

doi: 10.12029/gc20211019001

伍月, 鞠楠, 张森, 马维, 郭常来, 吴涛涛, 周永恒. 2023. 铼矿分布特点、主要类型与勘查开发现状[J]. 中国地质, 50(1): 133–145.

Wu Yue, Ju Nan, Zhang Sen, Ma Wei, Guo Changlai, Wu Taotao, Zhou Yongheng. 2023. The distribution features, main types and present situation of exploration and development for rhenium[J]. Geology in China, 50(1): 133–145(in Chinese with English abstract).

## 铼矿分布特点、主要类型与勘查开发现状

伍月<sup>1</sup>, 鞠楠<sup>1,2</sup>, 张森<sup>1</sup>, 马维<sup>3</sup>, 郭常来<sup>1</sup>, 吴涛涛<sup>1</sup>, 周永恒<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 辽宁省地质勘查院有限责任公司, 辽宁 大连 116200)

**摘要:**【研究目的】全球铼资源分布不均衡, 智利占全球铼资源总量的半数以上, 其中主要来自于斑岩铜矿床。铼的矿床类型与其赋存状态密切相关, 由于铼矿多数与其他矿种伴生, 导致铼的矿床类型划分尚未形成统一标准, 无法为找矿勘查提供依据, 因此急需开展相关研究。【研究方法】本文从全球铼矿赋存状态、矿床成因、矿石类型等方面入手, 系统梳理和总结已有典型铼矿的富集成矿规律及矿床类型, 以期为该类型矿床的勘探开发提供思路。【研究结果】本文将铼矿床划分为 4 种类型, 即斑岩型铜矿中的铼、沉积层控型铜矿中的铼、砂岩型铀矿中的铼以及矽卡岩型矿床中的铼, 其中, 以斑岩矿床的铼品位最高、储量最大。铼成矿作用以燕山期最为发育, 次为喜马拉雅期、印支期、加里东期, 其中, 大型伴生铼矿主要发育在加里东期、印支期、燕山期和喜马拉雅期。铼矿勘探方面, 已探明铼矿储量的半数以上来自智利, 其余主要国家依次为美国、俄罗斯、哈萨克斯坦和亚美尼亚。铼矿开发方面, 铼矿很可能存在于大陆弧环境下形成的斑岩型铜矿床, 各国开始从斑岩铜矿床中回收铼。【结论】铼矿作为新兴资源, 在未来节能减排、碳中和实施方面发挥积极作用, 应加强独立铼矿床的勘查以及铜钼铼伴生矿床的成因机制研究, 重视老矿山的二次开发利用。

**关键词:** 铼矿; 分布特点; 成矿类型; 勘查开发; 找矿远景; 矿产勘查工程

**创新点:** (1) 将铼矿床分为 4 大类, 其中斑岩型铜矿中铼的品位最高、储量最大; (2) 铼成矿作用以燕山期最为发育, 铼矿很可能存在于大陆弧环境下形成的斑岩型铜矿床。

中图分类号: P617 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)01-0133-13

## The distribution features, main types and present situation of exploration and development for rhenium

WU Yue<sup>1</sup>, JU Nan<sup>1,2</sup>, ZHANG Sen<sup>1</sup>, MA Wei<sup>3</sup>, GUO Changlai<sup>1</sup>, WU Taotao<sup>1</sup>, ZHOU Yongheng<sup>1</sup>

(1. Shenyang Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China; 2. China University of Geoscience (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Liaoning Provincial Institute of Geological Exploration Co., Ltd., Dalian 116200, Liaoning, China)

收稿日期: 2021-10-19; 改回日期: 2021-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(42102087), 中国博士后科学基金项目(2022M712966)和青藏高原大宗矿产数据库建设(2021QZKK0304)联合资助。

作者简介: 伍月, 女, 1985 年生, 高级工程师, 主要从事岩矿测试及固体矿产调查与研究; E-mail: wuyuemay005@163.com。

通讯作者: 鞠楠, 男, 1986 年生, 高级工程师, 主要从事固体矿产调查与研究; E-mail: junan-cgs@qq.com。

**Abstract:** This paper is the result of mineral exploration engineering.

**[Objective]**The global rhenium resources are unevenly distributed. Chile accounts for more than half of the total global rhenium resources, mainly from porphyry copper deposits. The type of rhenium deposit is closely related to its occurrence state. Since most of the rhenium ore is associated with other minerals, the classification of rhenium deposits has not yet formed a unified standard, which can not provide a basis for ore prospecting. Therefore, it is urgent to carry out relevant research. **[Methods]**In this paper, from the perspective of global occurrence of rhenium deposits, ore types and other aspects, the enrichment and mineralization rules and deposit types of existing typical rhenium deposits are systematically sorted out and summarized, in order to provide ideas for the exploration and development of this type of deposits. **[Results]**Rhenium deposits are divided into four types in this paper: rhenium in porphyry copper deposits, rhenium in sedimentary-type strata-bound copper deposits, rhenium in sandstone-type uranium deposits, and rhenium in skarn deposits. Among them, rhenium in porphyry deposits has the highest grade and largest reserves. In terms of metallogenic characteristics, the Yanshanian period is the most developed for rhenium mineralization, followed by the Himalayan, Indosinian, and Caledonian periods. Large associated rhenium deposits mainly developed in the Caledonian, Indosinian, Yanshanian and Himalayas. In terms of rhenium exploration, more than half of the proven rhenium reserves are from Chile, and the remaining major countries are the United States, Russia, Kazakhstan and Armenia in order. Regarding the development of rhenium ore, rhenium ore is likely to exist in porphyry copper deposits formed in a continental arc environment, and many countries have begun to recover rhenium from porphyry copper deposits. **[Conclusions]**As an emerging resource, rhenium ore will play an active role in the implementation of energy saving, emission reduction, and carbon neutrality in the future. The exploration of independent rhenium deposits and the genetic mechanism of copper-molybdenum-rhenium associated deposits should be strengthened, and the secondary development and utilization of old mines should be emphasized.

**Key words:** rhenium; distribution characteristics; metallogenic types; exploration and development; prospects perspective; mineral exploration engineering

**Highlights:** (1) Rhenium deposits are divided into four types, and rhenium in porphyry deposits has the highest grade and largest reserves; (2) In terms of metallogenic characteristics, the Yanshanian period is the most developed for rhenium mineralization, and rhenium ore is likely to exist in porphyry copper deposits formed in a continental arc environment.

**About the first author:** WU Yue, female, born in 1985, senior engineer, engaged in rock and mineral testing, solid mineral survey and research; E-mail: wuyuemay005@163.com.

**About the corresponding author:** JU Nan, male, born in 1986, senior engineer, engaged in solid mineral survey and research; E-mail: junan-cgs@qq.com.

**Fund support:** Supported by National Natural Science Foundation of China (No.42102087), China Postdoctoral Science Foundation (No.2022M712966) and construction of bulk mineral database on Qinghai-Tibet Plateau (No.2021QZKK0304).

## 1 引 言

铼(Re)是地球大陆壳中最稀有的元素之一,是人们发现的最后一种稳定的天然元素,德国化学家Walter Noddack, Ida Tacke 和 Otto Berg 于1925年从硅铍钨矿矿石中浓缩了铼,其平均地壳丰度约为 $0.4 \times 10^{-9}$ ,这种银白色金属元素具有极高的熔点和稳定的晶体结构(Taylor and McLennan, 1995; Emsley, 2001; Rudnick et al., 2003; Sun et al., 2003),主要用于催化剂和高温加热电离带等。近年来,铼的最重要的用途是在高温下制造保持足够机械强度的超级合金,因此其每吨价格也飞涨至数百万乃至上千

万美元,超级铼合金是高性能飞机发动机涡轮的核心材料,铼又有着“航空金属”和“超级金属”等美称(黄翀等,2014;廖仁强等,2020)。随着当今世界航空航天事业的发展,铼的重要性越来越凸显。本文将全球铼矿的分布、成因类型和勘查开发现状等特征系统梳理如下。

## 2 铼矿分布

从储量来看,全球铼资源分布不均衡,2019年,智利占全球铼总储量的半数以上(图1),其余的铼资源主要集中在美国、俄罗斯、哈萨克斯坦和亚美尼亚(U.S. Geological Survey, 2020)。从产量来看,

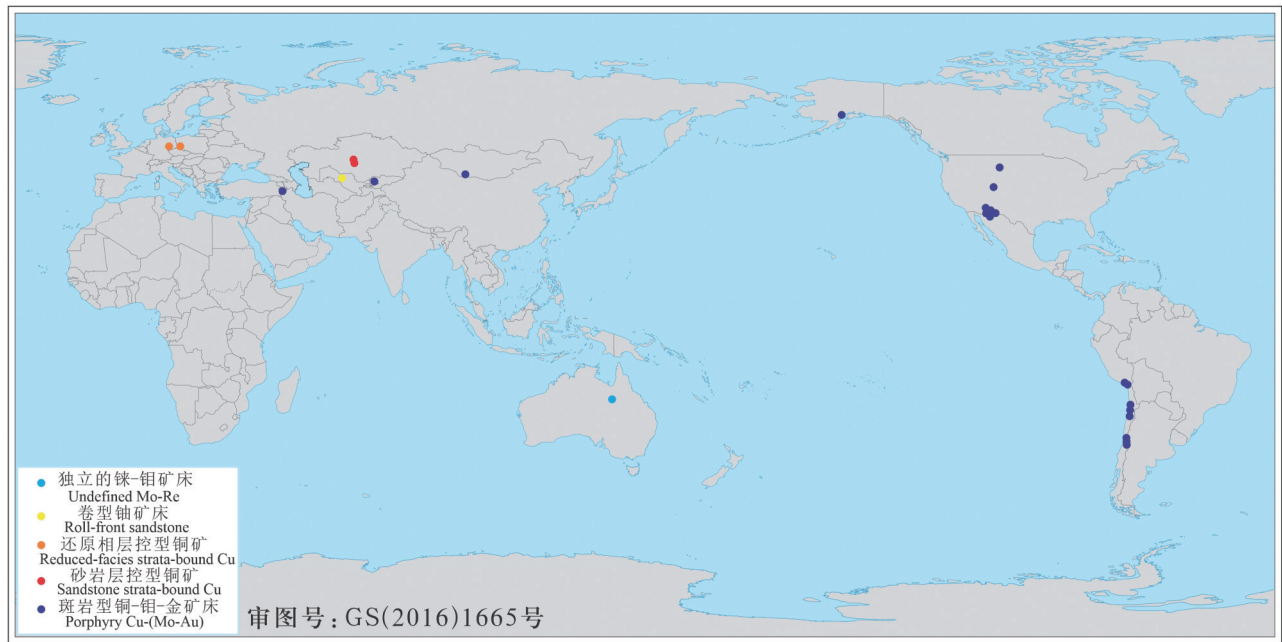


图1 全球主要铼矿床分布图(据张艳飞等, 2022 修改)  
Fig.1 Distribution map of main rhenium deposits in the world (modified from Zhang Yanfei et al., 2012)

2019年全球铼矿产量为49 t,其中约27 t产自智利的斑岩铜矿床(总产量的55%),如Bingham Canyon Mine矿床。近年来,美国、亚美尼亚、哈萨克斯坦、墨西哥、秘鲁、俄罗斯和乌兹别克斯坦等国家也开始从斑岩铜矿床中回收铼(郭娟等, 2020),而大陆弧环境下形成的斑岩型铜矿床是铼矿生产的主要来源。美国的铼资源主要位于亚利桑那州和犹他州,少量资源位于蒙大拿州、新墨西哥州和内华达州。波兰和哈萨克斯坦以沉积物为主的层控状铜矿床是铼的另一主要来源,其中,波兰的Kupferschiefer矿床和哈萨克斯坦的Dzhezkazgan矿床均拥有大量铼资源,而波兰Legnica-Głogów铜带的Kupferschiefer矿床年产量约30 t矿石,储量足以维持30至40年。哈萨克斯坦的砂岩型铀矿床也能将铼矿作为副产品产出(Dahlkamp, 2009),此外,俄罗斯乌拉尔山脉南部和中部矿床也产出少量铼矿资源(Khalezov, 2009)。澳大利亚昆士兰州的砂卡岩型铜-铼矿床是为数不多的独立铼矿床,其铼矿品位很高可达22.7 g/t,但与其他矿床类型相比,铼矿总储量相对较小。国内铼矿的储量约为237 t,主要分布于江西德兴、湖南宝山、陕西洛南和金堆城、河南栾川及吉林大黑山等地(吴贤等, 2008; 王海勇等, 2017; 白智辉和张江峰, 2019)。

### 3 铼矿床主要类型

铼的矿床类型与其赋存状态密切相关,自然界中的铼主要以类质同象形式存在于辉钼矿和硫化铜矿中,有少量分布在某些铜矿物、铋铁矿、硅铍钇矿、铂和铀矿物中。由于铼的高度分散性和特殊的赋存状态,导致很少有独立的铼矿床存在,其主要伴生在钼矿床和铜矿床中,尤其是斑岩型铜钼矿床(表1)。从全球性成矿带看,含铼矿床主要集中在西太平洋成矿带、特提斯成矿带、中亚—蒙古(古亚洲)成矿带和印度克拉通成矿区内,如特提斯成矿带分布有伊朗的萨尔切什梅斑岩型铜金钼(铼)矿床,西太平洋成矿带内产出的美国阿霍斑岩铜钼矿床是世界上已发现的辉钼矿含铼最高的矿床,其辉钼矿铼含量高达0.2%(陈喜峰等, 2019)。几乎所有的初级铼生产都是铜开采的副产物,斑岩型铜-钼-金矿床中主要含有铼资源,这些矿床占采矿总资源量的80%,斑岩型铜矿中的铼主要以辉钼矿固溶体中的 $\text{ReS}_2$ 形式存在(Fleischer, 1959),大部分的铼是作为矿床的副产物,这些铜矿床的围岩多数为沉积岩,地层的控矿作用明显,典型的沉积岩类型主要有哈萨克斯坦的砂岩红层类型和波兰Kupferschiefer的蒸发相类型(Hitzman et al.,

表 1 主要含铼矿床特征(据 U.S. Geological Survey, 2014)

Table 1 The characteristics of main rhenium-bearing deposits (after U.S. Geological Survey, 2014)

矿床名称	矿床类型	构造背景	Cu 品位/%	Mo 品位%	铼在 MoS <sub>2</sub> 中的平均值/10 <sup>-6</sup>
巴格达	斑岩型铜矿-(Mo-Au)	CA	0.400	0.01	460
宾厄姆	斑岩型铜矿-(Mo-Au)	PC	0.822	0.053	250
比尤特	斑岩型铜矿-(Mo-Au)	CA	0.673	0.028	240
莫伦奇	斑岩型铜矿-(Mo-Au)	CA	0.524	0.0095	455
佩布尔	斑岩型铜矿-(Mo-Au)	PC	0.592	0.0243	1100
卡尔马基尔(Almalyk)	斑岩型铜矿-(Mo-Au)	CA	0.380	0.006	1500
Zuun Mod Molyb-denum	斑岩型铜矿-(Mo-Au)	CA	0.069	0.059	275
鲁宾-谢罗佐维采	还原相(Kupfer-schiefer) 层控型铜矿	n.a.	1.58	—	—
曼斯菲尔德-桑格豪森	还原相(Kupfer-schiefer) 层控型铜矿	n.a.	2.41	0.015	—

注:CA—大陆弧;PC—后碰撞;n.a.—不适用于该类型矿床。

2005)。哈萨克斯坦从砂岩型铀矿中可回收少量铼(Dahlkamp, 2009),澳大利亚昆士兰州 Mount Dore 铜矿床的 Merlin 铼-铼矿带是高品质铼矿的潜在来源,并且是唯一已知的把铼作为主要矿石储量的矿床<sup>①</sup>。

总体上,由于铼矿多数与其他矿种伴生,导致铼的矿床类型划分尚未形成统一标准。Dill(2010)在阐述钼矿床分类时,提出了铼的划分方案,即伴生于斑岩型钼矿中的铼矿、以页岩为容矿岩石的钼-铼-铋矿床中的铼矿和以页岩为容矿岩石的铜矿中的铼矿;John et al.(2017)<sup>②</sup>将含铼矿床类型划分为独立的铼-钼矿床、卷型铀矿床、还原相层控型铜矿、砂岩层控型铜矿和斑岩型铜-钼-金矿床;也有学者认为对除伴生铼矿的各种成因类型钼矿床、铜钼矿床外,还有独立铼矿床、含铼的岩浆型铜铋矿床、铬铁矿床、铂矿床、含铼的黑钨矿床、铼铜砂岩、铀铼铜砂岩型矿床、铼铜炭质页岩型铜矿以及煤系中的铼(杨敏之,2000;黄凡等,2019a)。杨敏之(2000)进一步将含铼矿床分为3类:即黑色页岩系(包括煤层)内的含铼矿床,火山岩、浅变质火山岩、次火山岩内的含铼矿床以及斑岩、花岗岩内的含铼矿床(黄凡等,2019a)。综合全球已知大型铼矿特征,本文将铼矿床划分为:斑岩型铜矿中的铼、沉积层控型铜矿中的铼、砂岩型铀矿中的铼以及砂卡岩型矿床中的铼4种,其中,以斑岩矿床中的铼品位最高、储量最大(图2)。

### 3.1 斑岩型铜钼矿中的铼

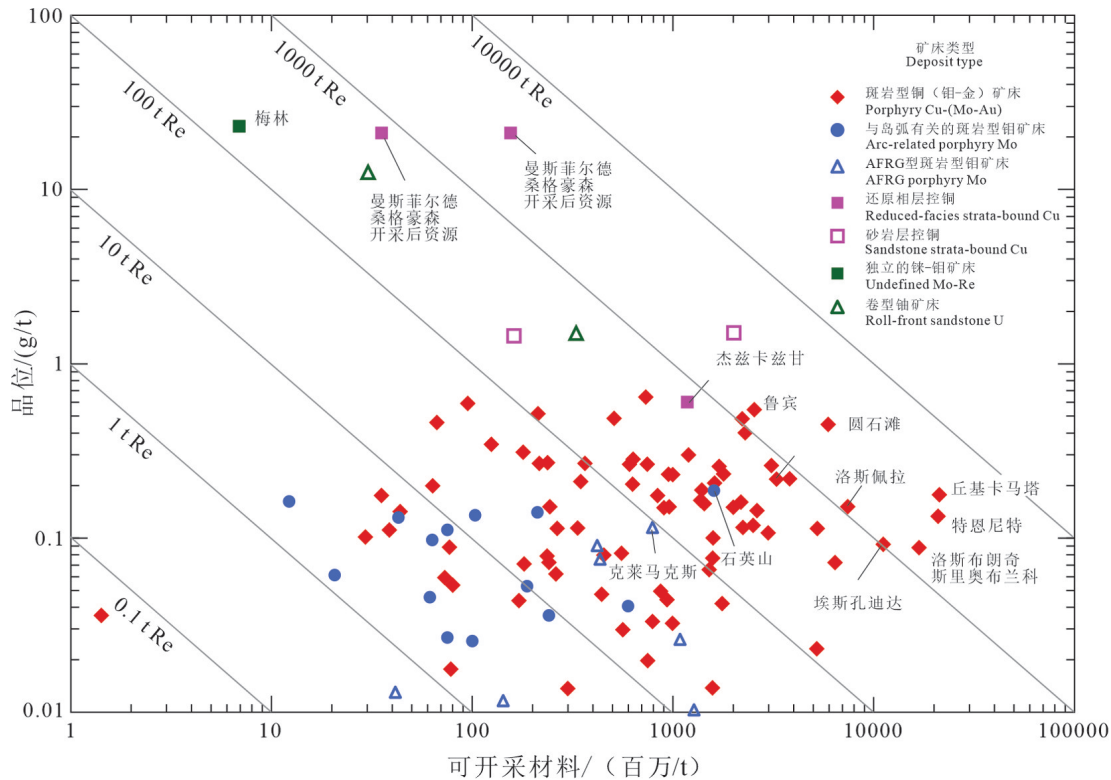
大型陆缘斑岩型铜-钼-金矿床中的铼占世界铼资源的主导地位,斑岩型铜矿床很大(超过0.1

Gt),品位低(铜的含量为0.3%~2.0%)<sup>③</sup>。斑岩型铜矿床是大型斑岩成矿系统的一部分(Sillitoe, 2010)。铜是斑岩型铜矿床中主要的矿石矿物,其次为钼,金和少量银,铼和PGE(主要是钯)是这些矿床中重要的副产物(Richards, 2009; Hou et al., 2011)。斑岩型铜矿系统的较深部分(深度约为2~10 km)中心形成斑岩铜-钼-金矿化,边部可能形成铜、金和铋矿化。这些系统的浅层上覆部分可能蕴藏着高硫化和中等硫化的热液型金-银-铜矿床,而铜、金和钼的矿化通常与钾和钠蚀变有关,铼总是与钼矿化有关(图3)。绝大部分铼矿都产自安第斯山脉的系列斑岩铜矿体中,如智利的丘基卡马塔-拉多米罗托米奇矿床和埃尔特恩特铁矿床等。斑岩型铜矿床中的铼主要以 ReS<sub>2</sub> 的形式赋存在辉钼矿的固溶体中(Fleischer, 1959),此类矿床的铼品位较低,通常小于0.5 g/t<sup>④</sup>(John and Taylor, 2016)。

斑岩钼矿床中辉钼矿中铼的含量通常远低于斑岩铜矿床中辉钼矿中铼的含量<sup>⑤⑥</sup>,尽管钼品位较高,但斑岩钼矿床的铼品位通常低于斑岩铜矿床的铼品位,而且大多数斑岩型钼矿床中铼的储量也较少。

### 3.2 在沉积层控型铜矿床中的铼

沉积层控型铜矿床是铼的另一主要来源,在加工铜矿石的过程中铼可提取,如哈萨克斯坦的砂岩(红床)型铜矿床和波兰的还原相(Kupferschiefer)型铜银矿床。沉积层控型铜矿床矿化由独立的铜矿物和铜-铁硫化物组成,产在硅质碎屑或白云岩等沉积岩中(Hitzman et al., 2005),而矿石矿物沿流体运移的方向,按照赤铁矿-菱铁矿-褐铁矿-黄铜矿-黄铁矿的顺层横向和垂直分布在沉积地层中,矿体位于氧化

图2 世界主要含铼矿床的铼品位与矿床吨位图<sup>①</sup>(据 John and Taylor, 2016 修改)Fig.2 Plot of rhenium grade versus deposit tonnage for major rhenium-bearing deposits in the world<sup>①</sup>(modified from John and Taylor, 2016)

的红层核部或上部。此类矿床是由氧化的、富含金属元素的卤水流过可渗透的红层沉积岩石(主要是砂岩)而形成的,氧化的富含成矿元素的流体、还原剂(如碳氢化合物)与还原的有机碳、硫化物的相互作用导致了铁、铜、铅和锌的富集成矿。

### 3.2.1 砂岩层控型铜矿床中的铼

在哈萨克斯坦中部,从楚-萨里苏盆地晚期的古生代砂岩层控型铜矿床(如 Dzhezkazgan 和 Zhaman-Aybat 矿床)中可提炼铼矿,矿床由铜的硫化物(斑铜矿,辉铜矿和黄铜矿)组成。铜矿物按流体流动的方向依次沉淀成矿,从辉铜矿到斑铜矿,再到黄铜矿(图4)。哈萨克斯坦大型的铼产地主要是 Zhaman-Aybat 矿床(平均品位为 1.45 g/t,最高可达 9 g/t)和 Dzhezkazgan 矿床(平均品位为 1~2 g/t),这两个矿床均位于哈萨克斯坦 Qaraghandy 省。在 Zhaman-Aybat 矿床中,铼矿均产自铜矿床中部的黄铜矿和斑铜矿-辉铜矿之间的过渡带,富铅和富锌矿石以及富铜矿石中都富含铼,而且铼显然与辉铜矿无关。铼与铜矿体关系更为密切。Dzhezkazgan 矿床中,铜矿石中钼与铼的比率(Mo:Re)平均值为

1.2,其他哈萨克斯坦矿床中的比率为 0.4~7.5,这表明在这些矿床中铼比钼更富集(Taylor and McLennan, 1995; Rudnick and Gao, 2003),这与大陆地壳的平均 Mo:Re 为 2.5 至 2.75 的估计值相近,而黄铜矿和斑铜矿中铼的含量则高达 3.3~10.1 g/t (Ruiz and Mathur, 1999; Selby et al., 2009; Box, 2013)。

### 3.2.2 还原相(Kupferschiefer)层控型铜矿床中的铼

形成于早二叠世 Kupferschiefer(铜板岩)的黑色薄页岩产出了欧洲最大的铜和银矿床(Mansfeld-Sangerhausen 和 Lubin-Sieroszowice 矿床)<sup>②③</sup>(Vaughan et al., 1989; Hitzman et al., 2005),这些还原相层控型铜矿床也含有大量的铼资源,如波兰西南部的 Lubin-Sieroszowice 矿床、德国南部的 Mansfeld-Sangerhausen 矿床,这些矿床的矿石储量巨大,波兰 Legnica-Głogów 铜矿带的资源量为 1.181 Gt,铜平均品位为 1.58%,银平均品位为 48 g/t<sup>④</sup>,Kupferschiefer 的其他地区也陆续发现了大型矿床。相比之下,德国曼斯费尔德-桑格豪森矿床的铼平均品位要高得多,为 21 g/t,从 1200 年至 1990 年

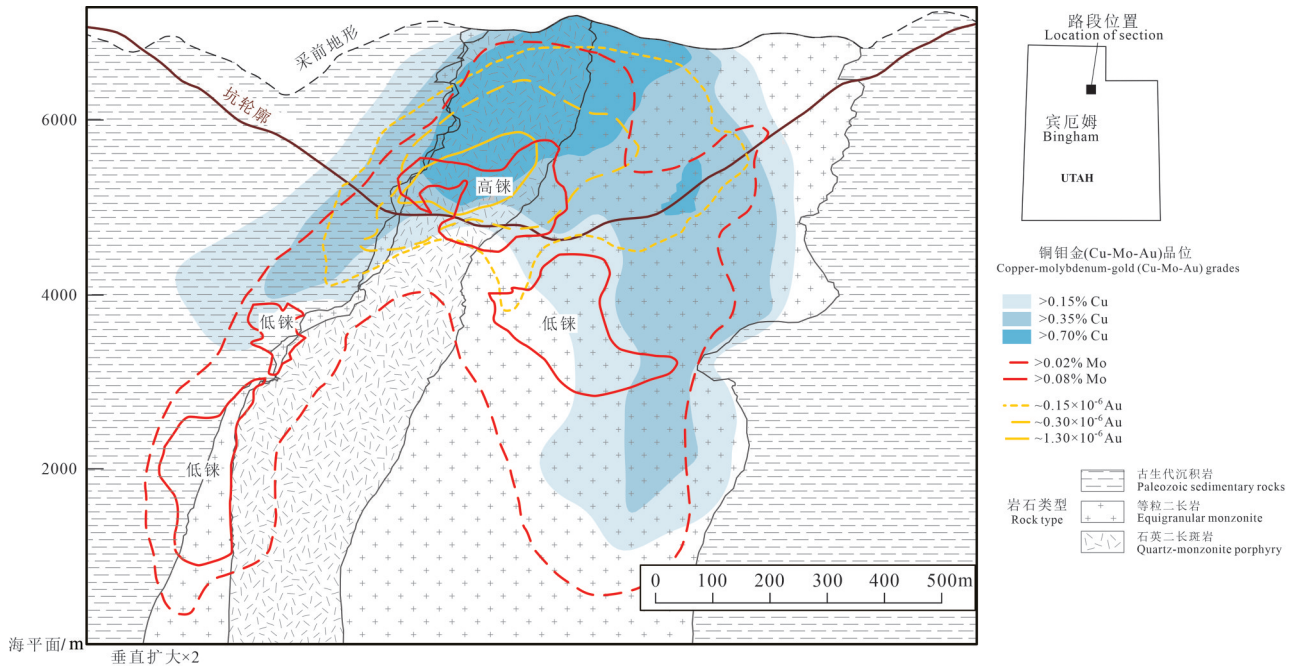


图3宾厄姆的斑岩铜钼金矿(据 Landtwing et al., 2010; Seo et al., 2012 修改)

Fig.3 Porphyry copper-molybdenum-gold (Cu-Mo-Au) deposit in Utah (modified from Landtwing et al., 2010; Seo et al., 2012)

开采总量超过 2500 t。Kupferschiefer 矿床产在 Rotliegendes-Zechstein 盆地的南部边缘(早二叠世大陆裂谷盆地的一部分),其上覆古生代大陆沉积和双峰火山岩(Vaughan et al., 1989; Kucha, 2003<sup>®</sup>; Hitzman et al., 2005),火山岩钠长石化明显,且铜含量达到工业品位(Hitzman et al., 2005)。上覆的 Rotliegendes 盆地是厚厚的红层层序,由河流、风积和 sabkha 沉积物组成,局部被白色风积砂岩(Weissliingendes)覆盖。早二叠世 Kupferschiefer 是一种薄的(30~70 cm)富含有机碳的黑色页岩,在欧洲中部覆盖面积超过 800000 km<sup>2</sup>,它构成了 Zechstein 地层的基础单元,并在 Rotliegendes-Weissliingendes 序列发生快速海侵的初始阶段沉积。Kupferschiefer 黑色页岩上覆有 Zechstein 碳酸盐(白云石和石灰石)以及硬石膏等(图 5),黑色页岩和下伏的白色砂岩都蕴藏着铜、金、PGE 和银。Kupferschiefer 矿床矿化特征复杂,可划分为多个成矿阶段:①沉积物-水界面附近的单硫化铁及辉绿岩的早期成岩作用;②铜-铁硫化物置换单硫化铁和黄铁矿;③金-PGE 矿化作用、铜矿化作用(Vaughan et al., 1989; Wodzicki and Piestrzynski, 1994; Kucha, 2003<sup>®</sup>; Hitzman et al., 2005)。

Kupferschiefer 中的铼与富含铜的页岩矿石中的铜关系密切(Hammer et al., 1990; Kucha, 2003<sup>®</sup>),如 Mansfeld-Sangerhausen 矿山中矿石的铜-铼比为 7:1,与哈萨克斯坦层控型铜矿床中一样,这些铜-铼比表明相对于铜而言,铼富集度显著。对德国桑格豪森盆地的地球化学研究表明,岩石中铼的含量存在很大差异,其范围为 0.24~27 g/t,最高的铼含量是在 Kupferschiefer 的铜矿体中(Hammer et al., 1990)。波兰的 6 个 Kupferschiefer 黑色页岩样品中的铼浓度范围为  $63.6 \times 10^{-9} \sim 1380 \times 10^{-9}$  (铜含量  $\leq 106$  g/t, 钼含量在 20~340 g/t),在这些样品中,铼与钼有很强的相关性 ( $R^2=0.93$ ),并且集中在黑色页岩的下部。德国西北下莱茵盆地 Kupferschiefer 沉积物的微量元素组成与加拿大泥盆纪 Exshaw 组晚期的黑色页岩和现代黑色页岩的比较表明,砷、镉、钼、镍、铼、铋、铀和钒的富集水平相似,它们是同生成矿的典型特征(Lüschen et al., 2000)。这些数据表明, Kupferschiefer 矿石中的铼可能源自盆地周边的岩浆岩,并赋存在黑色页岩中,被局部转移到铜富集区。

### 3.3 砂岩型铀矿中的铼

铼以前是乌兹别克斯坦砂岩型铀矿的副产品, Kazakhstan 公司目前专门负责从哈萨克斯坦相关铀

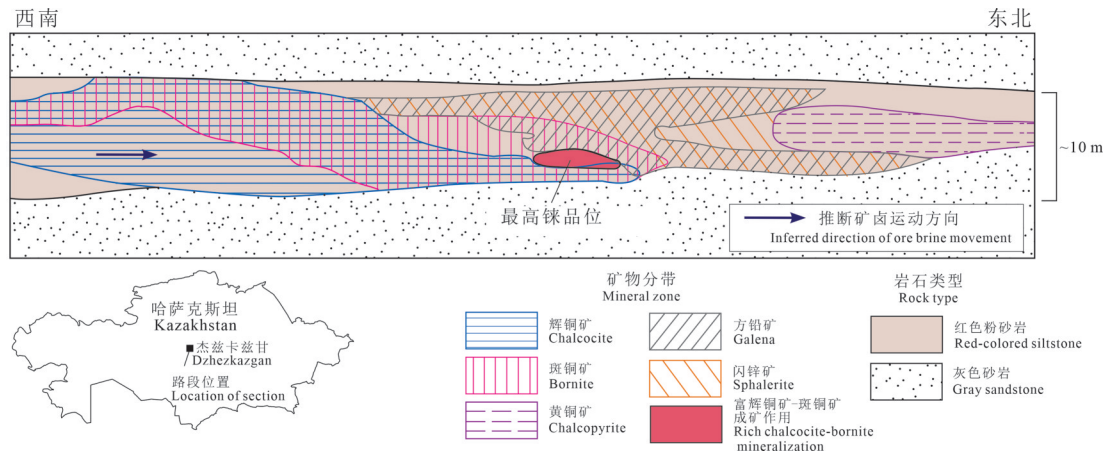


图4 哈萨克斯坦的砂岩层控型铜矿床<sup>①</sup>(据 Box et al., 2013 修改)  
Fig.4 Sandstone-type strata-bound copper deposit in Kazakhstan<sup>①</sup>(modified from Box et al., 2013)

矿中回收铼矿<sup>①</sup>(Dahlkamp, 2009)。砂岩型铀矿床通常产于沉积河流或近岸海洋环境中的可渗透的中粗粒砂岩中(张森等, 2018; 陈振岩等, 2021; 郝雪峰等, 2021), 哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦的大型铀矿床则赋存在白垩纪至古近—新近纪早期陆相盆地中, 沉积岩石是由盆地周边岩石中的铀溶解在流经砂岩的氧化地下水中形成的, 当氧化的含矿流体与砂岩基质岩石中的还原剂接触并发生作用时, 铀会在氧化还原边界处沉淀, 例如碳质(植物和藻类)、硫化物、碳氢化合物或层间火山岩中的还原剂, 矿体多呈新月形, 横穿地层中的其他砂体。在乌兹别克斯坦 Zarafshan 矿区的 Sugraly 矿床, 从 Kyzylkum 盆地白垩纪至始新世砂岩地层开采铀矿的副产品中回收了铼、硒和钼。该矿区地下采矿始于 1977 年, 后来转为地表浸出, 直到 1994 年采矿结束, Sugraly 矿床是典型的砂岩型矿床, 具有复杂的铀—硒—钼—铼矿石, 矿体长 0.5~20 km, 宽 100~500 m, 铼以  $\text{ReS}_2$  和  $\text{ReO}_2$  的形式存在, 铼品位介于 10~15 g/t (Dahlkamp, 2009; Seltmann et al., 2012)。哈萨克斯坦的砂岩型铀矿中均存在铼矿, 包括楚—萨里苏盆地的 Moynkum、Kanzhugan 和 Kenze—Budenovskaya 矿床, 以及 Suluchekinskoye 矿床 (Dahlkamp, 2009)。在 Moynkum 和 Kanzhugan 矿区, 古近纪砂岩含水层中的大量铀矿体与氧化还原锋有关, 铼品位通常在 0.08~0.38 g/t, 某些矿床中的铼含量高达 4.8 g/t。在 Moynkum 矿床北端的 Tortkuduk 区段中(图 6), 铀矿化包含在一个夹在黏土与粉砂床之间的 40 m 厚的砂岩体中, 铀矿化沿蜿蜒的氧化还原面延伸约 10 km, 还原锋的前部约 20 m 厚, 尾部可能

厚达几米, 长超过 400 m, 铼晕(铼品位  $>0.1$  g/t)与铀的分布相吻合, 围绕着还原锋的前部, 并延伸至还原岩石中, 还原锋的后部有一个硒含量大于 50 g/t 的硒富集区。在 Kenze—Budenovskaya 矿区的 Zhalspak 和 Akdala 矿床, 白垩纪砂岩中也蕴藏着铀矿化, 这些矿床中的几个矿体的铼含量高达 62 g/t (Dahlkamp, 2009; Seltmann et al., 2012<sup>①</sup>), 铼含量大于 0.2 g/t 的样品中铀含量更高。在伊利盆地的 Suluchekinskoye 地区, 前陆型矿体是白垩纪与古近纪砂岩的主体, 铼在还原的岩石中, 矿体横向分布, 然后在氧化还原边界处形成铀—铼富集区, 在氧化岩石中形成还原锋后部的硒富集区域, 铼含量为 1~24 g/t, 平均为 1~2 g/t。

### 3.4 砂卡岩型矿床中的铼

位于澳大利亚昆士兰州西北部伊萨山(Isa Inlier)的砂卡岩型钼—铼矿床是为数不多的高品位铼矿床, 其中铼和钼是主要矿产品, 并且存在少量的铜<sup>①</sup>。矿化岩石主要由脉石中的辉钼矿、角砾岩和陨石填充, 矿体长约 1 km, 厚达 20 m, 辉钼矿中含有平均含量约为 1000 g/t 的铼。2012 年, 推断的资源量为 6.9 Mt, 平均钼含量为 1.38%, 铼含量为 22.7 g/t。Merlin 矿床是在 Mount Dore 铜矿床北延线的钻探过程中发现的 (Brown et al., 2010<sup>①</sup>), Merlin 和 Mount Dore 矿床是由元古代早期的碳质变质页岩和粉砂岩组成的, 它们成矿后被花岗岩所覆盖。砂卡岩型钼—铼矿化与硅—长石蚀变及沿裂缝和剪切带形成的断层泥有关, 角砾岩具有控矿作用。在 Mount Dore 矿床中, 钾盐蚀变和石英脉以及角砾岩(在铜矿

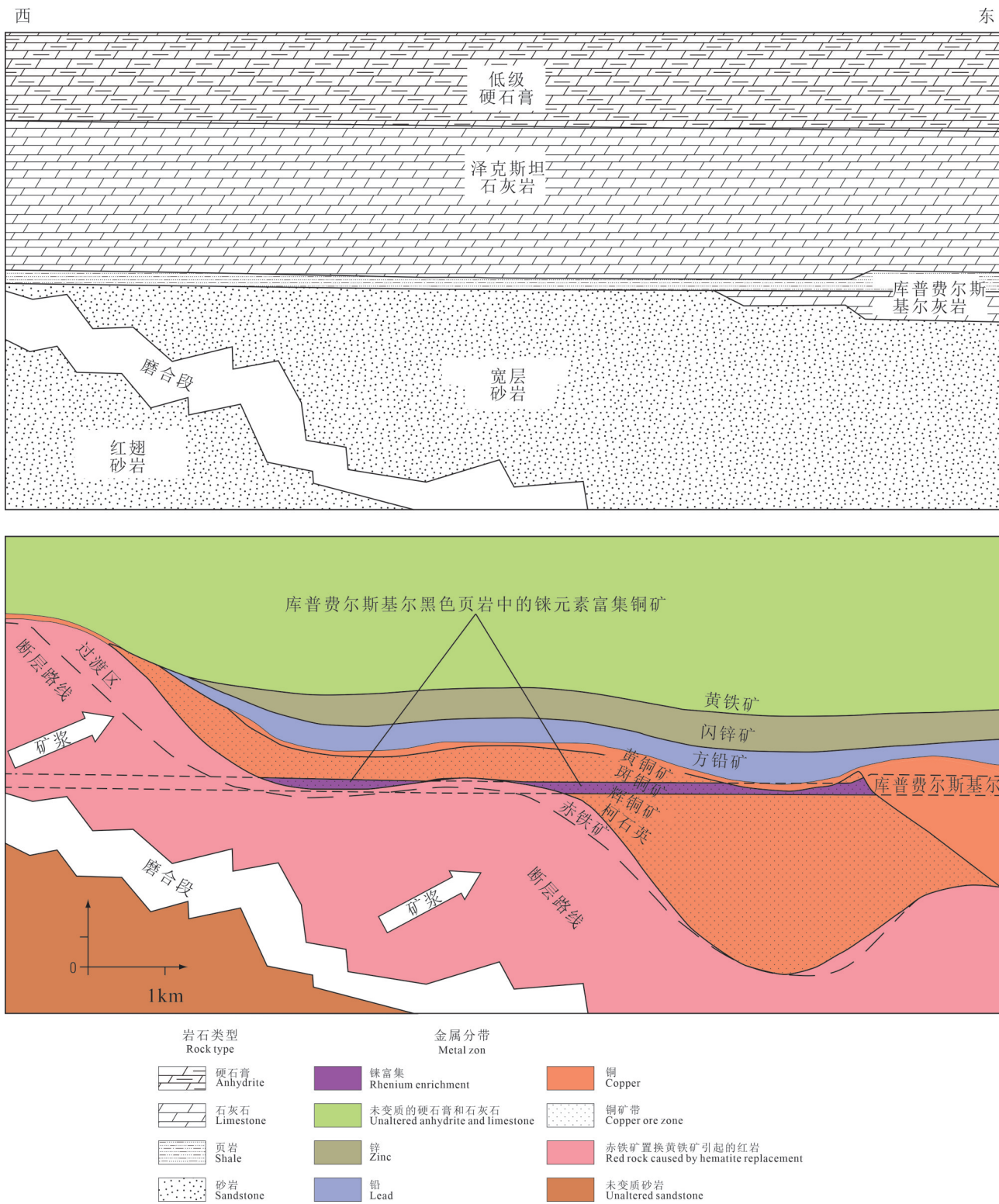


图5 还原相(Kupferschiefer)层控型铜矿床<sup>®</sup>(据Oszczepalski, 1999修改)  
Fig.5 Kupferschiefer (reduced-facies-type) strata-bound copper deposits<sup>®</sup> (modified from Oszczepalski, 1999)



成矿的早期阶段)取代了早期的区域性钠钙化蚀变,在第二阶段的角砾化之后,是白云岩的沉积和第二阶段的铜矿化,Merlin矿床中的钼-铼矿化取代了Mount Dore矿床中的铜矿化。Mount Dore花岗岩的锆石U-Pb定年和多尔山矿床辉钼矿的Re-Os定年结果表明,成矿时代均在1500 Ma,这表明Mount Dore的铜-钼矿化可能与后期的岩浆演化有关,产生钾质蚀变的岩浆作用与成矿关系密切(Duncan et al., 2011),Mo与Re的平均比值(600:1)也符合火成岩成因。

### 4 铼矿成矿特点

系统梳理全球大型含铼矿床特征发现,成矿时代方面,铼成矿作用发生的时间跨度较大,从古生代到新生代均有发育,总体上,铼成矿作用以燕山期最为发育,次为喜马拉雅期、印支期、加里东期。空间分布方面,全球铼资源分布集中在环太平洋成

矿带、古特提斯成矿带和中亚—蒙古成矿带。从各成矿类型特征分析,斑岩型铼矿成矿时代分布较广,但以印支期—燕山期最为主要,次为喜马拉雅期,矿体主要赋存在花岗闪长斑岩顶部及外接触带网状裂隙系统中。矽卡岩型以中酸性侵入体与碳酸盐岩地层接触带铜、钼矿伴生铼矿为特征,成矿时代以喜马拉雅期、印支期和燕山期为主,矿体处在碳酸盐岩与碎屑岩之间的缓倾角层间断层带中,矿体呈层状—似层状,钼矿体和部分铜矿体有明显的叠加。砂岩型成矿时代为印支期—燕山期和喜马拉雅期以及主要的成煤时期,岩性均为砂、泥岩及其互层。构造以褶皱为主,背斜宽缓、向斜相对紧闭,断裂构造不发育(黄凡等,2019a, b;乔耿彪等,2020)。

### 5 铼矿勘探远景

研究表明,铼资源很可能存在于全球大陆弧中

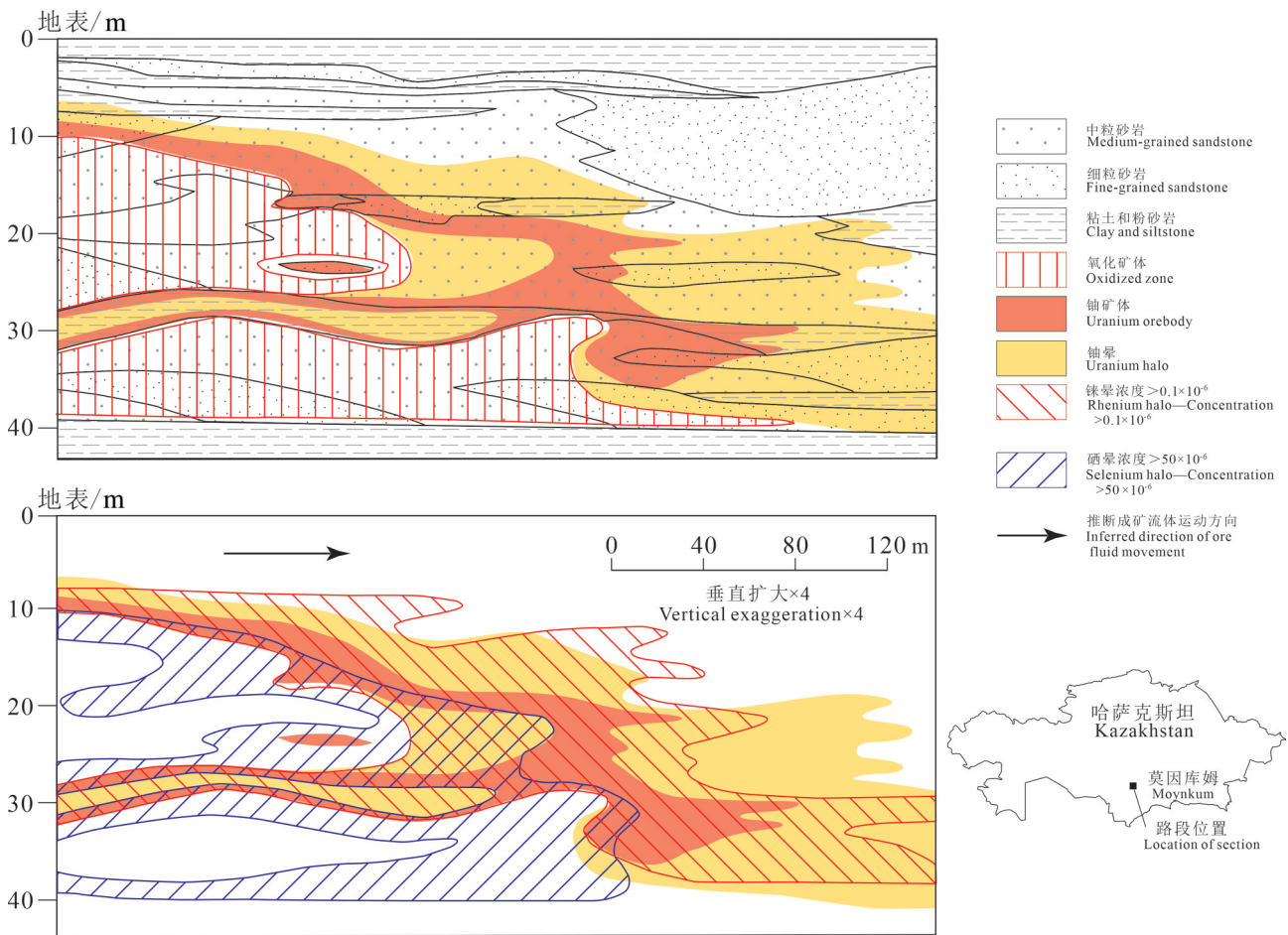


图6 哈萨克斯坦楚-萨里苏盆地的Moynkum-Tortkuduk地区中的前卷型砂岩铀矿(据Dahlkamp, 2009修改)  
 Fig.6 Roll-front-type sandstone uranium deposit in the Moynkum-Tortkuduk sector of the Chu-Sarysu basin, Kazakhstan (modified from Dahlkamp, 2009)

未发现的斑岩型铜矿床中,特提斯成矿带上斑岩铜矿床进行了评估,认为这些地区未发现的斑岩铜矿具有巨大潜力<sup>①②③④</sup>,因此在这些地区仍有大量铼资源有待发现。在美国,斑岩铜矿床中的铼资源集中于亚利桑那州,亚利桑那州有许多已查明的矿床,其中一些矿床富集铼矿的潜力较大,此外,最近对阿拉斯加的卵石斑岩型铜-钼-金矿床进行了调查,发现铼资源估算量相当于美国40年的开采量(Lang et al., 2013),表明阿拉斯加未发现的斑岩铜矿床中可能存在大量铼资源。蒙古最近发现了大量斑岩铜矿床中富含铼,如Omnogovi Aymag的巨型Oyu Tolgoi斑岩铜-金矿床以及Zuun Mod钼矿床<sup>⑤</sup>(Khashgerel et al., 2006),这些矿床的相继发现表明蒙古铼资源潜力巨大。波兰的Kupferschiefer地区发现了具有大量铼资源的还原相型铜矿床,与此同时,哈萨克斯坦砂岩层控型铜矿床中也有铼的发现(Box et al., 2013),由于这些地区的已知矿床富含铼,并且品位较高、规模较大,未来在此地区开展调查工作会取得重要进展。此外,其他大型的沉积层控型铜矿床也是潜在的找矿目标,如俄罗斯Transbaikalia地区的Udokan矿床和刚果的铜矿床矿床,均发现有铼矿化(Hitzman et al., 2005)。最近在澳大利亚发现的Merlin矿床,发现了独立的高品位钼-铼矿体,但该类型矿床的成因尚未明确,推测类似矿床找矿潜力还为时过早。

## 6 铼矿研究与开发建议

### 6.1 存在问题

#### 6.1.1 找矿勘查方面

除矽卡岩型钼-铼矿床外,所有已探明的铼资源都不是独立矿床,如在斑岩型铜矿床中,铼主要从钼矿中提取,在对Merlin矿床的成因有了更好的理解之前,进行独立铼矿床勘查的难度较大。因此,铼资源的勘查主要取决于斑岩铜矿床的勘探,特别是在阿拉斯加和蒙古等地区,最近发现了大型斑岩铜矿床,其中可能含有钼和铼,如Pebble和Oyu Tolgoi矿床,斑岩铜矿床的勘探应适当增加遥感,地球物理以及岩石地球化学方面的研究,也许更容易发现深部的大型矿体。

#### 6.1.2 碳循环方面

通过斑岩型铜钼矿床采矿、冶炼提取的铼不会

产生额外的碳排放,恰恰相反,就其用途而言,铼主要用于钼-铼催化剂的生产,进而产出高辛烷值的无铅汽油,对低碳排放意义重大,有利于全球碳中和计划的实施。

#### 6.1.3 老矿山利用方面

如何利用已关闭的斑岩型铜矿和沉积型铜矿进行铼矿的二次开采,主要取决于采矿方法和尾矿的特性,如露天矿、尾矿存储设施和废石堆的处理情况。坑道重新利用通常不实用,如果地下水位高于坑底,则该坑将被弃用,而尾矿储存设施的寿命取决于尾矿的性质和设施的建造方法,某些尾矿存储设施可以进行分级,加盖和重新利用,而有些矿山被设计为永久水体覆盖,其目的是为了控制硫化物的氧化,这些尾矿仍可进行二次回收利用。

### 6.2 未来方向

铼矿作为新兴资源,矿床成因与储量核算仍处于探索阶段,这严重影响了该类型矿床的调查与研究进度,许多富含铼矿的铜钼矿床地质和地球化学特征尚不明确,建议未来在以下四方面开展研究:①铼在斑岩型铜矿床与斑岩型钼矿床富集机制研究,以及富金斑岩铜矿床中的辉钼矿高富集铼的成因研究;②铼在沉积型铜矿床和铀矿床中成矿条件研究;③沉积层控型铜矿床中铼的来源;④矽卡岩型钼-铼矿床的成因;⑤老矿山利用与碳中和实施。

## 7 结 论

(1)从储量来看,铼资源分布不均衡,智利占全球铼储量的半数以上,其余主要国家依次为美国、俄罗斯、哈萨克斯坦和亚美尼亚。从产量来看,智利的占总产量的51%,其次为美国、亚美尼亚、哈萨克斯坦、墨西哥、秘鲁、俄罗斯和乌兹别克斯坦,而大陆弧环境下形成的斑岩型铜矿床是铼矿生产的主要来源。

(2)成矿类型方面,由于铼矿多数与其他矿种伴生,导致铼的矿床类型划分尚未形成统一标准,本文将铼矿床划分为:斑岩型铜矿中的铼、沉积层控铜矿中的铼、砂岩铀矿中的铼和矽卡岩矿床。其中,以斑岩矿床中的铼品位最高、储量最大。沉积层控型铜矿床与斑岩型铜矿床明显不同,斑岩型铜矿中的铼明显与辉钼矿伴生,且来源于深部岩浆作用,而沉积物层控型铜矿床中铼的来源问题仍有待深入研究。成矿特征方面,铼成矿作用发生的时间

跨度较大,从古生代到新生代均有发育,总体上,铼成矿作用以燕山期最为发育,次为喜马拉雅期、印支期、加里东期;全球铼资源分布集中在环太平洋成矿带、古特提斯带成矿以及中亚—蒙古成矿带。

(3) 勘探开发方面,铼资源很可能存在于全球大陆弧背景下未发现的斑岩型铜矿床中,美国西南部、南美安第斯山脉、墨西哥、加拿大不列颠哥伦比亚省和育空地区以及亚美尼亚、阿塞拜疆、格鲁吉亚、伊朗和土耳其在内的特提斯成矿带是铼矿的主要成矿潜力区。

(4) 未来应加强独立铼矿床的勘查以及铜铼伴生矿床的成因机制研究,重视老矿山的二次开发利用,充分发挥铼矿在节能减排、碳中和实施方面的积极作用。

## 注释

① Brown M, Lazo F, Carter P, Goss B, Kirwin D. 2010. The geology and discovery of the Merlin Mo-Re zone of the Mount Dore deposit, Mount Isa Inlier, NW Queensland, Australia[R]. SGA News, 27: 9-15.

② John D A, Seal R R, Polyak D E. 2017. Critical mineral resources of the United States—economic and environmental geology and prospects for future supply[R]. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1802: 1-49.

③ John D A, Ayuso R A, Barton M D, Blakely R J, Bodnar R J, Dilles J H, Gray F, Graybeal F T, Mars J C, McPhee D K, Seal R R, Taylor R D, Vikre P G. 2010. Porphyry copper deposit model, chap. B of mineral deposit models for resource assessment[R]. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-B, 169.

④ Sinclair W D, Jonasson I R, Kirkham R V, Soregaroli A E. 2009. Rhenium and other platinum-group metals in porphyry deposits[R]. Geological Survey of Canada Open File, 6181.

⑤ Giles D L, Schilling J H. 1972. Variation in the rhenium content of molybdenite, in Program—24th International Geological Congress, Montreal, Canada, 1972 Proceedings of sec.10[R]. Ottawa: International Geological Congress, 145-153.

⑥ Daukeev S Z, Ushkenov B S, Bespaev K A, Miroshnichenko L A, Mazurov A K, Saydukasov M A. 2004. Republic of Kazakhstan—Atlas of mineral deposit models[R]. Almaty: K.I. Satpaev Institute of Geological Sciences, Ministry of Education and Science, 141.

⑦ Jankowski G, Boltz G. 1995. Zur geschichte des Mansfelder Kupferschiefer-Bergbaus: The history of the Mansfield copper shale mining[R]. Clausthal-Zellerfeld: Gesellschaft Deutscher Metallhütten- und Bergleute, 370.

⑧ Kucha H. 2003. Geology, mineralogy, and geochemistry of the Kupferschiefer, Poland[R]. Europe's major base metal deposits, 215-238.

⑨ Bartlett S C, Burgess H, Damjanović B, Gowans R M, Lattanzi C R. 2013. Technical report on the copper-silver production operations of KGHM Polska Miedź S.A. in the Legnica-Głogów copper belt area of southwestern Poland[R]. 159.

⑩ Jowett E C. 1986. Kupferschiefer and other sediment-hosted deposits in central Europe[R]. Ottawa: Geological Association of Canada Mineralogical Association of Canada-Canadian Geophysical Union Joint Annual Meeting Field Trip Guidebook, 12: 42-52.

⑪ Seltmann R, Shatov V, Yakubchuk A. 2012. Mineral deposits database and thematic maps of central Asia, ArcGIS 9.2, ArView 3.2, and MapInfo 6.0 (7.0) GIS packages[R]. London, Centre for Russian and Central Eurasian Mineral Studies (CERCAMS), scale 1:5000000.

⑫ Lycopodium Minerals QLD Pty Ltd. 2012. NI 43-101 technical report, Merlin molybdenum rhenium project, feasibility study, northwest Queensland, Australia[R]. Spring Hill: Lycopodium Minerals QLD Pty Ltd, 302.

⑬ Ludington S D, Cox D P, McCammon R B. 1996. Database for a national mineral resource assessment of undiscovered deposits of gold, silver, copper, lead, and zinc—Conterminous United States[R]. U.S. Geological Survey Open-File Report 96-96, 2: 037.

⑭ Hammarstrom J M, Robinson J G R, Ludington S, Gray F, Drenth B J, Cendejas-Cruz F, Espinosa E, Pérez-Segura E, Valencia-Moreno M, Rodríguez-Castañeda J L, Vásquez-Mendoza R, Zürcher L. 2010. Global mineral resource assessment—Porphyry copper assessment of Mexico[R]. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5090-A, 176.

⑮ Mihalasky M J, Bookstrom A A, Frost T P, Ludington S. 2013. Porphyry copper assessment of British Columbia and Yukon Territory, Canada[R]. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5090-C, 128.

⑯ Cunningham C G, Zappettini E O, Vivallo S W, Celada C M, Celada C M, Quispe C, Jorge L, Singer D A, Briskey J A, Sutphin D M, Gajardo M M, Diaz A, Portigliati C, Berger V I, Carrasco O R, Schulz K J. 2008. Quantitative mineral resource assessment of copper, molybdenum, gold, and silver in undiscovered porphyry copper deposits in the Andes Mountains of South America[R]. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1253, 282.

⑰ Clark J, Baudry P. 2011. Zuun Mod porphyry molybdenum-copper project, south-western Mongolia[R]. Beijing: Minarco-Mine Consult, Project No.ADV-MN-00026, 64.

## References

Abisheva Z S, Zagorognyaya A N, Bukurov T N. 2001. Recovery of radiogenic <sup>187</sup>Os from sulfide copper ores in Kazakhstan[J]. Platinum Metals Review, 45(3): 132-135.

- Bai Zhihui, Zhang Jiangfeng. 2019. Brief analysis of the current situation of rhenium standard in China[J]. *China Metal Bulletin*, (7): 5–6 (in Chinese with English abstract).
- Box S E, Syusyura B, Selmann R, Creaser R A, Dolgoplova A, Zientek M L. 2013. Dzhezkazgan and associated sandstone copper deposits of the Chu–Sarysu basin, central Kazakhstan[J]. *Society of Economic Geologists*, 16: 303–328.
- Chen Xifeng, Chen Xiufa, Li Na, Ye Jinhua, Chen Yuming, Zhao Hongjun, Zhang Weibo. 2019. Distribution characteristics and development and utilization status of global rhenium resources and its enlightenments[J]. *China Mining Magazine*, 28(5): 7–12 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhenyan, Li Qingchun, Man Anjing, Chen Xingzhou, Cao Minqiang, Xiong Yaohua, Xiao Cheng. 2021. A uranium–rhenium deposit in superlarge sandstone was found in Kailu Depression[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(2): 425–426 (in Chinese with English abstract).
- Dahlkamp F J. 2009. *Uranium Deposits of the World—Asia*[M]. Berlin: Springer–Verlag, 181–189, 397–400.
- Dill H G. 2010. The “chessboard” classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium[J]. *Earth–Science Reviews*, 100(1/4): 1–420.
- Duncan R J, Stein H J, Evans K A, Hitzman M W, Nelson E P, Kirwin D J. 2011. A new geochronological framework for mineralization and alteration in the Selwyn–Mount Dore corridor, eastern fold belt, Mount Isa Inlier, Australia—Genetic implications for iron oxide copper–gold deposits[J]. *Economic Geology*, 106(2): 169–192.
- Emsley J. 2001. Rhenium, in *Nature's Building Blocks—An A–Z Guide to The Elements*[M]. New York: Oxford University Press, 358–360.
- Fleischer M. 1959. The geochemistry of rhenium, with special reference to its occurrence in molybdenite[J]. *Economic Geology*, 54(8): 1406–1413.
- Guo Juan, Cui Rongguo, Wang Hui, Lin Bolei, Sun Chunqiang, Yang Ling, Zhouzhou. 2020. Supply and demand situation and outlook of global rhenium resources[J]. *Land Resources Information*, 238(10): 67–74 (in Chinese with English abstract).
- Hammer J, Junge F, Rösler H J, Niese S, Gleisberg B, Stiehl G. 1990. Element and isotope geochemical investigations of the Kupferschiefer in the vicinity of “Rote Fäule”, indicating copper mineralization (Sangerhausen basin, G.D.R.) [J]. *Chemical Geology*, 85(3/4): 345–360.
- Hao Xuefeng, Peng Yu, Tang Yi, Pan Meng, Liang Bin, Yang Rong, Fan Junbo. 2021. First discovery of sedimentary sandstone–hosted rhenium deposit in the Fetianshan Formation(K<sub>1</sub>f) in the Puge area, Xichang[J]. *Geology in China*, 48(6): 197–197 (in Chinese with English abstract).
- Hitzman M, Kirkham R, Broughton D, Thorson J, Selley D. 2005. The sedimenthosted stratiform copper ore system[J]. *Economic Geology*, 100: 609–642.
- Hou Z Q, Zhang H R, Pan X F, Yang Z M. 2011. Porphyry Cu (–Mo–Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust—Examples from the eastern Tethyan metallogenic domain[J]. *Ore Geology Reviews*, 39(1/2): 21–45.
- Huang Chong, Chen Qishen, Li Ying, Liu Qunyi. 2014. Discussion of world and China rhenium resource demand in 2030[J]. *China Mining Magazine*, 23(9): 9–12 (in Chinese with English abstract).
- Huang Fan, Wang Denghong, Wang Yan, Jiang Biao, Li Chao, Zhao Hong. 2019a. Study on metallogenic regularity rhenium deposits in China and their prospecting direction[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1252–1269 (in Chinese with English abstract).
- Huang Fan, Wu Xishun, Wang Denghong, Sun Yan. 2019b. Ancient and modern “rhenium” – to uncover the supper metal “rhenium” mystery[J]. *Land and Resources Science and Culture*, 19(2): 10–15 (in Chinese with English abstract).
- John D A, Taylor R D. 2016. Byproducts of porphyry copper and molybdenum deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 18: 137–164.
- Khalezov A B. 2009. Problem of rhenium mineral resources expansion in Russian Federation[J]. *Razvedka I Okhrana Nedr*, 8: 13–17.
- Khashgerel B E, Rye O R, Hedenquist J W, Kavalieris I. 2006. Geology and reconnaissance stable isotope study of the Oyu Tolgoi porphyry Cu–Au system, South Gobi, Mongolia[J]. *Economic Geology*, 101(3): 503–522.
- Landtwing M R, Furrer C, Redmond P B, Pettke T, Guillong M, Heinrich C A. 2010. The Bingham Canyon porphyry Cu–Mo–Au deposit. III. Zoned copper–gold ore deposition by magmatic vapor expansion[J]. *Economic Geology*, 105(1): 91–118.
- Lang J R, Gregory M J, Rebagliati C M, Payne J G, Oliver J L, Roberts Keith. 2013. Geology and magmatic–hydrothermal evolution of the giant Pebble porphyry copper–gold–molybdenum deposit, southwest Alaska[J]. *Economic Geology*, 108(3): 437–462.
- Liao Renqiang, Liu He, Li Congying, Sun Weidong. 2020. Rhenium resource exploration prospects in China based on its geochemical properties[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(1): 55–67 (in Chinese with English abstract).
- Lüschen H, Schnetger B, Brumsack H J, Paul J. 2000. Trace element distribution in Palaeozoic black shales[J]. *Journal of Conference Abstracts*, 5(2): 656.
- Qiao Gengbiao, Ding Jiangang, Su Yonghai, Chen Junlu. 2020. The discovery of Li, Be, Nb, Ta rare metal ore spots in the Bieyesamas area in Altay, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 47(2): 542–543 (in Chinese with English abstract).
- Oszczepalski S. 1999. Origin of the Kupferschiefer polymetallic mineralization in Poland[J]. *Mineralium Deposita*, 34(5): 599–613.
- Richards J P. 2009. Postsubduction porphyry Cu–Au and epithermal Au deposits—Products of remelting of subduction modified

- lithosphere[J]. *Geology*, 37(3): 247–250.
- Rudnick R L, Gao S, Holland H D, Turekian K K. 2003. Composition of the Continental Crust[M]. Oxford: Elsevier–Pergamon, 1–64.
- Ruiz J, Mathur R. 1999. Metallogenesis in continental margins——Re–Os evidence from porphyry copper deposits in Chile[J]. *Reviews in Economic Geology Series*, 12(3): 59–72.
- Selby D, Kelley K D, Hitzman M W, Zieg J. 2009. Re–Os sulfide (bornite, chalcopyrite and pyrite) systematics of the carbonate-hosted copper deposits at Ruby Creek, southern Brooks Range, Alaska[J]. *Economic Geology*, 104(3): 437–444.
- Seo J H, Guillong M, Heinrich C A. 2012. Separation of molybdenum and copper in porphyry deposits——The roles of sulfur, redox, and pH in ore mineral deposition at Bingham Canyon[J]. *Economic Geology*, 107(2): 333–356.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Economic Geology*, 105(1): 3–41.
- Sun W D, Bennett V C, Eggins S M, Kamenetsky V S, Arculus R J. 2003. Enhanced mantle–to–crust rhenium transfer in undegassed arc magmas[J]. *Nature*, 422(3): 294–297.
- Taylor S R, McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241–265.
- U.S. Geological Survey. 2014. Mineral Resources Data System[M]. U. S. Geological Survey database.
- U.S. Geological Survey. 2020. Mineral Resources Data System[M]. U. S. Geological Survey database.
- Wang Haiyong, He Liang. 2018. Talking about the enrichment law and comprehensive utilization of rhenium[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 36(11): 70–72 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xian, Li Laiping, Zhang Wenzheng, Zhang Xin. 2008. Properties of rhenium and distribution of rhenium resources[J]. *Express Information of Mining Industry*, 475(11): 67–69 (in Chinese with English abstract).
- Vaughan D J, Sweeney M A, Friedrich G, Diedel R, Haranczyk C. 1989. The Kupferschiefer——An overview with an appraisal of the different types of mineralization[J]. *Economic Geology*, 84(5): 1003–1027.
- Yang Minzhi. 2000. Types of dispersed element deposits, metallogenic regularity and metallogenic prediction[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 19(4): 381–383 (in Chinese).
- Zhang Sen, Shi Lei, Ju Nan, Su Jianwei. 2018. The “oil–uranium co–exploration” idea in Songliao basin: a practice in the Southern Central Depression[J]. *Geology and Resource*, 27(3): 257–262 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanfei, An Zhengzhen, Liang Shuai, Zhai Furong, Zhang Sen, Ju Nan, Jiang Ping, Jin Xiuying, Xiao Rongge. 2022. Distribution characteristics, genetic types and prospecting progress of graphite deposits[J]. *Geology in China*, 49(1): 135–150 (in Chinese with English abstract).

## 中文参考文献

- 白智辉, 张江峰. 2019. 我国铼标准现状简析[J]. *中国金属通报*, (7): 5–6.
- 陈喜峰, 陈秀法, 李娜, 叶锦华, 陈玉明, 赵宏军, 张伟波. 2019. 全球铼矿资源分布特征与开发利用形势及启示[J]. *中国矿业*, 28(5): 7–12, 23.
- 陈振岩, 李清春, 满安静, 陈星州, 曹民强, 熊耀华, 肖程. 2021. 开鲁拗陷发现特大型砂岩铀铼共(伴)生矿床[J]. *大地构造与成矿学*, 45(2): 425–426.
- 郭娟, 崔荣国, 王卉, 林博磊, 孙春强, 杨玲, 周舟. 2020. 世界铼资源供需现状及展望[J]. *国土资源情报*, 238(10): 67–74, 66.
- 郝雪峰, 彭宇, 唐屹, 潘蒙, 梁斌, 杨荣, 范俊波. 2021. 西昌普格地区飞天山组(K<sub>2</sub>f)中首次发现沉积砂岩型铼矿[J]. *中国地质*, 48(6): 1975–1977.
- 黄翀, 陈其慎, 李颖, 柳群义. 2014. 2030年全球及中国铼资源需求刍议[J]. *中国矿业*, 23(9): 9–11, 29.
- 黄凡, 王登红, 王岩, 江彪, 李超, 赵鸿. 2019a. 中国铼矿成矿规律和找矿方向研究[J]. *地质学报*, 93(6): 1252–1269.
- 黄凡, 吴西顺, 王登红, 孙艳. 2019b. 古往今“铼”以小博大——揭开超级金属“铼”的神秘面纱[J]. *国土资源科普与文化*: 19(2): 10–15.
- 廖仁强, 刘鹤, 李聪颖, 孙卫东. 2020. 从铼的地球化学性质看我国铼找矿前景[J]. *岩石学报*, 36(1): 55–67.
- 乔耿彪, 丁建刚, 苏永海, 陈隽璐. 2020. 新疆阿尔泰山别也萨麻斯一带发现新的锂、铍、铋、钽等稀有金属矿点[J]. *中国地质*, 47(2): 542–543.
- 王海勇, 何亮. 2018. 浅谈铼的富集规律和综合利用[J]. *中国资源综合利用*, 36(11): 70–72.
- 吴贤, 李来平, 张文钰, 张新. 2008. 铼的性质及铼资源分布[J]. *矿业快报*, 475(11): 67–69.
- 杨敏之. 2000. 分散元素矿床类型、成矿规律及成矿预测[J]. *矿物岩石地球化学通报*, (4): 381–383.
- 张艳飞, 安政臻, 梁帅, 翟富荣, 张森, 鞠楠, 姜平, 金秀英, 肖荣阁. 2022. 石墨矿床分布特征、成因类型及勘查进展[J]. *中国地质*, 49(1): 135–150.
- 张森, 石蕾, 鞠楠, 苏建伟. 2018. “油铀兼探”的找矿思路在松辽盆地的应用——以中央拗陷区南部为例[J]. *地质与资源*, 27(3): 257–262.