈斯石英假象的柯石英,推测罗布莎发现的柯石英^[59],是由更高压相的斯石英(形成压力 $P > 9$ GPa)在一个压力降低的环境相变形成,不同于造山带中常见的由板块俯冲增压过程中形成的柯石英,提供铬铁矿可能来自地幔深部(形成深度 > 300 km)的重要证据。

(2)在罗布莎铬铁矿的钶铱矿中发现原位金刚石^[60],不仅仅表明金刚石产自铬铁矿,而且指示金刚石形成在高温高压($T > 2000$ °C, $P > 5$ GPa)环境,不同于板块俯冲过程中形成金刚石的高压低温环境($T < 1000$ °C, $P > 3$ GPa)。

(3)不仅仅在罗布莎矿区,在康金拉矿区和香卡山矿区的铬铁矿中均发现了金刚石,并且在罗布莎和康金拉铬铁矿床的容矿地幔橄榄岩中发现金刚石等异常地幔矿物,扩展了金刚石超高压矿物的空间展布,为探讨蛇绿岩和铬铁矿的成因提供新的重要证据^[60-62]。

(4)从俄罗斯极地乌拉尔取回的铬铁矿大样中首次发现金刚石等异常地幔矿物,并在金刚石中发现纳米级柯石英包裹体,证明金刚石为原生产出,提供铬铁矿成因的关键证据^[63]。

(5)高温高压实验研究证明铬铁矿中发现硅金红石为超高压环境形成;通过二次离子探针(SIMS)开展碳硅石(SiC)的原位碳同位素研究,发现 $\delta^{13}\text{C}$ ——亏损的同位素成分,通过对比,认为碳硅石可能来自下地幔^[64-65]。

(6)地幔橄榄岩中发现地壳成因的老锆石,可能

为早期俯冲地壳物质再循环,为地幔柱作用提供重要证据,并可能为“地幔不均匀”理论提供物质基础^[66];并提出罗布莎的地幔橄榄岩和铬铁矿可能是地幔柱成因。

4 豆荚状铬铁矿床的成因的新认识

当前国际上对地幔柱的研究取得很大进展,人们不仅仅在地球上发现越来越多的地幔柱存在的证据,例如,在夏威夷玄武岩包裹体中发现金刚石等深部地幔矿物证据^[67],人们还发现火星和金星上存在地幔柱的证据^[68]。地球上地幔柱直径达数千千米以上,深度达 2900 km 的核幔边界(CMB),其造成地幔物质由深部到浅部的运移^[69]。地幔柱的理念越来越引起人们的关注,地幔物质组成和地幔动力学成为固体地球科学研究的新领域。

上述研究成果表明,罗布莎和极地乌拉尔铬铁矿可能均为深部成因。大洋扩张脊下的地幔保留了深部物质,说明存在深部通道。金刚石等超高压矿物有可能与铬铁矿均在深部形成并被后者包裹,其后,深部形成的铬铁矿及容矿地幔橄榄岩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(whole mantle)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(mantle plume)被带到浅部地幔。

由此产生以下几点新认识:

(1)地幔中异常矿物和超高压矿物的发现对前人的豆荚状铬铁矿浅成理念提出了挑战,笔者认为需要重新审视豆荚状铬铁矿的成因。豆荚状铬铁矿如果是地幔柱成因,来自深部地幔,表明铬铁矿的物质可能不一定来源于周围的地幔橄榄岩,而是来自深部更大范围的熔融地幔,由此,有可能改变了前人不同的铬铁矿的成因模式,例如,“地幔-熔体相互作用”的铬铁矿成因模式^[41,43-44]等不同的成矿模式^[70-73]。

(2)俄罗斯极地乌拉尔豆荚状铬铁矿远景储量为 6 亿 t,其中一个拉依兹超镁铁岩体约 400 km²,有铬铁矿储量 1.9 亿 t^[28],并且经过笔者的研究,其中已经发现与罗布莎相类似的金刚石等地幔超高压矿物群^[63],表明两者的形成条件存在可比性,表明深部来源的铬铁矿可以成大矿。

(3)另一个新认识是,既然铬铁矿的物质来源不

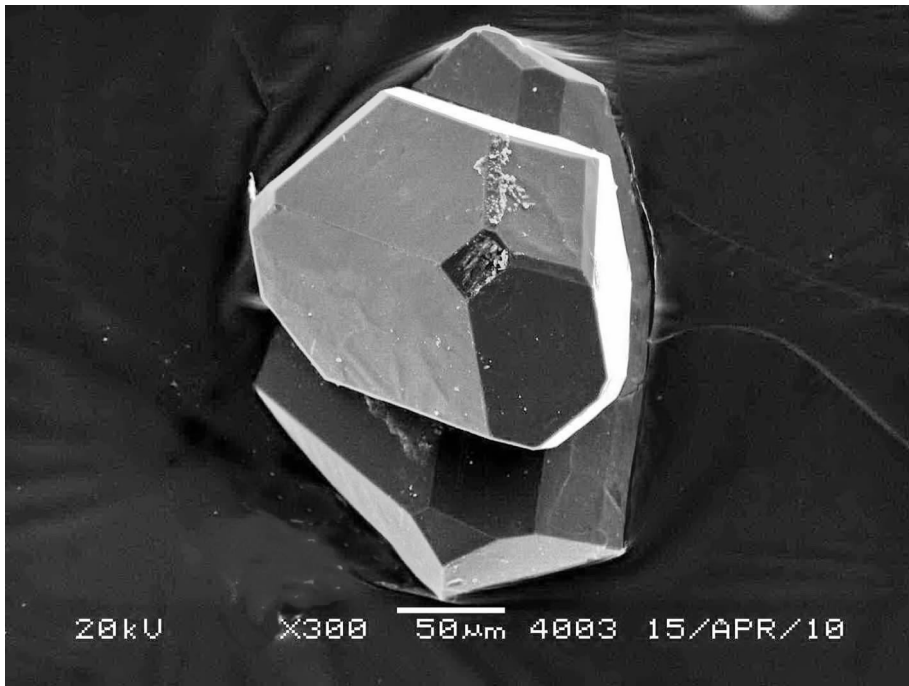


图4 西藏普兰地幔橄榄岩中发现晶型完好的金刚石等特殊地幔矿物
Fig.4 Unusual mantle minerals such as Luobusa diamond discovered from peridotite
in Purung ultramafic body, with the SEI picture showing a diamond crystal

一定是其容矿地幔橄榄岩，产有豆荚状铬铁矿的地幔橄榄岩体的规模可以不大，但矿床储量却可以很大。这种情况下，在开展铬铁矿成矿条件的普查时，将有一个完全新的思路，即小岩体也可以赋存大矿。

(4)中国尤其西藏发育数条规模巨大的蛇绿岩带，其中的地幔橄榄岩中是否也存在类似深部地幔矿物和深部来源的铬铁矿？显然，十分有必要对中国境内的蛇绿岩地幔橄榄岩开展新一轮的调查。

5 中国西藏普兰等地的铬铁矿找矿前景

中国的西藏发育数条大规模的蛇绿岩带和其中的超镁铁岩。尤其，雅鲁藏布江缝合带西段有数个大型的超镁铁岩体，如普兰岩体（面积 600 km²）、东波岩体（面积 400 km²）、体古嘎布岩体（700 km²）等等。根据笔者初步调查，认为这些岩体有许多共同点，可以作为开展铬铁矿远景调查的靶区。以下以普兰岩体为例加以说明。

普兰超镁铁岩体位于普兰县北，拉昂错以南，西起西兰塔，向东经拉昂错南岸至波色足勒。其地理坐标：东经 80°42′00″~81°24′00″；北纬 30°45′30″~30°

35′40″。该岩体长约 60 km，宽约十余千米，面积约 600 km²。其围岩为上三叠统—下侏罗统的砂岩、板岩和石灰岩，岩体与围岩为断层接触关系。

岩体的边部由蛇纹岩组成，中部为新鲜的方辉橄榄岩，过渡带为蛇纹石化方辉橄榄岩。主要岩石类型有：纯橄岩、斜辉辉橄岩、斜辉橄橄岩、含单辉斜辉橄橄岩和二辉橄橄岩等。岩石具有不同程度的蛇纹岩化、绿泥石化、绢云母化；岩体边部蛇纹石化强烈，中部则相对较弱。地幔橄榄岩中已经发现一些豆荚状铬铁矿体和矿化，地幔橄榄岩岩体中及其周围见辉长岩和辉绿岩等的岩石与其伴生。

普兰地幔橄榄岩岩石类型与含铬铁矿大矿的罗布莎以及俄罗斯乌拉尔的地幔橄榄岩可以对比。矿物学研究表明普兰地幔橄榄岩为大洋型（MOR），与罗布莎地幔橄榄岩的形成环境可以对比，推测两者均形成于大洋扩张脊背景。

笔者在岩石类型为含单辉斜辉橄橄岩的普兰岩体中取了约 400 kg 重的人工重砂大样，采用常规的人工重砂样品的矿物分离技术，从该大样中发现了 30 余粒金刚石和碳化硅等一批异常矿物。金刚石大小为 0.1~0.3 cm，晶型发育完好，为常见的八面体并

可见发育完整的锥体(图 3)。实体镜下金刚石为黄绿色,与罗布莎地幔橄榄岩中的金刚石可以对比。

该研究表明,普兰地幔橄榄岩体与罗布莎岩体以及俄罗斯乌拉尔的拉依兹地幔橄榄岩具有许多共同的特征,前两者中均发现具有工业价值的大型铬铁矿床,因此,很有必要开展普兰超镁铁岩体及该地区的其他几个大岩体,例如,东波岩体(面积 400 km²)和休古嘎布岩体(700 km²)的铬铁矿的前景调查。

参考文献(References):

- [1] http://www.hattonfze.com/Chromite_Ore.php.
- [2] 张友平, 周渝生, 李肇毅. 我国不锈钢原料资源和生产进展[J]. 特殊钢, 2008, 29(6):17-19.
Zhang Youping, Zhou Yusheng, Li Zhaoyi. Raw material resource for stainless steel and the progress[J]. Special Steel, 2008, 29(6):17-19 (in Chinese with English abstract).
- [3] <http://www.roskill.com/reports/chromium>.
- [4] 余良晖, 王海军, 于银杰. 我国铬铁矿战略储备构思[J]. 国土资源, 2006:24-25.
Yu Lianghui, Wang Haijun, Yu Yinjie. Strategic reserves design of the chromite in China [J]. Land & Resources, 2006:24-25 (in Chinese).
- [5] Wager L R, Brown G M. Layered Igneous Rocks [M]. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1968:588.
- [6] Hess H H. Complementary evidence from the Bushveld Complex, Great Dyke, and Skaergaard intrusion [C] // Stillwater Igneous Complex, Montana—A Quantitative Mineralogical Study. Geol. Sot. Amer. Mem. 80. 1960, 9:151-167.
- [7] Cameron E N. Structure and rock sequences of the Critical Zone of the eastern Bushveld Complex[J]. Mineral. Soc. Amer. Spec., 1963, 1:93-107.
- [8] Cameron E N. Problems of the eastern Bushveld Complex [J]. Fortschr. Mineral, 1971, 48:86-108.
- [9] Jackson E D. Ultramafic cumulates in the Stillwater, Great Dyke, and Bushveld intrusions [C] //Wyllie P J (ed.). Ultramafic and Related Rocks. 1967:20-38.
- [10] Wager L R, Brown G M. The Bushveld Intrusion, South Africa [C] // In Layered Igneous Rocks. 1967, 14:343-407.
- [11] Willemse J. The geology of the Bushveld Igneous Complex, the largest repository of magmatic ore deposits in the world [C] // Wilson H D (ed.). Magmatic Ore Deposits—A Symposium. 1969: 1-22, Econ. Geol. Monograph 4.
- [12] DePaolo J, Wasserburg G J. Sm-Nd age of the Stillwater complex and the mantle evolution curve for neodymium [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1979, 43:999-1008.
- [13] Page N J. Stillwater complex, Montana:Rock succession, metamorphism contents[J]. Amer. Mineral, 1977, 64:768-775.
- [14] Marcantonio F, Zindler A, Reisberg L, et al. Re-Os isotopic systematics in chromitites from the Stillwater Complex, Montana, USA[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57:4029-4037.
- [15] Worst B G. The Great Dyke of Southern Rhodesia [J]. S. Rhod. Geol. Surv., Bulletin, 1960:47.
- [16] Stuphin D M, Page N J. International strategic minerals inventory summary report—platinum—group metals [J]. US Geol. Surv., Circular, 1986, 930-E.
- [17] Wilson A H, Prendergast M D. The Great Dyke of Zimbabwe—I: tectonic setting, stratigraphy, petrology, structure, emplacement and crystallization [C] // Prendergast M D, Jones M J (eds.). Magmatic Sulphides—the Zimbabwe Volume. Instn. Mining Metallurgy, London, 1989:1-20.
- [18] Thomas O, Donald W D, Thomas G B, et al. Precise U-Pb mineral ages, Rb-Sr and Sm-Nd systematics for the Great Dyke, Zimbabwe—constraints on late Archean events in the Zimbabwe craton and Limpopo belt [J]. Precambrian Research, 2002, 113(3/4):293-305.
- [19] Gijbels R H, Millard H T, Desborough G A, et al. Osmium, ruthenium, iridium and uranium in silicates and chromite from the eastern Bushveld Complex, South Africa [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1974, 38:319-337.
- [20] Leblanc M, Nicolas A. Ophiolitic chromitites [J]. International Geological Review, 1992, 34:653-686.
- [21] Melcher F, Grum W, Simon G, et al. Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan; a study of solid and fluid inclusions in chromite [J]. Journal of Petrology, 1997, 38 (10):1419-1458.
- [22] Proenza J A, Gervilla F, Melgarejo J C, et al. Al- and Cr-rich chromitites from the Mayari-Baracoa ophiolitic belt (Eastern Cuba); consequence of interaction between volatile-rich belts and peridotites in supra subduction mantle[J]. Economic Geology, 1999, 194:547-566.
- [23] 鲍佩声, 王希斌, 彭根永, 等. 中国铬铁矿床[M]. 北京:科学出版社, 1999:98-142.
Bao Peisheng, Wang Xibin, Peng Genyong, et al. Chromite Deposit in China [M]. Beijing: Science Press, 1999:98-142 (in Chinese with English abstract).
- [24] Moreno T, Gibbons W, Prichard H M, et al. Platiniferous chromitite and the tectonics setting of ultra mafic rocks in Cabo Ortegal, NW Spain [J]. Journal of the Geological Society London, 2001, 158:601-614.
- [25] Ahmed A H, Arai S, Attia A K. Petrological characteristics of podiform chromitites and associated peridotites of the Pan African Proterozoic ophiolite complexes of Egypt[J]. Mineralium Deposita, 2001, 36:72-84.
- [26] Tamayo R A, Yumul G P, Maury R C, et al. Petrochemical investigation of the antique ophiolite (Philippines): implications on volcanogenic massive sulfide and podiform chromitite deposits [J]. Resource Geology, 2001, 51(2):145-164.
- [27] Melcher F, Grum W, Thalhammer T V, et al. The giant chromite

- deposits at Kempirsai, Urals: constraints from trace element (PGE, REE) and isotope data [J]. *Mineralium Deposita*, 1999, 34:250–272.
- [28] Makeyev Alexander B. Mineralogy of the Alpine-type Ultrabasic Rocks in Polar Ura [M]. Science Press, St. Petersburg Publication Brunch. St. Petersburg, 1992:1–195(in Russian).
- [29] Savelieva G N, Sharaskin A Y, Saveliev A A, et al. Ophiolites of the southern Uralides adjacent to the East European continental margin[J]. *Tectonophysics*, 1997, 276:117–137.
- [30] Lennykh V I, Valizer P M, Beane R, et al. Petrotectonic evolution of the Maksyutov Complex, southern Urals, Russia: implications for ultrahigh-pressure metamorphism [J]. *Int. Geol. Rev.*, 1995, 37:584–600.
- [31] Pearce J A, Lippard S J, Robert S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites [C] // Kokelaar B P, Howells M F (eds.). *Marginal Basin Geology, Volcanic and Ancient Marginal Basins*. London: Blackwell Scientific Publication, 1984:77–94.
- [32] Pearce J A. Supra-subduction zone ophiolites: The search for modern analogues [C] // Dilek Y, Newcomb S Colorado G(eds.). *Ophiolite Soncept, the Evolution of Geological Thought*. eological Society of American Special Paper, 2003, 373:269–293.
- [33] Robertson A H F. Overview of the genesis and emplacement of Mesozoic ophiolites in the Eastern Mediterranean Tethyan region [J]. *Lithos*, 2002, 65:1–67.
- [34] Leblanc M, Nicolas A. Ophiolitic chromitites [J]. *International Geological Review*, 1992, 34:653–686.
- [35] Nicolas A. Structures of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithosphere. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989, 223–252.
- [36] Nicolas A, Azri H A. Chromite-rich and chromite-poor ophiolites: the Oman case [C] // Peter T, et al. *Ophiolite Genesis and Evolution of the Oceanic Lithosphere*, 1991:1261–274.
- [37] Arai S, Matsukage K. Petrology of a chromitite micropod from Hess Deep, equatorial Pacific: a comparison between abyssal and alpine-type podiform chromitite[J]. *Lithos*, 1998, 43:1–14.
- [38] Zhou Meifu, Sun M, Keays R, et al. 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*, 1998, 62:677–688.
- [39] Proenza J A F, Gervilla J C Melgarejo, J L Bodinier. Al and Cr rich chromitites from the Mayarí-Barcoia Ophiolitic Belt, (eastern Cuba): consequence of interaction between volatile-rich melts and peridotite in suprasubduction mantle [J]. *Economic Geology*, 1999, 94:547–566.
- [40] Yumul G P. The Acoje block platiniferous dunite horizon, Zambales ophiolite complex, Philippines: melt type and associated geochemical controls[J]. *Resource Geology*, 2001, 51(2):165–174.
- [41] Stockman H W, Hlava P F. Platinum-group minerals in Alpine chromitites from southwestern Orogen [J]. *Economic Geology*, 1984:79, 491–508.
- [42] Talkington R W, Watkinson D H, Whittaker P J, et al. Platinum-group minerals and other solid inclusions in chromite of ophiolitic complexes, occurrence and petrological significance [J]. *TMPM Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 1984,32(4):258–301.
- [43] Arai S. Origin of podiform chromitites [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1997, 15(2/3):303–310.
- [44] Edwards S J, Pearce J A, Freeman J. New insights concerning the influence of water during the formation of podiform chromite [C] // Dilek Y, Moores E M, Elthon D, et al (eds.). *Ophiolites and Oceanic Crust: New Insights from Field Studies and the Ocean Drilling Program*. Geological Society of America Special Paper, 2000, 349:139–147.
- [45] Zhou Su, Mo Xuanxue, Mahoney J J, et al. Geochronology and Nd and Pb isotope characteristics of gabbro dikes in the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47:143–146.
- [46] Robinson P T, Bai Wenji, Malpas J, et al. Ultra-high pressure minerals in the Luobusa ophiolite, Tibet and their tectonic implications. Aspects of the Tectonic Evolution of China [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 226:247–271.
- [47] Lambert L B, Wyllie P J. Lowvelocity zone of the earth's mantle: Incipient melting caused by water[J]. *Science*, 1970, 109, 764–766.
- [48] Zhou Meifu, Robinson P T, Malpas J. et al. Podiform chromitites in the Luobusa Ophiolite (southern Tibet): implications for melt-rock interaction and chromite segregation in the upper mantle[J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37 (1):3–21.
- [49] 白文吉, 周美夫, Robinson P T,等. 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, 2000:1–98. Bai Weiji, Zhou Meifu, Robinson P T, et al. 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).
- [50] 钟立峰, 夏斌, 周国庆, 等. 藏南罗布莎蛇纹岩成因: 壳层熔岩的 Sr–Nd–Pb 同位素制约[J]. *矿物岩石*, 2006, 26(1):57–63. Zhong Lifeng, Xia Bin, Zhou Guoqing, et al. Origin of the Luobusa ophiolite, southern Tibet: Sr–Nd–Pb isotopic constraints on crust lavas[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2006, 26(1): 57–63 (in Chinese with English abstract).
- [51] 张浩勇, 巴登珠, 郭铁鹰, 等. 西藏自治区曲松县罗布莎铬铁矿床研究[M]. 西藏:西藏人民出版社, 1996:1–181. Zhang Haoyong, Ba Dengzhu, Guo Tieying, et al. Study of Luobusa Typical Chromite Ore Deposit Qusong County Tibet (Xizang) [M]. Xizang: Xizang People Press, 1996:1–181 (in Chinese with English abstract).
- [52] Malpas J, Zhou M F, Robinson P T, et al. 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, 2003, 218:191–206.

- [53] 钟立峰, 夏斌, 周国庆, 等. 藏南罗布莎蛇绿岩辉绿岩中锆石 SHRIMP 测年[J]. 地质论评, 2006, 52(2):224-229.
Zhong Lifeng, Xia Bin, Zhou Guoqing, et al. SHRIMP age determination of the diabase in Luobusa ophiolite, Southern Xizang (Tibet)[J]. *Geological Review*, 2006, 52(2), 224-229 (in Chinese with English abstract).
- [54] 中国地质科学院地质研究所金刚石组. 西藏首次发现含金刚石的阿尔卑斯型岩体[J]. 地质论评, 1981, 27(5):455-457.
Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. The discovery of alpine-type diamond bearing ultrabasic intrusions in Xizang (Tibet) [J]. *Geological Review*, 1981, 27(5): 445 - 447 (in Chinese with English abstract).
- [55] Bai Wenji, Zhou Meifu, Robinson P J. Possibly diamond-bearing mantle peridotites and podiform chromitites in the Luobusa and Dongqiao ophiolites, Tibet[J]. *Can. J. Earth Sci*, 1993, 30:1650-1659.
- [56] 杨凤英, 康志琴, 刘淑春. 蛇纹石的八面体假象及其成因的初步探讨[J]. 矿物学报, 1981, (1):52-54
Yang Fengying, Kang Zhiqin, Liu Shuchun. A new octahedral pseudomorph of lizardite and its origin[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1981, (1): 52-54 (in Chinese with English abstract).
- [57] Chen M, Goresy A E, Gillet P. Ringwoodite lamellae in olivine: Clues to olivine-ringwoodite phase transition mechanisms in shocked meteorites and subducting slabs [J]. *PNAS*, 2004, 101: 15033-15037.
- [58] Taylor W R, Milledge H J, Griffin B J, et al. Characteristics of microdiamonds from ultramafic massifs in Tibet: authentic ophiolitic diamonds or contamination? Sixth international kimberlite conference; extended abstracts. *Proceedings of the International Kimberlite Conference*, 1995, 6:623-624.
- [59] Yang Jingsui, Larissa D, Bai Wenji, et al. Diamond- and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet [J]. *Geology*, 2007, 35(10):875-878.
- [60] 杨经绥, 张仲明, 李天福, 等. 西藏罗布莎铬铁矿体围岩方辉橄辉岩中的异常矿物[J]. 岩石学报, 2008, 24(7):1445-1452.
Yang Jingsui, Zhang Zhongming, Li Tianfu, et al. Unusual minerals from harzburgite, the host rock of the Luobusa chromite deposit, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(7), 1445-1452 (in Chinese with English abstract).
- [61] 徐向珍, 杨经绥, 巴登珠, 等. 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, 2008, 24(7):1453-1462.
Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Ba Dengzhu, et al. Diamond discovered from the Kangjinla chromitite in the Yarlung Zangbo ophiolite belt, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(7), 1453-1462 (in Chinese with English abstract).
- [62] Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Chen Songyong, et al. An unusual mantle mineral group from chromitite orebody Cr-11 in the Luobusa ophiolite of the Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet [J]. *Journal of Earth Science*, 2009, 20(2):284-302.
- [63] 杨经绥, 白文吉, 方青松, 等. 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, 2007, 34(5):950-952.
Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, et al. Discovery of diamond and an unusual mineral group from the podiform chromite, Polar Ural[J]. *Geology in China*, 2007, 34(5):950-952.
- [64] Ren Yufeng, Fei Yingwei, Yang Jingsui, et al. SiO₂ solubility in rutile at high temperature and pressure[J]. *Journal of Earth Sciences*, 2009, 20 (2):274-283.
- [65] Trumbull Robert B, Yang Jingsui, Robinson Paul T, et al. The carbon isotope composition of natural SiC (moissanite) from the Earth's mantle: New discoveries from ophiolites [J]. *Lithos*, 2009, 113:612-620.
- [66] 徐向珍. 藏南康金拉豆荚状铬铁矿和地幔橄辉岩成因研究[D]. 中国地质科学院博士学位论文, 2009: 145.
Xu Xiangzhen. Origin of the Kangjinla podiform chromite deposit and mantle peridotite, South Tibet [D]. Doctoral thesis, Chinese Academy of Geological Science, 2009:145 (in Chinese with English abstract).
- [67] Wirth R, Rocholl A. Nanocrystalline diamond from the Earth's mantle underneath Hawaii [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 211: 357-369.
- [68] Condie K. *Mantle Plumes and Their Record in Earth History*[M]. Cambridge University Press, 2001:1-306.
- [69] Maruyama S, Santosh M, Zhao D. Superplume, supercontinent, and post-perovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the Core-Mantle Boundary[J]. *Gondwana Research*, 2007, 11:7-37.
- [70] Dickey J S. A hypothesis of origin for podiform chromite deposits [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1975, 39:1061-1074.
- [71] 王恒升, 白文吉, 王炳熙, 等. 中国铬铁矿床及成因[M]. 北京: 科学出版社, 1983:1-227.
Wang Hengsheng, Bai Wenji, Wang Bingxi, et al. *Chromite Deposits in China and their Origin* [M]. Beijing: Science Press, 1983:1-227 (in Chinese with English abstract).
- [72] 王希斌, 鲍佩声, 邓万明, 等. 西藏蛇绿岩[M]. 北京: 地质出版社, 1987:1-336.
Wang Xibin, Bao Peisheng, Deng Wanming, et al. *Tibet ophiolite* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987:1-336 (in Chinese with English abstract).
- [73] 裴荣富. 中国矿床模式[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 111-113.
Pei Rongfu. *Mineral Deposit Models of China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995:111-113 (in Chinese with English abstract).

A restudy of podiform chromite deposits and their ore-prospecting vista in China

YANG Jing-sui, BA Deng-zhu, XU Xiang-zhen, LI Zhao-li

(Key Laboratory of Continental Dynamics of Ministry of Land and Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Chromite is an essential component of stainless steel, and China is the largest consumer of stainless steel in the world. However, only a few chromite deposits have been discovered in China, so China must rely almost entirely on imports for this strategic metal. Chromite forms two types of deposits, namely layered and podiform deposits. Chromite deposits in China are all of the podiform type and occur mainly in Tibet, Xinjiang and Inner Mongolia, where they are hosted in mantle peridotites and cumulates sequences in ophiolites. Deep mantle minerals have recently been discovered in-situ in chromite deposits in Tibet and the Polar Urals, which strongly suggests that chromite was formed in the deep mantle rather than in shallow mantle peridotite as suggested by previous researchers. It is held that large chromite deposits can be formed deep in the mantle and be hosted even in small bodies of mantle peridotite. It is thus necessary to reevaluate the current models for chromite formation and to undertake a new investigation into the ophiolite peridotites and chromite deposits in China.

Key words: chromite; ophiolite; mantle; Luobusa; Ural

About the first author: YANG Jing -sui, male, born in 1950, senior researcher and supervisor of doctor candidates, engages in the study of ophiolite of the orogenic zone and ultrahigh-pressure metamorphic rocks; E-mail: yangjingsui@yahoo.com.cn.