

新特提斯缝合带中段豆荚状铬铁矿成矿规律对比研究

洪俊^{1, 2)}, 姚文光²⁾, 张晶²⁾, 张辉善²⁾, 吕鹏瑞²⁾, 杨博²⁾

1) 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 西安, 710054;

2) 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安, 710054

内容提要:新特提斯缝合带中的铬铁矿带是全球最重要的豆荚状铬铁矿成矿带之一, 尤其是新特提斯缝合带中段, 即穆斯林巴赫-科希斯坦-雅鲁藏布江一带, 自东向西发育罗布莎、马拉坎德、穆斯林巴赫等若干大型铬铁矿床。本文系统总结和梳理新特提斯缝合带中段蛇绿岩的时空分布特征以及典型豆荚状铬铁矿的矿床特征、赋存规律和控矿因素。研究表明, 蛇绿岩形成时代主体为中侏罗世一晚白垩世, 自东向西大致呈逐渐变新的趋势, 构造侵位的时代相近, 为古新世—始新世; 马拉坎德、瓦济里斯坦、穆斯林巴赫及贝拉铬铁矿, 与罗布莎矿床相似, 均属于富铬型铬铁矿, 产于 SSZ 相关构造背景下, 显示良好的岩相分带, 具有良好的成矿条件; 提出下一步找矿方向是针对成矿条件优越的蛇绿岩, 解析层序剖面, 识别纯橄岩与方辉橄榄岩的岩相分带, 确定有利赋矿岩相。

关键词:成矿规律; 豆荚状铬铁矿; 对比研究; 新特提斯缝合带

豆荚状铬铁矿在全球的分布具有明显不均一性, 主要产于喜马拉雅-阿尔卑斯造山带、地中海周围、中东、东南亚、古巴、北美西部等地的显生宙蛇绿岩中 (Leblanc and Nicolas, 1992)。喜马拉雅-阿尔卑斯造山带是最重要的铬铁矿成矿带之一, 东西延伸达数千千米。据统计, 世界上已发现的 21 个大型豆荚状铬铁矿床中, 有 15 个产于喜马拉雅-阿尔卑斯蛇绿岩带, 因而成为令人瞩目的巨型铬铁矿成矿带 (鲍佩声等, 1999)。位于新特提斯缝合带中段的穆斯林巴赫-科希斯坦-雅鲁藏布江蛇绿岩带, 作为该成矿带的组成部分, 资源潜力巨大, 典型的豆荚状铬铁矿包括巴基斯坦的穆斯林巴赫 (Muslim Bagh) 矿床 (Kakar et al., 2013, 2014), 和中国的罗布莎铬铁矿床等 (鲍佩声等, 1999)。因此, 对其进行总结和对对比研究具有重要理论和实践意义。

然而, 限于地区研究程度的差异, 现有的铬铁矿研究资料多局限于特定地段 (黄圭成, 2006), 或集中于单个典型矿床, 特别是罗布莎矿床 (王希斌等, 1987, 1992; 周二斌等, 2011), 而缺少区带的系统对比研究和宏观规律的总结。尽管目前对于豆荚状铬铁矿的成因还存在争议, 但是近年来铬铁矿的研究不断取得新进展 (Yang et al., 2007, 2009; Zhou et al., 2014), 这些研究成果对于重新认识铬铁矿成矿

规律具有一定的启示。本文在广泛的资料收集基础上, 通过对新特提斯缝合带中段蛇绿岩特征的梳理总结, 并系统对比各区段重要豆荚状铬铁矿床的岩体规模和组成、矿体赋存部位、地球化学特征等, 分析新特提斯缝合带豆荚状铬铁矿的区域成矿规律, 不仅有利于分析巴基斯坦豆荚状铬铁矿的资源潜力, 对境内雅鲁藏布江蛇绿岩带中铬铁矿的勘查工作也有一定指导意义。

1 区域地质背景

新特提斯洋盆的闭合造成了印度板块、阿拉伯板块与欧亚大陆的碰撞, 是陆内汇聚、碰撞造山的典型代表, 形成单一的缝合带, 从塞浦路斯到土耳其的比特里斯, 沿伊朗的扎格罗斯向东南入阿曼湾, 在巴基斯坦境内为贝拉-穆斯林巴赫-瓦齐里斯坦缝合带, 经喀喇昆仑地块后与雅鲁藏布江缝合带相接, 向西延伸至缅甸后入印度洋 (Sengor, 1987; Sengor et al., 1996; Sorkhabi et al., 2008)。本文的研究区位于新特提斯缝合带中段, 包含中国西藏雅鲁藏布江蛇绿岩带、巴基斯坦北部印度河缝合带和巴基斯坦中西部贝拉-穆斯林巴赫-瓦齐里斯坦缝合带 (图 1)。

雅鲁藏布江蛇绿岩带位于青藏高原南部, 呈近东西向、大致沿雅鲁藏布江展布, 其北为拉萨地块,

注: 本文为中国地质调查局项目 (编号 121201112036, 12120115066801) 资助的成果。

收稿日期: 2015-05-09; 改回日期: 2015-07-12; 责任编辑: 周健。

作者简介: 洪俊, 男, 1985 年生。工程师, 主要从事境外地质调查、岩浆岩与成矿作用方面的研究。Email: hongjunmail2013@163.com。

主要由冈底斯火山岩浆弧、巨厚的陆源碎屑复理石建造组成,南侧与古生代—中生代北喜马拉雅大陆边缘褶冲带相邻。根据蛇绿岩的空间分布特点,该岩带可划分为东段(曲水-墨脱)、中段(昂仁-仁布)和西段(萨嘎以西),西段又分南北两支,分别为达巴-休古嘎布蛇绿岩带和达机翁-萨嘎蛇绿岩带(黄圭成,2006),后者一直向西延伸至克什米尔,进入巴基斯坦境内,与印度河缝合带相接。

巴基斯坦北部自北向南以主喀喇昆仑断裂(MKT)、主地幔逆冲断裂(MMT)、主边界断裂(MBT)和主前缘断裂(MFT)为界,将该区分成喀喇昆仑地块、科希斯坦-拉达克岛弧、喜马拉雅造山带以及新生代前缘拗陷带等 4 个构造单元(图 1)。印度河缝合带位于科希斯坦-拉达克岛弧南部,呈蛇绿混杂岩推覆体,沿主地幔逆冲断裂的两侧分布。巴基斯坦中西部即印度河西岸地区,为印度板块西北缘向阿拉伯板块俯冲拼合地带,其构造格局总体上沿着近 SN 向的杰曼(Chaman)大型走滑断裂为界,以西为查盖(Chagai)火山岩浆弧,古近纪火山活动强烈,以东为苏莱曼山中—新生代造山带(吴良士,2010)。由于印度板块是向西偏北方向斜切碰撞的,造成构造带在走向上变化较大,总体呈反“S”形展

布。贝拉-穆斯林巴赫-瓦齐里斯坦蛇绿岩带位于杰曼断裂东侧,是巴基斯坦境内规模最大的蛇绿岩带(沈百花等,2008)。岩带自南向北分为 3 段,南部沿帕普山脉近南北走向的贝拉岩体、中部近东西走向的若布河谷(又称穆斯林巴赫)岩体和北部马通山区呈南北走向的瓦齐里斯坦岩体(图 1)。

2 蛇绿岩特征及时代

由于地质研究和勘查程度不同,目前在新特提斯缝合带中已发现的铬铁矿床,数量多,但规模差异很大,分布也极不平衡。下面将按区段分别介绍雅鲁藏布江蛇绿岩带、印度河缝合带和瓦齐里斯坦-贝拉蛇绿岩带铬铁矿床(点)的空间分布,以便于从整体上认识区域矿化特征。

2.1 蛇绿岩分布与含矿性

(1)雅鲁藏布江蛇绿岩带:雅鲁藏布江蛇绿岩带在我国西藏境内断续出露长达 1500 km,南北宽 5~15 km,据统计有大小岩体(群)161 个,区域上分为东、中、西 3 段(张浩勇等,1996)。东段是目前发现矿体最多、规模最大的地区,主要岩体有罗布莎岩体、泽当岩体和鲁见沟岩体等。罗布莎岩体长 43 km,宽 3 km,出露面积约 70 km²,共发现大小矿体

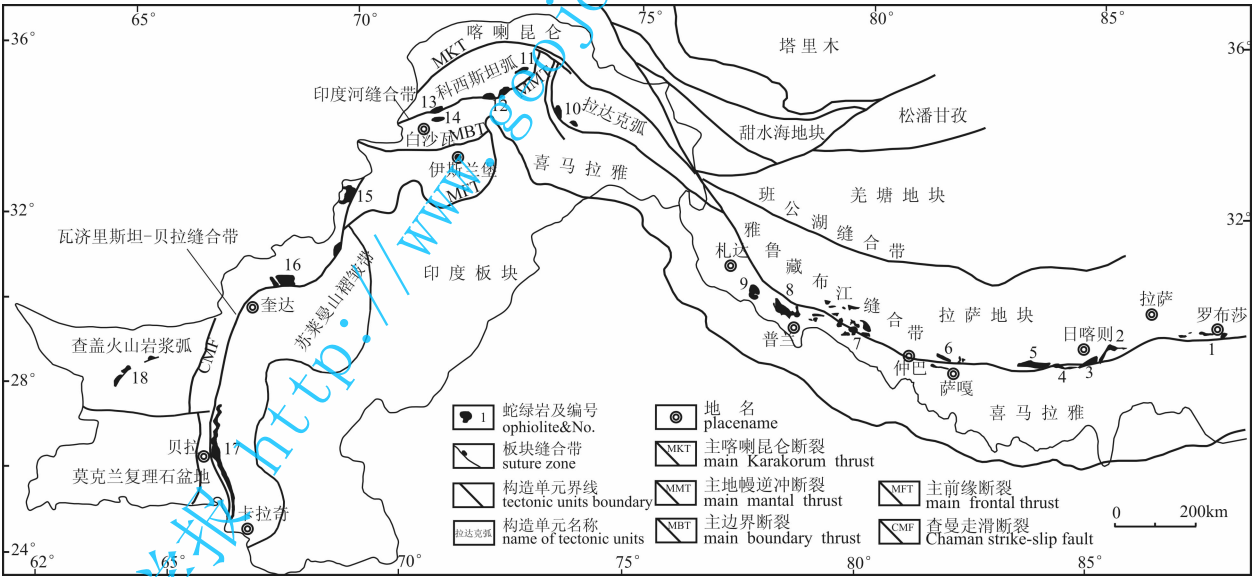


图 1 新特提斯缝合带中段蛇绿岩分布图(据巴基斯坦地质图、西藏地质二队内部资料综合编绘)

Fig. 1 Sketch of distribution of ophiolites in the middle of the Neotethys suture zone (modified after the geology map of Pakistan and internal data)

- 1—罗布莎岩体;2—仁布岩体;3—日喀则岩体;4—昂仁岩体;5—桑桑岩体;6—当穷岩体;7—休古嘎布岩体;8—拉昂错岩体;
9—东坡岩体;10—内达尔蛇绿岩;11—奇拉斯岩体;12—季佳尔岩体;13—尚拉—明戈拉岩体;14—德尔盖岩体;
15—瓦齐里斯坦岩体;16—穆斯林巴赫岩体;17—贝拉岩体;18—拉斯科岩体
1—Luobusha;2—Renbu;3—Xigaze;4—Angren;5—Sangsang;6—Dangqiong;7—Xiugugabu;8—Laangcuo;9—Dongbo;10—Nidar;
11—Chilas;12—Jijal;13—Shangla-Mingora;14—Dargai;15—Waziristan;16—Muslim Bagh;17—Bela;18—Ras Koh

超过 600 个,主要产于方辉橄榄岩岩相带中,单个矿体长度达 390 m,是我国已知规模最大的铬铁矿床。泽当岩体中已发现铬铁矿矿体近 300 个,矿体呈透镜状和扁豆状,长约 6 m,宽 1~2 m。鲁见沟岩体已发现矿体 50 余个,其中隐伏矿体 13 个,矿体以透镜状为主,最长矿体为 24 m,铬铁矿主产在纯橄岩中,少数矿体赋存于方辉橄榄岩中。中段出露岩体数量多、规模大,但是地表矿化并不理想,发现的矿体数量少,规模也不大。日喀则岩体规模最大,面积达 940 km²,在日喀则-昂仁一带岩体里仅见有 30 余个矿体,最大的长 6 m,多数长约几十厘米(张浩勇, 1996)。西段蛇绿岩带分北亚带和南亚带两个分支,北亚带岩体规模小,在日康巴和巴尔西沟岩体发现铬铁矿,呈透镜状断续出露,矿体长 1~18 m,厚 2 m,所有矿体均产于方辉橄榄岩中。南亚带工作程度较低,出露的岩体有当穷岩体、休古嘎布岩体、东坡岩体、拉昂错岩体以及普兰岩体等,这些岩体中均有不同程度矿化,如在当穷和休古嘎布地区共发现铬铁矿化点 58 个(王方国等, 2009)。

(2) 印度河蛇绿岩带:印度河蛇绿岩带位于科希斯坦-拉达克岛弧南部,已发现十几个岩体,包括科希斯坦、马拉坎德等,向东延伸到克什米尔地区。岩体多以蛇纹石化橄榄岩和纯橄岩为主,局部具有铬铁矿化,其中以科希斯坦岩体矿化较强,铬铁矿产在超镁铁质岩中,呈条带状、似层状、透镜状及豆荚状产出,矿石构造类型以浸染状为主。矿体长百余米,厚数米至十余米,(Cr₂O₃ 含量变化较大,最高可达 55 %,一般在 30 %左右,Cr/Fe 比值最高为 2.8)。马拉坎德岩体位于西北边境省白沙瓦东北 60 km,蛇绿岩带延伸约 25 km,宽 5~6 km,共发现 7 个矿群,由 62 个大小不等矿体组成,分上下两个矿带,下矿带由 1 个矿群 23 个矿体组成,矿体产出方辉橄榄岩、纯橄岩中,多呈条带状、透境状,长 20~300 m,宽 3~12 m,少数为不规则状和豆荚状,规模不大,Cr₂O₃ 平均含量为 50 %左右,估算储量约 68×10⁴ t。

(3) 瓦齐里斯坦-贝拉蛇绿岩带:该蛇绿岩带又称作卑路支蛇绿岩带,出露于印度板块西部构造转换带内,是规模最大、含矿性最好的蛇绿岩带,呈近南北走向,北起瓦济里斯坦,经若布河谷,向南卡拉奇以西的阿拉伯海岸。带中岩体规模大小相差悬殊,已发现数百个矿体,主要集中在穆斯林巴赫地区,单个矿体规模在 5×10⁴ t 以上的有 7~8 个,其他多在 2×10⁴ t 以下,其中规模最大的矿体是位于东南部的萨普莱托加尔岩段的 401 号矿体,矿石储

量约 10×10⁴ t。铬铁矿主要赋存于蛇纹石化纯橄岩中,矿石构造多呈豆荚状,少数呈条带状、似层状,矿石 Cr₂O₃ 平均含量为 45 %,Cr/Fe 比值>3,铬铁矿储量超过 400×10⁴ t。贝拉地区铬铁矿多为豆荚状矿体,现有矿产地 4 处,矿石质量中上等,但规模较小,储量约几十万吨。

2.2 蛇绿岩的时代

沿新特提斯缝合带出露的蛇绿岩除了在规模、层序上存在显著差异,其形成和侵位时代也显示一定的分段性,本文统计了前人通过不同类型样品、不同测试方法所获得的代表性蛇绿岩年龄数据(表 1),总结该带中蛇绿岩的时空分布特征。

在雅鲁藏布江缝合带东段,对罗布莎岩体、泽当岩体的测年结果主要集中在~177 Ma,并结合放射虫硅质岩所确定蛇绿岩的形成时间主要为中晚侏罗世。雅鲁藏布江缝合带中段,蛇绿岩主要出露在日喀则地区,吴浩若等(1988, 2000)对该区南部硅质岩中的放射虫化石做了系统研究,在蛇绿岩顶部枕状熔岩上覆的冲堆组底部硅质岩中发现含有晚白垩世放射虫化石组合,代表蛇绿岩形成的上限。已获得的测年结果显示,中段蛇绿岩形成时代集中在晚侏罗世—早白垩世,略晚于东段蛇绿岩。西段蛇绿岩体主要有休古嘎布、拉昂错、东坡岩体等。东坡岩体附近紫红色含放射虫硅质岩时代为晚侏罗世—早白垩世;除了 Miller 等(2003)通过玄武岩的 Sm-Nd 等时线获得休古嘎布蛇绿岩年龄为 147±25 Ma 之外,其他结果多集中于~120 Ma,与中段蛇绿岩时代相近。

在巴基斯坦北部印度河蛇绿岩带,根据镁铁质岩石中角闪石³⁹Ar/⁴⁰Ar 测年获得拉达克地区蛇绿岩形成时代为 110~130 Ma(Gweltaz et al., 2004), Nindar 蛇绿岩中辉长岩 Sm-Nd 同位素测年结果为 140±32 Ma(Ravikant et al., 2004),表明蛇绿岩形成时代与中国雅鲁藏布江缝合带西段的蛇绿岩时代大致相当。

巴基斯坦中部瓦济里斯坦-贝拉蛇绿岩带中,穆斯林巴赫蛇绿岩中斜长花岗岩岩脉的锆石 U-Pb 年龄为 80.2±1.5 Ma,代表了蛇绿岩的形成年龄,变质岩和辉长岩中角闪石、斜长石的 Ar-Ar 年龄为 70~65 Ma,代表了洋壳仰冲时间(Mehrab et al., 2007),北部瓦济里斯坦超基性岩体中花岗岩岩脉的全岩 K-Ar 法结果为 77±2 Ma、70±1 Ma(Arif, 2006)。该蛇绿岩带形成时间总体晚于雅鲁藏布江蛇绿岩带。

表 1 新特提斯缝合带典型蛇绿岩年龄统计表

蛇绿岩	定年样品	定年方法	年龄(Ma)	数据来源
罗布莎	玄武岩	全岩 Rb-Sr 法	173.27±0.9	李海平等,1996
	辉长辉绿岩	全岩 Sm-Nd	177±31	周肃等,2001
	辉绿岩	锆石 U-Pb	162.9±2.8	钟立峰等,2006
	纯橄岩	锆石 U-Pb	130.0±2.8	徐向珍,2009
泽当	枕状玄武岩	全岩 Sm-Nd	175±20	韦栋梁等,2006
仁布	石英闪长岩	锆石 U-Pb	126±1.5	Malpas et al., 2003
白朗	角闪岩	角闪石 Ar-Ar	123.3±3.1	Guilmette et al., 2009
桑桑	辉绿岩	锆石 U-Pb	125.2±3.4	夏斌等,2008
仲巴	辉绿岩	锆石 U-Pb	125.7±0.9	Dai et al., 2012
休古嘎布	辉绿岩	锆石 U-Pb	122.3±2.4	韦振权等,2006
	玄武岩	全岩 Sm-Nd	147±25 Ma	Miller. et al., 2003
普兰	辉绿岩	锆石 U-Pb	120.2±2.3	李剑锋等,2006
东坡	辉长岩	锆石 U-Pb	128±1.1	熊发挥等,2013
纳达尔(Nindar)	角闪岩	角闪石 Ar-Ar	110~130	Gweltaz et al., 2004
	辉长岩	全岩 Rb-Sr 法	140±32	Ravikant et al., 2004
穆斯林巴赫	斜长花岗岩	锆石 U-Pb	80.2±1.5	Mehrab et al., 2007
瓦济里斯坦	斜长花岗岩	全岩 K-Ar	77±2	Arif,2006

3 典型铬铁矿床对比

3.1 罗布莎铬铁矿床

罗布莎铬铁矿产于印度河-雅鲁藏布江缝合带的东段,罗布莎超基性岩体的南部为印度地块北缘的三叠系复理石建造,北部为陆缘山前磨拉石和冈底斯-念青唐古拉火山岩浆岩带,均呈构造接触(图 2)。

罗布莎岩体主要由地幔橄榄岩和堆晶杂岩组成(表 2),地幔橄榄岩以方辉橄榄岩和纯橄岩为主,含少量二辉橄榄岩,岩相分带明显,铬铁矿赋存于两个岩相分带且靠近方辉橄榄岩岩相带一侧,方辉橄榄岩往往比较新鲜,几乎不发育蛇纹石化。矿体的分

布受岩相分带的总体制约,具有“成群出现,分段集中”的现象,多呈形态不规则的似脉状、透镜状产出,还有反映塑性流动变形的蝌蚪状、哑铃状、串珠状等。矿石类型主要呈致密块状和浸染状,还包括豆状(瘤状)(图 3a),斑杂状和条带状等,豆体大小一般 0.5~1cm,呈椭球状,部分发育塑性变形,呈蝌蚪状(图 3b)。矿石化学组成以富 Cr、贫 Al、高 Mg 为特征,平均品位可达 52.63%,MgO 含量在 14.77%~19.04%之间。

3.2 科希斯坦铬铁矿

科希斯坦超基性岩体(又称季佳尔岩体)位于印度河缝合带、科希斯坦岛弧的南部(图 1),出露面积达 150km²,构成了科希斯坦弧的最南部分。岩体

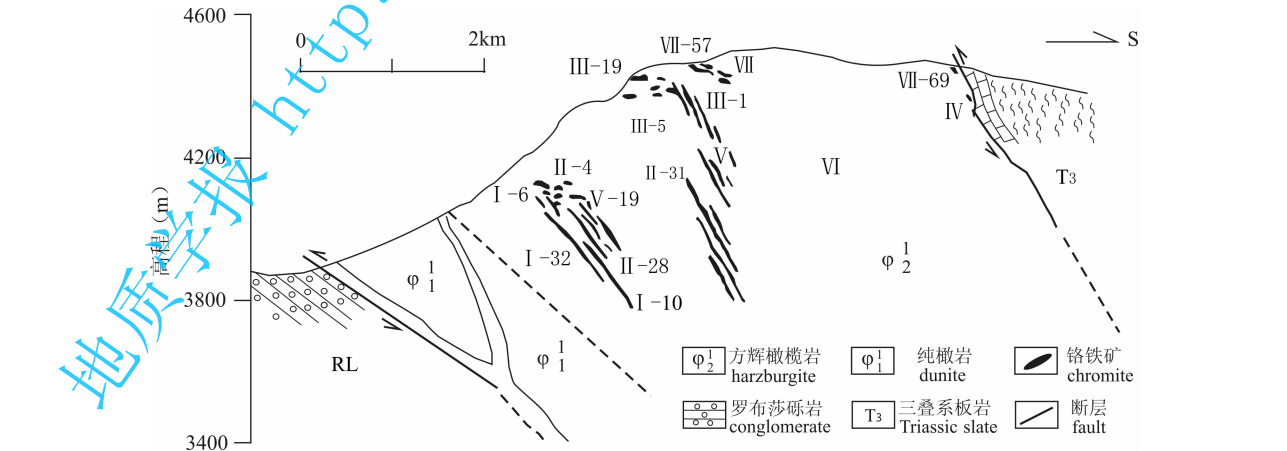


图 2 西藏罗布莎铬铁矿床矿区剖面图(据洪俊,2011)

Fig. 2 The geological section of the Luobusha chromite mine, Tibet (after Hong Jun, 2011)

表 2 新特提斯缝合带中代表性铬铁矿床地质特征一览表

Table 2 The geologic characteristics of the typical chromite deposits in the middle of the Neotethys suture zone

序号	岩体名称	位置	规模 (km ²)	岩石组合	围岩	构造环境	侵位时代
1	马拉坎德	印度河缝合带南部	约 100	主要由超镁铁质构造岩和超镁铁质-镁铁质堆晶岩组成。构造岩主要为方辉橄榄岩(90%)；超基性堆晶岩由方辉橄榄岩(约占 80%)和纯橄橄榄岩组成(约占 20%)，其上发育镁铁质堆晶岩，包括辉长岩和少量蛇纹岩	构造侵位于前寒武纪到三叠纪的变沉积岩中		
2	瓦济里斯坦	中部瓦齐里斯坦-贝拉蛇绿岩带	约 2000	超镁铁质岩石包括方辉橄榄石、纯橄橄榄岩，其中包括斜辉辉橄榄岩，产出有豆荚状铬铁矿	古近纪灰岩和页岩		辉长岩中 角闪石 ³⁹ Ar- ⁴⁰ Ar 年龄约为 90 Ma
3	穆斯林巴赫	中部瓦齐里斯坦-贝拉蛇绿岩带	超过 1000	蛇绿岩单元包括底部的变质橄橄榄岩、超镁铁质和镁铁质堆晶岩、席状岩墙和粗玄岩岩墙以及含放射虫硅质岩等。超基性岩主要由方辉橄榄岩(70%)和纯橄橄榄岩组成	侏罗纪罗来群灰岩、页岩，以及白垩纪的灰岩	洋中脊向俯冲带之上过渡的构造环境	粗玄岩岩脉 ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar 测量，认为蛇绿岩侵位时间为 65~71 Ma
4	贝拉	中部瓦齐里斯坦-贝拉蛇绿岩带	超过 1000	超镁铁质岩石，包括残余方辉橄榄岩，以及少量纯橄橄榄岩和二辉橄橄榄岩，具有不同程度蛇纹石化；基性-中性-酸性深成岩，包括辉长岩、内长岩、石英闪长岩和斜长花岗岩	侏罗纪白垩纪灰岩，页岩	存在争议，高弧环境到大洋环境的意见都有	角闪石 Ar-Ar 测量结果表明侵位时代在 65 Ma
5	罗布莎	雅鲁藏布江蛇绿岩带(中国西藏)	约 70	主要包含两个大岩相带：方辉橄橄榄岩和纯橄岩岩相带，方辉橄橄榄岩岩相带中含有大量纯橄橄榄岩透镜体，二辉橄橄榄岩少	北部为古近系砾岩，南部为三叠系页岩，均为构造接触	洋中脊向俯冲带之上过渡的构造环境	古新世

南部由含纯铬铁矿纯橄岩、方辉橄榄岩和辉石岩组成，发育层状构造。岩体东北部主要由从辉长岩、斜长岩、辉石岩以及苏长岩变质形成的石榴石麻粒岩构成。

北部麻粒岩的全岩 Sm-Nd 和矿物分析表明，岩体经历两个阶段的变质作用，变质作用与科希斯坦-亚洲板块碰撞有关，其时代在 102~85 Ma 之间 (Treloar et al., 1989)。季佳尔岩体南部大面积出露的层状超镁铁质-镁铁质岩石，构造侵位于印度板块片麻岩之上，侵位时代大约在 50~45 Ma。

Kausar 等(1998)认为超基性岩体在成因上与分离结晶作用有关，形成于科希斯坦岛弧早期岩浆作用阶段的高温、高压条件下，其构造背景应属于与俯冲作用相关的环境。铬铁矿呈透镜状产出，其周围为浸染状、条带状矿体。矿石化学成分为：Cr₂O₃ 45%~55%，Fe₂O₃ 14.0%，Cr/Fe 比值小于 2.8。

3.3 马拉坎德铬铁矿

马拉坎德岩体呈近东西向延伸，东起瑟格哈格特，西止吉拉，长约 25 km，南北宽 3~6 km，向北倾斜，倾角为 60°~85°。岩体上覆前寒武系，下伏古生代灰岩，均呈构造接触关系。蛇绿岩主要包括地幔橄橄榄岩和堆晶岩，地幔橄橄榄岩主要由方辉橄橄榄岩(约占 90%)和纯橄岩(约占 10%)组成，岩体强烈变形，发育等斜褶皱构造。根据矿体形态和矿石构造特征分 3 种类型：①层状铬铁矿，是矿区相对普遍的类型，矿体赋存在蛇绿岩剖面上部层状超基性岩中，靠近纯橄岩底部近水平延伸，单层厚度 3~4.5 m，最大厚度达 9 m，矿石呈中等稠密浸染状构造；②不规则形态矿体，出露于边缘带的层状方辉橄橄榄岩-纯橄岩以及纯橄岩透镜体中，呈板状、透镜状、脉状等，矿石为致密块状；③豆荚状铬铁矿，产于岩体北部海鲁沙矿群内，单个矿体规模不大，矿石主要为致密块状，还包括浸染状、结核状、网脉状构造。

3.4 穆斯林巴赫铬铁矿

穆斯林巴赫铬铁矿产于巴基斯坦中部瓦济里斯坦-穆斯林巴赫-贝拉新特提斯蛇绿岩带的中段，该带总体呈反“S”形展布，南北向延伸约 1000 km，宽约 50 km，约有 10 个规模悬殊的岩体，穆斯林巴赫为其中最大的岩体群，穆斯林巴赫蛇绿岩由 3 套构造岩片组成：下部位巴赫混杂岩带，包括三叠系—侏罗系沉积岩、侏罗纪—白垩纪基性火山岩以

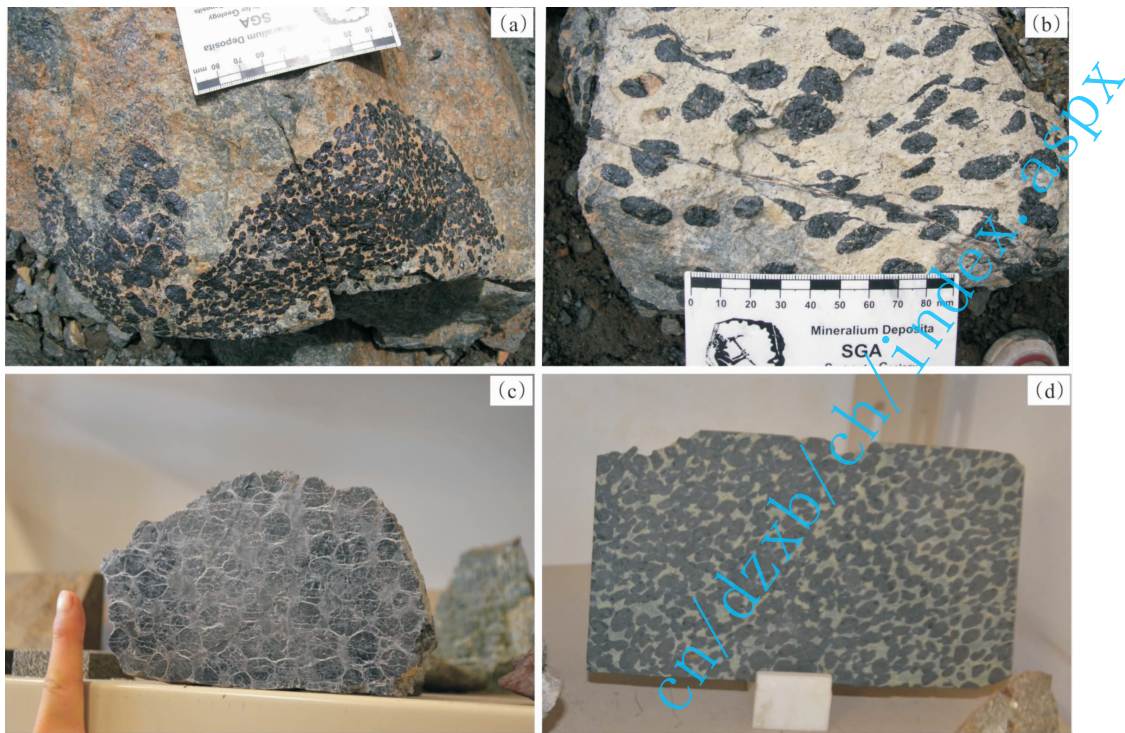


图 3 罗布莎铬铁矿床(a,b)和穆斯林巴赫铬铁矿床(c,d)典型矿石构造

Fig. 3 The typical ore textures from the Luobusha (a,b) and Muslim Bagh (c,d) chromite deposit

(a) — 罗布莎矿床, 豆状矿石, 可见豆体直径大小明显不同的两个群体; (b) — 罗布莎矿床, 矿体受塑性变形改造, 豆体略有定向排列, 部分呈蝌蚪状; (c) — 穆斯林巴赫矿床, 蛇纹石化豆状铬铁矿石; (d) — 穆斯林巴赫矿床, 豆体直径 3~6 mm, 具有定向排列特征

(a) — The pisolitic ore from the Luobusha deposit, two groups with quite different size ; (b) — the ore from the Luobusha deposit suffered from plastic deformation, showing tadpole-looking feature; (c) — the serpentinized pisolitic ore from the Muslim Bagh deposit; (d) — the pisolitic ore from the Muslim Bagh deposit, 3~6 mm size, discovered directional arrangement

及白垩纪放射虫硅质岩,被蛇纹石化橄榄岩、辉长岩等混杂岩逆冲覆盖;中部为一套绿片岩相-角闪岩相变质岩,呈叠瓦状断续出露,其原始层序因受强烈剪切改造无法识别;上部主要由蛇纹石化方辉橄榄岩、纯橄岩、异剥橄榄岩等超基性岩岩体组成,纯橄岩在方辉橄榄岩中呈透镜体或贯入体产出,发育蛇纹石化。层序向上出现层状辉长堆晶岩和席状岩墙群,大量辉长岩、辉长辉绿岩和少量斜长花岗岩脉侵入(图 4)。

铬铁矿主要分布在江格陀加尔岩体的西部,萨布兰陀加尔、尼赛岩体的中西部。矿体主要产在堆晶岩之下的地幔橄榄岩中,主要为斜方辉橄岩和纯橄岩,矿体赋存在纯橄岩与斜方辉橄岩接触带附近,且靠近纯橄岩一侧内。矿体呈似层状、透镜状、雪茄状、脉状、条带状产出,与围岩的接触关系清楚截然。在江格陀加尔岩体段已发现矿体 40 余个,单个矿体规模为 1000~1500 t。矿石主要为半自形-他形粒状结构,致密块状、豆状(图 3c,d),其次为浸染状构造。在堆晶纯橄岩内,矿体以似层状为主,

矿层厚度从几毫米至几米不等,为不同稠密程度的浸染状矿石,多产于纯橄岩的顶部。在萨布兰陀加尔-尼赛岩体段,岩性以斜方辉橄岩为主,含有大量纯橄岩透镜体,目前已发现 70 余个矿体,全部赋存在蛇纹石化的纯橄岩内,呈豆荚状、铅笔状、团块状和网脉状。

4 区域成矿规律对比

4.1 成矿类型及构造环境

Thayer(1970)根据豆荚状铬铁矿矿石中 Cr_2O_3 和 Al_2O_3 含量的差异将其分为富铬型和富铝型:富铬型铬铁矿中 Cr_2O_3 含量大于 45%, Al_2O_3 小于 20%,富铝型 Cr_2O_3 含量小于 45%, Al_2O_3 大于 20%,分别对应冶金级和耐火级矿石。富铬型和富铝型铬铁矿分属于两套蛇绿岩系列,形成于不同的构造环境下,前者形成于岛弧或弧前盆地,对应于俯冲带之上环境;后者则形成于扩张洋脊及弧后盆地环境(鲍佩声,2009)。从典型矿床的铬铁矿成分范围(表 3)来看,巴基斯坦铬铁矿的造矿铬尖晶石总

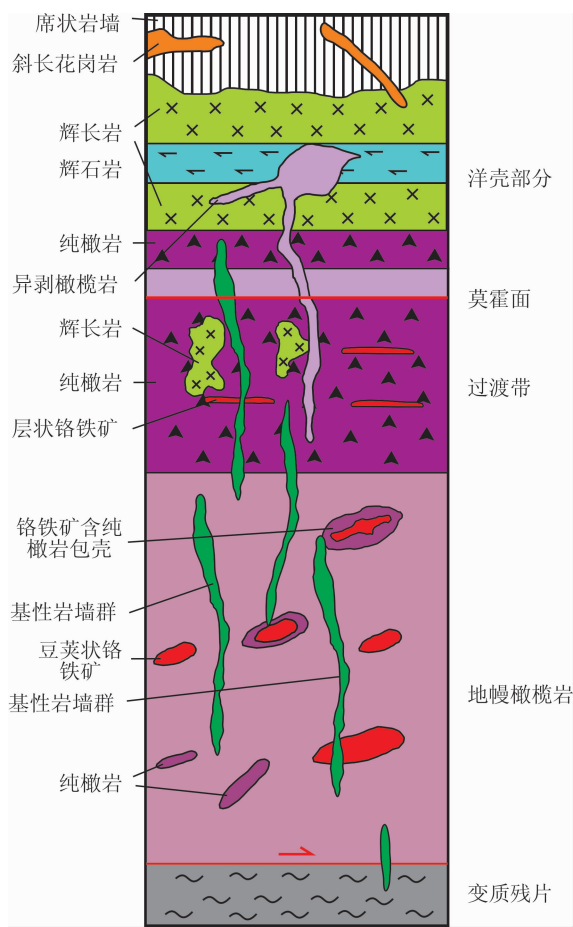


图 4 穆斯林巴赫蛇绿岩层序示意图(未按比例)
(据 Kakar et al. ,2014 改绘)
Fig. 4 Schematic log of the Muslim Bagh ophiolite
showing the ophiolite suite (Not to scale)
(modified after Kakar et al. ,2014)

体上表现富铬、贫铝的特征,穆斯林巴赫、瓦齐里斯坦中铬铁矿 Cr_2O_3 含量都在 45%~64% 之间, Al_2O_3 含量在 10%~20% 之间,和我国罗布莎铬铁矿的成分非常相似,属于富铬型铬铁矿。

豆荚状铬铁矿组分特征受蛇绿岩构造环境的制约(鲍佩声,2009;王希斌等,2010)。关于雅鲁藏布江蛇绿岩带的构造背景存在多种认识,包括洋脊型(MOR)(Nicolas et al. , 1981; Girardeau et al. , 1985)和俯冲带之上(SSZ)(Pearce et al. ,1984; 王成善等,2005)。近年来,越来越多的观点认为罗布莎蛇绿岩形成于复合构造环境,即早期为 MOR 环境,后期经历了 SSZ 环境的改造(徐向珍,2009;周二斌等,2011)。在雅鲁藏布江蛇绿岩带的西段,对普兰、东坡和达机翁蛇绿岩的研究也认为,它们经历了 MOR 和 SSZ 两种构造环境(杨经绥等,2011;徐向珍等,2011;连东洋等,2014)。

穆斯林巴赫蛇绿岩中堆晶岩、岩脉地球化学特征反映其属于俯冲带之上(SSZ)型,形成于初始岛弧环境(Kakar et al. ,2013,2014)。铬尖晶石是进行蛇绿岩动力学研究最有效指示剂(Dick and Bullen,1984),地幔橄榄岩中副矿物铬尖晶石的 $\text{Cr}^\#$ - $\text{Mg}^\#$ 关系对其构造环境的判别具有很好指示意义(Arai,1994)。Arif(2006)通过对穆斯林巴赫、贝拉、瓦济里斯坦等蛇绿岩中铬尖晶石研究认为,其 $\text{Cr}^\#$ 值变化范围较大,形成于岛弧与大洋中脊的过渡构造环境,比如边缘海盆或俯冲带。

4.2 豆荚状铬铁矿成因

豆荚状铬铁矿的成因一直是铬铁矿成矿理论研究的焦点,但仍未有统一的认识。王希斌(1987)、鲍佩声等(1999)基于对罗布莎地幔橄榄岩矿物学研究提出豆荚状铬铁矿是原始地幔高度熔融再造的产物;现阶段国际上流行的观点认为岩石/熔体相互反应更适合解释豆荚状铬铁矿的成因,提出在俯冲带背景下呈地幔楔状的方辉橄榄岩与 H_2O 饱和玻安岩熔体发生熔体-地幔岩相互反应,形成了富含铂族元素合金的铬铁矿(Zhou et al. ,1996,1997,2005;

表 3 新特提斯缝合带典型铬铁矿的成分范围(%)

Table 3 Composition (%) of chrome spinels the typical chromite deposits in the Neotethys suture zone

岩体名称	科西斯坦	马拉坎德	瓦济里斯坦	穆斯林巴赫	贝拉	罗布莎
SiO_2	0.25~0.39	0.00~0.06	0.34~0.37	0.00~0.01	0.00~0.02	0.00~0.17
TiO_2	0.21~0.27	0.18~0.30	0.09~0.17	0.21~0.38	0.16~0.26	0.11~0.24
Al_2O_3	1.54~16.13	7.95~21.70	9.25~19.50	9.22~17.63	9.40~22.69	8.31~12.19
Cr_2O_3	50.85~64.29	45.69~64.10	49.22~62.94	49.37~61.67	45.54~63.12	54.77~61.63
Fe_2O_3	3.17~4.36	2.81~4.01	0.10~2.94	4.38~4.67	0.84~4.35	1.63~5.97
FeO	16.47~19.00	11.72~12.66	12.65~13.15	8.86~12.73	10.21~11.91	8.16~12.22
MnO	0.33~0.56	0.00~0.54	0.12~0.24	0.16~0.26	0.08~0.16	0.17~0.32
MgO	8.41~11.95	14.29~14.36	13.18~14.40	14.26~16.17	13.97~17.82	10.63~16.73
NiO	0.00	0.00~0.11	0.00~0.10	0.09~0.12	0.00~0.17	0.01~0.19

数据来源:Arif et al. ,1993; 洪俊,2011; Jan et al. , 1990; Khan,2000。

Rollinson et al., 2005); 白文吉(2000; 2005)、杨经绥(2007)等在罗布莎矿区发现金刚石、SiC、呈斯石英假象的柯石英, 提出豆荚状铬铁矿的深部地幔成因(Yang et al., 2007), 熊发挥等(2013, 2014)在罗布莎矿床中识别不同成因类型的铬铁矿, 认为豆荚状铬铁矿是多阶段形成, 经历了从深部到浅部, 不同构造环境转变的演化过程。

穆斯林巴赫铬铁矿的成因也存在地幔熔融残余和熔体/地幔岩相互反应两种观点(张洪瑞等, 2013), 但基本摒弃了早期的岩浆结晶分异的观点, 都认为铬铁矿是源自地幔, 只是熔融分异过程和机制不同。铬铁矿矿体和赋矿地幔橄榄岩均发生了高温塑性变形, 豆荚状构造被水平剪切作用改造成条带状, 局部出现拉分构造, 随后的洋壳仰冲和大陆碰撞时的矿床最终就位于板块缝合带中。

通过对比铬铁矿产出形态、赋矿围岩以及铬尖晶石成分, 科希斯坦铬铁矿明显不同于穆斯林巴赫、贝拉等典型的豆荚状铬铁矿。科希斯坦铬铁矿产于层状镁铁质-超镁铁质杂岩中, 含矿的纯橄榄岩也发育层状构造, 属于莫霍面以上的堆晶成因纯橄榄岩, 而非地幔橄榄岩的组成部分。另外, 铬铁矿以浸染状为主, 呈层状、条带状构造, 区别于典型的豆荚状构造, 其成因类似于层状铬铁矿, 属于晚期结晶分异的产物。

4.3 成矿规律对比

(1) 时间上分布规律: 前面已总结前人对新特提斯缝合带不同蛇绿岩的测年结果, 罗布莎和昂仁地区蛇绿岩形成时代主要为中晚侏罗世(160~177 Ma), 雅鲁藏布江中段日喀则地区和西段休古嘎布、普兰蛇绿岩的形成时代稍晚, 为晚侏罗世一早白垩世(120~140 Ma); 巴基斯坦北部印度河蛇绿岩带形成时代(110~140 Ma)与雅鲁藏布江西段大致相当, 但巴基斯坦中西部瓦济里斯坦-贝拉蛇绿岩带形成时代明显较晚(70~80 Ma)(Xiong, 2011)。总体来看, 新特提斯缝合带中蛇绿岩的形成时代不尽相同, 自东向西大致呈逐渐变晚的趋势。蛇绿岩构造侵位的时代代表了铬铁矿构造侵位的时间。雅鲁藏布江蛇绿岩构造时代为古新世—始新世期间(65~45 Ma), 与巴基斯坦境内蛇绿岩构造侵位的时代相近(~65 Ma), 这和莫宣学等(2005)确定印度-亚洲大陆初始碰撞的时间也是一致的。

(2) 成矿类型分布规律: 完整的蛇绿岩剖面中通常有两个部位赋存铬铁矿床, 一是产于莫霍面以上堆晶岩中的层状铬铁矿床; 另一种为形成于莫霍面

以下地幔橄榄岩中的豆荚状铬铁矿床。矿体的形态、赋矿岩相是区分两类不同成因铬铁矿的主要标志, 前者呈层状产出, 含矿围岩为成分单一的纯橄榄岩相, 科希斯坦铬铁矿属于该种类型, 成矿规模往往不大; 后者呈不连续分布的豆荚状、透镜状, 含矿岩相多为贫辉石的方辉橄榄岩+纯橄榄岩杂岩相, 成矿部位主要在地幔橄榄岩的上部, 在莫霍面以下1~2 km范围以内。穆斯林巴赫、瓦济里斯坦、贝拉以及马拉坎德铬铁矿与罗布莎铬铁矿都具有以上相似的特征。

(3) 与方辉橄榄岩+纯橄榄岩的岩相组合密切相关: 罗布莎铬铁矿中矿体的分布严格受构造岩相带的控制, 即产于方辉橄榄岩与纯橄榄岩岩相分界附近, 并靠近方辉橄榄岩一侧, 雅鲁藏布江西段的蛇绿岩中地幔橄榄岩也具有良好的岩相分带(黄圭成, 2006; 黄圭成等, 2007); 巴基斯坦穆斯林巴赫铬铁矿含矿围岩以方辉橄榄岩和纯橄榄岩为主, 绝大部分产于蛇纹石化纯橄榄岩中, 均不含或者含极少的二辉橄榄岩。在地幔岩石部分熔融作用过程中, 单斜辉石熔融释放出铬进入熔体, 是铬富集成矿的重要来源, 部分熔融达到一定程度, 单斜辉石消失, 形成方辉橄榄岩和纯橄榄岩, 所以含矿蛇绿岩中一般不出现大量二辉橄榄岩。

(4) 岩体内的塑性剪切带具有一定控矿作用: 矿体、矿体群和矿带的总体产状受岩体产状和构造变形的制约, 即它们具有同构造变形的分布规律, 各矿体、矿群的产状和构造变形取决于它们在整个岩体变形构造中的部位。铬铁矿在地幔演化和高温流变过程中, 在剪切应力作用下与围岩一起遭受塑性剪切流变, 导致矿体沿着一定的叶理、面理延伸方向集中分布。罗布莎岩体内矿体沿着岩石变形带成群出现, 分段集中, 并且同围岩一起弯曲褶皱, 康金拉矿区豆状结构矿石中大多数豆体呈压扁的椭球状, 部分豆体具有明显的塑性变形和定向排列特征; 穆斯林巴赫矿床中铬铁矿体拉长, 平行于线理方向分布, 部分地区地幔橄榄岩发育等斜褶皱, 矿体往往出现在褶皱两翼位置, 围岩及矿体的褶皱变形一般发生在成矿的早期阶段, 是在剪切应力的作用下所产生的塑性变形效应所致, 为此矿体呈现出“缓者厚, 陡者薄”的特点。

(5) 受蛇绿岩形成的大地构造环境控制: 大洋环境的俯冲带之上(SSZ)是富铬型铬铁矿形成的有利构造环境(Pearce et al., 1984; Zhou et al., 1996)。新特提斯缝合带中典型豆荚状铬铁矿床研究表明,

其形成的构造环境为岛弧相关环境或者经历了 MOR 向 SSZ 构造环境的过渡,如穆斯林巴赫铬铁矿、瓦济里斯坦铬铁矿(Arif et al., 2006),罗布莎铬铁矿(杨经绥等, 2011; 周二斌等, 2011)。从 Cr 的富集机制来看,在俯冲带构造背景下,高含量的水(流体)的存在不仅降低了橄榄岩部分熔融所需温度,提高其部分熔融程度,促进辉石中 Cr 的释放;同时由于抑制了熔体中硅酸盐格架的形成,有利富 Cr 熔体的聚集(Sergey and Chris, 2002)。

4.4 找矿方向探讨

产于新特提斯缝合带的豆荚状铬铁矿基本都属于富铬型,大型富铬型铬铁矿的形成需具备以下几个条件:一是地幔橄榄岩部分熔融程度高,出现明显的岩相分带,特别是跟纯橄榄岩和方辉橄榄岩岩相组合密切相关;二是岩体具有一定的规模,铬铁矿赋存在超基性岩体中,岩体规模决定了找矿空间的大小;三是岩体的塑性流变作用强。在雅鲁藏布江蛇绿岩带的西段,东坡岩体、普兰岩体以及休古嘎布岩体具备良好的成矿条件,并已发现多处矿化点,是良好的找矿前景区。巴基斯坦中部蛇绿岩带,除了穆斯林巴赫岩体外,瓦济里斯坦岩体以及南部的贝拉岩体,工作程度低,但岩体规模大,具良好的岩相分带,成矿条件有利。

根据蛇绿岩剖面中成矿类型的分布,产于莫霍面以上层状镁铁质-超镁铁质杂岩中的铬铁矿,矿石类型以浸染状为主,品位较低,矿床规模往往不大,如巴基斯坦北部的科希斯坦岩体中发现的铬铁矿化就属于该种类型,不宜作为找矿重点岩体,而是以此为找矿线索,追踪更有利成矿的地幔橄榄岩隐伏岩体。

通过典型矿床中矿体赋存规律的对比发现,罗布莎矿床的最有利寄主岩相为方辉橄榄岩,矿体几乎产于两个岩相分带附近,且靠近方辉橄榄岩的一侧,而穆斯林巴赫矿床中绝大多数矿体赋存在蛇纹石化纯橄岩中。这种差异可能是岩体受到多期次逆冲推覆作用的影响,层序发生倒转引起的。所以,下一步找矿工作中,对于具体岩体,需要详细解析层序剖面,识别纯橄岩与方辉橄榄岩的岩相分带,将岩相分带界线两侧作为重点找矿方向。

5 结论

(1)新特提斯缝合带中蛇绿岩的形成时代主体为中侏罗世一晚白垩世,自东向西大致呈逐渐变新的趋势;蛇绿岩构造侵位的时代相近,为古新世一始

新世期间。

(2)马拉坎德、瓦济里斯坦、穆斯林巴赫及贝拉铬铁矿,与罗布莎矿床相似,均属于富铬型铬铁矿,产于 SSZ 或 SSZ 与 MORB 的过渡构造背景下。

(3)瓦济里斯坦、贝拉蛇绿岩,岩体规模较大,具良好的岩相分带,成矿条件有利,是良好的找矿靶区。

(4)穆斯林巴赫与罗布莎矿床的有利赋矿岩相不同,下一步工作中需针对具体蛇绿岩,解析层序剖面,识别纯橄岩与方辉橄榄岩的岩相分带,确定有利找矿部位。

参考文献

- 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,周美付,Robinson P T,方青松. 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,1~110.
- 鲍佩声,王希斌,彭根永. 1999. 中国铬铁矿床. 北京:科技出版社,1~350.
- 鲍佩声. 2009. 再论蛇绿岩中豆荚状铬铁矿的成因-质疑岩石/熔体反应成矿说. 地质通报, 28(12): 1742~1761.
- 洪俊. 2011. 西藏罗布莎铬铁矿床铬尖晶石对比研究及成矿演化探讨. 中国地质大学(北京)硕士学位论文,1~96.
- 黄圭成. 2006. 西藏雅鲁藏布江西段蛇绿岩及铬铁矿研究. 中国地质大学(北京)博士学位论文,1~130.
- 黄圭成,徐德明,雷义均. 2007. 西藏西南部达巴-休古嘎布绿岩带铬铁矿的找矿前景. 中国地质, 34(4): 668~674.
- 李海平,张满社. 1996. 西藏罗布莎蛇绿岩的地球化学特征及形成环境探讨. 西藏地质, 2: 55~61.
- 李剑峰,夏斌,刘立文,徐力峰,张玉泉,杨之青. 2008. 西藏普兰地区拉昂错蛇绿岩中辉绿岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 27(10): 1739~1743.
- 连东洋,杨经绥,熊发挥,刘飞,王云鹏,周文达,赵一钰. 2014. 雅鲁藏布江蛇绿岩带西段达机翁地幔橄榄岩组成特征及其形成环境分析. 岩石学报, 30(8): 2164~2184.
- 莫宣学,董国臣,赵志丹,周肃,王亮亮,邱瑞照,张风琴. 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息. 高校地质学报, 11(3): 281~290.
- 沈百花,王立新. 2008. 巴基斯坦蛇绿岩及铬铁矿分布. 新疆地质, 26(2): 195~197.
- 王成善,李亚林,刘志飞,李祥辉,唐菊兴,Rejean H. 2005. 雅鲁藏布江蛇绿岩再研究:从地质调查到矿物记录. 地质学报, 79(3): 323~330.
- 王希斌,鲍佩声. 1987. 豆荚状铬铁矿的成因——以西藏自治区罗布莎铬铁矿床为例. 地质学报, (2): 166~181.
- 王希斌,郝梓国,鲍佩声,彭永根. 1992. 中国造山带蛇绿岩中铬铁矿的成因类型及其成矿的若干特征. 矿床地质, (1): 21~34.
- 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.

- 王万国,杨君雅,陈莉. 2009. 青藏高原的蛇绿岩与铬铁矿. 地质通报, 28(12): 1762~1768.
- 韦栋梁,夏斌,周国庆,王冉,钟立峰,万哨凯. 2006. 西藏泽当蛇绿岩的 Sm-Nd 等时线年龄及其意义. 地球学报, 27(1): 31~34.
- 韦振权,夏斌,张玉泉,王冉,杨之青,韦栋梁. 2006. 西藏休古嘎布蛇绿岩中辉绿岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 大地构造与成矿学, 30(1): 93~97.
- 吴浩若. 1988. 西藏南部雅鲁藏布蛇绿岩带吓鲁硅岩中的侏罗—白垩纪放射虫化石及其地质意义. 中国科学院地质研究所集刊, 3: 191~212.
- 吴浩若. 2000. 西藏南部下鲁硅岩晚侏罗世罩笼虫(放射虫)新材料. 现代地质, 14(3): 301~306.
- 吴良士. 2010. 巴基斯坦伊斯兰共和国地质构造与区域成矿. 矿床地质, 29(1): 192~194.
- 夏斌,李建峰. 2008. 西藏桑桑蛇绿岩辉绿岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄: 对特提斯洋盆发育的年代学制约. 地球化学, 37(4): 399~403.
- 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. 北京: 中国地质科学院博士学位论文, 1~165.
- 徐向珍,杨经绥,郭国林,李金阳. 2011. 雅鲁藏布江缝合带西段普兰蛇绿岩中地幔橄榄岩的岩石学研究. 岩石学报, 27(11): 3179~3196.
- 熊发挥,杨经绥,巴登珠,刘钊,徐向珍,风光英,刘露露,许继峰. 2014. 西藏罗布莎不同类型铬铁矿的特征及成因模式讨论. 岩石学报, 30(8): 2137~2163.
- 熊发挥,杨经绥,刘钊. 2013. 豆荚状铬铁矿多阶段形成过程的讨论. 中国地质, 40(3): 820~839.
- 杨经绥,巴登珠,徐向珍,李兆丽. 2010. 中国铬铁矿床的再研究及找矿前景. 中国地质, 37(4): 1141~1150.
- 杨经绥,徐向珍,李源,李金阳,巴登珠,戎合,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: 蛇绿岩型金刚石分类的提出. 岩石学报, 27(11): 3171~3178.
- 张浩勇,巴登珠,郭铁鹰. 1996. 罗布莎铬铁矿研究. 拉萨: 西藏人民出版社, 1~85.
- 张浩勇,巴登珠,郭铁鹰,莫宣学,薛君治. 1999. 西藏自治区曲松县罗布莎铬铁矿床研究. 拉萨: 西藏人民出版社, 79~85.
- 张洪瑞,侯增谦,贾敬伍,胡茂德,杨竹森. 2013. 巴基斯坦穆斯林巴赫铬铁矿床. 矿床地质, 32(5): 1072~1074.
- 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.
- 周二斌,杨竹森,江万,侯增谦,郭福生,洪俊. 2011. 藏南罗布莎铬铁矿床铬尖晶石矿物学与矿床成因研究. 岩石学报, 27(7): 2060~2072.
- 周肃,莫宣学, Mahoney J. J. 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.
- Arai S., Abe N. 1994. Podiform chromitite in the arc mantle: Chromitite xenoliths from the Takashima alkali basalt Southwest Japan arc. Miner. Deposita, 29: 434~438.
- Arif M., Jan M. Q. 1993. Chemistry of chromite and associated phases from the Shangla ultramafic body in the Indus suture zone of Pakistan. In: Searle M. P., Treloar P. J., eds. Himalayan Tectonics. Geological Society of London Special Publication, 74: 101~112.
- Arif M., Qasim J. 2006. Petrotectonic significance of the chemistry of chromite in the ultramafic-mafic complexes of Pakistan. Journal of Asian Sciences, 27: 628~646.
- Dai Jingen, Wang Chengshan, Li Yalin. 2012. Relicts of the Early Cretaceous seamounts in the central-western Yarlung Zangbo suture zone, Southern Tibet. Journal of Asian Earth Sciences, 53: 25~37.
- Dick H. J. and Bullen T. 1984. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. Contributions to Mineralogy and Petrology, 86: 54~76.
- Girardeau J., Mercier J. C. C., Cao Yougong. 1985. Structure of the Xigaze ophiolite, Yarlung Zangbo suture zone, southern Tibet, China: Genetic implications. Tectonics, 4: 267~288.
- Gweltaz M., Herve B., Stephane G. 2004. The South Ladakh ophiolites (NW Himalaya, India): an intra-oceanic tholeiitic arc origin with implication for the closure of the Neo-Tethys. Chemical Geology, 203: 273~303.
- Guilmette C., Hebert R., Wang Chengshan, Villeneuve M. 2009. Geochemistry and geochronology of the metamorphic sole underlying the Xigaze Ophiolite, Yarlung Zangbo Suture Zone, South Tibet. Lithos, 112(1~2): 149~162.
- Jan M. Q., Windley B. F. 1990. Chromian spinel-silicate chemistry in ultramafic rocks of the Jijal complex, Northwest Pakistan. Journal of Petrology, 31: 667~715.
- Kakar M. I., Khalid M., Andrew C. K., Khalid M. 2013. Petrology of the mantle rocks from the Muslim Bagh Ophiolite, Balochistan, Pakistan. Journal of Himalayan Earth Sciences, 46(2): 101~112.
- Kakar M. I., Andrew C. K., Khalid M., Alan S. C., Mehrab K., McDonald I. 2014. Supra-subduction zone tectonic setting of the Muslim Bagh Ophiolite, northwestern Pakistan: Insights from geochemistry and petrology. Lithos, 202~203: 190~206.
- Kausar A. B., Picard C., Guillot S. 1998. Evidence for high-temperature pressure crystallization during early magmatism of the Kohistan arc, Northern Pakistan. In: Hamidullah S., Lawrence R. D., Jan M. Q., eds. Proceedings of the 13th HKT International Workshop. Geological Bulletin University of Peshawar (Special Issue), 31: 91~93.
- Khan S. R. 2000. Geology, petrology and geochemistry of the Waziristan ophiolite, North Waziris-tan, Pakistan. PhD dissertation, University of Peshawar, Pakistan.
- Leblanc M., Nicolas A. 1992. Ophiolitic chromitites. International Geological Review, 34: 653~686.
- Malpas J., Zhou Meifu, Robinson P. T. 2003. Geochemical and geochronological constraints on the origin and emplacement of the Yarlung Zangbo ophiolites, Southern Tibet. In: Dilek Y., Robinson P. T., et al., eds. Ophiolites in Earth History. London: Special Published, 147~164.
- Mehrab K., Andrew C. K., Khalid M. 2007. Formation and tectonic evolution of the Cretaceous-Jurassic Muslim Bagh ophiolitic tectonic setting of ophiolites. Journal of Earth Sciences, 31: 112~127.
- Miller C., Thoni M., Frank W. 2003. Geochemistry and tectonomagmatic affinity of the Yungbwa ophiolite, SW Tibet. Lithos, 66(3): 155~172.

- Nicolas A, Girardeau J, Marcoux J, Dupre B, Wang Xibin, Cao Yougong. 1981. The Xigaze ophiolite (Tibet): A peculiar oceanic lithosphere. *Nature*, 294: 414~417.
- Pearce J A, Lippard S J, Robert S. 1984. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. *Marginal Basin Geology, Volcanic and Ancient Marginal Basins*. London: Black-well Scientific Publication, 77~94.
- Ravikant V, Tanpan P, Dipankar D. 2004. Chromites from the Nidar ophiolite and Karzok complex, Transhimalaya, eastern Ladakh: their magmatic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 177~184.
- Rollinson, H. 2005. Chromite in the mantle section of the Oman ophiolite: a new genetic model. *The Island Arc*, 14: 542~550.
- Sengor A M C. 1987. Tectonics of the Tethysides: Orogenic collage development in a collisional setting. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 15: 213~244.
- Sengor A M C, Natalin B A. 1996. Palaeotectonics of Asia: Fragments of a synthesis. In: Yin A, Harrison M, eds. *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 443~486.
- Sergey M, Chris B. 2002. Role of water in the origin of podiform chromite deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 203: 235~243.
- Sorkhabi R, Heydari E. 2008. Asia out of Tethys: Foreword preface. *Tectonophysics*, 451(1~4): 3171~3178.
- Thayer T P. 1970. Chromite segregation as petrogenetic indicators. *Geol. Soc. S. Africa, Sp. Publ.* 1: 380~390.
- Treloar P J, Rex D C G. 1989. K-Ar and Ar-Ar geochronology of the Himalayan collision in NW Pakistan: constraints on the timing of suturing, deformation, metamorphism and uplift. *Tectonics*, 8: 881~909.
- Xiong Yingqian. 2011. Emplacement of Bela and Muslim Bagh ophiolites and significance of India-Asia collision in western Pakistan. PhD dissertation, University of Houston, USA. 175.
- Yang Jinsui, Dobrzhinetskaya L, Bai Wenji, Fang Qingsong, Robinson P T, Green H W. 2007. Diamond and coesite-bearing chromites from the Luobusha ophiolite, Tibet. *Geology*, 35(10): 875~878.
- Yang Jinsui, Bai Wenji, Dobrzhinetskaya L, Makeev A B. 2009. In situ diamonds in polished chromitite fragments from the chromite deposits in Polar Ural and Tibet. *American Geophysical Union, Fall Meeting Abstracts*, # V54B-08.
- Zhou Meifu, Robinson P T, Malpas J, Li Zijin. 1996. Podiform chromites in the Luobusha ophiolite (Southern Tibet): implications for melt-rock interaction and chromite segregation in the upper mantle. *Journal of Petrology*, 37: 3~21.
- Zhou Meifu, Robinson P T. 1997. Origin and tectonic environment of podiform chromite deposits. *Economic Geology*, 92: 259~262.
- Zhou Meifu, Robinson P T, Malpas J, Edwards S J, Qi Liang. 2005. REE and PGE geochemical constraints on the formation of dunites in the Luobusha ophiolite, southern Tibet. *Journal of Petrology*, 46(3): 615~639.
- Zhou Meifu, Robinson P T, Su Benxun, Gao Jianfeng, Li Jianwei, Yang Jinsui, 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.

Comparative Study of Metallogenic Regularities of Chromite Deposits in the Middle of the Neotethys Suture Zone

HONG Jun^{1,2)}, YAO Wenguang²⁾, ZHANG Jing²⁾, ZHANG Huishan²⁾, LÜ Pengrui²⁾, YANG Bo²⁾

1) MLR Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Xi'an 710054;

2) Xian Center of Geological survey, CGS, Xi'an, 710054

Abstract

The chromite ore belt in the Neotethys suture zone is one of the most important podiform chromite metallogenic zones in the world, particularly in the middle section of this suture zone, namely Muslim Bagh-Kohistan-Yarlung Zangbo ophiolitic belt, in which there occur a number of large chromite deposits, such as Luobusha, Malakand, and Muslim Bagh deposit. The time-space distribution features of the ophiolites and the characteristics, occurrence regularities, ore-controlling factors of the typical chromite deposits in the belt are systematically summed up. The study shows that the ophiolites formed mainly during middle Jurassic to late Cretaceous, and tend to be younger from east to west roughly, with the similar emplacement age from Paleocene to Eocene. The features of chromite deposits at Malakand, Waziristan, Muslim Bagh and Bela are similar to that of the Luobusha chromite, and all of them belong to Cr-rich chromite and formed in SSZ related tectonic setting. These deposits show distinct petrographic zones and advantageous metallogenic conditions. Therefore, It suggests that future exploration should focus on the ophiolite zone. The analysis of sequence profiles and dunite-harzburgite petrographic zones will help find favorable ore-bearing areas.

Key words: metallogenic regularity; podiform chromite; comparative study; Neotethys suture zone