

DOI: 10.12401/j.nwg.2022006

哈萨克斯坦乌拉尔肯皮赛铬铁矿资源基地 地质背景、成矿特征及矿床成因

高永伟^{1,2,3,4}, 洪俊^{1,2,3}, 吕鹏瑞^{1,2,3}, 曹凯^{1,2,3}, 张宇轩^{1,2,3}, 李旭拓^{1,2,3},
刘明义^{1,2,3}, 张丹丹^{1,2,3}, 马中平^{1,2,3,*}

(1. 中国-上海合作组织地学合作研究中心, 陕西 西安 710054; 2. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿
重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;
4. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 铬铁矿是中国极为短缺的战略性矿产, 哈萨克斯坦乌拉尔肯皮赛铬铁矿资源基地是全球最大的豆荚状铬铁矿产地。笔者系统总结了肯皮赛铬铁矿资源基地的地质背景、蛇绿岩特征及成矿类型, 并对基地的开发现状进行了梳理。肯皮赛铬铁矿资源基地位于乌拉尔造山带南部, 伴随寒武纪—三叠纪古乌拉尔洋形成演化, 大量蛇绿岩地体残存于乌拉尔造山带内, 形成一系列豆荚状铬铁矿床。肯皮赛地块出露完整的蛇绿岩层序, 地幔橄榄岩以方辉橄榄岩和纯橄岩为主, 发育高铝型和高铬型两类富铬铁矿。其中, 高铝型铬铁矿形成于早泥盆世(或更早)MOR 环境下; 而高铬型铬铁矿形成于晚泥盆世洋内俯冲环境下(SSZ), 是俯冲带流体与残留地幔橄榄岩交代反应后形成的熔体与围岩(地幔橄榄岩)发生熔岩反应的产物。肯皮赛铬铁矿资源基地铬铁矿探明储量约 3 亿 t, 年产铬铁矿和铬铁合金约 700 万 t 和 169 万 t, 主要用于出口。中国应不断加强哈萨克斯坦的铬铁矿资源潜力调查、勘查开发及产能合作。

关键词: 豆荚状铬铁矿; 蛇绿岩; 开发现状; 肯皮赛铬铁矿资源基地; 乌拉尔造山带; 哈萨克斯坦

中图分类号: P611;F416.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)01-0142-14

Geological Background, Metallogenic Characteristics and Ore Genesis of the Kempirsay Chromite Resource Base in the Ural, Kazakhstan

GAO Yongwei^{1,2,3,4}, HONG Jun^{1,2,3}, LÜ Pengrui^{1,2,3}, CAO Kai^{1,2,3}, ZHANG Yuxuan^{1,2,3}, LI Xutuo^{1,2,3},
LIU Mingyi^{1,2,3}, ZHANG Dandan^{1,2,3}, MA Zhongping^{1,2,3,*}

(1. China-SCO Geosciences Cooperation Research Center, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-07-07; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 新疆重大科技专项“新亚欧大陆桥经济走廊铜金稀土等战略性矿产资源成矿预测与潜力评价”(2022A03010-2), 中国地质调查局项目“中亚西亚国际合作地质调查”(DD20221804), 国家重点研发计划项目课题“中亚成矿域战略性矿产信息及成矿规律”(2021YFC2901802), 国家自然科学基金项目“西天山卡特巴阿苏金矿床黄铁矿特征研究及其对成矿机制的指示”(41602096)及陕西省重点研发计划项目“中亚优势战略性矿产成矿规律研究与矿业项目优选”(2021KWZ-19)联合资助。

作者简介: 高永伟(1986-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事中亚西亚地区地质矿产调查与研究。E-mail: gaoyw21033@126.com。

* **通讯作者:** 马中平(1970-), 男, 博士, 研究员, 从事中亚西亚地区地质矿产调查与研究。E-mail: 2399056951@qq.com。

Abstract: China ranks at the top in chromium consumption and stainless steel production, yet due to the limited domestic reserve and mine production of chromite ore, the current supply of chromium relies on the main imports from South Africa. Meanwhile, Kazakhstan has a leading position in chromite reserves and mining, mainly from the Kempirsay chromite resource base. On account of the above, this contribution provides an exhaustive summary of the geological background, ophiolites, metallogenic characteristics, the deposit's genetic types, and the development status of the resource base. The Kempirsay chromite resource base is tectonically located in the Kempirsay massif of southern Urals. Many ophiolites were produced and preserved in the Ural orogenic belt during the opening and closure of the Ural paleo-ocean in the Cambrian to Triassic and host a series of podiform chromite deposits. The Harzburgites and dunites dominate the mantle peridotites, which are outcropped in a complete ophiolite sequence of the Kempirsay massif. Two kinds of chromitite have been found: the high-Al type in the Early Devonian (or earlier) MOR setting and the high-Cr type in the Late Devonian Supra-subduction zone(SSZ). The latter chromitite was formed in the reaction between the melt derived from residual mantle peridotites metasomatized by subduction fluids with depleted mantle during the intra-ocean subduction process. The estimated chromite reserve of the Kempirsay resource base is approximately 300 million tons, forming an annual chromite ore production of 7 million tons. Over half of the 1.69 million tons of ferrochrome production is exported to China. In summary, the Kempirsay chromite resource base in the Ural of Kazakhstan has favorable metallogenic conditions and progressive mining activities. Thus, China should endeavor to strengthen cooperation with Kazakhstan in the potential resource investigation, exploration, mining of chromite resources, and related industry capacity.

Keywords: podiform chromite; ophiolite; ore genesis; Kempirsay chromite resource base; Ural orogenic belt; Kazakhstan

矿产资源是国民经济发展的重要物质基础。战略性矿产是社会发展到关键阶段,在关键领域可以发挥战略性作用的资源,也是国家实施矿产资源战略的核心抓手(王登红, 2019; 陈其慎等, 2021)。战略性矿产资源安全是国家安全的重要组成部分,占有基础地位。在全球政治格局发生深度变化和新冠疫情引发全球供应链安全的背景下,战略性矿产安全供应能力对经济社会可持续发展具有重要影响和制约作用(翟明国等, 2021)。目前,中国战略性关键矿产资源安全供给形势严峻,多种矿产的国内保障程度严重不足,石油、铁、铜、锰、铬、钴、镍等 14 个矿种的对外依存度高达 50% 以上(成金华等, 2021)。铬是重要的战略物资,在冶金、耐火材料制造和化学工业中应用广泛(张伟波等, 2019),其中约 90% 以上用于冶金工业。铬铁矿是自然界唯一具有工业价值的可采铬矿物。铬铁矿经过冶炼转化为铬铁合金,是制造不锈钢、高速钢、耐热钢等特殊用途钢的重要原料(吕鹏瑞等, 2022),其中 90% 以上的铬铁合金用于制造不锈钢。铬铁矿是《全国矿产资源规划(2016~2020 年)》确定的 24 个战略矿种之一,是中国极为短缺的战略性矿

产资源。截至 2020 年底,中国铬铁矿探明储量仅为 276.97 万 t(中国矿产资源报告, 2021),年产量不足 20 万 t,对外依存度高达 99% 以上。同时,中国铬铁矿资源禀赋差,矿产勘查取得重大突破难度大,国内产量将长期处于较小规模。因此,中国的铬铁矿供应将长期依靠国际市场。但中国铬铁矿的主要进口来源地为南非,集中度过高,带来了较大的地缘政治风险(刘全文等, 2018)。

目前,世界上已发现的原生铬铁矿床主要包括 2 类:一类为产于太古代和元古代稳定大陆地台区镁铁-超镁铁杂岩中的层状铬铁矿(Stratiform deposits),以南非布什维尔德(Bushveld)、津巴布韦大岩墙(Great Dyke)和美国斯蒂尔沃特(Stillwater)等杂岩体中发育的铬铁矿为代表,矿床规模巨大,其蕴含的铬铁矿资源量约占全球 70% 以上(苏本勋等, 2018);另一类为豆荚状铬铁矿(Podiform deposits),亦称阿尔卑斯型(Alpine-type)铬铁矿,主要发育于莫霍面以下 1 000~1 500 m(并以数百米居多)(李江海等, 2002; 刘婷等, 2019),主要赋存于方辉橄辉岩或地幔橄辉岩上方壳-幔转换带的纯橄岩中,铬铁矿体外围常包裹厚

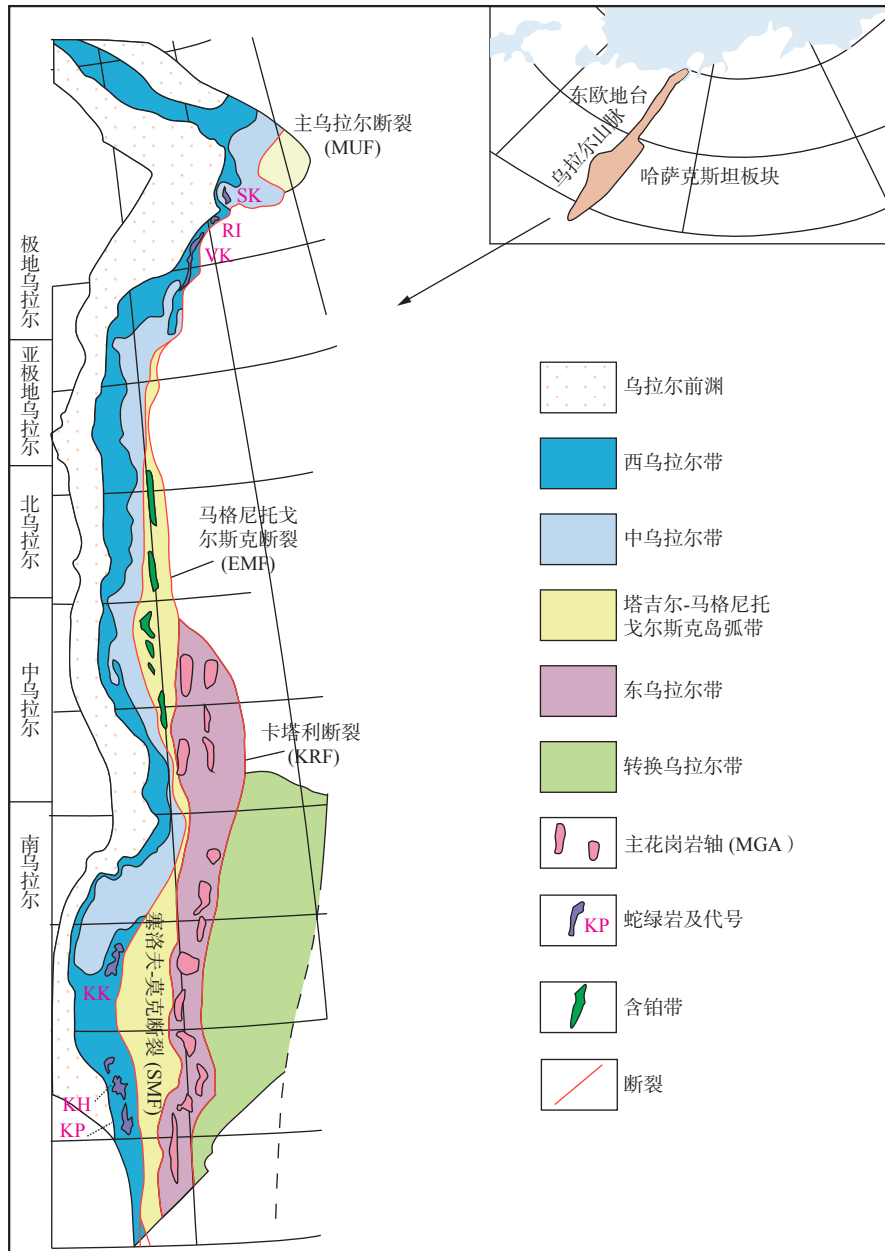
度不等的纯橄岩外壳,且发育不同程度的蛇纹石化(Arai, 1997; Zhou et al., 1997; 苏本勋等, 2018)。豆荚状铬铁矿主要产于显生宙以来造山带的蛇绿岩中,包括乌拉尔造山带、喜马拉雅-阿尔卑斯造山带、西太平洋的菲律宾、新喀里多尼亚,地中海周围、古巴等地。其中,地处乌拉尔造山带南部的哈萨克斯坦肯皮赛地块,发育有众多赋存于古生代蛇绿岩中的豆荚状铬铁矿床,形成了著名的乌拉尔肯皮赛铬铁矿资源基地(高永伟等, 2022),成为世界最大的豆荚状铬铁矿产地。2021年,该基地的铬铁矿石产量约700万t,仅次于南非(1600万t),居世界第二。基于此,笔者系统分析了哈萨克斯坦乌拉尔肯皮赛铬铁矿资源基地的地质背景、蛇绿岩特征、成矿特征、矿床成因及开发利用现状,这有助于提升对豆荚状铬铁矿成矿作用的理论认识,同时对了解哈萨克斯坦铬铁矿的成矿潜力以及未来中国参与哈萨克斯坦铬铁矿的勘查开发也具有重要的参考价值。

1 乌拉尔造山带地质概况

哈萨克斯坦肯皮赛铬铁矿资源基地大地构造位置处于乌拉尔造山带南部。乌拉尔造山带是世界上保存最好的古生代增生型造山带之一,发育完整的威尔逊构造旋回(Ivanov et al., 2013),其位于东欧克拉通(波罗的古陆)、西伯利亚板块和哈萨克地块之间,整体呈北东东向,北起北冰洋新地岛,南至哈萨克斯坦威海地区,延伸近2500km。乌拉尔造山带由西向东可分为6个构造带:乌拉尔前渊(foredeep, 乌拉尔前陆盆地)、西乌拉尔带、中乌拉尔带、塔吉尔-马格尼托戈尔斯克(Tagil-Magnitogorsk)岛弧杂岩带、东乌拉尔带和转换乌拉尔带(Puchkov, 2013, 2017)。以发育于主乌拉尔断裂带(MUF)的蛇绿岩缝合带为界,西侧3个构造带构成了乌拉尔古陆单元,属于波罗的古陆东侧被动大陆边缘的组成部分;东侧3个构造带构成古洋盆单元,由古乌拉尔洋的蛇绿岩、岛弧及微陆块拼贴而成(图1)。

乌拉尔地区经历了多个构造演化阶段,形成了极为丰富的矿产资源(Puchkov, 2017):①太古代—古元古代基底形成演化阶段:在乌拉尔中南部出露经历麻粒岩和角闪岩相变质的正副变质岩,发育沉积变质型磁铁矿,如库瓦塔(Kuvatal)大型磁铁矿床。②中元古代—新元古代蒂曼(Timanides)造山运动阶段,形成蒂

曼造山带,代表了伯朝拉(Pechora)古洋盆和波罗的克拉通大陆边缘的消失;其走向与乌拉尔造山带中南部相平行,并发育完整的威尔逊旋回。在乌拉尔中南部出露的中元古代—新元古代镁铁-超镁铁质杂岩中发育钒钛磁铁矿和含PGE的高铝铬铁矿(如中乌拉尔萨热拉矿床组);在乌拉尔南部中元古代沉积地层中发育一系列后生热液-沉积矿产,包括菱镁矿、菱铁矿及萤石矿等(Prochaska et al., 2013),赋存于黑色岩系中的金、钨及稀土矿化,以及众多Sedex型重晶石及多金属矿产;在乌拉尔中北部地区则主要发育与裂谷火山岩相关的VMS型和斑岩型铜多金属矿,以及与碰撞花岗岩相关的钼、钨、铌、钽矿床。③寒武纪—三叠纪古乌拉尔洋形成演化阶段,形成乌拉尔造山带(图2):晚寒武世—早奥陶世波罗的大陆边缘发生裂解,随后洋盆扩张,形成乌拉尔洋,大量的蛇绿岩地体被保存在乌拉尔造山带中(如肯皮赛地块),发育了世界级的铬铁矿和众多PGE矿床;在乌拉尔中北部则形成砂岩型铜矿和层控重晶石-多金属矿。具体来看,晚奥陶世开始,古乌拉尔洋发生东向洋内俯冲,至晚泥盆世先后形成塔吉尔和马格尼托戈尔斯克洋内弧(Puchkov, 2009),发育了与俯冲相关的乌拉尔VMS型铜锌矿床、斑岩型铜矿床(李文渊, 2007),以及热水沉积型铁锰矿;晚泥盆世—早石炭世马格尼托戈尔斯克岛弧与波罗的古陆的被动边缘发生弧-陆碰撞,发育变质的VMS矿床以及与变质超基性岩有关的硬玉矿。此外,在转换乌拉尔带还发育矽卡岩型铜铁矿和斑岩型铜金矿等;晚石炭世—早二叠世古乌拉尔洋盆完全关闭,波罗的大陆与西伯利亚古陆发生碰撞,在极地乌拉尔和中-南乌拉尔地区发育著名的“阿尔卑斯脉”型石英(水晶)成矿带(王九一, 2021),在主乌拉尔断裂带形成了与变质和岩浆流体相关的造山型金矿床,沿着乌拉尔造山带主花岗岩轴发育与二叠纪花岗伟晶岩相关的稀有金属矿化;三叠纪发育有限的后碰撞伸展,形成煤沉积;由于早三叠纪西伯利亚地幔柱事件,乌拉尔地区发育大规模的溢流玄武岩,具有岩浆型铜镍硫化物矿床的成矿潜力(Puchkov, 2017)。④侏罗纪之后陆内演化阶段:侏罗纪—古近纪发育持续较短的陆内造山作用,乌拉尔北部产生一定变形,主要形成含煤盆地及表生矿床(红土型镍矿、次生氧化铜矿、风化壳型铝土和稀土矿、砂金矿等);新生代晚期,乌拉尔发育新的造山运动并开始隆升,最终形成现今的乌拉尔山脉,此阶段主要形成砂金矿。



代表性蛇绿岩体: SK. Syum-Keu; RI. Ray-Iz; VK. Voykar; KK. Kraka; KH. Khabarny; KP. Kempirsay

图 1 乌拉尔造山带构造简图及蛇绿岩分布图(构造分区据李三忠等, 2016; Puchkov, 2017 修改)

Fig. 1 Tectonic zones of the Urals and localization of major ophiolite massifs

2 肯皮赛地块蛇绿岩及铬铁矿成矿特征

2.1 乌拉尔造山带蛇绿岩分布及特征

蛇绿岩是保存在造山带中的古大洋岩石圈或古洋壳的残余, 与铬铁矿的形成密切相关(鲍佩声, 2019)。晚古生代, 随着西伯利亚板块和东欧板块发生碰撞, 古乌拉尔洋完全闭合, 部分大洋岩石圈残存于东欧板块之上。150 余个大小不一的蛇绿岩体分布

于乌拉尔造山带内, 主要见于主乌拉尔断裂相邻两侧, 在塔吉尔-马格尼托戈尔斯克岛弧杂岩带也出露少量卷入火山岩系中的蛇绿岩体, 形成多条南北向断续分布的蛇绿岩带(Savelieva et al., 2002)。其中, 极地乌拉尔和南乌拉尔的蛇绿岩带规模最大。乌拉尔不同蛇绿岩体中的地幔橄榄岩岩石类型不同, 表现出明显的非均质性, 显示地幔亏损程度的差异。南乌拉尔 Kraka 蛇绿岩体地幔橄榄岩主要为二辉橄榄岩, 极地乌拉尔 Syum-Keu 蛇绿岩体主要为二辉橄榄岩、方辉橄榄

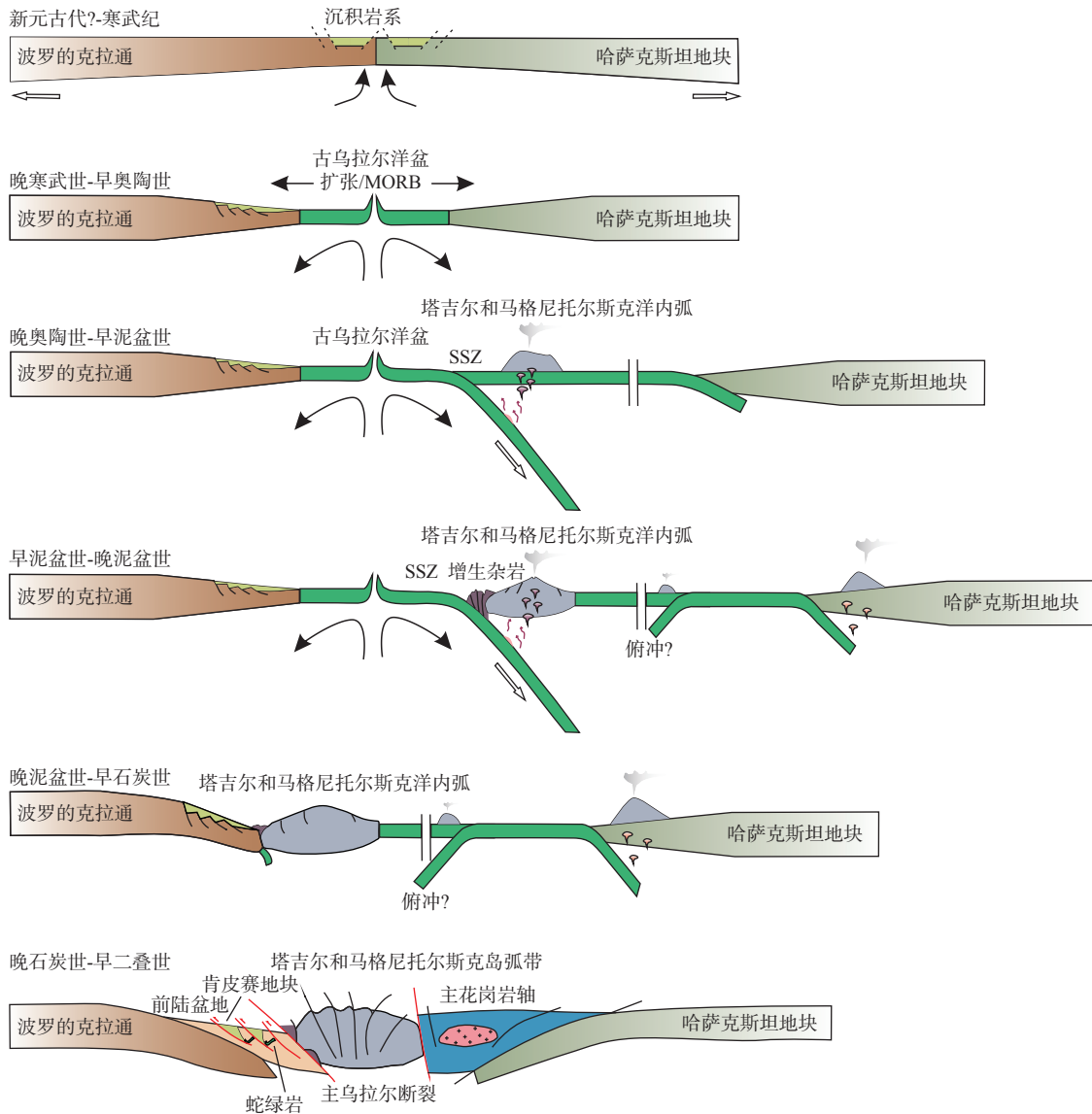


图2 乌拉尔造山带古生代构造演化模式图

Fig. 2 Tectonic models showing the evolutionary history for the Urals in the Paleozoic

岩,而赋存有铬铁矿的极地乌拉尔 Ray-Iz 和南乌拉尔 Kempirsay(肯皮赛)蛇绿岩体中的地幔橄榄岩则为纯橄榄岩和方辉橄榄岩(Shmelev, 2011; Savelieva, 2011)。通常认为,乌拉尔造山带的蛇绿岩形成于早古生代古乌拉尔洋的开启(Yang et al., 2015)。但已有研究表明,乌拉尔造山带的蛇绿岩形成时代为新元古代—泥盆纪,跨度大,峰期为奥陶纪和泥盆纪(Belova et al., 2010; Batanova, 2011; Pirajno et al., 2020)。Savelieva 等(2002)提出南乌拉尔地区出露的早奥陶—中奥陶世蛇绿岩形成于洋中脊环境下(MOR),代表了奥陶纪波罗的大陆边缘的裂解以及古乌拉尔洋的扩张。而乌拉尔造山带内大量的泥盆纪蛇绿岩体,

如极地乌拉尔的 Ray-Iz、Voykar 以及南乌拉尔的 Kraka、Kempirsay 等蛇绿岩体被认为形成于 SSZ 背景下或者形成于 MOR 背景下并受到后期 SSZ 的改造(Savelieva et al., 2002; Zaccarini et al., 2008; Belova et al., 2010; Batanova, 2011; Saveliev, 2021),此类蛇绿岩体赋存有储量巨大的冶金级铬铁矿(铬铁矿品位大于 40%)。以 Ray-Iz 蛇绿岩体为例,其出露面积约 380 km²,出露的镁铁-超镁铁岩石组合包括二辉橄榄岩、方辉橄榄岩、纯橄岩、单斜辉石岩、辉长岩和角闪岩等;共发育 200 余个铬铁矿矿(化)点,主要寄主于纯橄岩中或方辉橄榄岩中,铬铁矿储量大于 1 亿 t(Garuti et al., 2012);铬铁矿体主要呈透镜状,矿石主要呈块

状、瘤状和浸染状, 在铬铁矿中发现有金刚石、柯石英和碳硅石等高压矿物(Yang et al., 2015); Ray-Iz 蛇绿岩形成于 MOR 背景下, 晚期受到了洋内俯冲过程中 SSZ 环境的改造(Xiong et al., 2020)。

2.2 肯皮赛地块蛇绿岩及铬铁矿成矿特征

肯皮赛地块位于哈萨克斯坦西北部阿克纠宾州阿克托别市东部, 大地构造处于南乌拉尔萨克马拉移

置体内(Sakmara allochthon)(Melcher et al., 1997, 1999)。区内主要出露寒武纪和奥陶纪沉积岩系。受华力西构造运动影响, 蛇绿岩向西逆冲叠置于西乌拉尔带沉积岩之上; 萨克马拉向东被马格尼托戈尔斯克岛弧带逆冲推覆, 最终在古乌拉尔洋闭合后俯冲于岛弧带之下。肯皮赛是南乌拉尔地区出露最大的蛇绿岩地体, 呈北西西向延伸, 南北长约 90 km, 东西宽约

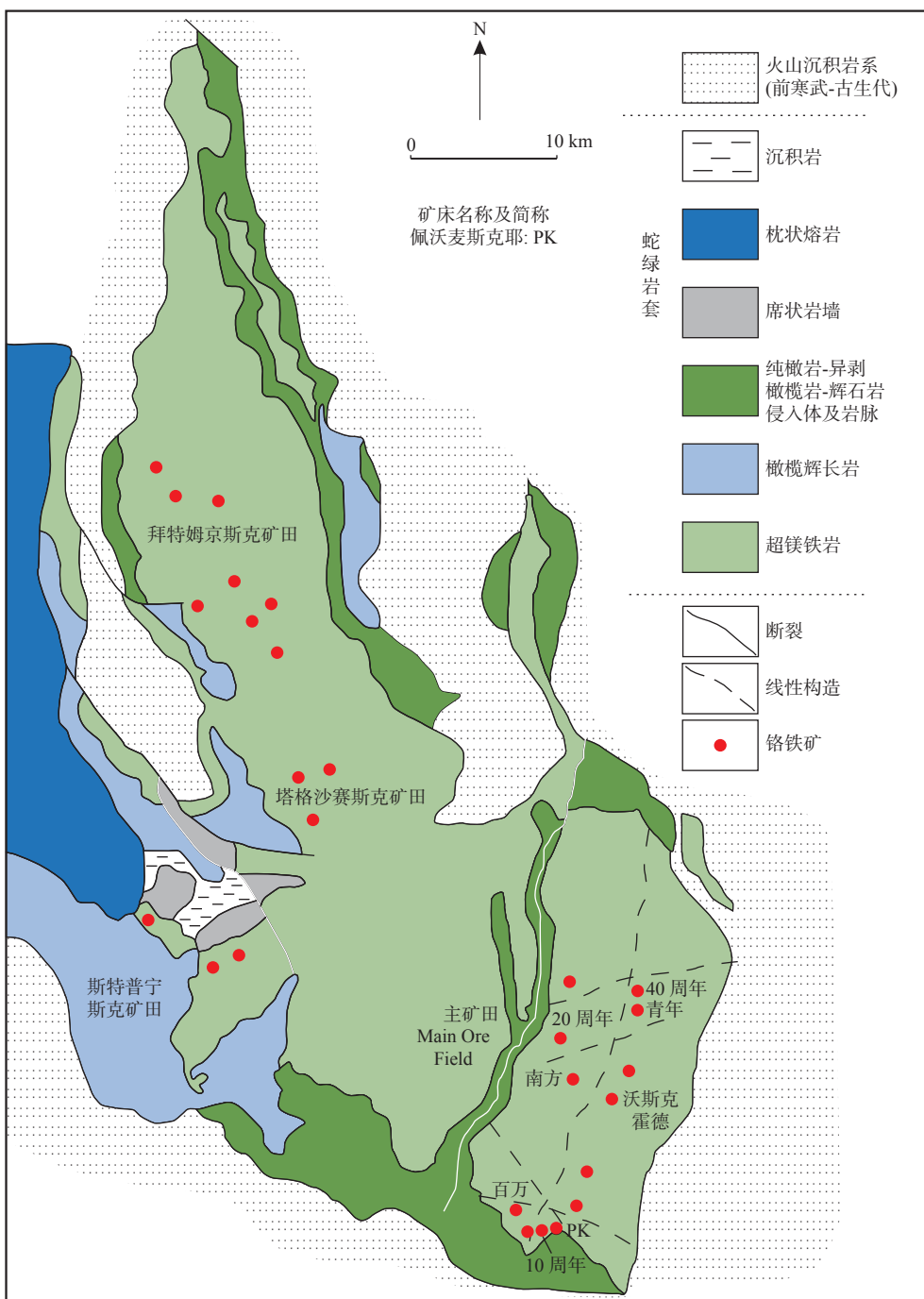


图 3 哈萨克斯坦肯皮赛地块地质简图及铬铁矿分布图(据 Melcher et al., 1997 修改)
Fig. 3 Schematic geologic map and distribution of chromite deposits of the Kempirsay Massif

32 km, 面积约 2 000 km²(图 3)。肯皮赛发育完整的“Pengrose”蛇绿岩层序, 包括地幔橄榄岩、堆晶杂岩、席状岩墙、枕状熔岩和海底沉积物(图 4)。其中, 地幔橄榄岩系列主要为方辉橄榄岩及少量纯橄岩和二辉橄榄岩, 总厚度达 16 km, 并发育不同程度的蛇纹石化; 堆晶岩主要包括橄榄辉长岩、斜长岩和纯橄岩; 席状岩墙由辉长岩和辉绿岩构成。蛇绿岩局部被前寒武—古生代火山沉积岩系所覆盖, 晚期异剥橄榄岩、辉石岩及辉长岩侵入体和岩脉横切蛇绿岩中地壳系列岩石。

肯皮赛地块共有 80 余个铬铁矿床, 是世界最大的豆荚状铬铁矿产地, 形成主矿田(Главное рудное поле, Main Ore Field)、拜特姆京斯克(Багамшинское, Batamshinsk)、塔格沙赛斯克(Тагашасайское, Tagashasai)和斯特普宁斯克(Степнинское, Stepninsk)

等 4 个矿田, 并发育高铝和高铬 2 类豆荚状铬铁矿。前者主要发育于拜特姆京斯克矿田中, 矿体规模普遍较小, 主要赋存于方辉橄榄岩、纯橄岩和二辉岩中, 部分赋存于壳幔边界(莫霍面)的超基性岩中; 高铬型铬铁矿主要发育于主矿田中, 包括沃斯克霍德(Восход, Voskhod)、青年(Молодежная, Molodezhnaya)和十周年(10-летия независимости Казахстана, 10th Anniversary of independence)等一系列大中型矿床, 探明铬铁矿储量超过 3 亿 t, 平均品位达 50%。主矿田内发育北东东—南南西向背斜构造, 枢纽延伸约 20 km。铬铁矿床主要分布于背斜两侧。矿体主要赋存于方辉橄榄岩中, 少量赋存于纯橄岩及二辉橄榄岩中, 多呈透镜状、笔状、脉状及筒状等, 长度为数十米至 1 800 m (青年矿床), 厚度为数米至 230 m (宝石矿床), 并且常被晚期高角度断层切断(Melcher et al., 1997, 1999)。

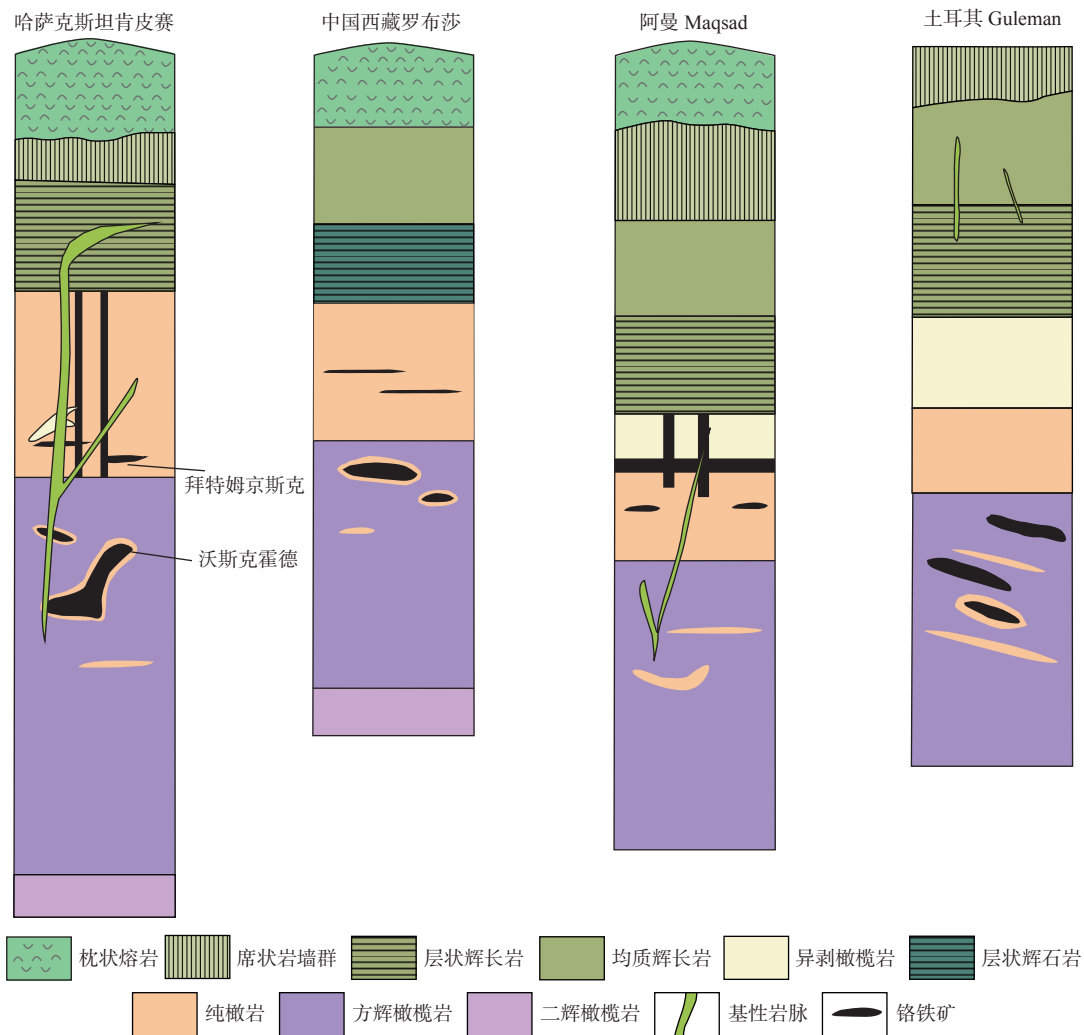


图 4 肯皮赛与世界典型蛇绿岩的岩性柱状示意图(图上厚度未按比例)(据 Melcher et al., 1997; Rizeli et al., 2016; 陈艳虹等, 2018; Rollinson et al., 2018; Pirajno et al., 2020 修改)

Fig. 4 Schematic stratigraphic columnar section of Kempirsay and other typical ophiolites in the world (not at scale)

3 典型铬铁矿床

3.1 沃斯克霍德铬铁矿床

沃斯克霍德铬铁矿床位于肯皮赛地块主矿田中东部, 探明储量约 1 900 万 t, 为超大型, 目前正在地下开采。矿床内主要出露超镁铁岩, 包括纯橄岩和方辉橄岩 (Haldar, 2017), 属于地幔橄岩系列。赋矿围岩主要为方辉橄岩和纯橄岩, 矿体外围常发育厚约 1~3 m 的纯橄岩包壳, 围岩普遍发育不同程度蛇纹岩化。矿化带总体呈板状, 包含有一系列呈雁列状分布的透镜状矿体。矿体多倾向北东, 倾角为 35°~40°, 倾向延深约为 600 m, 宽为 170~360 m, 厚为 2~123 m (平均为 39 m), 总体向北东倾伏, 倾伏角约 28°。

矿石类型多样, 主要包括块状、浸染状、豆状、条带状及细脉状铬铁矿等。不同矿石类型的铬铁矿含量不同。其中, 块状铬铁矿在矿床内最为发育, 铬铁矿含量最高, 通常达 90% 以上, 品位 (Cr_2O_3) 可达 55% 以上; 浸染状铬铁矿也较为常见, 铬铁矿含量为 5%~50%, 多呈自形粒状, 粒径为 1~2 mm, 常形成集合体; 此外, 在块状铬铁矿矿石中局部可见稠密浸染状铬铁矿, 铬铁矿含量为 50%~90%; 豆状及条带状铬铁矿矿石在矿床内较少, 主要发育于块状铬铁矿与贫矿的纯橄岩之间, 与块状矿石呈过渡接触, 矿化带厚度多大于 5 m, 二者含有的铬铁矿含量为 51%~90%; 豆状铬铁矿中的铬铁矿豆体直径约为 1~2 cm; 条带状铬铁矿的条带主要由呈线状定向排列的椭圆状或纺锤状铬铁矿组成, 可能是豆状铬铁矿遭受强塑性变形发生拉伸而形成; 细脉状铬铁矿主要发育于不含矿的纯橄岩中, 脉宽为 1~5 cm; 此外, 在包裹矿体的纯橄岩壳中, 也含有少量的稀疏浸染状铬铁矿 (含量小于 5%)。

矿石结构包括粒状结构、碎裂结构及嵌晶结构等。其中, 粒状结构最为常见, 铬铁矿多呈中细粒自形-他形。在块状矿石中, 粒状铬铁矿常呈密集的集合体状产出。在半自形-他形铬铁矿中偶见橄岩包裹体, 构成嵌晶结构。矿石构造主要为块状、浸染状、豆状及条带状等。主要金属矿物为铬铁矿, 多呈深灰色、黑色及棕色; 非金属矿物主要为橄岩和蛇纹石。

3.2 青年铬铁矿床

青年铬铁矿地处肯皮赛地块主矿田东部, 沃斯克霍德矿床北部, 探明储量约 1 000 万 t, 属超大型, 目前正在地下开采。矿床内主要发育蛇绿岩地幔系列的

纯橄岩、方辉橄岩及辉橄岩 (计文化等, 2013)。在矿区北部, 铬铁矿化发育于古生代基底岩石上部, 上覆中生代及新生代沉积物。在矿区南部, 铬铁矿化发育于深部 300~600 m 处。矿化带总体呈近南北向展布, 发育多条矿体。几乎所有矿体都产于蛇纹石化纯橄岩中, 少量产于方辉橄岩及辉橄岩中。部分矿体呈近水平状延伸, 另一部分矿体呈西倾, 倾角约为 10°~25°。矿体多长约几十米至上千米, 厚几十米至上百米。主矿体隐伏于深部约 422~600 m 处, 呈透镜状, 走向延伸约 1 500 m, 宽约为 200~300 m, 最大厚度约为 140 m, 北部倾向南东, 倾角约为 25°, 向南趋于水平。矿体多受后期断裂构造切割发生错断或者位移。断裂多呈近东西向, 向南或南西陡倾, 倾角约为 70°~85°, 断裂带宽约为 8~40 m。

矿石类型包括致密块状及浸染状矿石。主要金属矿物为铬铁矿, 非金属矿物主要为橄岩、辉石及蛇纹石。青年矿床的铬铁矿品位为 19%~59%, 平均约为 50%, Al_2O_3 含量多小于 10%, 属于高铬型富铬铁矿。

3.3 矿床成因

目前, 有关豆荚状铬铁矿的成因尚无统一的认识。初期研究认为豆荚状铬铁矿与层状铬铁矿类似, 是岩浆分异作用的产物 (Thayer, 1964)。20 世纪 80 年代末期提出的浅部地幔部分熔融残余成因则认为豆荚状铬铁矿的成分与寄主橄岩的熔融程度有关。随着熔融程度的增加, 残余的地幔橄岩中的铬尖晶石的 $\text{Cr}^\#$ 随熔融程度增加而增加, 最终呈分散状态的铬尖晶石逐渐融化并形成彼此隔开的熔滴状, 并借助地幔剪切作用汇聚成矿 (鲍佩声, 2009; 陈艳虹等, 2018)。近 20 年以来, 熔体/岩石反应成因机制成为解释豆荚状铬铁矿形成的主流观点: 深部地幔形成的原始玄武质熔体在上升过程中会与上地幔的二辉橄岩、方辉橄岩等围岩发生熔体-岩石反应 (Rock/melt interaction), 熔体会溶解岩石中的辉石, 残留下橄岩, 并形成富 SiO_2 的二次熔体 (Arai et al., 1994; Zhou et al., 1994; Zhou et al., 1997)。铬铁矿则是岩石 (方辉橄岩)/熔体 (母岩浆) 反应的产物, 豆荚状矿体周围的纯橄岩薄壳则为熔体交代寄主方辉橄岩的产物 (鲍佩声, 2009)。原始岩浆成分被认为是控制铬铁矿成分的最重要因素。高铬型铬铁矿结晶于高镁的玻安质岩浆, 而高铝型铬铁矿则由拉斑质熔体与地幔反应生成。而岩浆成分与上地幔的部分熔融程度密切相关。在部分熔融过程中, Cr 是相容元素, 优先留在残留相, Al 是不相容元素, 优先进入熔体相 (Dick et al.,

1984)。因此,高铬型铬铁矿源于更高程度部分熔融的岩浆,而高铝型铬铁矿母岩浆的熔融程度则较低。此外,由于在铬铁矿及围岩地幔橄榄岩中发现金刚石和柯石英等超高压矿物和异常地幔矿物,部分研究者提出了铬铁矿可能来源于深部地幔(大于400 km),甚至下地幔或核-幔边界的认识(Yang et al., 2007; 杨经绥等, 2008)。

铬铁矿和残余地幔橄榄岩中的铬尖晶石成分蕴含了丰富的成岩过程和地球动力学背景信息,可以反映蛇绿岩形成的构造背景,示踪上地幔中熔体与地幔橄榄岩的相互反应,尖晶石的 $Cr^{\#}(Cr^{\#}=Cr/(Cr+Al))$ 也可以指示地幔岩石部分熔融程度及源区(Dick et al., 1984; Kamenetsky et al., 2001)。肯皮赛地块的基性岩中发育两类不同类型的铬尖晶石: Batamshinsk 矿田和 Stepninsk 矿田中的高 Al、低 Cr 型铬尖晶石($Cr^{\#}=40\sim 60$)(Melcher et al., 1997)以及主矿田中的高 Cr、低 Al 型铬尖晶石($Cr^{\#}>78$)。通常认为,高 Cr 型铬尖晶石来源于俯冲相关背景下的高度熔融的亏损地幔,即俯冲带之上(SSZ)是形成高 Cr 型铬铁矿的最有利构造环境(Dick et al., 1984; Zhou et al., 1996; Furnes et al., 2014);而高 Al 型铬铁矿主要来源于低程度部分熔融的富集地幔,一般形成于与俯冲无关的构造背景中,如洋中脊(Uysal et al., 2009)。在蛇绿岩带中常同时出现高铬和高铝型铬铁矿,二者可能出现在不同的超基性岩地块中,也可能同时发育于单一的超基性岩体中(González-Jiménez et al., 2011)。究其原因,两类铬铁矿可能起源于在大洋岩石圈形成及演化过程中不同的蛇绿岩形成环境下的岩浆源区(Zhou et al., 1998; Uysal et al., 2009),也可能是 SSZ 以及弧构造背景下初始富集的富铬母熔体逐步分馏形成的结果(Graham et al., 1996)。Melcher 等(1997)认为肯皮赛地块高 Al 型铬铁矿者形成于地幔上部以及壳-幔边界,是伸展构造背景下“肥沃”的二辉橄榄岩部分熔融形成的玄武质或苦橄质熔体发生分离结晶的产物。而高 Cr 型铬铁矿形成于洋内俯冲环境下,是俯冲带流体与残留地幔橄榄岩交代反应后形成的熔体在上升过程中与围岩(地幔橄榄岩)发生熔岩反应的产物。

铂族元素(PGE: Os, Ir, Ru, Rh, Pt 和 Pd)是不同岩浆过程的地球化学指示剂,可以有效示踪岩浆分异、地幔熔融、熔体-岩石作用和幔源岩浆性质及演化过程等(王玉往等, 2010; Mondal et al., 2019)。豆荚状铬铁矿只分布于超镁铁岩中,其 PGE 特征因此可直接反映形成过程及超镁铁岩的演化过程(熊发挥等, 2014)。

肯皮赛地块主矿田不同类型铬铁矿中的 PGE 总量为 $104\times 10^{-9}\sim 868\times 10^{-9}$,平均为 310×10^{-9} ,并且南部矿体样品的 PGE 总量相比北部具有减小的趋势。铬铁矿的 IPGE(Os, Ir, Ru)与 PPGE(Rh, Pt, Pd)之间具有较强的分馏作用,IPGE 相比 PPGE 显著富集(Melcher et al., 1999)。而赋矿地幔橄榄岩的 PGE 总量($23\times 10^{-9}\sim 52\times 10^{-9}$)远低于铬铁矿,并且 PPGE 较 IPGE 有一定程度的富集。这些特征与典型的蛇绿岩中豆荚状铬铁矿相类似(Uysal et al., 2009)。此外,在主矿田的铬铁矿中还识别出了大量的铂族元素矿物(PGM),粒径 $1\sim 20\ \mu\text{m}$,主要发育于块状和稠密浸染状矿石中,可分为2种类型:①呈原生包裹体存在,以单一晶体相或多相颗粒形式发育于未变形铬铁矿中。硫钨矿和硫钼矿固溶体系列是最主要的单晶形式,其次为 Os-Ir 合金和 Ni-Cu-Ir-Os 硫化物;多相包裹体主要由硅酸盐、硫钨矿、硫钼矿及 Os-Ir 合金等组成。②发育于铬铁矿裂隙中的蛇纹石或绿泥石脉内,以及包裹铬铁矿的蛇纹石基质中,多为自形单晶或多相颗粒,矿物类型与第一类相似,但 Os-Ir 合金和 Ir-Rh 硫化物少见(Melcher et al., 1997)。Distler 等(2003)初步估算肯皮赛主矿田的 PGE 资源量超过 100 t,肯皮赛也成为世界级的 PGE 矿床。此外,肯皮赛地块中的铬铁矿呈现较低的 Al_2O_3 含量(多小于 20%)和较低的 TiO_2 含量(小于 0.3%),具有起源于岛弧环境下玻安质和玄武质熔体的特征,这也与乌拉尔蛇绿岩带的其他铬铁矿特征相一致(Zaccarini et al., 2008)。铬铁矿中的 Al_2O_3 和 TiO_2 含量主要受母岩浆成分的控制,可以用来判别铬铁矿的形成环境(Kamenetsky et al., 2001)。Garuti 等(2012)认为肯皮赛地块的高铬型铬铁矿形成于俯冲带之上环境(SSZ),而高铝型铬铁矿形成于洋中脊(MOR)以及洋中脊向俯冲带过渡环境之下。从成岩成矿年代学角度上看,Melcher 等(1999)获得的肯皮赛地块西北部方辉橄榄岩、辉石岩脉和辉长岩脉等4个样品的 Sm-Nd 等时线年龄为 420~400 Ma,其中1个含金云母和角闪石的辉石岩脉样品的锆石 U-Pb 年龄为(420±10)Ma。结合样品 REE、Sm-Nd 同位素特征,肯皮赛地块西北部基性岩具有石榴石橄榄岩部分熔融形成的拉斑质 MORB 特征(Melcher et al., 1999)。而肯皮赛地块东南部赋存有高铬型铬铁矿的地幔橄榄岩特征则明显不同,方辉橄榄岩和橄榄岩显著富集 LREE,并且角闪石岩具有低的 $\epsilon_{Nd}(t=400\text{ Ma})$ 值(+0.6~-4.6)和正的 $\epsilon_{Nd}(t=400\text{ Ma})$ (10~15)值,显示岩石经历了明显的交代过程。结合从角闪石-铬铁矿

脉中分离出的角闪石单矿物的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄(365~380 Ma), Melcher等(1999)初步揭示了肯皮赛地块铬铁矿的成矿过程。420~400 Ma或者之前,由于乌拉尔洋盆扩张,形成了肯皮赛西北部具有MORB特征的基性岩,并赋存规模较小的高铝型铬铁矿;365~385 Ma之前,伴随乌拉尔洋发生洋内俯冲,大量的沉积物俯冲进入地幔楔,经历榴辉岩相变质作用的俯冲沉积物在脱挥发分作用下形成的流体与亏损地幔发生交代反应使残留的地幔橄榄岩(方辉橄榄岩)中辉石的铬出溶并形成富镁、高硅的二次含水熔体,同时难溶的IPGE被从铂族元素矿物或尖晶石中释放出来。当含水熔体在岩浆通道内向上运移过程中,与围岩(方辉橄榄岩)发生反应,致使方辉橄榄岩中的斜方辉石转变为橄榄石,从而形成橄榄岩外壳,随着熔体成分逐渐变得富硅,铬铁矿开始聚集结晶,并捕获了大量的铂族元素硫化物、原生铂族元素矿物以及含水硅酸盐包裹体,并最终形成高铬型铬铁矿(Arai et al., 1994; Arai, 1997; Melcher et al., 1999; Arai et al., 2015)。值得注意的是, Melcher等(1999)报道的肯皮赛西北部基性岩的形成时代为早泥盆世(420~400 Ma),而越来越多的研究则认为南乌拉尔地区由于洋盆扩张形成的具有MORB特征的蛇绿岩主要形成于早—中奥陶世或者更早,从早泥盆世开始南乌拉尔地区已进入洋内初始俯冲阶段(Belova et al., 2010; Savelieva, 2011)。因此,有关肯皮赛地块蛇绿岩的形成时代仍需进一步的工作。

4 开采与销售现状

4.1 开采现状

全球的铬铁矿分布广泛,但极不均衡。据USGS(2022),全球冶金级铬铁矿资源量超过120亿t,92%集中于南非、哈萨克斯坦、津巴布韦、芬兰、土耳其和印度等少数国家(Haldar, 2017; 赵宏军等, 2021)。哈萨克斯坦的铬铁矿储量超过3.66亿t(吕鹏瑞等, 2022),仅次于南非,居世界第二位(高永伟等, 2022)。哈萨克斯坦共有300余个铬铁矿床(矿点、矿化点),主要分布于其西北、东部及中部地区,与13条蛇绿岩带密切相关,并以乌拉尔肯皮赛蛇绿岩带最为集中。

肯皮赛铬铁矿基地的勘查开发历史悠久。1920年,前苏联在区内进行铬铁矿找矿工作;1937年,发现第一批铬铁矿床,并于1938年开始开采;1943年阿克托别铁合金冶炼厂开始生产;1963年发现Voskhod矿

床;1970~1980年,前苏联在区内开展大规模地质勘探,区内铬铁矿资源量大幅增加;1995年哈萨克斯坦铬业公司(TNC Kazchrome JSC)成立,并开始运营顿斯克伊(Донской, Donskoy)项目,目前该公司已成为世界最大的铬铁矿和铁合金生产商;2009年,俄罗斯梅矿业巨头梅切尔集团(Mechel)运营的沃斯克霍德项目正头投产;2013年土耳其伊德勒姆集团(Yildirim)通过收购沃斯克霍德项目正式进入哈萨克斯坦铬铁矿市场。至此,哈萨克斯坦铬铁矿开发格局基本形成。目前,哈萨克斯坦铬业公司和土耳其伊德勒姆集团基本控制了肯皮赛铬铁矿资源基地的商业开采。截至目前,哈萨克斯坦共登记有18个铬铁矿矿业权区块,包括6个采矿权和12个探矿权。其中,采矿权区块全部位于乌拉尔肯皮赛铬铁矿资源基地内,涉及顿斯克伊和沃斯克霍德两大矿业项目,包含5座矿山(表1)。

4.2 产能与贸易

哈萨克斯坦是全球最大的铬铁矿开采国之一,其他主要开采国包括南非、土耳其、芬兰、印度、津巴布韦和阿曼等。哈萨克斯坦的铬铁矿开采均来自于肯皮赛资源基地。近十年来,哈萨克斯坦的铬铁矿石产量不断上升。2019~2021年产量分别为670万t、670万t、700万t。2021年产量占全球总产量约17%,仅次于南非(1800万t),为全球第二大铬铁矿开采国,在全球铬及铁合金产品稳定供应上发挥重要作用(图5)。其中哈萨克斯坦铬业集团运营的顿斯克伊项目占全国总产量超80%,2021年产量近600万t。目前,该公司开采的铬铁矿石均由其旗下阿克托别和阿克苏两家铁合金厂进行冶炼,仅有极少量原矿石销往俄罗斯。土耳其伊德勒姆集团是世界前四大铬产品供应商之一,旗下沃斯克霍德项目2021年铬铁矿石产量约为100万t。

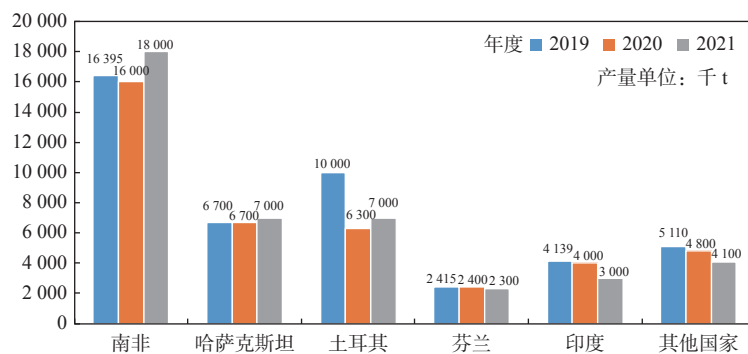
目前,全球90%以上的铬铁矿主要用于冶金工业。铬铁矿石经过冶炼转化为铬铁合金,其中90%以上的铬铁合金用于制造不锈钢(张炜等, 2016)。哈萨克斯坦开采的铬铁矿主要由哈萨克斯坦铬业公司旗下两家铁合金厂进行冶炼,该公司也是世界规模最大的铬铁合金生产商。土耳其伊德勒姆集团在哈萨克斯坦开采的铬铁矿石主要销售至哈萨克斯坦铬业公司,另有部分供应给该集团旗下的俄罗斯Tikhvin铁合金厂。哈萨克斯坦铬业公司官网显示,2016~2020年度的铬铁合金产量为150~181万t,年均169万t(图6);销售量为143~168万t,年均157万t;2018~2020年出口量分别为150万t、154万t、161万t。哈萨克

表1 哈萨克斯坦乌拉尔肯皮赛铬铁矿资源基地主要矿山统计表

Tab. 1 Main mines in Kempirsay chromite resource base of Ural, Kazakhstan

矿业项目	矿山	储量/矿石量(Mt)	资源量/矿石量(Mt)	平均品位/%(Cr ₂ O ₃)	产量/矿石量(Mt)	所有者
顿斯克伊	十周年	158.1	202.4	49.9	2.5	哈萨克斯坦铬业公司
	青年	3.1	4.1	50.4	2.3	
	南方	0.6	0.6	51.7	0.6	
	佩沃麦斯克耶	3			0.3	
	7号异常		0.2	41.2		
沃斯克霍德	沃斯克霍德	19		48.5	1.05	土耳其伊德勒姆集团
合计		183.8	207.3		6.75	

注：数据来源于哈萨克斯坦铬业公司、土耳其伊德勒姆公司以及标普数据库(截至2021年底)。



数据来源于国际铬铁矿发展协会(ICDA)

图5 世界主要铬铁矿生产国2019~2021年铬铁矿石产量图

Fig. 5 Mine production of chromium in major countries in worldwide, 2019~2021

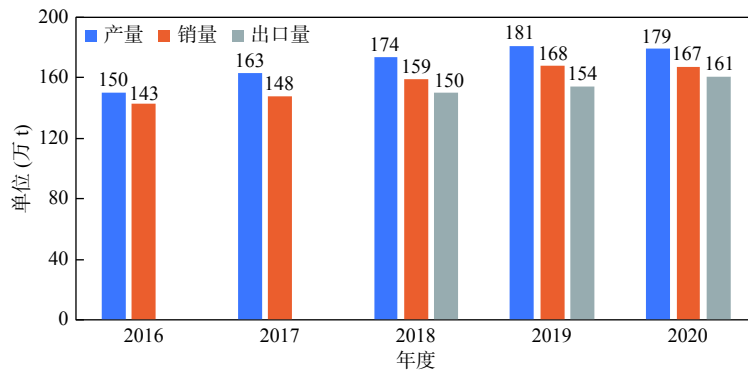


图6 哈萨克斯坦铬业公司2016~2020年铬铁合金产量、销量及出口量图

Fig. 6 Ferroalloys production, sales, export volumes of Kazchrome, 2016~2020

斯坦90%的铬铁矿销量用于出口,主要出口至中国、日本、韩国、欧洲和美国。其中,中国是其最大出口目标国,约占其出口量50%。目前,哈萨克斯坦铬业公司正通过新建矿山、扩建基础设施、改进生产工艺等手段,不断扩大铬铁矿石及合金产能,以满足全球不断增长的需求。此外,近年来哈萨克斯坦已采取了一系列改革措施,不断改善矿业投资环境,扩大国际矿业合作,提升矿产资源勘探开发水平(高永伟等, 2022)。因此,中国应积极加强与哈萨克斯坦的铬铁

矿勘查开发合作,防范进口来源过窄带来的供应风险,增强铬铁矿资源安全保障能力。同时,加强对肯皮赛铬铁矿资源基地的资源调查和潜力评价工作,积极参与或探索与当地有关机构(企业)进行勘查开发以及产能合作。

5 结论

(1)乌拉尔造山带是世界上保存最好的古生代增

生型造山带之一, 经历了太古代—古元古代基底形成演化、中—新元古代蒂曼造山、寒武纪—三叠纪古乌拉尔洋陆演化及侏罗纪之后陆内演化4个阶段, 发育了规模宏大、种类丰富的矿产资源。乌拉尔造山带总共分布有150余个蛇绿岩体, 蛇绿岩形成时代为新元古代—泥盆纪, 峰期为奥陶纪和泥盆纪, 包括MOR和SSZ两种类型, 后者赋存有储量巨大的冶金级铬铁矿。

(2) 肯皮赛铬铁矿资源基地有80余个铬铁矿床, 是世界最大的豆荚状铬铁矿产地。肯皮赛地块具有完整的“Pengrose”蛇绿岩层序, 发育高铝和高铬两类铬铁矿。其中, 前者形成于早泥盆世(或更早)的MOR环境; 后者含有较高的PGE含量, 并发育大量铂族元素矿物, 形成于晚泥盆世古乌拉尔洋内俯冲环境下, 是俯冲带流体与残留地幔橄榄岩交代反应后形成的熔体在上升过程中与围岩(地幔橄榄岩)发生熔岩反应的产物。

(3) 肯皮赛铬铁矿资源基地目前拥有顿斯克伊和沃斯克霍德两大矿业项目, 哈萨克斯坦铬业公司和土耳其伊德勒姆集团在基地内从事商业开采, 年产铬铁矿近700万t, 位居全球第二; 年产铬铁合金169万t; 年均销售量157万t, 90%用于出口, 中国是其最大出口国。

致谢: 匿名评审专家详细评阅了本文, 并提出了宝贵的意见与建议; 责任编辑为完善本文付出了大量精力, 在此一并致以诚挚的谢意。

参考文献(References):

- 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): 1741-1761.
- 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): 1741-1761.
- 鲍佩声. 元古代蛇绿岩及铬铁矿[J]. *岩石学报*, 2019, 35(10): 2971-2988.
- BAO Peisheng. Proterozoic ophiolite and chromite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(10): 2971-2988.
- 陈其慎, 张艳飞, 邢佳韵, 等. 国内外战略性矿产厘定理论与方法[J]. *地球学报*, 2021, 42(2): 137-144.
- CHEN Qishen, ZHANG Yanfei, XING Jiayun, et al. Methods of strategic mineral resources determination in China and abroad[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2021, 42(2): 137-144.
- 陈艳虹, 杨经绥. 豆荚状铬铁矿床研究回顾与展望[J]. *地球科学*, 2018, 43(4): 991-1010.
- CHEN Yanhong, YANG Jingsui. Formation of podiform chromitite deposits: review and prospects[J]. *Earth Science*, 2018, 43(4): 991-1010.
- 成金华, 刘凯雷, 徐德义, 等. 战略性关键矿产资源可供性研究现状与展望[J]. *河北地质大学学报*, 2021, 44(1): 95-103.
- CHENG Jinhua, LIU Kailei, XU Deyi, et al. Review of the research on strategic and critical mineral resources availability[J]. *Journal of Hebei Geo University*, 2021, 44(1): 95-103.
- 高永伟, 刘明义, 张丹丹, 等. 哈萨克斯坦主要矿产资源特征及矿业投资环境[J]. *地质与勘探*, 2022, 58(3): 454-464.
- GAO Yongwei, LIU Mingyi, ZHANG Dandan, et al. Characteristics of main mineral resources and mining investment environment in Kazakhstan[J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(3): 454-464.
- 计文化, 张海迪, 杨博, 等. 中亚重要成矿带成矿规律与优势矿产资源潜力评价综合研究报告[R]. 中国地质调查局西安地质调查中心, 2013.
- 李江海, 牛向龙, 黄雄南, 等. 豆荚状铬铁矿: 古大洋岩石圈残片的重要证据[J]. *地学前缘*, 2002, 9(4): 235-246.
- LI Jianghai, NIU Xianglong, HUANG Xiongnan, et al. Podiform chromitites: a key to identify the ancient oceanic lithospheric relicts[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(4): 235-246.
- 李三忠, 杨朝, 赵淑娟, 等. 全球早古生代造山带(II): 俯冲-增生型造山[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(04): 968-1004.
- LI Sanzhong, YANG Zhao, ZHAO Shujuan, et al. Global early Paleozoic Orogens(II): subduction-accretionary-type Orogeny[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(04): 968-1004.
- 李文渊. 块状硫化物矿床的类型、分布和形成环境[J]. *地球科学与环境学报*, 2007, 29(4): 331-344.
- LI Wenyuan. Classification, distribution and forming setting of massive sulfide deposits[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2007, 29(4): 331-344.
- 刘全文, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国铬资源供应风险评价与对策研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(3): 516-525.
- LIU Quanwen, SHA Jinghua, YAN Jingjing, et al. Risk assessment and countermeasures of chromium resource supply in China[J]. *Resources Science*, 2018, 40(3): 516-525.
- 刘婷, 郑有业, 郭统军. 大中型豆荚状铬铁矿床地球化学特征研究[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(2): 217-225.
- LIU Ting, ZHENG Youye, GUO Tongjun. Optimal geochemical features of medium and large-sized podiform chromite ores[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(2): 217-225.
- 吕鹏瑞, 高永伟, 张宇轩, 等. 哈萨克斯坦铬铁矿资源禀赋、供应格局与中哈产能合作建议[J]. *西北地质*, 2022, 55(3): 297-305.
- LÜ Pengrui, GAO Yongwei, ZHANG Yuxuan, et al. Kazakhstan's Chromite Resource Endowment, Development, Import and its

- Suggestions for Production Capacity Cooperation between China and Kazakhstan[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 297–305.
- 苏本勋, 白洋, 陈晨, 等. 铬铁矿床母岩浆含水性的岩石矿物学探讨[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2018, 37(06): 1035–1046.
- SU Benxun, BAI Yang, CHEN Chen, et al. Petrological and mineralogical investigations on hydrous properties of parental magmas of chromite deposits[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2018, 37(06): 1035–1046.
- 王登红. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. *地质学报*, 2019, 93(6): 1189–1209.
- WANG Denghong. Study on critical mineral resources: significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6): 1189–1209.
- 王九一. 全球高纯石英原料矿的资源分布与开发现状[J]. *岩石矿物学杂志*, 2021, 40(1): 131–141.
- WANG Jiuyi. Global high purity quartz deposits: resources distribution and exploitation status[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2021, 40(1): 131–141.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 等. 新疆北部镁铁-超镁铁质岩的PGE成矿问题[J]. *地学前缘*, 2010, 17(1): 137–152.
- WANG Yuwang, WANG Jingbin, WANG Lijuan, et al. PGE metallogenesis related to mafic-ultramafic complex in North Xinjiang[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(1): 137–152.
- 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 Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(8): 2137–2163.
- 杨经绥, 张仲明, 李天福, 等. 西藏罗布莎铬铁矿体围岩方辉橄榄岩中的异常矿物[J]. *岩石学报*, 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.
- 翟明国, 胡波. 矿产资源国家安全、国际争夺与国家战略之思考[J]. *地球科学与环境学报*, 2021, 43(1): 1–11.
- ZHAI Mingguo, HU Bo. Thinking to state security, international competition and national strategy of mineral resources[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(1): 1–11.
- 张炜. 世界铬矿资源需求分析及预测[J]. *资源与产业*, 2016, 18(4): 87–91.
- ZHANG Wei. Demand analysis and prediction of world chrome resource[J]. *Resources and Industries*, 2016, 18(4): 87–91.
- 张伟波, 刘翼飞, 何学洲. 非洲铬铁矿资源分布与找矿潜力[J]. *中国矿业*, 2019, 28(4): 79–83.
- ZHANG Weibo, LIU Yifei, HE Xuezhou. Distribution and prospecting potential of chromite resource in Africa[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(4): 79–83.
- 赵宏军, 陈玉明, 陈秀法, 等. 全球铬铁矿床成因类型、地质特征及时空分布规律初探[J]. *矿床地质*, 2021, 40(6): 1312–1326.
- ZHAO Hongjun, CHEN Yuming, CHEN Xiufa, et al. A review on genetic types, geological characteristics and temporal and spatial distribution of chromite deposits in world[J]. *Mineral Deposits*, 2021, 40(6): 1312–1326.
- 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2021[M]. 北京: 地质出版社, 2021: 4–12.
- Ministry of Natural Resources, PRC. 2021 China Mineral Resources[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021: 4–12.
- Arai S, Miura M. Podiform chromitites do form beneath mid-ocean ridges[J]. *Lithos*, 2015, 232: 143–149.
- Arai S, Yurimoto H. Podiform chromitites of the Tari-Misaka ultramafic complex, southwestern Japan, as mantle-melt interaction products[J]. *Economic Geology*, 1994, 89(6): 1279–1288.
- Arai S. Origin of podiform chromitites[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1997, 15(2-3): 303–310.
- Batanova V G, Belousov I A, Savelieva G N, et al. Consequences of Channelized and Diffuse Melt Transport in Supra-subduction Zone Mantle: Evidence from the Voykar Ophiolite (Polar Urals)[J]. *Journal of Petrology*, 2011, 52(12): 2483–2521.
- Belova A A, Ryazantsev A V, Razumovsky A A, et al. Early Devonian suprasubduction ophiolites of the southern Urals[J]. *Geotectonics*, 2010, 44(4): 321–343.
- 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(1): 54–76.
- Distler V V, Kryachko V V, Yudovskaya M A. Formation conditions of platinum-group metals in chromite ores of the Kempirsai ore field[J]. *Geology of Ore Deposits*, 2003, 45(1): 37–65.
- Furnes H, Wit M D, Dilek Y. Four billion years of ophiolites reveal secular trends in oceanic crust formation[J]. *Geoscience Frontiers*, 2014, 5(4): 571–603.
- Garuti G, Pushkarev E V, Thalhammer O A R, et al. Chromitites of the urals (part 1): overview of chromite mineral chemistry and geo-tectonic setting[J]. *Ophioliti*, 2012, 37(1): 27–53.
- González-Jiménez J M, Proenza J A, Gervilla F, et al. High-Cr and high-Al chromitites from the Sagua de Tánamo district, Mayarí-Cristal ophiolitic massif (eastern Cuba): Constraints on their origin from mineralogy and geochemistry of chromian spinel and platinum-group elements[J].

- Lithos, 2011, 125(1-2): 101–121.
- Graham I T, Franklin B J, Marshall B. Chemistry and mineralogy of podiform chromitite deposits, southern NSW, Australia: a guide to their origin and evolution[J]. *Mineralogy and Petrology*, 1996, 37: 129–150.
- Haldar S K. Platinum-Nickel-Chromium Deposits: Geology, Exploration, and Reserve Base[M]. Elsevier, 2017: 179–181.
- Ivanov K S, Puchkov V N, Fyodorov Y N, et al. Tectonics of the Urals and adjacent part of the West-Siberian platform basement: Main features of geology and development[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 72: 12–24.
- Kamenetsky V S, Crawford A J, Meffre S. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(4): 655–671.
- 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.
- 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.
- Mondal S K, Khatun S, Prichard H M, et al. Platinum-group element geochemistry of boninite-derived Mesoarchean chromitites and ultramafic-mafic cumulate rocks from the Sukinda Massif (Orissa, India)[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 104: 722–744.
- Pirajno F, Uysal I, Naumov E A. Oceanic lithosphere and ophiolites: Birth, life and final resting place of related ore deposits[J]. *Gondwana Research*, 2020, 88(5): 333–352.
- Prochaska W, Krupenin M. Formation of magnesite and siderite deposits in the Southern Urals-evidence of inclusion fluid chemistry[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2013, 107(1): 53–65.
- Puchkov V N. General features relating to the occurrence of mineral deposits in the Urals: What, where, when and why[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 85: 4–29.
- Puchkov V N. Structural stages and evolution of the Urals[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2013, 107(1): 3–37.
- Puchkov V N. The diachronous (step-wise) arc-continent collision in the Urals[J]. *Tectonophysics*, 2009, 479(1-2): 175–184.
- Rizeli M E, Beyarslan M, Wang K L, et al. Mineral chemistry and petrology of mantle peridotites from the Guleman ophiolite (SE Anatolia, Turkey): evidence of a forearc setting[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, 123: 392–402.
- Rollinson H, Mameri L, Barry T. Polymineralic inclusions in mantle chromitites from the Oman ophiolite indicate a highly magnesian parental melt[J]. *Lithos*, 2018, 310-311: 381–391.
- Saveliev D E. Chromitites of the Kraka ophiolite (South Urals, Russia): geological, mineralogical and structural features[J]. *Mineralium Deposita*, 2021, 56(6): 1111–1132.
- Savelieva G N, Sharaskin A Y, Saveliev A A, et al. Ophiolites and zoned mafic-ultramafic massifs of the Urals: a comparative analysis and some tectonic implications[A]. In: Brawn D, Juhlin C, Puchkov V (eds) *Mountain Building in the Uralides: Pangea to Present*[C]. *Geophysical Monographs*, American Geophysical Union, 2002, 132: 111–137.
- Savelieva G N. Ophiolites in European Variscides and Uralides: Geodynamic settings and metamorphism[J]. *Geotectonics*, 2011, 45(6): 439–452.
- Shemelev V R. Mantle Ultrabasites of Ophiolite Complexes in the Polar Urals: Petrogenesis and Geodynamic Environments[J]. *Petrology*, 2011, 19(6): 618–640.
- Thayer P T. Principal features and origin of podiform chromite deposits, and some observations on the Guelman-Soridag District, Turkey[J]. *Economic Geology*, 1964, 59(8): 1497–1524.
- USGS. Mineral commodity summaries 2022[R]. 2022.
- Uysal İ, Tarkian M, Sadiklar M B, et al. Petrology of Al- and Cr-rich ophiolitic chromitites from the Muğla, SW Turkey: implications from composition of chromite, solid inclusions of platinum-group mineral, silicate, and base-metal mineral, and Os-isotope geochemistry[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2009, 158(5): 659–674.
- Xiong F H, Zoheir B, Robinson P T, et al. Genesis of the Ray-Iz chromitite, Polar Urals: Inferences to mantle conditions and recycling processes[J]. *Lithos*, 2020, 374-375: 105699.
- Yang J S, Dobrzhinetskaya L, Bai W J, et al. Diamond- and coesite-bearing chromitites from the luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Geology*, 2007, 35(10): 875–878.
- Yang J S, Meng F C, Xu X Z, et al. Diamonds, native elements and metal alloys from chromitites of the Ray-Iz ophiolite of the Polar Urals[J]. *Gondwana Research*, 2015, 27(2): 459–485.
- Zaccarini F, Pushkarev E, Garuti G. Platinum-group element mineralogy and geochemistry of chromitite of the Kluchevskoy ophiolite complex, central Urals (Russia)[J]. *Ore Geology Reviews*, 2008, 33(1): 20–30.
- Zhou M F, Robinson P T, Bai W J. Formation of podiform chromitites by melt/rock interaction in the upper mantle[J]. *mineralium deposita*, 1994, 29: 98–101.
- Zhou M F, 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.
- 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, Sun M, Keays R 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(4): 677–688.