



引文格式: 洪俊, 张辉善, 吕鹏瑞, 等. 巴基斯坦新特提斯构造-岩浆演化与重要金属成矿作用[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 154-176. DOI: 10.12401/j.nwg.2023117

Citation: HONG Jun, ZHANG Huishan, LÜ Pengrui, et al. Tectono-Magmatic Evolution of the Neo-Tethys Belt in Pakistan and Related Mineralization of Major Metal Mineral Deposits [J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 154-176. DOI: 10.12401/j.nwg.2023117

巴基斯坦新特提斯构造-岩浆演化与重要金属成矿作用

洪俊¹, 张辉善¹, 吕鹏瑞¹, Tahseenullah Khan², Yasir Shaheen Khalil^{3,4},
王志华¹, 张海迪¹

(1. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119;
2. 巴基斯坦巴利亚大学地球科学与环境学院, 巴基斯坦 伊斯兰堡 44000; 3. 巴基斯坦地质调查局,
巴基斯坦 伊斯兰堡 44000; 4. 长安大学资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 巴基斯坦在大地构造位置上处于印度、欧亚和阿拉伯三大板块的汇聚带, 正同时发生着大陆碰撞和大洋俯冲作用, 是研究地球系统深部圈层相互作用与成矿效应的绝佳天然实验室。但是, 目前对于巴基斯坦构造演化与成矿作用的研究还不系统, 对于巴基斯坦的大型-超大型矿床形成的背景和机制仍不清楚。笔者针对巴基斯坦不同类型的优势矿种开展了深入解剖和对比研究, 系统梳理最新研究进展, 围绕巴基斯坦新特提斯构造-岩浆演化与成矿作用响应的关键科学问题, 分析铜矿、铬铁矿、铅锌矿以及碳酸岩有关的稀土矿床等重要金属成矿类型形成的构造环境以及与区域重大地质事件的耦合关系, 总结巴基斯坦区域成矿规律, 为资源潜力分析和境内外找矿勘查提供依据。

关键词: 新特提斯; 岩浆作用; 铬铁矿; 斑岩铜矿; 碳酸岩; 巴基斯坦

中图分类号: P612

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)03-0154-23

Tectono-Magmatic Evolution of the Neo-Tethys Belt in Pakistan and Related Mineralization of Major Metal Mineral Deposits

HONG Jun¹, ZHANG Huishan¹, LÜ Pengrui¹, Tahseenullah Khan², Yasir Shaheen Khalil^{3,4},
WANG Zhihua¹, ZHANG Haidi¹

(1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Department of Earth and Environmental Sciences, School of Engineering and Applied Sciences, Bahria University, Islamabad 44000, Pakistan; 3. Geological Survey of Pakistan, Islamabad 44000, Pakistan;
4. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

收稿日期: 2023-04-09; 修回日期: 2023-08-13; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家自然科学基金项目(92055314、U2244204、42372115), 陕西省创新能力支撑计划项目(2022KJXX-91), 中国地质调查局项目“巴基斯坦-土耳其铜铬资源调查”(DD20201159)和“中亚西亚地质调查国际合作”(DD2021804)联合资助。

作者简介: 洪俊(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事中亚西亚境外地质调查和资源潜力评价、岩浆作用与区域成矿规律研究工作。E-mail: hongjunmail2013@163.com。

Abstract: Pakistan is located in the convergent zone of the India, Eurasian and Arabian plates, an important part of the Tethys tectonic domain. It is an excellent natural laboratory for the study of deep earth system interactions and mineralization effects, as both continental collision and oceanic subduction occur in Pakistan. However, the study of tectonic evolution and mineralization in Pakistan is still not systematic, and the background and mechanism of formation of some large and super-large ore deposits in Pakistan are still unclear. The authors and collaborating team have conducted in-depth anatomical and comparative studies on different types of dominant mineral deposits in Pakistan. In this paper, the recent research progress are summarized systematically. Focusing on the key scientific issues of tectonic-magmatic evolution and mineralization response in the Neo-Tethys belt, we have analyzed the tectonic setting of the formation of major metal mineralization types such as copper, chromite, lead-zinc and carbonatite-related REE deposits and the coupling relationship with major regional geological events. The study of regional mineralization regularities in Pakistan will provide a basis for resource potential analysis and mineral exploration both domestic and abroad.

Keywords: Neo-Tethys; magmatism; chromite; porphyry Cu-Au deposits; carbonatite; Pakistan

特提斯碰撞造山带的形成,经历了不同时期特提斯洋的洋-陆俯冲和随后的陆-陆碰撞过程,伴随着强烈的壳幔相互作用和多样化的金属成矿作用,包括斑岩型矿床、蛇绿岩型铬铁矿、沉积岩容矿型铅锌矿、碳酸岩型稀土矿以及造山型金矿等(张洪瑞等, 2010; Hou et al., 2011, 2015a; Richards et al., 2012, 2017; 吕鹏瑞等, 2015, 2020; Richards, 2015; 王瑞等, 2020)。巴基斯坦位于欧亚、印度和阿拉伯三大板块的汇聚带,是特提斯碰撞造山带的重要组成部分,向西连接伊朗高原,反映的是俯冲-初始碰撞的连续过程,而东端位于青藏高原的西北缘,是全球最典型的陆-陆碰撞的典型场所之一(图1)。

巴基斯坦是全球少有的同时发生大洋俯冲和大陆碰撞作用的地区,是研究地球系统深部圈层作用和资源效应的绝佳天然实验室。在巴基斯坦中北部,印度与欧亚大陆于约 55~50 Ma 沿印度河缝合带发生初始碰撞,之后持续向欧亚大陆之下的深俯冲,是现今世界上少有的仍在活动的大陆俯冲带(Negredo et al., 2007; Wilke et al., 2010; Ding et al., 2016),造就了喜马拉雅、喀喇昆仑和兴都库什三大山系。在巴基斯坦那西南部,北印度洋大洋板块正沿莫克兰海沟发生向北的超低角度俯冲,形成从海底一直延伸到陆上的莫克兰增生楔以及查盖岩浆弧(Nicholson et al., 2010; Burg, 2018),是大洋超低角度俯冲的典型。大洋俯冲和大陆碰撞过程不仅是构造地质学的重要研究课题,同时产出诸多类型的战略性矿产资源,因为俯冲和碰撞带是绝佳的深部物质迁移活跃带,有利于成矿元素的聚集,成矿潜力巨大。巴基斯坦的构造演化及成矿作用具有一定的独特性,如发育洋内俯冲作用形成的

科希斯坦弧、发育中新世斑岩型铜金矿床以及与蛇绿岩有关的豆荚状铬铁矿床(吕鹏瑞等, 2016),碳酸岩型稀土矿在巴基斯坦北部也具有良好的成矿潜力。然而,由于巴基斯坦地质调查工作和研究程度偏低,巴基斯坦目前已发现的大型-超大型矿床数量十分有限,对于巴基斯坦构造演化与区域成矿规律的研究仍比较薄弱,一些超大型矿床形成的背景和机制仍不清楚,如山达克斑岩型铜(金)矿床、穆斯林巴赫铬铁矿床等。

笔者对巴基斯坦构造单元划分、不同单元地质特征和优势矿产成矿规律进行了系统的总结,以巴基斯坦及邻区新特提斯构造演化-陆陆碰撞过程的岩浆作用和成矿作用响应为主线,分析铅锌矿、铜矿、铬铁矿以及碳酸岩有关的稀土矿床等重要金属成矿类型形成的构造环境以及与区域重大地质事件的耦合关系,总结巴基斯坦区域成矿规律,为资源潜力分析和境内外找矿勘查提供依据。

1 区域地质背景

巴基斯坦位于南亚次大陆的南缘,处于欧亚板块、阿拉伯板块与印度板块之三大板块的汇聚部位(吕鹏瑞等, 2017),中生代以来,由于印度板块向西向北的斜向陆陆俯冲碰撞,构造运动十分强烈。巴基斯坦地质学家通常按照以大型断裂为边界将全境划分为 10 个构造单元,并依据单元内的沉积特征的差异进一步划分为 30 个次级构造单元(图2),各个单元的地质特征描述详见吕鹏瑞等(2017)和洪俊(2021)。将巴基斯坦的区域构造演化历史简述如下。

在三叠纪早期(~250 Ma)或中晚三叠世时

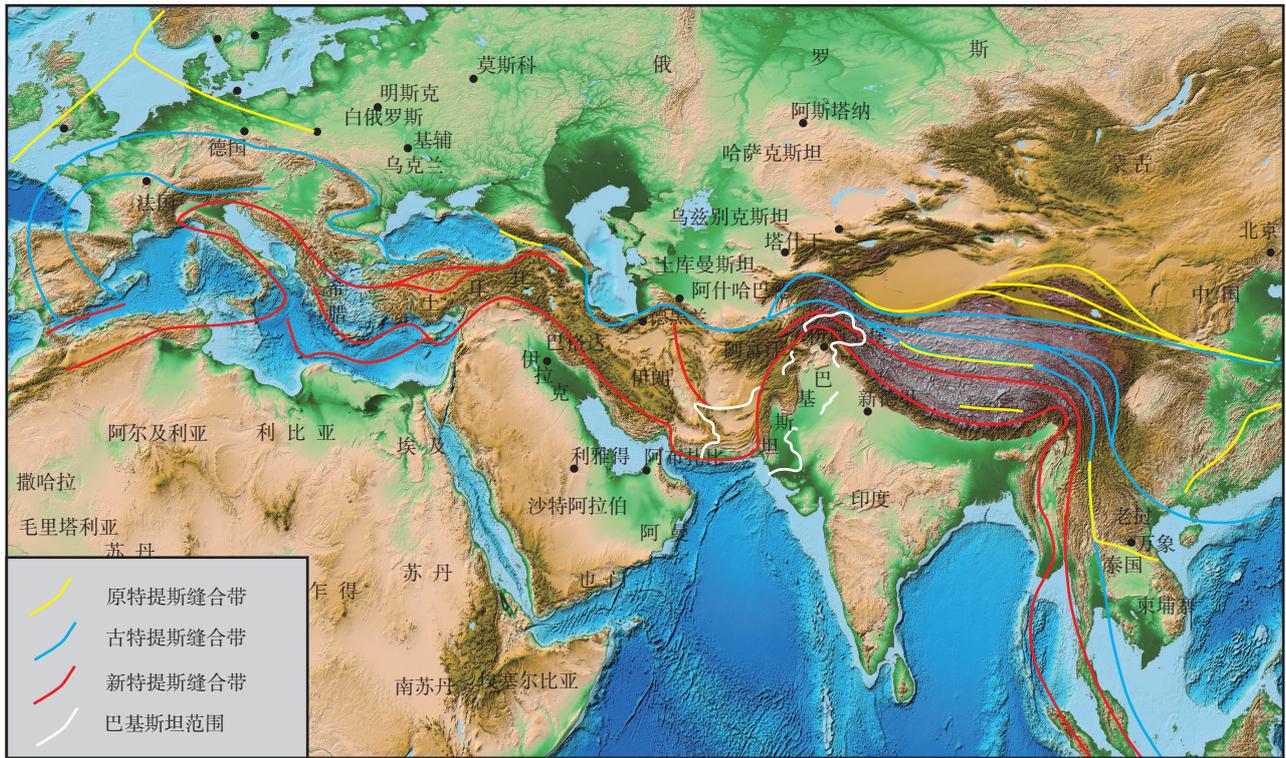


图1 特提斯构造域主要缝合带分布及巴基斯坦所处位置示意图(据吴福元等, 2020 修)

Fig. 1 Distribution of major suture zones in the Tethys belt, showing the location of Pakistan

(~220 Ma), 位于冈瓦纳大陆北缘的基梅里(Cimmerian)陆块群(包括滇缅泰马苏、拉萨地体、羌塘、南帕米尔、南阿富汗、土耳其中部和伊朗中部等小地块)向北裂离, 打开了新特提斯洋, 基梅里陆块群在洋脊扩张或俯冲带下沉板片拖拉力的影响下持续向北东漂移, 为古特提斯洋消减闭合提供了动力(Metcalf, 1996, 2013; Bortolotti et al., 2005)。三叠纪—早白垩世, 印度大陆快速向北漂移, 导致新特提斯洋向北俯冲, 洋内俯冲作用形成了科希斯坦—拉达克弧。新特提斯洋继续俯冲消减, 科希斯坦—拉达克岛弧与欧亚大陆拼贴, 在巴基斯坦北部形成了什约克(Shyok)缝合带(主喀喇昆仑断裂)(Rehman et al., 2011), 构成欧亚大陆的被动大陆边缘。白垩纪—始新世, 随着新特提斯洋盆的俯冲闭合, 俯冲带之上(SSZ)因洋壳拉伸形成一些伸展性小洋盆, 在随后的挤压应力作用下就位形成了瓦济里斯坦、穆斯林巴赫和贝拉等SSZ型蛇绿岩。

古新世初, 非洲大陆的北移造成了新特提斯主体洋盆的闭合, 新特提斯洋盆的闭合造成了印度、阿拉伯板块与欧亚大陆的碰撞, 是陆内汇聚的典型代表, 形成单一的缝合带, 绵延数千公里, 自塞浦路斯(Cyprus)到土耳其的比特利斯(Bitlis), 沿伊朗的扎格罗斯(Zagros)向东南方向入阿曼湾, 在洋底以莫克兰

(Makran)海沟的形式出现, 经帕米尔与雅鲁藏布江缝合带(IYS)相接, 后者呈弧形在缅甸入印度洋(Sengor et al., 1996; Sorkhabi et al., 2008)。碰撞造山阶段可划分为主碰撞汇聚阶段(65~41 Ma)、晚碰撞构造转换阶段(40~26 Ma)和后碰撞阶段(25~0 Ma)(张洪瑞等, 2010)。主碰撞阶段, 大规模逆冲和褶皱作用在巴基斯坦及相邻地区形成褶冲带和逆冲推覆系统。印度大陆与欧亚大陆碰撞还形成大规模同碰撞岩浆作用, 在冈底斯带和巴基斯坦科希斯坦地区形成规模宏大的花岗质岩基。晚碰撞构造转换阶段, 沿碰撞缝合带或早期岩石圈不连续带发生大规模走滑运动, 形成查曼、扎格罗斯等大型走滑系统(张洪瑞等, 2010)。后碰撞地壳伸展阶段, 碰撞带附近块体大多发生伸展和拆离作用, 形成不同类型的岩浆岩, 包括上部地壳熔融的伟晶岩类、以及后碰撞伸展阶段的幔源岩浆活动, 形成碱性—碳酸岩杂岩体(Hong et al., 2019, 2021)。阿拉伯板块向北俯冲到伊朗东南部和巴基斯坦西部, 在查盖岩浆岩带形成了多期次的岩浆—热液活动、区域隆升事件, 广泛发育钙碱性火山岩和花岗闪长岩、石英闪长岩等浅成—超浅成侵入体, 形成了巴基斯坦最重要的查盖斑岩型铜—金成矿带(Richards et al., 2012; 吕鹏瑞等, 2015)。

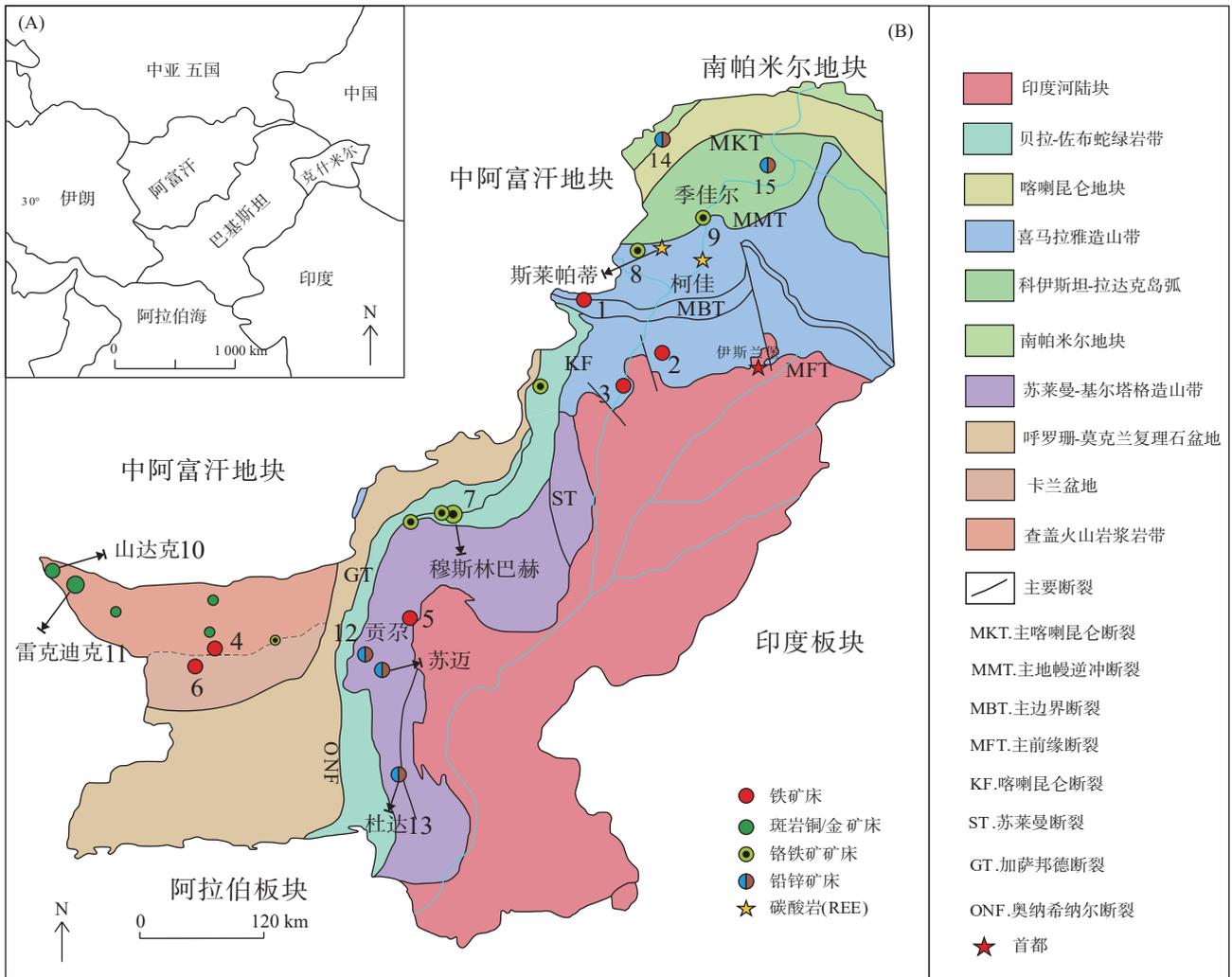


图2 巴基斯坦大地构造简图(A)及典型矿床分布图(B)(据 Kazmi et al., 1982; 吕鹏瑞等, 2016 修)

Fig. 2 (A) Tectonic units subdivision map and (B) distribution of typical mineral deposits in Pakistan.

2 重要金属成矿作用和构造环境

2.1 斑岩型铜矿

铜矿是巴基斯坦的重要优势矿产资源之一, 已发现的矿床主要分布在俾路支省查盖岩浆岩带中(图2), 以斑岩型最为重要, 普遍伴生金, 少量为黑矿型、岩浆热液型。目前该带中已发现 48 个斑岩铜矿床(点)及远景区(图3), 以雷克迪克铜金矿、山达克铜金矿和达斯特·伊·凯恩铜矿床为代表, 其中雷克迪克已达到世界级规模, 据推测该矿床的矿石储量为 67.06 亿 t, Cu 品位为 0.41%, Au 品位为 0.36 g/t, Mo 品位为 0.01%, 其中 H14、H15 矿体的推测矿石储量为 67.06 亿 t, Cu 品位为 0.41%, Au 品位为 0.22 g/t, Mo 品位为 0.01%。山达克斑岩铜金矿达到大型以上, 矿石储量为 4.40 亿 t,

Cu 的平均品位为 0.41%, 伴生的 Au 品位 0.5 g/t。达斯特·伊·凯恩铜矿矿石储量约为 3.5 亿 t, Cu 品位 0.3% (吕鹏瑞等, 2015)。

查盖斑岩型铜矿带东部的矿床受晚白垩世 Sinjrani 群火山岩和查盖侵入岩控制, 而西部矿床受古新世和更年轻的浅成斑岩体和火山岩控制(Perelló et al., 2008)。含矿斑岩主要赋存于陡倾的柱状多相斑岩岩株中, 出露面积一般小于 1 km², 矿床蚀变强烈, 蚀变带分带明显, 呈面状分布, 自岩体中心向外分为钾硅酸盐化、石英绢云母化和青磐岩化, 缺少高级泥化。

2.1.1 斑岩型矿床成岩-成矿时代

查盖侵入岩主要分为两期, 早期侵入岩以闪长岩、花岗闪长岩为主, 其次为辉长岩和石英二长闪长岩, 闪长岩和石英闪长岩主要由斜长石(70%)和 30% 的暗色矿物组成。晚期以花岗闪长岩、石英二长岩和花

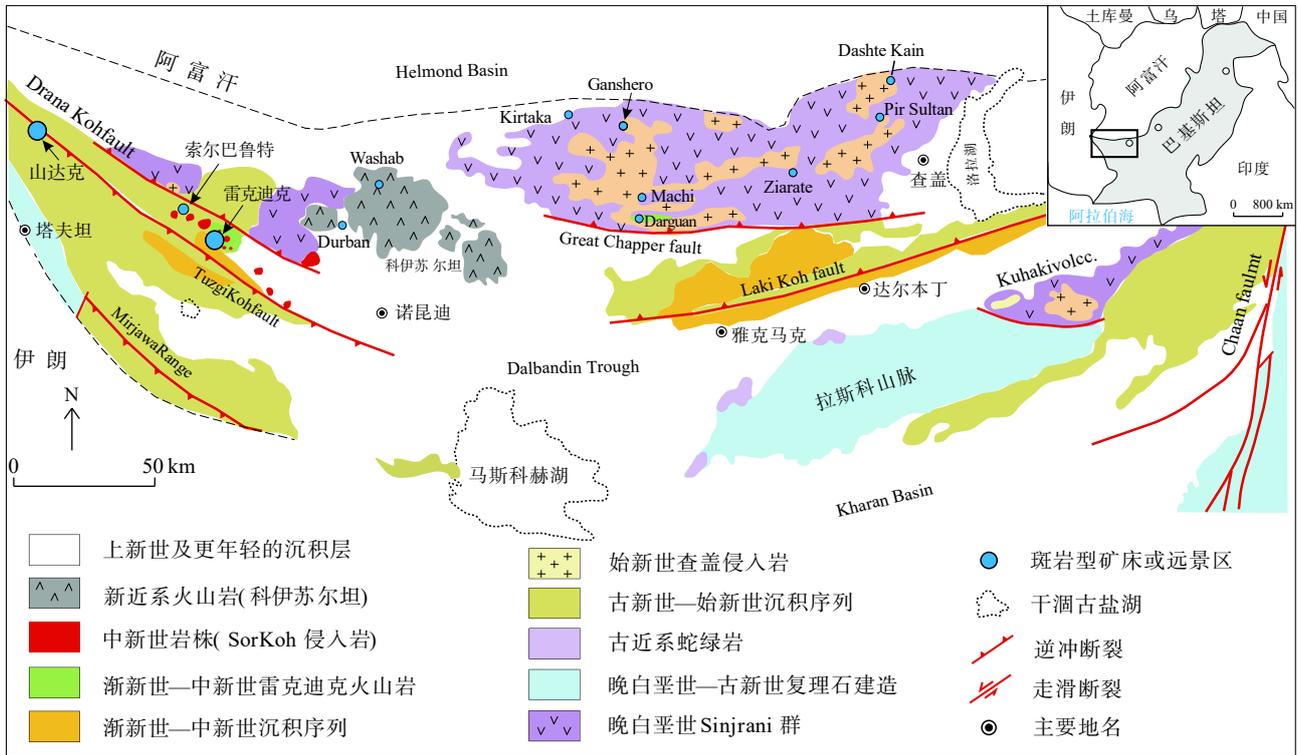


图3 查盖地区主要斑岩型矿床(点)分布及年代学(据 Perelló et al., 2008 修)

Fig. 3 Spatial distribution and ages of the main porphyry Cu deposits in Chagai belt.

岗岩为主。岩石具有中-粗粒、等粒粒状结构,主要矿物组成为石英(40%)、钾长石(45%)和少量黑云母。索尔科(Sor Koh)侵入岩主要由岩株、岩床、岩墙、岩穹和岩盆组成,出露规模大小不一,小则几百米,大至1 km。岩性主要为英安岩,包含少量玄武安山岩和流纹英安岩。查盖侵入岩主要分3个时期:始新世(55~44 Ma)、中新世(25~10 Ma)和上新世,索尔科侵入岩时代为古新世—早中新世(23~10 Ma)(Perelló et al., 2008)。年代学研究显示该区先后经历了中—晚始新世(43~37 Ma)、早中新世(24~22 Ma 和 18~16 Ma)、中中新世(13~10 Ma)和晚中新世—早上新世

(6~4 Ma)4次主要成矿作用(图3、图4)。

洪俊(2021)对山达克矿区石英闪长斑岩、闪长玢岩及基性岩脉等进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,开展含铜石英脉的辉钼矿 Re-Os 同位素测年。锆石 U-Pb 测年结果显示,含矿石英闪长斑岩中锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (22.15 ± 0.22) Ma (MSWD=0.41)。闪长玢岩的锆石特征与石英闪长斑岩相似,其锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 (22.21 ± 0.33) Ma (MSWD=0.67)。基性岩脉中锆石呈浅褐色,粒径较小,多数 $< 100 \mu\text{m}$, 锆石 Th、U 含量明显高于石英闪长斑岩。CL 图像显示,锆石阴极发光较暗,震荡环带结构

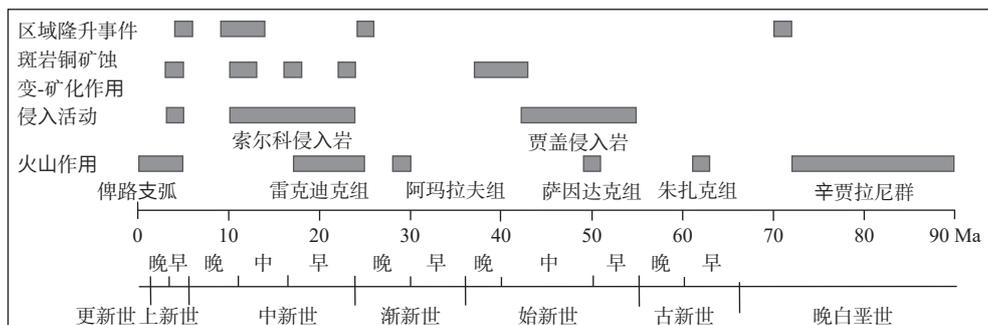


图4 查盖火山岩浆岩带主要岩浆事件及成矿时代(据 Perelló et al., 2008 修)

Fig. 4 Summary chart of the distribution of the major magmatic and uplift events, porphyry Cu mineralization along the Chagai belt, western Pakistan

不清楚,测点的 Th/U 值为 0.43~1.87,属于岩浆成因锆石(Hoskin et al., 2003)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为(21.21±0.16) Ma(MSWD=0.41)。

Re-Os 测年结果显示辉钼矿的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 远远大

于 20。因此,Re-Os 模式年龄可代表成矿的真实年龄,4 件辉钼矿获得的模式年龄十分接近,为(22.35~21.93) Ma,与含矿斑岩的时代一致(洪俊, 2021)(图 5)。

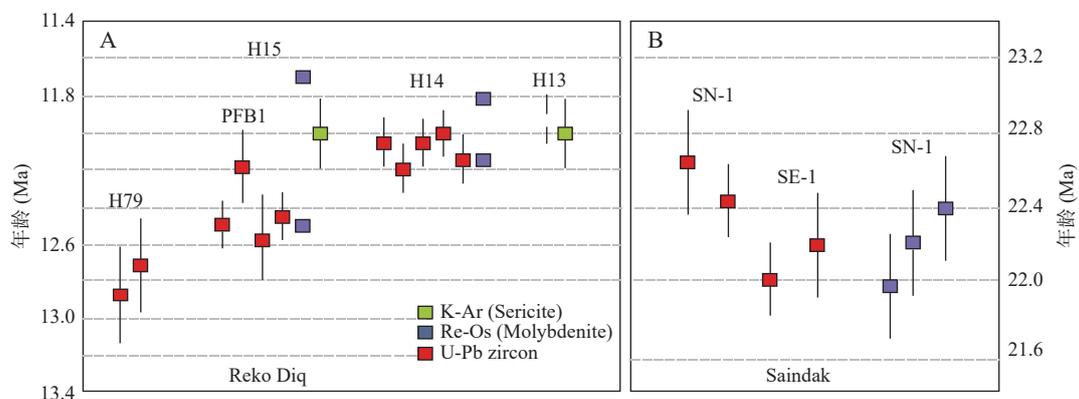


图5 Reko Diq 和 Saindak 矿床的成岩-成矿年代学

Fig. 5 Formation ages of host rocks and mineralization of Reko Diq and Saindak porphyry Cu-(Au) deposits

Perelló 等(2008)认为雷克迪克超大型斑岩铜金矿床最主要成矿时代为(10~13) Ma。前人的年代学数据也显示,雷克迪克矿集区 H14 矿床的岩株的形成时代为(12.22±0.15) Ma, H15 矿床的绢云母-绿泥石蚀变的时代为(11.73±0.04) Ma (Fu et al., 2006; Perelló et al., 2008)。因此,雷克迪克矿床的成矿时代比山达克矿床大约晚 10 Ma。

2.1.2 含矿斑岩地球化学特征

山达克矿区与铜金矿化相关的岩石类型主要为石英闪长斑岩和英云闪长斑岩,其中发育少量镁铁质微粒暗色包体以及近同期的基性岩脉。岩石地球化学分析结果显示,石英闪长岩具有较高的 SiO_2 含量(61.9%~65.8%)和含量 Al_2O_3 (15.6%~16.6%), TiO_2 含量较低(< 0.5%),全碱含量为 4.64%~5.91% ($\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=0.33\sim 0.55$)。闪长玢岩以低 Si、低 Ti,富 Al 和 Mg、Fe 为特征, SiO_2 含量较稳定(约为 54%), Al_2O_3 大于 18%,高于石英闪长斑岩。其 MgO 和 FeO 含量也明显高于前者,MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 值分别为 4.28%~4.42% 和 52.6~53.3。

在稀土元素球粒陨石标准化分布型式图显示,含矿岩体表现为相似的配分型式,以相对富集轻稀土元素(LREE)的右倾型配分型式,且无明显的负 Eu 异常,暗示源区具有高的水含量,从而制约了斜长石的分离结晶。不含矿的二长闪长岩也呈相对富集轻稀土元素的右倾型配分型式,但中-重稀土元素配分曲线相对平缓,且中-重稀土元素含量明显高于含矿斑岩。

微量元素分析结果显示石英闪长斑岩具有高 Sr($641\times 10^{-6}\sim 756\times 10^{-6}$)、低 Y($8.7\times 10^{-6}\sim 13.4\times 10^{-6}$)和高 Sr/Y 值(51.6~83.2)。而二长闪长岩具有更高的 Sr 含量和 Sr/Y 值,分别为 $1725\times 10^{-6}\sim 1390\times 10^{-6}$ 和 110~117。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中可以看到两类样品均富集大离子亲石元素、而相对亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素,但明显的差异在于含矿的石英闪长斑岩具有亏损 Zr、Hf 的负异常,而不含矿的二长闪长岩体显示 Zr、Hf 的正异常。

山达克矿区斑岩体的 Sr-Nd 同位素组成显示,含矿斑岩的初始铈值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为 0.706 481~0.706 904,具有负的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(-0.7~-2.4),不含矿的二长闪长岩具有相似的 Sr-Nd 同位素组成,初始铈值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为 0.706 650~0.707 182,略高于前者, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值较稳定,为-1.7~-1.1。同期的基性岩脉具有相似的初始铈值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i (0.706 966~0.707 044), $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为-3.0~-2.9。

2.1.3 构造环境与深部地球动力学

山达克斑岩 Cu-Au 矿区的石英闪长斑岩和二长闪长岩主要矿物组成为斜长石、石英、角闪石、黑云母和钾长石等,样品的 A/CNK 小于 1.1(0.82~1.10),具有偏铝质-弱过铝质特征,这些特征明显与 S 型花岗岩不同。全碱含量较低($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=4.64\%\sim 5.91\%$),也与 A 型花岗岩类不同。闪长岩类中发现镁铁质微粒暗色包体,岩石矿物组成中常见角闪石,这些特征显示它们属于 I 型花岗岩类。从地球化学特征来看,

山达克矿区石英闪长岩和二长闪长岩均富集大离子亲石元素(LILEs)、而强烈亏损高场强元素(HFSEs),具有高的 Sr/Y 值和 $(La/Yb)_N$ 值,显示出埃达克质岩石的地球化学特征(Defant et al., 1990; Thorkelson et al., 2005)。与山达克矿床处于相同构造带的 Reko Diq 斑岩矿床含矿斑岩体(11~12 Ma)(Perelló et al., 2008)具有相似的地球化学特征,属于埃达克质岩石。

山达克和雷克迪克斑岩型 Cu-Au 矿集区位于中特提斯构造带查盖钙碱性火山岩浆弧的西部,作为特提斯构造域的组成部分,查盖岩浆岩带的形成与新特提斯洋演化密切相关。晚白垩世以来,随着新特提斯洋的闭合,特提斯构造域进入碰撞造山阶段,印度板块、阿拉伯板块逐渐与欧亚板块碰撞(张洪瑞等, 2010)。渐新世以来,阿拉伯大洋板块持续向北的俯冲作用在查盖地区产生强烈的岩浆活动,包括早中新世、中中新世和晚中新世—早上新世岩浆作用,年轻的大洋板片在俯冲消减过程中可以直接发生部分熔融,产生埃达克质岩石(Perelló et al., 2008)。山达克矿区发育同时代的基性岩墙(脉),表明幔源岩浆的注入和不同程度的岩浆混合在岩浆起源和演化中具有重要作用。因此,笔者认为阿拉伯板块的斜向俯冲导致查盖岛弧拼贴到阿富汗微陆块南缘,板片俯冲角度发生平缓化,俯冲板片脱水释放出的氧化性流体交代软流圈地幔,使其部分熔融形成玄武质岩浆,在中部地壳经历 MASH 过程,形成含矿的埃达克质岩浆。

2.2 铬铁矿

2.2.1 铬铁矿分布与形成时代

喜马拉雅-阿尔卑斯造山带是其中最重要的铬铁矿成矿带之一,东西延伸达数千公里。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, 2009)。巴基斯坦境内蛇绿岩带广泛发育且保存相对完整,是阿尔卑斯-特提斯喜马拉雅蛇绿岩带的组成部分。铬铁矿的分布与蛇绿岩带密切相关,主要分布在北部印度河蛇绿岩带和中部的瓦齐里斯坦-贝拉蛇绿岩带。

印度河蛇绿岩带沿着主地幔逆冲断裂出露于科希斯坦-拉达克岛弧的南部,西起达拉斯,向东与雅鲁藏布江蛇绿岩带相接(图 6)(洪俊等, 2015a)。该带中目前已发现十几个矿床(点),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

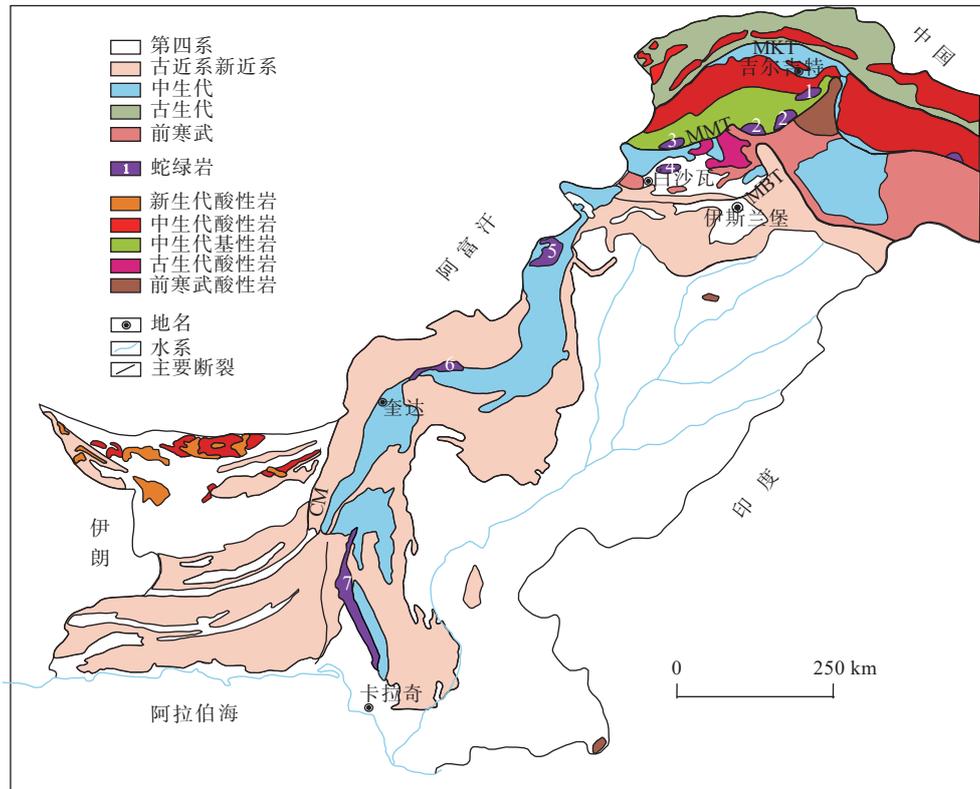
希斯坦岩体矿化较强,铬铁矿产在超镁铁质岩中,呈条带状、似层状、透镜状及豆荚状产出,矿石构造类型以浸染状为主。矿体长百余米,厚数米至十余米, (Cr_2O_3) 含量变化较大,最高可达 55%,一般约为 30%,Cr/Fe 值最高为 2.8。马拉坎德岩体位于 KPK 省白沙瓦东北 60 km,蛇绿岩带延伸约 25 km,宽为 5~6 km,共发现 7 个矿群,由 62 个大小不等矿体组成,分上下两个矿带,下矿带由 1 个矿群 23 个矿体组成,矿体产出于方辉橄榄岩、纯橄岩中,多呈条带状、透境状,长为 20~300 m,宽为 3~12 m,少数为不规则状和豆荚状,规模不大, Cr_2O_3 平均含量约为 50%,估算储量约 68 万 t。

瓦齐里斯坦-贝拉蛇绿岩带位于杰曼大型走滑断裂的东侧,长达 1 000 余 km,宽约为 50 余 km,是巴基斯坦境内规模最大的蛇绿岩带,也是最重要的铬铁矿产地。超镁铁质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 万 t 以上的有 7~8 个,其他多在 2 万 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 万 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 Cr_2O_3 平均含量为 45%,Cr/Fe 值 ≥ 3 ,铬铁矿储量超过 400 万 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 t。

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 $^{39}Ar/^{40}Ar$ 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 \pm 32) Ma(Ravikant et al., 2004),表明巴基斯坦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。巴基斯坦中部瓦齐里斯坦-贝拉蛇绿岩带中,穆斯林巴赫蛇绿岩中斜长花岗岩脉的锆石 U-Pb 年龄为(80.2 \pm 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,代表洋壳仰冲时间(Mehrab et al., 2007)。北部瓦齐里斯坦超基性岩体中花岗岩岩脉的全岩 K-Ar 法测年结果为(77 \pm 2) Ma 和(70 \pm 1) Ma(Arif, 2006),该蛇绿岩带形成时间总体晚于中国西藏雅鲁藏布江蛇绿岩带。

2.2.2 成矿构造环境

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,富铬型和富铝型铬铁矿分属于两套蛇绿岩系列(Thayer, 1970),形成于不同



MKT. 主喀喇昆仑断裂; MMT. 主地幔逆冲断裂; MBT. 主边界断裂; MFT. 主前缘断裂; CM. 杰曼断裂; 1. 奇拉斯岩体; 2. 吉佳尔岩体; 3. 尚拉-明戈拉岩体; 4. 德尔盖岩体; 5. 瓦济里斯坦岩体; 6. 穆斯林巴赫岩体; 7. 贝拉岩体

图6 巴基斯坦地质简图及主要镁铁质-超镁铁质岩体分布

Fig. 6 Geological sketch map of Pakistan and the distribution of major mafic-ultramafic rocks

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)。巴基斯坦铬铁矿总体上表现富铬、贫铝的特征,穆斯林巴赫铬铁矿 Cr_2O_3 含量为 45%~64%, Al_2O_3 含量为 10%~20%, 和中国罗布莎铬铁矿的成分非常相似,属于富铬型铬铁矿。穆斯林巴赫蛇绿岩中堆晶岩、岩脉地球化学特征也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的指示剂(Dick et al., 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)。对巴基斯坦境内主要镁铁质-超镁铁质岩体开展了铬尖晶石矿物化学对比研究(Arif et al., 2006; 洪俊等, 2015a, 2015b)。结果表明,矿石中造矿铬尖晶石的成分以富铬、富镁为特征,其 Cr_2O_3 含量为 49.22%~62.94%, Al_2O_3 含量为 9.22%~19.50%, MgO 含量为 13.18%~16.17%。副矿物铬尖晶石成分明显不同于造矿铬尖晶石,变化范围较大,相对低铬、富铝,

其 Cr_2O_3 含量为 18.94%~56.98%, Al_2O_3 含量为 8.96%~49.54%, MgO 含量变化范围与造矿铬尖晶石接近。在铬尖晶石三价离子所占比率图中(图 7A),造矿铬尖晶石成分稳定,以富铬为主,而副矿物铬尖晶石在富铁和富铬之间变化,两类铬尖晶石的成分均和世界范围内层状镁铁质-超镁铁质杂岩体中铬尖晶石相似。在 $\text{Cr}^\#$ - $\text{Mg}^\#$ 关系图解中(图 7B),造矿铬尖晶石中随 $\text{Mg}^\#$ 值降低, $\text{Cr}^\#$ 值不断增加,而副矿物铬尖晶石显示随 $\text{Mg}^\#$ 值降低, $\text{Cr}^\#$ 值未见明显的变化趋势,副矿物铬尖晶石样品点多数落在玻安岩和岛弧玄武岩的区域,而造矿铬尖晶石以高 $\text{Cr}^\#$ 质为特征,基本上落在玻安岩的范围,表明其形成与大洋起始俯冲形成的玻安质熔体有关。

2.2.3 豆荚状铬铁矿矿床成因

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。鲍佩声(2009)、王希斌(2010)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。目前主流观点认为岩石/熔体相互反应的模型更适合

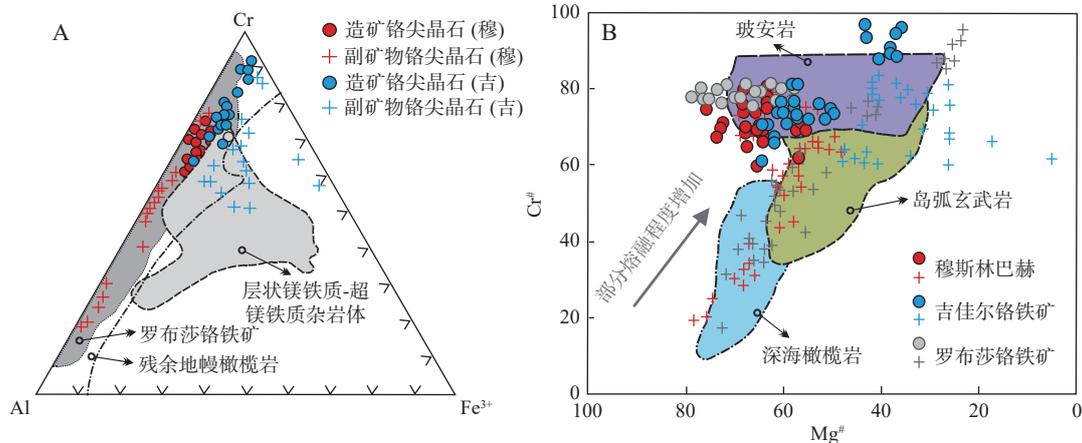


图7 穆斯林巴赫铬铁矿床和吉佳尔铬铁矿中铬尖晶石三价离子所占比率图(A)和 Cr[#]-Mg[#]图解(B) (罗布莎铬铁矿床数据引自洪俊, 2011)

Fig. 7 (A) Trivalent ions proportion and (B) Cr[#]-Mg[#] diagram in chrome spinels from the Muslim Bagh and Jijal chromite deposit

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 H₂O 饱和的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; Rollinson et al., 2015)。白文吉等 (2005)、杨经绥等 (2011) 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。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。穆斯林巴赫铬铁矿与中国罗布莎铬铁矿在地质背景、成矿特征、铬尖晶石成分、控矿条件等方面存在一定的相似性, 表明其成矿过程也经历了多阶段演化 (洪俊等, 2015a, 2015b)。在大洋中脊环境, 地幔对流致使深部地幔物质快速上涌, Cr 从单斜辉石、斜方辉石等矿物中释放并聚集, 铬尖晶石呈分散的“晶粥”状在上升过程中由于地幔剪切作用下初步富集。在俯冲带环境下, 由于俯冲板片所释放出的富含 H₂O、LREE 以及大离子亲石元素 (LILE) 的流体交代已亏损地幔橄榄岩, 降低了其部分熔融所需温度, 产生大量熔体并发生广泛的熔体-地幔相互反应, 抑制了熔体中硅酸盐格架的形成, 有利富 Cr 熔体的聚集, 形成工业矿体。在演化过程中, 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使矿床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, 北部蛇绿岩带中吉佳尔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。吉佳尔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, 属于岩浆晚期结晶分异的产物。

2.3 铅锌矿

2.3.1 铅锌矿分布与形成时代

巴基斯坦胡兹达尔-拉斯贝拉铅锌成矿带 (图 8) 是特提斯巨型铅锌成矿带的重要组成部分, 也是巴基斯坦最有潜力的铅-锌-重晶石成矿区 (Ahsan et al., 1997, 1999)。该带位于卡拉奇与奎达之间, 南北向延伸超过 300 km, 发育有众多沉积岩容矿铅锌矿床或矿化点, 主要矿床有杜达、贡尔、苏迈等, 规模均达中型以上。张辉善 (2021) 对该区矿床研究认为, 矿床主要类型为喷流沉积型 (SEDEX) 和密西西比河谷型 (MVT), SEDEX 型矿床成矿时代主要集中在早—中侏罗世, 代表大洋伸展裂解的被动大陆边缘下陷盆地和大陆裂谷伸展盆地环境成矿。MVT 矿床成矿时代主要集中在新生代, 与特提斯带内其它 MVT 矿床成矿时代类似, 代表特提斯碰撞造阶段褶皱逆冲系内成矿。

2.3.2 成矿构造环境

胡兹达尔-拉斯贝拉铅锌成矿带位于巴基斯坦中轴带(Axial Belt)南段(Husain et al., 2002), 是印度板块向北运动, 随后与阿富汗微陆块、中伊朗微陆块碰撞的结果, 其西部以贝拉蛇绿岩带为界, 其东为喜马拉雅前陆盆地(图 6)(Song et al., 2019)。该地区有多处层控型铅锌矿床, 广泛分布于侏罗纪沉积岩中, 区内出露的地层主要为侏罗纪费罗扎巴德群(Ferozabd Group)和侏罗纪—白垩纪帕尔群(Parh), 由老到新依次为斯平沃组、劳瑞莱组、安吉拉组、塞姆班组, 其中, 下白垩统—上侏罗统塞姆班组不整合上覆侏罗纪费罗扎巴德群。这些具有重要经济价值的铅锌矿和重晶石矿均位于劳瑞莱组碳酸盐岩层序和安吉拉组

深海硅质碎屑岩层序中(图 9)(Ahsan et al., 1997, 1999)。

该区构造演化主要与两期造山运动有关(Ahsan et al., 1999)。第一期造山作用发生在晚三叠世到白垩纪期间, 与冈瓦纳大陆的裂解有关(Powell, 1979; Lydon, 1989; Ahsan et al., 1999)。在这个阶段, 裂谷作用和区域伸展构造起关键作用, 区内的赋矿岩石代表了伸展构造体制下的沉积作用, 而侏罗系费罗扎巴德群的纵向相变则反映了裂谷作用(Ahsan et al., 1999)。第二期造山运动则是由印度板块与图兰地块分离造成的(Powell, 1979)。晚白垩世—古近纪期间, 印度板块在西部与欧亚板块中的阿富汗陆块和中伊朗陆块碰撞, 导致在巴基斯坦中南部形成近南北向的穆斯林巴赫-贝拉蛇绿岩带(Ahsan et al., 1999)。

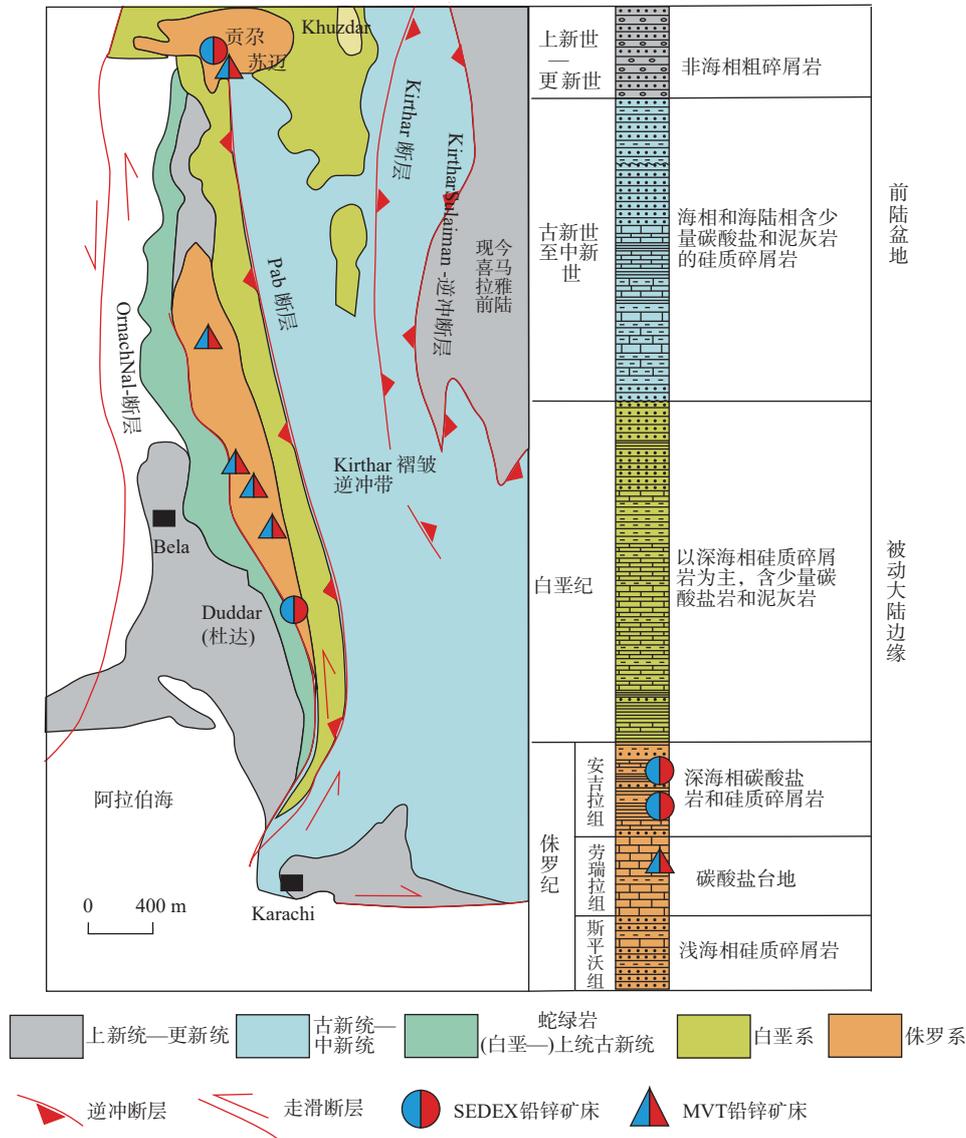


图 8 巴基斯坦胡兹达尔-拉斯贝拉地质简图(据 Song et al., 2019 修)

Fig. 8 Simplified geological map of Khuzdar-Lasbela, Pakistan

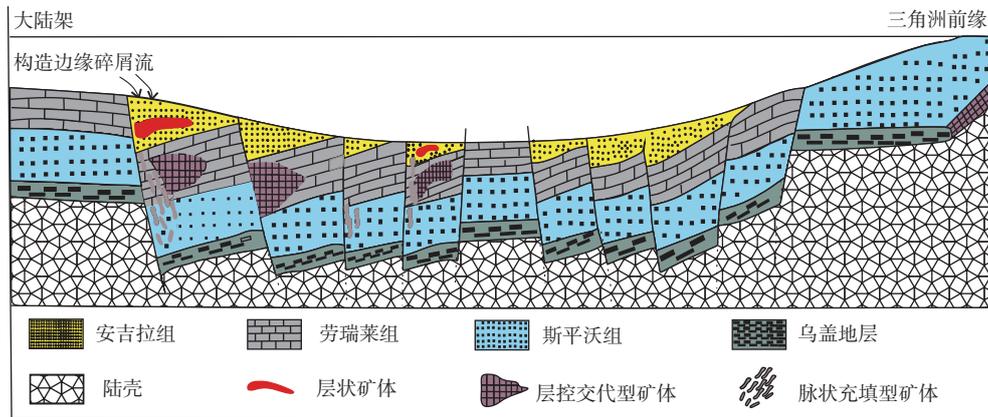


图9 胡兹达尔-拉斯贝拉地区铅锌硫化物矿床成矿构造示意图(据 Large, 1980; Ahsan et al., 1999; 张辉善, 2021)

Fig. 9 Schematic diagram of mineralization structure of Pb-Zn deposits in Khuzdar-Lasbela area

2.3.3 矿床成因

胡兹达尔-拉斯贝拉铅锌成矿带中,矿床成因类型主要为喷流沉积型和密西西比河谷型。

喷流沉积型:该类铅锌矿主要产于中上侏罗统的碳酸盐岩、泥岩和细粒碎屑岩中,容矿岩石多为暗灰色灰岩和浅灰色钙质页岩。矿体产状与赋矿地层基本一致,多呈似层状,其 upper 和顶部常发育重晶石和萤石。矿石以方铅矿和闪锌矿为主,伴生银和锑等组分。喷流沉积型铅锌矿主要有杜达和贡杂等矿床。贡杂铅锌矿受中上侏罗统安吉拉组控制,矿体呈层状产出,矿石组分为方铅矿、闪锌矿、硫锑铅矿、针硫锑铅矿、黄铁矿、重晶石等。杜达铅锌矿也受中上侏罗统安吉拉组控制,产于灰黑色灰岩和泥岩中,具有多阶段成矿的特点,矿石矿物以闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿为主,脉石矿物主要包括石英、方解石和有机质。

密西西比河谷型:该类铅锌矿与喷流沉积型铅锌矿均主要分布在俾路支省的胡兹达尔-拉斯贝拉地区,该区主要岩性为厚层深灰色灰岩,夹有浅灰色页岩、砂岩和泥岩。矿体主要产于下侏罗统劳瑞莱组中,矿体主要呈浸染状、层状、透镜状等,金属矿物主要有方铅矿、闪锌矿,含少量的黄铜矿、针硫锑矿、黄铁矿、白铁矿等。该地区典型的密西西比河谷型铅锌矿为苏迈铅锌矿床。

张辉善(2021)厘定了杜达(Duddar)铅锌矿成因类型属于喷流沉积型,并受后期改造作用。通过碳质泥岩(含矿围岩)Re-Os定年,获得杜达矿床铅锌成矿年龄为(187.8±6.3) Ma。初步建立杜达铅锌矿多阶段成矿模型,早期阶段深部热液流体沿同生断裂上涌,形成网脉状矿石,成矿物质主要来源于底部岩石。晚期阶段,随着成矿作用持续进行,热液流体与富含矿

物质的沉积物不断发生反应,形成层状和角砾状矿体,其中 S^{2-} 主要是海水硫酸盐矿物经历了TSR和BSR过程所提供,成矿物质主要来源于底部岩石和含矿围岩。在该阶段层状矿体形成中,记录了黄铁矿从早期富集轻硫,后期富集重硫的生长过程。

2.4 碳酸岩型稀土矿

2.4.1 碱性岩浆活动期次和时代

白沙瓦平原碱性火成岩省(PPAIP)位于巴基斯坦西北部KPK省,以广泛出露的碱性花岗岩、正长岩、霞石正长岩和碳酸岩为特征。大地构造位置属于印度板块西北缘,由晚古生代—中生代的变质岩和不同时代的碱性岩组成,故而被定义为白沙瓦平原碱性火成岩省(PPAIP)(Kempe et al., 1970, 1980; Coward et al., 1987)。PPAIP北侧以主地幔逆冲断裂(MMT)为界,南侧则由主边界逆冲断裂(MBT)所分隔,构成约300 km宽的喜马拉雅逆冲褶皱带(Khattak et al., 2012)(图10)。该单元的地质特征主要表现为由早古生代的结晶基底和具有低喜马拉雅的沉积变质盖层组成,变质相为绿片岩相—角闪岩相。碳酸岩和相关的碱性岩侵位于强烈变形的变质地层中,变形构造主要是在~50 Ma印度—欧亚大陆碰撞过程所形成的(Hussain et al., 2004; Dipietro et al., 2004; Hou et al., 2009; Ahmad et al., 2013)。PPAIP由若干个碱性岩—碳酸岩杂岩体构成,包括Loe Shilman碳酸岩、Michni碱性岩、Warsak碱性花岗岩、Koga碳酸岩—碱性杂岩、Sillai Patti碳酸岩和Tarbela碱性岩等(Butt et al., 1989; Ahmad et al., 1990)。

通过对Koga和Dunkeldik碳酸岩开展锆石U-Pb年代学研究,并结合前人已经发表的年代学数据,将巴基斯坦北部的碳酸岩—碱性岩浆活动划分为两个期

次。研究区最早的碱性岩浆活动为晚石炭世—早二叠世, 包括 Koga 和 Loe Shiman 碳酸岩。前人主要采用 Rb-Sr 法和 K-Ar 法开展年代学研究, Ahmad 等 (2013) 统计了这些测年结果, 这些数据跨度范围较大, 约为 468~265 Ma。洪俊 (2021) 利用高精度 SHRIMP 锆石 U-Pb 获得 Koga 碱性岩的形成时代, 为早期碱性岩浆活动提供重要的约束。两件英碱正长岩中锆石记录的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄比较集中, 为 291.0~278.5 Ma, 加权平均值分别为 (283.6±1.7) Ma (MSWD = 1.4, n = 17) 和 (281.9±1.6) Ma (MSWD = 1.4, n = 17)。Koga 正

长岩样品获得的年龄与英碱正长岩非常接近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (282.6±1.6) Ma (MSWD = 0.66, n = 20)。另外, 碱性花岗岩样品获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (306.5±3.7) Ma (MSWD = 2.56, n = 18)。第二期碳酸岩-碱性岩的侵位时代为古近纪, 以白沙瓦地区的 Jambil 和 Sillai Patti 碳酸岩为代表。Sillai Patti 碳酸岩中黑云母 K-Ar 法获得的年龄为 (31±2.0) Ma, 但也有研究者认为随后的逆冲断裂活动会导致黑云母在造山运动中发生重置, 影响年龄的准确性 (Le Bas et al., 1987; Mian, 1988)。除了在白沙瓦碱性火成岩省

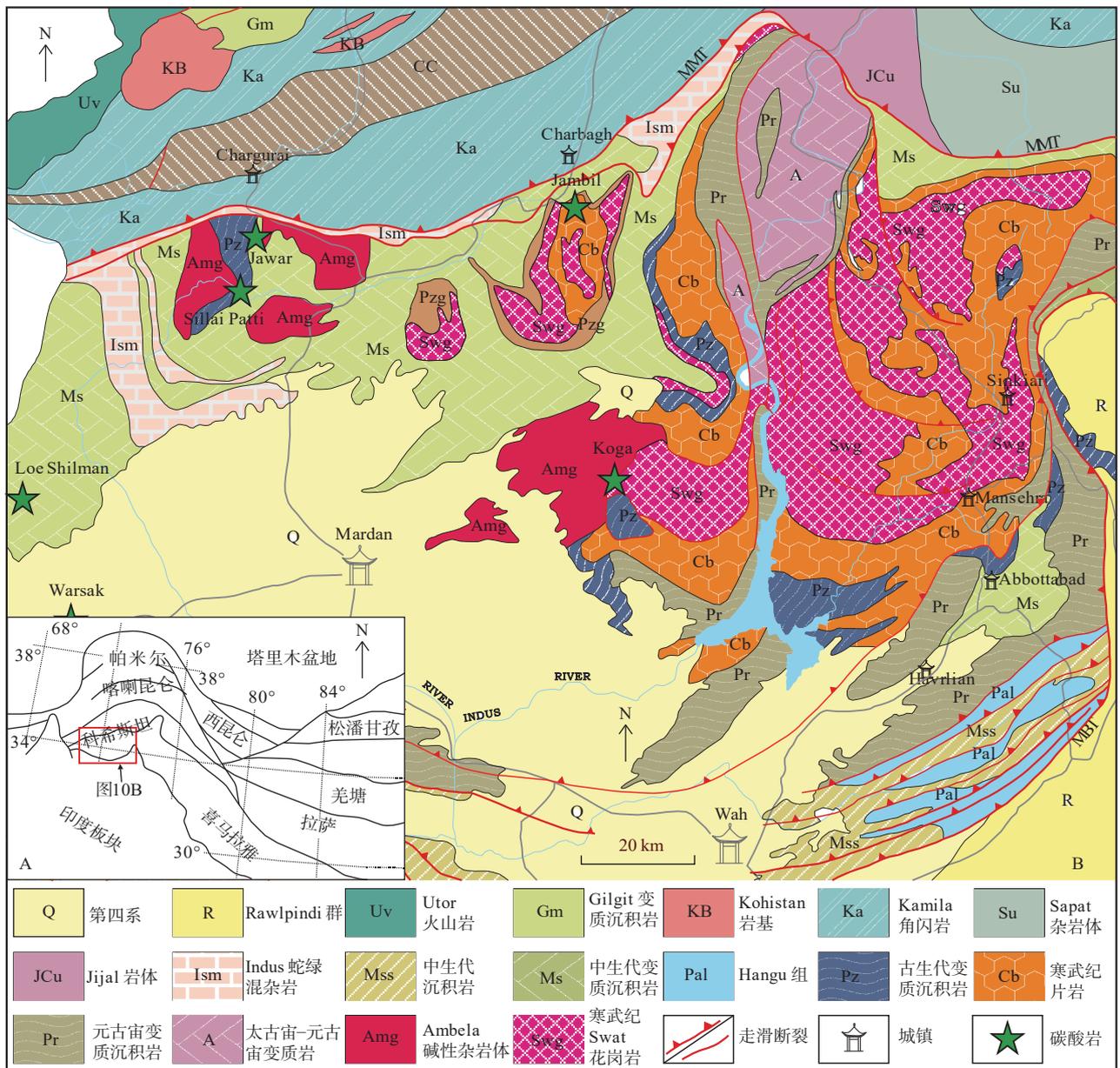


图10 白沙瓦平原碱性火成岩省大地构造位置(A)和区域地质图(B)

Fig. 10 (A) Tectonic map and (B) Geological map of the occurrences of carbonatite complexes in Peshawar Plain alkaline igneous province (PPAIP)

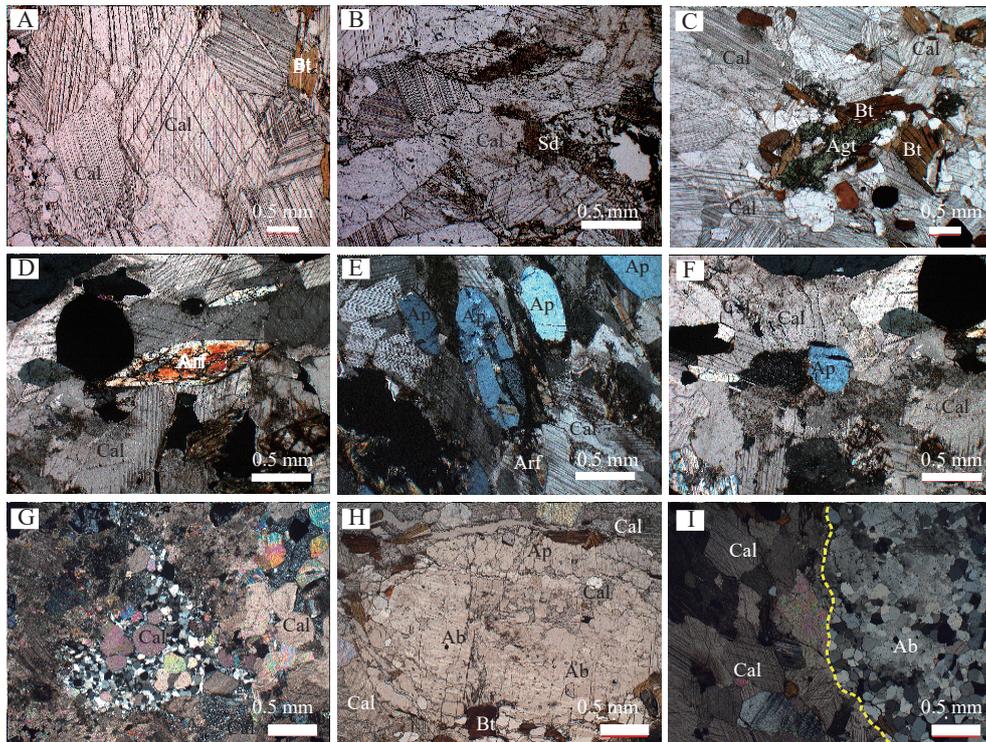
的古近纪碱性岩浆活动外,最近还有学者报导在科希斯坦岛弧中也发育伴有REE矿化的正长岩类,并通过锆石U-Pb法获得正长岩的结晶年龄为(31.2±0.3) Ma (Hussain et al., 2020)

2.4.2 碳酸岩-碱性岩岩石地球化学特征

Sillai Patti 碳酸岩主要为中-粗粒粒状结构,块状构造,主要矿物组成包括方解石(65%~75%)、磷灰石(10%~15%)、角闪石(<5%)、黑云母(<5%)和少量的霓辉石、钠长石、独居石、钾长石、石英、钠铁闪石,以及不透明矿物菱铁矿、磁铁矿等。岩石中的主要含REE矿物除了独居石外,见少量烧绿石、褐帘石。方解石(0.3~2 mm)呈半自形-他形结构(图 11A),显示中等-强波状消光特征,局部见铁质析出,沿着晶体边缘向中心逐渐被菱铁矿取代(图 11B)。霓辉石(0.2~1 mm)呈自形晶,显示港湾状边缘,常与方解石和黑云母共生(图 11C)。角闪石主要见钠铁闪石,显示多色性,呈菱形柱状穿插早期的方解石颗粒(图 11D)。

磷灰石是 Sillai Patti 碳酸岩中除方解石外主要矿物,以他形粒状、柱状为主,粒径为 0.2~3 mm(图 11E、图 11F)。钠长石等硅酸盐矿物以矿物包裹体形式出现在碳酸岩中,钠长石或呈细粒集合体形式,其中包含自形的细粒方解石颗粒(图 11G),或呈大的椭圆形矿物包裹体,其边缘镶嵌细粒黑云母颗粒(图 11H),硅酸盐矿物包裹体与周围方解石颗粒接触关系截然(图 11I)。

碳酸岩总体上具有较低的 SiO₂ 含量(≤ 2.0%)和全碱含量(K₂O + Na₂O ≤ 0.5%),全铁 FeO^t 和 MgO 变化范围较大,分别为 0.87%~6.01% 和 0.4%~2.12%。根据 Woolley 等(2008)对火成碳酸岩的分类,利用 CaO, FeO^t + MnO 和 MgO 含量的三角图解,所有碳酸岩样品划分为钙质碳酸岩(Hong et al., 2019)。Koga 正长岩类具有较高的 SiO₂(62.79%~65.58%)、Al₂O₃(16.92%~18.55%)和全碱(K₂O + Na₂O = 11.86%~12.89%; Na₂O > K₂O)含量,和较低的 MgO(0.10%~



A. 粗粒碳酸岩中方解石和黑云母颗粒,方解石解理发育,黑云母在方解石粒间充填; B. 岩石发生蚀变,方解石局部出溶菱铁矿; C. 碳酸岩中半自形的霓辉石颗粒,与黑云母、方解石共生; D. 棕色的角闪石颗粒呈棱柱状,穿插早期的方解石颗粒; E. 碳酸岩中磷灰石含量较高,呈蓝色,与钠铁闪石共生; F. 方解石颗粒中呈自行晶的磷灰石; G. 细粒钠长石颗粒与自形的细粒方解石; H. 钠长石呈矿物包裹体形式出现,内部包含方解石,边部为细粒黑云母; I. 细粒钠长石组成矿物包裹体,与方解石界线截然; Ab. 钠长石; Agt. 霓辉石; Ap. 磷灰石; Bt. 黑云母; Cal. 方解石; Sd. 菱铁矿

图 11 巴基斯坦西北部白沙瓦碱性火成岩省 Sillai Patti 碳酸岩代表性显微照片

Fig. 11 Representative photomicrographs of rocks from the studied carbonatite complexes of the Sillai Patti area, NW Pakistan

1.66%)、 TiO_2 (0.10%~0.29%) 含量。

Sillai Patti 碳酸岩的 Sr、Nd 同位素组成主要以相对高的 Sr 初始比值 ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70474 \sim 0.70557$) 和负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 ($-2.21 \sim -1.71$) 为特征。碳酸岩中方解石的 Sr-Nd 同位素具有类似的特征, ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 $0.70475 \sim 0.70486$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-3.6 \sim -3.2$ 。所有的数据点均投点在 HIMU-EMI 混合线上 (图 12)。

而 Koga 地区的碳酸岩-碱性岩的 Sr-Nd 同位素特征明显与 Sillai Patti 碳酸岩不同, 表现为较低的 Sr 初始比值) 和正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 $0.70233 \sim 0.70382$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $+3.10 \sim +3.47$ (图 12)。Sillai Patti 碳酸岩的 Pb 同位素以相对稳定的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值 ($39.427 \sim 39.585$) 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值 ($15.553 \sim 15.643$), 变化较大的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ($18.67 \sim 20.31$) 值为特征。

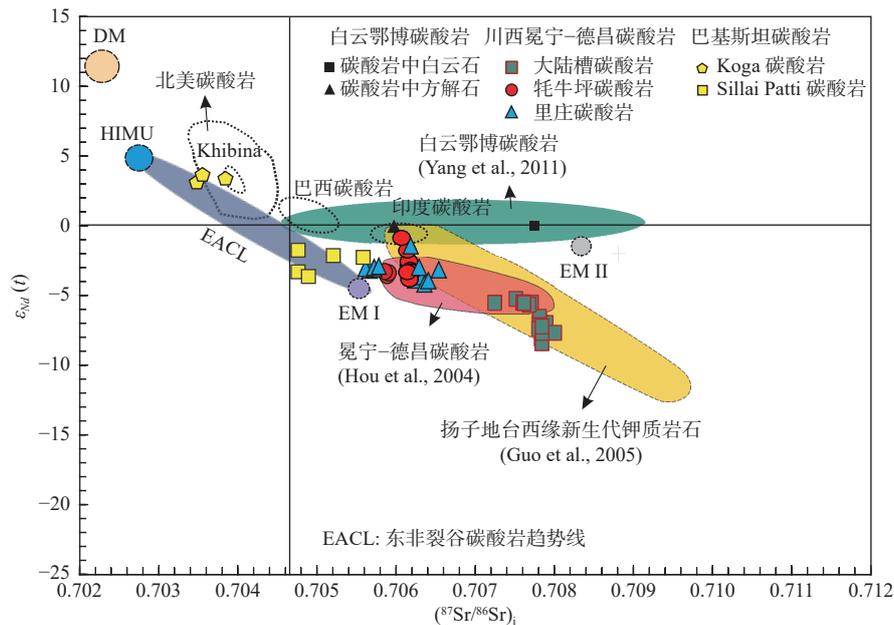


图12 巴基斯坦西北部碳酸岩以及世界范围内碳酸岩的全岩 Sr-Nd 同位素图解

Fig. 12 Whole-rock Sr-Nd isotopic compositions of carbonatite from NW Pakistan and carbonatites from around the world

2.4.3 碳酸岩型 REE 矿成岩-成矿机制

微量和稀土元素分析数据显示, Sillai Patti 碳酸岩以强烈富集 Sr、Ba 和 LREE, 相对亏损 Nb、Ta 为特征 (Hong et al., 2019)。碳酸质岩浆演化中可以通过壳内过程达到 Sr、Ba 和 LREE 的强烈富集, 如亚固相下的再活化过程 (Ling et al., 2013) 和流体不混溶过程 (Yang et al., 2019)。但 Sillai Patti 碳酸岩缺乏与同时代的碱性岩共生, 所以不能用碳酸质岩浆与硅酸盐岩浆液态不混溶来解释。前人的研究已经证明, 世界范围的大多数碳酸的 Sr-Nd-Pb 同位素特征类似于 OIB (Hou et al., 2015b), 这些碳酸岩被广泛认为是起源于软流圈物质上涌或者地幔柱活动触发的岩石圈地幔部分熔融 (Bell et al., 2010)。Sr-Nd 同位素分析结果显示, Sillai Patti 碳酸岩具有高 Sr、低 Nd 的同位素比值及负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 ($-2.2 \sim -1.7$)。在 Sr-Nd 同位素图解中 (图 12), 所有样品均落在 HIMU-EMI 的混合线, 且更加靠近 EMI 地幔端元。这种 Sr 同位素组成

的碳酸岩是受到与地壳物质相互作用的低温蚀变引起的 (Simonetti et al., 1995)。此外, Pb 同位素的异常也暗示原始碳酸质熔体上升过程中受到地壳的 Pb 混染。C-O 同位素组成显示所有的 Sillai Patti 碳酸岩样品较原生的火成碳酸岩具有重的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 也是低温热蚀变的结果。综上所述, 笔者认为 Sillai Patti 碳酸岩起源于次大陆岩石圈地幔部分熔融, 并受到地壳物质的混染。

绝大多数的内生轻稀土矿床都与碳酸岩和(或)碱性杂岩体有关, 碳酸岩也经常作为稀土勘探的主要岩石类型 (Kanazawa et al., 2006)。碳酸岩是所有火成岩中 REE 含量最高且轻重 REE 分异最大的岩石类型之一, REE 平均含量高于原始地幔 500~1000 倍 (Nelson et al., 1988), 但仅有少数碳酸岩蕴含具有经济价值的稀土矿床 (Woolley et al., 2008)。根据已有研究, 无矿碳酸岩主要分布在东非裂谷附近, 而含矿碳酸岩主要位于克拉通边缘或造山带环境, 如内蒙白云鄂博

(Yang et al., 2009, 2016)、川西地区的牦牛坪(Hou et al., 2006)和南秦岭地区庙垭(Xu et al., 2010)是中国与碳酸岩有关的大型稀土矿床。形成大型-超大型碳酸岩有关的稀土矿的控制因素在最近的研究中广泛讨论(Hou et al., 2015b; Jia et al., 2020; Feng et al., 2020)。大规模的碳酸岩-碱性岩体、广泛发育的后期热液蚀变、多阶段构造作用、高度演化的流体的参与等(Liu et al., 2017),此外,地幔源区特征、岩浆和热液演化过程对成矿也具有关键控制作用(Jia et al., 2020)。

Sillai Patti 碳酸岩起源于受俯冲沉积物流体交代的岩石圈地幔部分熔融,源区有一定程度的 REE 预富集,但尚未形成工业规模的 REE 矿床,因为不发育伟晶岩阶段及后期热液阶段,缺乏大规模热液作用的进一步富集。P 的地球化学行为对岩浆中 REE 含量具有重要控制作用(Feng et al., 2020)。P 元素的存在使得在地幔低程度部分熔融过程或者碳酸岩-硅酸盐液态不混溶过程中碳酸质岩浆进一步富集更多的 REE。但一旦岩浆中非常富 P 时,将会在分离结晶过程中出现 P 的过饱和,导致富 P 矿物(如磷灰石)或者富 P 的熔体发生分离,进而致使岩浆演化过程中亏损 REE。

3 构造-岩浆演化与区域成矿规律讨论

3.1 巴基斯坦构造-岩浆演化

巴基斯坦处于欧亚板块、阿拉伯板块和印度板块的交汇部位,中生代以前分别属于三大板块的范畴,中生代以来,由于印度板块向西北的斜向俯冲,导致新特提斯洋消亡和随后的陆-陆碰撞,形成了现今的大地构造格局,其构造演化历史及成矿作用也与新特提斯演化与陆-陆碰撞过程密切相关(张洪瑞等, 2010; 吕鹏瑞等, 2017)。

在晚石炭世—早二叠世,冈瓦纳大陆北缘发生裂谷作用,微陆块裂解并向北漂移导致新特提斯的形成(Palin et al., 2018)。这次裂解事件形成了 Panjal Traps 群超过 3 000 m 厚的高 Ti 溢流玄武岩,代表了典型的大火成岩省产物(Palin et al., 2018)。洪俊(2021)利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 对巴基斯坦北部碳酸岩-碱性岩开展年代学研究,结果显示 Koga 碱性岩形成的时代为(283.6±1.7) Ma 和(281.9±1.6) Ma,与早二叠世冈瓦纳大陆北缘的裂解时限接近。

晚侏罗世(158~155 Ma),新特提斯洋处于汇聚阶段,沿着新特提斯洋中的转换断层发生洋内初始俯

冲,形成了典型的英云闪长岩-弧前玄武岩-玻安岩岩石组合,代表了科希斯坦弧初始俯冲阶段的岩浆产物。

晚白垩世,阿拉伯板块向北运动,推动这新特提斯洋盆的持续消减,生成了一系列火山岩浆弧,在巴基斯坦的西南部的查盖地区发育一套晚白垩世的玄武安山岩-安山岩系列,具有明显的岛弧岩浆岩地球化学特征(Nicholson et al., 2010; Richards et al., 2012)。因此,查盖岩浆弧也被认为是一个洋内弧。在巴基斯坦北部,新特提斯洋俯冲消减,导致科希斯坦弧于欧亚板块发生碰撞,弧-陆碰撞导致什约克(Shyok)小洋盆的闭合,形成了什约克缝合带。晚白垩世是科希斯坦岩浆作用的一个明显峰期,以(100~90) Ma 科希斯坦岩基为代表,下部由辉长岩和辉长苏长岩组成,中上部由闪长岩和花岗闪长岩组成,岩石具有典型陆缘弧地球化学特征。

Ding 等(2016)根据巴基斯坦北部喜马拉雅古新世—中新世地层序列及碎屑锆石数据认为印度-欧亚大陆的初始碰撞为(56~55) Ma。古近纪是科希斯坦弧岩浆作用的爆发期,结合前人的年代学数据,岩浆岩的年龄大多为(53~47) Ma,岩浆峰期在 50 Ma 左右,并广泛分布于 Yasin、Gilgit 一带,是同碰撞花岗岩的代表。

渐新世—中新世(26~10 Ma)以来,印度-欧亚板块进入后碰撞伸展阶段,在冈底斯南部广泛发育二长花岗斑岩、二长斑岩以及英安岩和流纹岩,这些岩石具有高硅、高铝、高 Sr/Y 值,显示出埃达克质岩石的典型地球化学特征。因此,大多数研究认为这些岩石起源于新生加厚下地壳的部分熔融(Yang et al., 2016)。在巴基斯坦北部,后碰撞阶段主要发育地壳部分熔融的淡色花岗岩,呈岩席状侵入早期科希斯坦岩基中。此外,在喜马拉雅、科希斯坦弧和南帕米尔,还发育渐新世—中新世的碱性岩-碳酸岩岩浆活动(包括 Sillai Patti 和 Dunkeldik 碳酸岩)。碳酸岩-碱性岩的形成是由于在后碰撞阶段板片断裂或局部岩石圈拆沉作用导致软流圈物质上涌,进而触发的次大陆岩石圈地幔部分熔融的产物,受地壳混染和低温蚀变的影响。

在巴基斯坦西部,阿拉伯板块和欧亚板块之间的初始碰撞时限也存在争议,但多数研究认为是(35~25) Ma(Agard et al., 2011; Mouthereau et al., 2012; Hou et al., 2015c)。阿拉伯板块向北斜向俯冲碰撞,火山作用主要位于伊朗东部的鲁特地块和查盖岩浆弧,诱发弧岩浆活动和一系列构造变形,发育了查曼大型

逆冲走滑断裂系和由 NW 向、NE 向呈拱形的大恰帕尔、拉吉科和德拉纳科断层。

始新世—渐新世, 阿拉伯板块、印度板块和欧亚板块碰撞形成的缝合带起于土耳其西部的塞浦路斯, 向东到土耳其的比特利斯缝合带, 沿伊朗的扎格罗斯缝合带向东南方向入阿曼湾, 在洋底以莫克兰海沟的形式出现, 最终在巴基斯坦的瓦济里斯坦—穆斯林巴赫—贝拉缝合带登陆。在巴基斯坦西南部的莫克兰残余洋盆至今尚未关闭, 印度洋洋壳平缓向北持续俯冲, 在查盖地区形成了中—晚始新世(43~37 Ma)、早中新世(24~21 Ma 和 18~15 Ma)、中中新世(13~10 Ma)和晚中新世—早上新世(6~4 Ma)4 期浅成斑岩和火山活动, 斑岩和火山岩的岩石地球化学研究均显示典型陆缘弧地球化学特征。

3.2 区域成矿规律

与蛇绿岩有关的铬铁矿、斑岩型铜金矿以及碳酸岩型稀土矿床是特提斯构造域的特色成矿类型(张洪瑞等, 2010), 这 3 种类型矿床在巴基斯坦广泛发育, 铬铁矿主要沿科希斯坦弧南部缝合带、中部瓦济里斯坦—穆斯林巴赫—贝拉缝合带分布, 斑岩型矿床集中在巴基斯坦西南部的查盖岩浆弧, 而碳酸岩型稀土矿主要分布在巴基斯坦北部白沙瓦地区和南帕米尔地区。巴基斯坦不同类型矿床的产出与新特提斯洋演化及大陆碰撞过程密切相关(图 13), SEDEX 型铅锌矿床形成于新特提斯洋盆扩张阶段, 与镁铁质—超镁铁质岩有关的铬铁矿形成于洋盆俯冲消减阶段, 在陆陆碰撞阶段仰冲就位。碳酸岩形成于二叠纪和新生代两个时期, 晚期的碳酸岩与稀土成矿密切相关, 形成于后碰撞伸展阶段, 可能与局部岩石圈拆沉作用有关。查盖斑岩铜矿带主体成矿时代为(22~11) Ma, 但在该地区还残余尚未关闭的洋盆, 先进仍处于俯冲阶段。在厘定巴基斯坦构造—岩浆演化的基础上, 通过典型矿床的对比研究, 建立构造演化—成矿模型(图 14), 总结区域成矿规律, 初步分析巴基斯坦优势矿产资源潜力。

3.2.1 蛇绿岩有关的铬铁矿

在巴基斯坦存在两种不同类型的铬铁矿, 一类以吉佳尔层状铬铁矿赋存于科希斯坦弧的底部, 形成于大洋俯冲阶段(晚侏罗世—早白垩世)。岩石地球化学和铬尖晶石矿物化学成分图解显示其形成于岛弧环境, 与初始俯冲阶段的玻安质熔体有关, 显示易剥橄榄岩—方辉橄榄岩—纯橄岩的结晶分异序列, 是高温环境下科希斯坦弧底部超基性岩浆堆晶作用的产物。

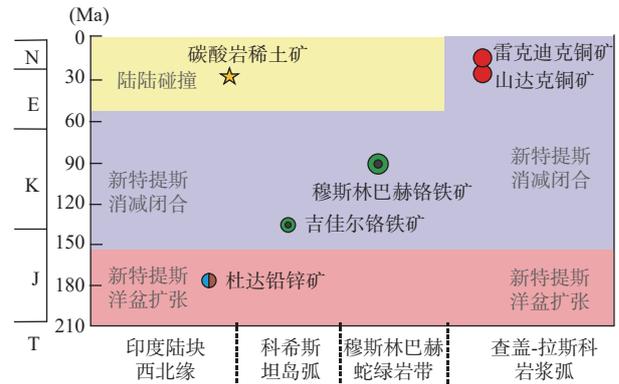
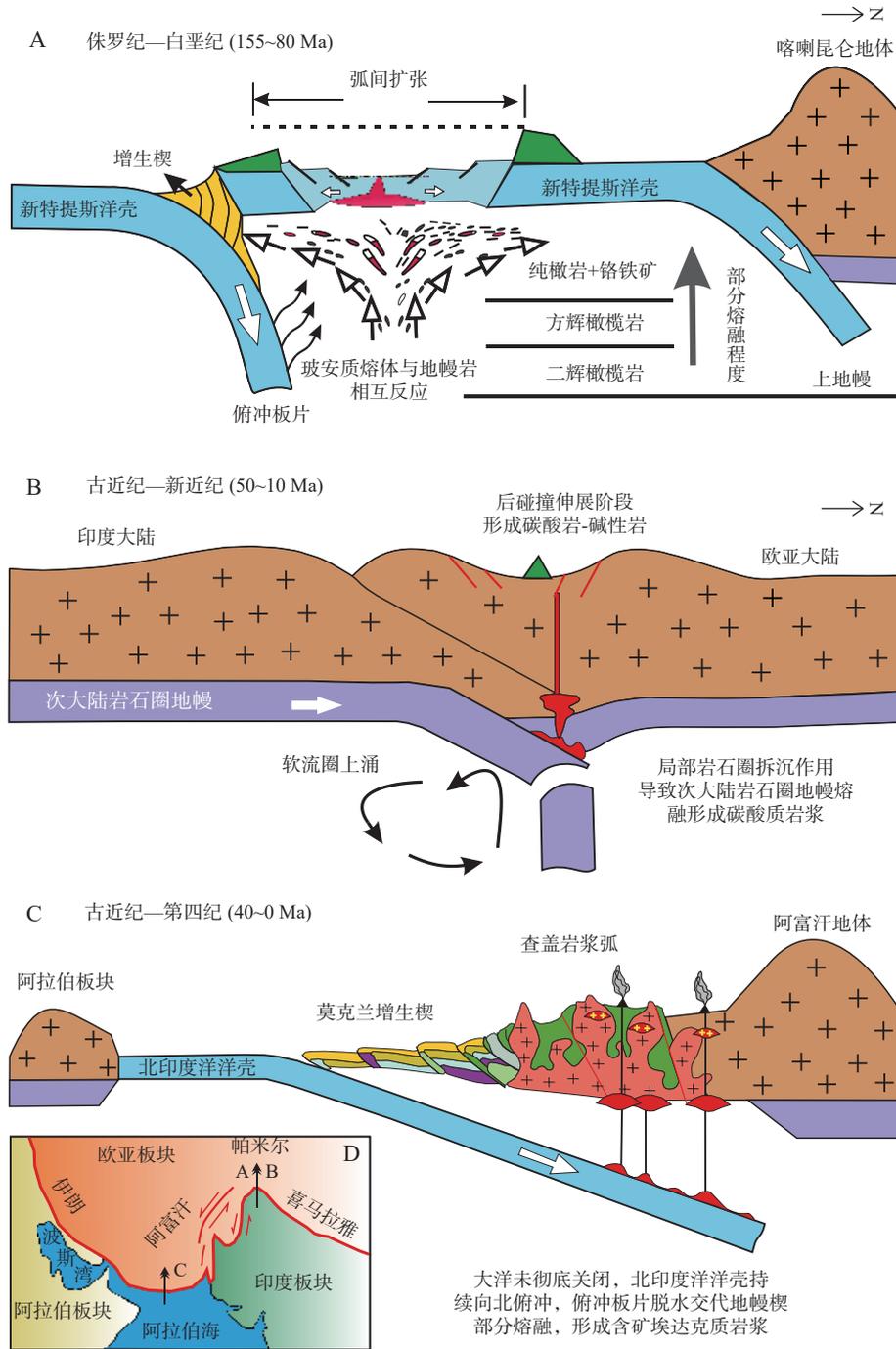


图 13 巴基斯坦主要构造事件与矿床时空结构分布示意图

Fig. 13 Tectonic events and main mineral deposits spatiotemporal distribution of Pakistan

第二类以中部蛇绿岩带中穆斯林巴赫矿床为代表, 赋存在穆斯林巴赫型蛇绿岩底部地幔橄榄岩中, 蛇绿岩形成时代为~80 Ma, 在晚白垩世—古近纪时期仰冲就位(Xiong, 2011)。岩石地球化学显示其具有 SSZ 型蛇绿岩的特征(Kakar et al., 2014)。铬铁矿的产出与方辉橄榄岩+纯橄岩的岩相组合密切相关, 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岩为主, 绝大部分产于蛇纹石化纯橄岩中, 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岩, 所以含矿蛇绿岩中一般不出现大量二辉橄榄岩。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(Arif et al., 2006)。巴基斯坦的德尔盖、尚拉—明戈拉、瓦齐里斯坦、穆斯林巴赫和贝拉岩体 5 个岩体的特征, 接近中国的罗布莎岩体, 富 Cr、贫 Al、低 Ti, 这也是世界上典型阿尔卑斯型铬铁矿的特征。这几个岩体中的副矿物铬尖晶石所反映的成矿构造环境是从 MOR 向 SSZ 的过渡环境, 在 SSZ 环境, 俯冲洋壳所释放出的富含 H₂O 以及大离子亲石元素的流体交代其上部呈地幔楔产出的亏损地幔橄榄岩, 降低了地幔橄榄岩的熔点, 且伴随着俯冲带环境的挤压作用, 俯冲带之上已亏损的地幔橄榄岩发生再次高度熔融并产生快速上升, 加剧了地幔橄榄岩的高度熔融, 形成了富铬型铬铁矿。综上所述, 巴基斯坦的穆斯林巴



A. 新特提斯洋消减阶段, 俯冲板片脱水加速地幔部分熔融, 产生的玻安质熔体与亏损的地幔橄榄岩相互反应形成铬铁矿; B. 55~50 Ma, 印度-欧亚大陆发生碰撞, 在后碰撞构造体制下, 局部岩石圈拆沉作用触发岩石圈地幔部分熔融产生碳酸质岩浆和碱性岩浆; C. 巴基斯坦西南部的莫克兰-查盖地区, 北印度洋洋壳持续向北俯冲, 形成俯冲型斑岩铜矿床; D. 巴基斯坦构造位置和不同构造体制相对位置示意图

图14 巴基斯坦不同阶段构造-岩浆演化与成矿模式图

Fig. 14 Tectono-magmatic evolution and mineralization model of Pakistan

赫、瓦济里斯坦以及贝拉等岩体主要赋存在 SSZ 型蛇绿岩中, 有一定的规模、部分熔融程度较高, 显示特定的岩相组合, 具有较好的找矿潜力。

3.2.2 斑岩型铜(金)矿

查盖火山岩浆弧是巴基斯坦最重要的铜金成矿带, 已经发现包括雷克迪克(Reko Diq)和山达克(Sain-

dak)大型-超大型斑岩型铜金矿,先后先后经历了中—晚始新世(43~37 Ma)、早中新世(24~22 Ma和18~16 Ma)、中中新世(13~10 Ma)和晚中新世—早上新世(6~4 Ma)4次主要成矿作用(Siddiqui et al., 2007; Perelló et al., 2008)。山达克斑岩铜金矿主要赋存在石英闪长斑岩中,矿化类型为细脉型、细脉浸染型和少量角砾岩型。矿床发育钾硅酸盐化、娟英岩化和青磐岩化等围岩蚀变类型,具有良好的蚀变分带,该矿床具有典型的斑岩型矿床的蚀变分带特征。岩石地球化学特征显示其为中钾钙碱性岩石系列,具有埃达克质岩石地球化学特征,富集不相容元素、亏损高场强元素,具有高 Sr、低 Y 和高 Sr/Y 值。但其 Sr/Y 值(52~83)和 La/Yb 值(10~25)明显低于冈底斯带和伊朗克尔曼成矿带后碰撞环境下的含矿斑岩(Aghazadeh et al., 2015; 张洪瑞等, 2018)。查盖成矿带经历了洋内弧到陆缘弧两个阶段,新特提斯洋在晚白垩纪—始新世的俯冲形成洋内弧,远离大陆边缘,始新世—渐新世,随着新特提斯洋的消减,岛弧逐渐向北漂移,以拼贴的方式增生到中阿富汗陆块南缘。随后,渐新世—第四纪北印度洋大洋板块以低角度俯冲形成一系列钙碱性系列火山岩和浅成斑岩岩株,岩浆起源于俯冲板片和上覆沉积物脱水交代地幔楔部分熔融(图 14)。伊朗的克尔曼成矿带和冈底斯成矿带的新世斑岩铜矿形成于后碰撞构造环境,岩浆起源于加厚的新生下地壳部分熔融,受板片断离或岩石圈拆沉诱发的软流圈物质上涌以及大陆后碰撞阶段伸展构造体制下。

综合对比分析,认为查盖斑岩铜矿带形成于俯冲构造环境下,其构造背景和深部动力学机制不同于后碰撞构造环境下斑岩铜矿,而类似于典型俯冲带斑岩型矿床,俯冲带构造环境也被认为是斑岩型矿床形成的最有利的构造环境(Sillitoe, 2010; Richards, 2012)。目前,在巴基斯坦查盖成矿带中目前已发现 40 余处斑岩型矿床(点),包括雷克迪克世界级斑岩铜矿,是世界最大的未开发铜矿之一。该成矿带中还有大量的斑岩铜矿化未经系统勘查和评价,找矿潜力巨大。此外,除了斑岩型铜矿床外,与斑岩型矿床空间密切相关的浅成低温热液型金矿和矽卡岩型铜多金属矿床也具有很大找矿潜力。

3.2.3 碳酸岩型 REE 矿床

巴基斯坦的碳酸岩-碱性岩主要分布在西北部白沙瓦平原碱性火成岩省(PPAIP),包括 Loe Shilman 碳

酸岩、Michni 碱性岩、Warsak 碱性花岗岩、Koga 碳酸岩-碱性杂岩、Sillai Patti 碳酸岩和 Tarbela 碱性岩等(Butt et al., 1989; Ahmad et al., 1990)。通过对 Koga 和 Dunkeldik 碳酸岩开展锆石 U-Pb 年代学研究,并结合前人已经发表的年代学数据,将巴基斯坦北部的碳酸岩-碱性岩浆活动划分为早二叠世、渐新世—中新世。早期 Koga 碳酸岩的 Sr-Nd-Pd 同位素特征显示其有较低的 Sr 初始比值和正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.702 33~0.703 82, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 +3.10~+3.47, 表明其源区具有 HIMU 和 EMI 两种地幔端元混合的特征,与东非裂谷带和北美碳酸岩等裂谷环境下碳酸岩的同位素特征相似(Nelson et al., 1988; Bell et al., 2010)。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中, Koga 碳酸岩样品基本 FOZO(Focal Zone)区域,类似于大部分板内侵入岩的特征。因此,笔者推测早期碳酸岩形成与早二叠世冈瓦纳大陆北缘的裂解事件有关,其源区特征和岩石成因与东非裂谷碳酸岩相似,碳酸岩中稀土总量较低,属于无矿碳酸岩。

Sillai Patti 碳酸岩以富含磷灰石为特征,主要矿物组成包括方解石(65%~75%)、磷灰石(10%~15%)、角闪石、黑云母和少量的霓辉石、钠长石、独居石、钾长石、石英、钠铁闪石以及不透明矿物。岩石中的主要含 REE 矿物除了独居石外,见少量烧绿石、褐帘石。Sr-Nd 同位素分析结果显示, Sillai Patti 碳酸岩具有高 Sr、低 Nd 的同位素比值及负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-2.2~-1.7)。在 Sr-Nd 同位素图解中(图 12),所有样品均落在 HIMU-EMI 的混合线,且更加靠近 EMI 地幔端元。C-O 同位素组成显示所有的 Sillai Patti 碳酸岩样品较原生的火成碳酸岩具有重的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,也是低温热蚀变的结果。综上所述,认为 Sillai Patti 碳酸岩起源于印度次大陆岩石圈地幔部分熔融,并受到地壳物质的混染,而触发部分熔融的深部动力学机制可能是后碰撞构造体制下局部岩石圈的拆沉作用(图 14B)。Sillai Patti 碳酸岩起源于受俯冲沉积物流体交代的岩石圈地幔部分熔融,源区有一定程度的 REE 预富集,但尚未形成工业规模的 REE 矿床,因为不发育伟晶岩阶段及后期热液阶段,缺乏大规模热液作用的进一步富集。通过对 Sillai Patti 碳酸岩中磷灰石的原位微量元素测试表明,这些磷灰石具有极高的 REE 含量($\sum\text{REE} = 6.637 \times 10^{-6} \sim 7.800 \times 10^{-6}$)。P 的地球化学行为对岩浆中 REE 含量具有重要控制作用(Feng et al., 2020),磷灰石或者富 P 的熔体早期发生分离,致使岩浆演化过

程中亏损 REE, 也不利于形成 REE 矿床。

综上所述, 与碳酸岩有关的稀土矿床成矿与地幔源区预富集、岩浆演化过程、热液阶段流体活动密切相关。首先, 形成大型-超大型碳酸岩有关的 REE 矿床, 需要富集 REE 的地幔源区, REE 元素的初始预富集, 是碳酸岩型 REE 矿床形成的重要基础。地幔源区经历交代作用过程, 从而使得碳酸岩具有较高放射性的 Sr 同位素组成。这类交代地幔的流体可能来自俯冲大洋沉积物脱水产生的富 CO₂ 流体或者蚀变洋壳产生的流体, 本区主要以前者为主。其次, 岩浆演化中适当的 P 元素存在会使得在液态不混溶等过程中 REE 元素向碳酸质岩浆中迁移, 稀土元素进一步富集, 但当 P 元素过饱和时, 会导致 REE 随着磷灰石等富 P 矿物分离, 使岩浆中不断亏损 REE, 无法形成工业规模的 REE 矿床。此外, 在岩浆期后的热液阶段存在 REE 再次富集, 可能是大规模成矿的重要阶段。REE 矿化发生在低温热液过程中, 伴随着大规模萤石、重晶石、方解石等脉石矿物的形成。因此, 区域上诸如 Dunkeldik 碳酸岩, 以萤石+重晶石+方解石+氟碳铈矿的矿物组合的碳酸岩更加具有 REE 找矿潜力, 因为在热液阶段, F⁻、SO₄²⁻和 CO₂ 对稀土的迁移和进一步富集沉淀非常关键。

4 结论

(1) 胡兹达尔-拉斯贝拉成矿带为特提斯铅锌巨型成矿带的组成部分, 主要类型包括喷流-沉积型 (SEDEX 型) 和密西西比河谷型 (MVT 型)。杜达铅锌矿成因类型属于 SEDEX 型, 并受后期改造作用, 其成矿物质主要来源于基底岩石和容矿围岩, 成矿时代为 (187.8±6.3) Ma, 即早侏罗世, 是新特提斯洋盆扩张阶段的产物。

(2) 巴基斯坦的铬铁矿成因类型包括两类, 一类以吉佳尔铬铁矿为代表, 矿石显示高度富铬、富铁的特征, 呈明显的层状构造, 是科希斯坦岛弧底部早期演化超镁铁质岩浆结晶分异的产物, 与起始俯冲过程有关; 另一类以穆斯林巴赫铬铁矿代表, 属于典型的与蛇绿岩有关的豆荚状铬铁矿, 产于蛇绿岩地幔橄榄岩底部。蛇绿岩均具有 SSZ 的特征, 形成于复合构造环境, 经历了从深部到浅部, 不同构造环境转变的演化过程。

(3) 巴基斯坦查盖斑岩型成矿带先后经历了中—

晚始新世以来 4 次斑岩成矿作用。矿床地质特征和含矿斑岩的地球化学特征显示其属于俯冲型斑岩铜矿, 而不同于后碰撞构造体制下的斑岩铜矿, 斑岩矿床的形成与北印度洋大洋板块持续低角度俯冲密切相关。

(4) 巴基斯坦的碱性岩-碳酸岩岩浆活动具有多期性, 早期的 Koga 碳酸岩形成于裂谷相关环境, 与冈瓦纳大陆北缘二叠纪裂谷作用有关。晚期的碳酸岩起源于次大陆岩石圈地幔部分熔融, 并受到地壳物质的混染, 其形成机制与印度板块-欧亚板块后碰撞构造体制下伸展作用有关。与碳酸岩有关的稀土矿床成矿作用与地幔源区预富集、岩浆演化过程和晚期热液阶段流体活动密切相关。

参考文献 (References):

- 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 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 [J]. *地质学报*, 2005, 79(6): 814-822.
- BAI Wenji, YANG Jingsui, FANG Qingsong, et al. A Study on Os-Ir-Ru Alloy and Boninitic Inclusion in the Luobusa Ophiolite, Tibet [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(6): 814-822.
- 鲍佩声. 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*, 2009, 28(12): 1742-1761.
- BAO Peisheng. 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): 1742-1761.
- 洪俊, 姚文光, 张晶, 等. 新特提斯缝合带中段豆荚状铬铁矿成矿规律对比研究 [J]. *地质学报*, 2015a, 89(9): 1618-1628.
- HONG Jun, YAO Wenguang, ZHANG Jing, et al. Comparative Study of Metallogenic Regularities of Chromite Deposits in the Middle of the Neotethys Suture Zone [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015a, 89(9): 1618-1628.
- 洪俊, 姚文光, 计文化, 等. 巴基斯坦基性-超基性岩铬尖晶石矿物化学及铬铁矿找矿潜力分析 [J]. *新疆地质*, 2015b, 33(2): 251-257.
- HONG Jun, YAO Wenguang, JI Wenhua, et al. Mineral Chemistry of picotites from mafic-ultramafic complexes of Pakistan and the prospecting potential [J]. *Xinjiang Geology*, 2015b, 33(2): 251-257.
- 洪俊. 巴基斯坦构造-岩浆演化与金属成矿作用研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2021.
- HONG Jun. Study on the tectono-magmatic evolution and related mineralization of Pakistan [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2021.
- 洪俊. 西藏罗布莎铬铁矿床铬尖晶石对比研究及成矿演化探讨

- [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- HONG Jun. Chromium spinel contrast research and metallogenic evolution of the Luobusha chromite deposit, Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- 吕鹏瑞, 姚文光, 张海迪, 等. 巴基斯坦贾盖火山岩带斑岩型铜-金矿床地质特征、成矿作用及找矿潜力[J]. *地质学报*, 2015, 89(9): 1629–1642.
- LÜ Pengrui, YAO Wenguang, ZHANG Haidi, et al. Geological Features, Mineralization and Ore-Prospecting Potential of Porphyry Cu-Au Deposits in the Chagai Volcanoplutonic Belt, Pakistan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(9): 1629–1642.
- 吕鹏瑞, 姚文光, 张辉善, 等. 特提斯成矿域中新世斑岩铜矿岩石成因、源区、构造演化及其成矿作用过程[J]. *地质学报*, 2020, 94(8): 2291–2310.
- LÜ Pengrui, YAO Wenguang, ZHANG Huishan, et al. Petrogenesis, source, tectonic evolution and mineralization process of the Miocene porphyry Cu deposits in the Tethyan metallogenic domain[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(8): 2291–2310.
- 吕鹏瑞, 姚文光, 张海迪, 等. 巴基斯坦成矿地质背景、主要金属矿产类型及其特征[J]. *地质科技情报*, 2016, 35(04): 150–157.
- LÜ Pengrui, YAO Wenguang, ZHANG Haidi, et al. Metallogenic setting, genetic types and geological features of main metallic deposits in Pakistan[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2016, 35(04): 150–157.
- 吕鹏瑞, 姚文光, 张辉善, 等. 巴基斯坦及中国邻区构造单元划分及其演化[J]. *西北地质*, 2017, 50(3): 126–139.
- LÜ Pengrui, YAO Wenguang, ZHANG Huishan, et al. Tectonic Unit Division and Geological Evolution of Pakistan and Its Adjacent Regions[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(3): 126–139.
- 王希斌, 周详, 郝梓国. 西藏罗布莎铬铁矿床的进一步找矿意见和建议[J]. *地质通报*, 2010, 29(1): 105–114.
- WANG Xibin, ZHOU Xiang, HAO Ziguang. Some opinions on further exploration for chromite deposits in the Luobusha area, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(1): 105–114.
- 王瑞, 朱弟成, 王青, 等. 特提斯造山带斑岩成矿作用[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(12): 1919–1946.
- WANG Rui, ZHU Dicheng, WANG Qing, et al. Porphyry mineralization in the Tethyan orogen[J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 50(12): 1919–1946.
- 吴福元, 万博, 赵亮, 等. 特提斯地球动力学[J]. *岩石学报*, 2020, 36(6): 1627–1674.
- WU Fuyuan, WAN Bo, ZHAO Liang, et al. Tethyan geodynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(6): 1627–1674.
- 熊发挥, 杨经绥, 巴登珠, 等. 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*, 2014, 30(8): 2137–2163.
- XIONG Fahui, YANG Jingsui, BA Dengzhu, et al. Different type of chromitite and genetic model from Luobusha ophiolite, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(8): 2137–2163.
- 熊发挥, 杨经绥, 刘钊. 豆荚状铬铁矿多阶段形成过程的讨论[J]. *中国地质*, 2013, 40(3): 820–839.
- XIONG Fahui, YANG Jingsui, LIU Zhao. Multi-stage formation of the podiform chromitite[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 820–839.
- 杨经绥, 徐向珍, 李源, 等. 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[J]. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3171–3178.
- YANG Jingsui, XU Xiangzhen, LI Yuan, et al. 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*, 2011, 27(11): 3171–3178.
- 张洪瑞, 侯增谦. 大陆碰撞带成矿作用: 年轻碰撞造山带对比研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(12): 1629–1654.
- ZHANG Hongrui, HOU Zengqian. Metallogenesis within continental collision zones: comparisons of modern collisional orogens[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2018, 48(12): 1629–1654.
- 张洪瑞, 侯增谦, 杨志明, 等. 特提斯成矿域主要金属矿床类型与成矿过程[J]. *矿床地质*, 2010, 29(1): 113–133.
- ZHANG Hongrui, HOU Zengqian, YANG Zhiming, et al. Metallogenesis and geodynamics of Tethyan metallogenic domain: A review[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(1): 113–133.
- 张洪瑞, 侯增谦, 贾敬伍, 等. 巴基斯坦穆斯林巴赫铬铁矿床[J]. *矿床地质*, 2013, 32(5): 1072–1074.
- ZHANG Hongrui, HOU Zengqian, JIA Jingwu, et al. Muslim Bagh Chromite Deposit in Pakistan[J]. *Mineral Deposits*, 2013, 32(5): 1072–1074.
- 张辉善. 新特提斯构造域中东段沉积岩容矿铅锌成矿作用: 以青海多才玛和巴基斯坦杜达矿床为例[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- ZHANG Huishan. Mineralization of Sediment-hosted Lead-Zinc Deposits in the Middle-East Segment of the Neo-Tethys Tectonic Domain: Examples from the Duocaima Deposit in Qinghai, China and the Duddar Deposit in Pakistan [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- Agard P, Omrani J, Jolivet L. Zagros orogeny: a subduction-dominated process[J]. *Geological Magazine*, 2011, 148: 692–725.
- Aghazadeh M, Hou Z Q, Badrzadeh Z, et al. Temporal-spatial distribution and tectonic setting of porphyry copper deposits in Iran: constraints from zircon U–Pb and molybdenite Re–Os geochronology[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 70: 385–406.
- Ahmad I, Hamidullah S, Jehan N. Petrology of the Shewa–Shahbaz Garhi complex, Mardan North Pakistan[J]. *Geological Bulletin University of Peshawar*, 1990, 23: 135–159.
- Ahmad I, Khan S, Lapen T, et al. Isotopic ages for alkaline igneous rocks, including a 26 Ma ignimbrite, from the Peshawar plain of northern Pakistan and their tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 62: 414–424.
- Ahsan S N, Mallick K A. Geology and genesis of barite Deposits of Lasbela and Khuzdar districts, Balochistan, Pakistan[J]. *Re-*

- source *Geology*, 1999, 49(2): 105–111.
- Ahsan S, Qureshi I. Mineral/rock resources of Lasbela and Khuzdar Districts[J]. *Geological Bulletin University of Peshawar*, 1997, 30: 41–51.
- Arai S, Abe N. Podiform chromitite in the arc mantle: Chromitite xenoliths from the Takashima alkali basalt Southwest Japan arc[J]. *Mineral Deposit*, 1994, 29: 434–438.
- Arif M, Qasim J. Petrotectonic significance of the chemistry of chromite in the ultramafic-mafic complexes of Pakistan[J]. *Journal of Asian Sciences*, 2006, 27(5): 628–646.
- Bell K, Simonetti A. Source of parental melts to carbonatites—critical isotopic constraints[J]. *Mineralogy & Petrology*, 2010, 98(1): 77–89.
- Bortolotti V, Principi G. Tethyan ophiolites and Pangea break-up[J]. *Island Arc*, 2005, 14: 442–470.
- Burg J P. Geology of the onshore Makran accretionary wedge: Synthesis and tectonic interpretation[J]. *Earth-Sciences Reviews*, 2018, 185: 1210–1231.
- Butt K A, Arif A Z, Ahmed J, et al. Chemistry and petrography of the Sillai Patti carbonatite complex, North Pakistan[J]. *Geological Bulletin University of Peshawar*, 1989, 22: 197–215.
- Coward M P, Butler R W H, Khan M A, et al. The tectonic history and its implications for Himalayan structure[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 1987, 144: 377–391.
- Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 347: 662–665.
- Dick H J B, Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1984, 86: 54–76.
- Ding N, Qasim M, Jadoon I A K, et al. The India–Asia collision in north Pakistan: Insight from the U–Pb detrital zircon provenance of Cenozoic foreland basin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 455: 49–61.
- DiPietro J A, Pogue K R. Tectonostratigraphic subdivisions of the Himalaya: a view from the West[J]. *Tectonics*, 2004, 23: TC5001.
- Feng M, Song W L, Kynicky J, et al. Primary rare earth element enrichment in carbonatites: Evidence from melt inclusions in Ulgii Khiid carbonatite, Mongolia[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 117: 103294.
- Fu F Q, McInnes B I A, Evans N J, et al. Thermal and exhumation history of the Parra Koh porphyry Cu–Au deposit, Pakistan: Thermochronology and inverse numerical modeling[C]. *Geological Society of America–Society of Economic Geologists Joint Annual Meeting (Salt Lake City, 2005)*, 2006, CD-ROM:1.
- Gweltaz M, Herve B, Stephane G. The south Ladakh ophiolites (NW Himalaya, India): an intra-oceanic tholeiitic arc origin with implication for the closure of the Neo-Tethys[J]. *Chemical Geology*, 2004, 203(3–4): 207–303.
- Hong J, Ji W H, Yang X Y, et al. Origin of a Miocene alkaline–carbonatite complex in the Dunkeldik area of Pamir, Tajikistan: Petrology, geochemistry, LA–ICP–MS zircon U–Pb dating, and Hf isotope analysis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 107: 820–837.
- Hong J, Tahseenullah K, Li W Y, et al. SHRIMP U–Pb ages, mineralogy, and geochemistry of carbonatite–alkaline complexes of the Sillai Patti and Koga areas, NW Pakistan: Implications for petrogenesis and REE mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, S0169-1368(21): 00573–4.
- Hoskin P, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53: 27–62.
- Hou Z Q, Tian S H, Yuan Z X, et al. The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: petrogenesis, mantle source and tectonic implication[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 244(1–2): 234–250.
- Hou Z Q, Tian S H, Xie Y L, et al. The Himalayan Mianning–Dechang REE belt associated with carbonatite–alkaline complexes, eastern Indo-Asian collision zone, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 36(1–3): 65–89.
- Hou Z, Zhang H, Pan X, et al. Porphyry Cu (–Mo–Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust: examples from the eastern Tethyan metallogenic domain[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 39 (1), 21–45.
- Hou Z Q, Yang Z M, Lu Y J, et al. A genetic linkage between subduction and collision-related porphyry Cu deposits in continental collision zones[J]. *Geology*, 2015a, 43(3): 247–250.
- Hou Z Q, Liu Y, Tian S H, et al. Formation of carbonatite related giant rare-earth-element deposits by the recycling of marine sediments[J]. *Scientific Reports*, 2015b, 5: 10231.
- Hou Z Q, Zhang H R. Geodynamics and metallogeny of the eastern Tethyan metallogenic domain[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015c, 70: 346–384.
- Hussain A, Mughal M N, Haq I, et al. Geological Map of the Garhi Hibibullah Area, District Mansehra and Parts of Muzaffarabad District, AJK (sheet no. 43 F/7) [M]. Quetta: Geological Survey of Pakistan, 2004.
- Husain V, Khan H, Germann K. et al. Geochemical investigations of stratabound gunga barite deposits of khuzdar (balochistan), Pakistan[J]. *Resource Geology*, 2002, 52(1): 49–58.
- Hussain A, Zhao K D, Arif M, et al. Geochronology, mineral chemistry and genesis of REE mineralization in alkaline rocks from the Kohistan Island Arc, Pakistan[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 126: 103749.
- Jia Y H, Liu Y. Factors controlling the generation and diversity of giant carbonatite-related rare earth element deposits: Insights from the Mianning–Dechang belt[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 121: 103472.

- Kakar M I, Andrew C K, Khalid M, et al. Petrology of the mantle rocks from the Muslim Bagh Ophiolite, Balochistan, Pakistan [J]. *Journal of Himalayan Earth Sciences*, 2013, 46(2): 101–112.
- Kakar M I, Andrew C K, Khalid M, et al. Supra-subduction zone tectonic setting of the Muslim Bagh Ophiolite, northwestern Pakistan: Insights from geochemistry and petrology [J]. *Lithos*, 2014, 202–203: 190–206.
- Kanazawa Y, Kamitani M. Rear earth minerals and resources in the world [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, 408–412: 1339–1343.
- Kazmi A H, Rana R A. Tectonic map of Pakistan [M]. Quetta: Geological Survey of Pakistan, 1982.
- Kempe D R C, Jan M Q. An alkaline igneous province in the North-West Frontier Province, West Pakistan [J]. *Geological Magazine*, 1970, 107(4): 395–398.
- Kempe D R C, Jan M Q. The Peshawar plain alkaline igneous province, NW Pakistan [J]. *Geological Bulletin University of Peshawar*, 1980, 13: 71–77.
- Khattak N U, Akram M, Ali N, et al. Recognition of the time and level of emplacement of the Sillai Patti carbonatite complex, Malakand Division, Northwest Pakistan: Constraints from fission-track dating [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, 53(8), 736–744.
- Large D E. Geological parameters associated with sediment-hosted submarine exhalative Pb-Zn deposits: an empirical model for mineral exploration [J]. *Geologisches Jahrbuch*, 1980, 40: 59–129.
- Lydon J W. Report on an examination of Zn-Pb-Ba deposits of the Lasbela-Khuzdar belt, Balochistan, Pakistan [R]. United Nations Development Programme, 1989.
- Le Bas M J, Mian I, Rex D C. Age and nature of carbonatites emplacement in North Pakistan [J]. *Geologische Rundschau*, 1987, 76(2): 317–323.
- Ling M X, Liu Y L, Williams I S, et al. Formation of the world's largest REE deposit through protracted fluxing of carbonatite by subduction-derived fluids [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1–8.
- Liu Y, Hou Z Q. A synthesis of mineralization styles with an integrated genetic model of carbonatite-syenite-hosted REE deposits in the Cenozoic Mianning-Dechang REE metallogenic belt, the eastern Tibetan Plateau, southwestern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 137: 35–79.
- Mehrab K, Andrew C K, Khalid M. Formation and tectonic evolution of the Cretaceous-Jurassic Muslim Bagh ophiolitic tectonic setting of ophiolites [J]. *Journal of Earth Sciences*, 2007, 31(2): 112–127.
- Metcalfe I. Gondwanaland dispersion, Asian accretion and evolution of eastern Tethys [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1996, 43: 605–623.
- Metcalfe I. Gondwana dispersion and Asian accretion: tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66: 1–33.
- Mian I, Le Bas M J. Feldspar solid solution series in fenites from Loe-Shilman carbonatite complex, NW Pakistan [J]. *Geological Bulletin University of Peshawar*, 1988, 21: 71–83.
- Mouthereau F, Lacombe O, Verges J. Building the Zagros collisional orogen: timing, strain distribution and the dynamics of Arabia/Eurasia plate convergence [J]. *Tectonophysics*, 2012, 532: 27–60.
- Negredo A M, Replumaz A, Villaseñor A, et al. Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir-Hindu Kush region [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 259(1–2): 212–225.
- Nelson D R, Chivas A R, Chappell B W. Geochemical and isotopic systematics in carbonatite and implications for the evolution of ocean-island sources [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52(1): 1–17.
- Nicholson K N, Khan M, Mahmood K. Geochemistry of the Chagai-Raskoh arc, Pakistan: Complex arc dynamics spanning the Cretaceous to the Quaternary [J]. *Lithos*, 2010, 118 (3–4): 338–348.
- Palin R M, Treloar P J, Searle M P, et al. U-Pb monazite ages from the Pakistan Himalaya record pre-Himalayan Ordovician orogeny and Permian continental breakup [J]. *GSA Bulletin*, 2018, 130(11–12): 2047–2061.
- Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1984, 16: 77–94.
- Perelló J, Raziq A, Schloderer J, et al. The Chagai porphyry copper belt, Baluchistan province, Pakistan [J]. *Economic Geology*, 2008, 103(8): 1583–1612.
- Powell C M A. Speculative tectonic history of Pakistan and surroundings [J]. In: Farah A, Dejong K A, eds. *Geodynamics of Pakistan* [M]. Quetta: Geological Survey of Pakistan, 1979, 5–24.
- Ravikant V, Tanpan P, Dipankar D. Chromites from the Nidar ophiolite and Karzok complex, Transhimalaya, eastern Ladakh: their magmatic evolution [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 24(2): 177–184.
- Rehman H U, Seno T, Yamamoto H, et al. Timing of collision of the Kohistan-Ladakh Arc with India and Asia: Debate [J]. *Island Arc*, 2011, 20(3): 308–328.
- Richards J P, Şengör A M C. Did Paleo-Tethyan anoxia kill arc magma fertility for porphyry copper formation? [J]. *Geology*, 2017, 45(7): 591–594.
- Richards J P, Spell T, Remeh E, et al. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu-Mo-Au potential: an example from the Tethyan arcs of Central and Eastern Iran and Western Pakistan [J]. *Economic Geology*, 2012, 107(2): 295–332.

- Richards J P. Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the tethyan orogen: From subduction to collision[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 70: 323–345.
- Rollinson H, Adetunji J. The geochemistry and oxidation state of podiform chromitites from the mantle section of the Oman ophiolite: A review[J]. *Gondwana Research*. 2015, 27(2): 543–554.
- Sengör A.M.C., Natal'in B.A., Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis, In: *The Tectonic Evolution of Asia*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- Siddiqui R H, Khan M A, Jan M Q. Geochemistry and petrogenesis of the Miocene alkaline and sub-alkaline volcanic rocks from the Chagai arc, Baluchistan, Pakistan: implications for porphyry Cu-Mo-Au deposits[J]. *Journal of Himalayan Earth Sciences*, 2007, 40: 1–23.
- Sillitoe R H. Porphyry copper systems[J]. *Economic Geology*, 2010, 105(1): 3–41.
- Simonetti A, Bell K, Viladkar S G. Isotopic data from the Amba Dongar carbonatite complex, west-central India: evidence for an enriched mantle source[J]. *Chemical Geology*, 1995, 122(1–4): 185–198.
- Song Y C, Liu Y C, Hou Z Q, et al. Sediment-hosted Pb–Zn deposits in the Tethyan domain from China to Iran: Characteristics, tectonic setting, and ore controls[J]. *Gondwana Research*, 2019, 75: 249–281.
- Sorkhabi R, Heydari E. Asia out of Tethys: Foreword preface[J]. *Tectonophysics*, 2008, 451(1–4): 171–3178.
- Thayer T P. Chromite segregation as petrogenetic indicators[J]. *Geological Society of South Africa Special Publication*, 1970, 1: 380–390.
- Thorkelson D J, Breitsprecher K. Partial melting of slab window margins: Genesis of adakitic and non-adakitic magmas[J]. *Lithos*, 2005, 79(1–2): 25–41.
- Wilke F D H, O'Brien P J, Gerdes A. The multistage exhumation history of the Kaghan Valley UHP series, NW Himalaya, Pakistan, from U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2010, 22(5): 703–719.
- Woolley A R, Kjarsgaard B A. Paragenetic types of carbonatite as indicated by the diversity and relative abundances of associated silicate rocks: evidence from a global database[J]. *Canadian Mineralogist*, 2008, 46(4): 741–752.
- Xiong Y Q. Emplacement of Bela and Musilm Bagh ophiolites and significance of India-Asia collision in western Pakistan [D]. Houston: University of Houston, 2011: 1-175.
- Xu C, Kynicky J, Chakhmouradian A R, et al. Trace-element modeling of the magmatic evolution of rare earth-rich carbonatite from the Miaoya deposit, central China[J]. *Lithos*, 2010, 118(1–2): 145–155.
- Yang K F, Fan H R, Franco P, et al. The Bayan Obo (China) giant REE accumulation conundrum elucidated by intense magmatic differentiation of carbonatite[J]. *Geology*, 2019, 47(12): 1198–1202.
- Yang X Y, Lai X D, Pirajno F, et al. Genesis of the Bayan Obo Fe-REE-Nb formation in Inner Mongolia, north China craton: a perspective review[J]. *Precambrian Research*, 2016, 288: 39–71.
- Yang X Y, Sun W D, Zhang Y X, et al. Geochemical constraints on the genesis of the Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit in Inner Mongolia, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(5): 1417–1435.
- Yang Z M, Goldfarb R, Chang Z S. Generation of postcollisional porphyry copper deposits in southern Tibet triggered by subduction of the Indian continental plate[J]. *Economic Geology*, 2016, S19: 279–300.
- Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, et al. Podiform chromitites in the Luobusa ophiolite (Southern Tibet): implications for mantle–melt interaction and chromite segregation[J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37: 3–21.
- Zhou M F, Robinson P T. Origin and tectonic environment of podiform chromite deposits[J]. *Economic Geology*, 1997, 92(2): 259–262.
- Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, et al. REE and PGE geochemical constraints on the formation of dunites in the Luobusa ophiolite, southern Tibet[J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46(3): 615–639.