

文章编号: 1004-4051(2025)02-0476-17

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20241681

铂族金属全球产业链: 循环视域下的敏感因素及中国应对策略

黄胜忠^{1,2}, 张 灿¹, 王春林³, 孟明亮⁴, 张双腾⁵

- (1. 中国矿业大学(北京)管理学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)决策科学与大数据研究院, 北京 100083; 3. 四川省第七地质大队, 四川 乐山 614200;
4. 云南省地矿工程勘察集团有限公司, 云南 昆明 650041;
5. 云南省有色地质局地质地球物理化学勘查院, 云南 昆明 650216)

摘要: 铂族金属是我国极其匮乏的战略性关键矿产, 全球集中度高, 如何保障我国铂族金属矿产资源安全是一项重要的现实议题。基于从地下资源到地上资源的循环视域, 从地质赋存、工业应用、金融属性三个角度梳理了铂族金属全球产业链之间的复杂关联, 识别其中的主要敏感因素, 并探讨了资源政策、技术进步和投资市场对铂族金属全球产业链网络的影响。研究表明: 铂族金属的地下资源集中且有限, 地上资源寡头特征明显; 铂族金属的工业价值体现在从地上资源到城市矿产的扩散过程中, 产业网络庞大且复杂, 但城市矿产的集中也有利于含铂废料的回收循环; 在金融投资领域, 铂族金属在从地上资源到交易机构过程中, 价格波动在跌宕中具有一定确定性, 其价格驱动因素来自于持久的供需紧平衡; 铂族金属地下资源的勘探开发, 未来将聚焦于新地质构造或新成矿理论, 而地上资源的循环回收经济除了着眼于工程技术问题, 还应关注资源循环回收的绿色流程和城市矿产的废料管理。铂族金属因其独特的物化属性和广泛的应用场景, 未来从地下资源的勘探开发到地上资源的循环回收是支撑其产业繁荣的关键, 为此提出保障我国铂族金属资源安全的启示与对策, 强调除了完善城市矿产管理和资源循环利用, 还应从关注地下资源转向重视地上资源的循环利用, 以及摆脱并打破铂族金属全球产业链中寡头控制的“茧房效应”。

关键词: 铂族金属; 产业链; 循环经济; 战略性关键矿产; 资源安全

中图分类号: TD-9 **文献标识码:** A

The global industrial chain of platinum group metals: sensitive factors and China's coping strategy from a circular economy perspective

HUANG Shengzhong^{1,2}, ZHANG Can¹, WANG Chunlin³,
MENG Mingliang⁴, ZHANG Shuangteng⁵

- (1. School of Management, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Decision-making Science and Big Data, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. The 7th Geological Brigade of Sichuan, Leshan 614200, China;

收稿日期: 2024-08-26 责任编辑: 刘硕

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目资助(编号: 20YJA790030)

第一作者简介: 黄胜忠(1979—), 男, 汉族, 湖北十堰人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事决策理论与风险管理等方面的研究, E-mail: huangshengzhong@hotmail.com。

通讯作者简介: 张灿(1986—), 男, 汉族, 湖北武汉人, 博士研究生, 工程师, 主要从事战略性矿产资源安全(铂族金属)等方面的研究, E-mail: mr.zhangcan@ucass.edu.cn。

孟明亮(1991—), 男, 汉族, 云南楚雄人, 工程师, 主要从事有色金属矿产勘探等方面的研究, E-mail: 1272892534@qq.com。

引用格式: 黄胜忠, 张灿, 王春林, 等. 铂族金属全球产业链: 循环视域下的敏感因素及中国应对策略[J]. 中国矿业, 2025, 34(2): 476-492.

HUANG Shengzhong, ZHANG Can, WANG Chunlin, et al. The global industrial chain of platinum group metals: sensitive factors and China's coping strategy from a circular economy perspective[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2): 476-492.

4. *Yunnan Geology and Mineral Exploration Engineering General Company (Group), Kunming 650041, China;*

5. *Geological Geophysical and Chemical Exploration Institute of Yunnan Nonferrous Geology Bureau, Kunming 650216, China)*

Abstract: Platinum group metals (PGMs) are strategic critical minerals characterized by their scarcity in China and significant global concentration. Ensuring the security of PGMs resources in China presents a critical and complex challenge. This paper adopts a cyclical perspective, encompassing both underground and above-ground resources, to examine the intricate global industrial chain of PGMs. Through an analysis of geological endowment, industrial applications, and financial attributes, the research identifies key sensitive factors and explores the influence of resource policies, technological advancements, and investment markets on the global PGMs industrial network. The findings indicate that the underground resources of PGMs are highly concentrated and limited, with above-ground resources dominated by a few entities, highlighting a clear oligopolistic control. The industrial value of PGMs extends through the transition from underground resources to urban minerals, creating a vast and complex industrial network. However, the concentration of urban minerals also facilitates the recycling of platinum-containing waste. In the financial sector, PGMs prices exhibit notable volatility during their transition from above-ground resources to trading platforms, driven primarily by the persistent tight balance between supply and demand. Future exploration and development of underground resources of PGMs will likely focus on new geological formations and metallogenic theories, while the economic efficiency of recycling above-ground resources will require not only engineering solutions, but also on the green process of resource recycling and the management of urban mineral wastes. Overall, the unique physical and chemical properties of PGMs, coupled with their diverse application scenarios, underscore the importance of both resource exploration and recycling for sustaining industrial growth. The study stressing that in addition to improving the management of urban minerals and the recycling of resources, it should also need to shift focus from solely underground resources to also prioritizing the recycling of above-ground resources, thereby addressing and overcoming the oligopolistic control exerted over the PGMs global industrial chain, often referred to as the “cocoon effect”.

Keywords: platinum group metal; industrial chain; circular economy; strategic key mineral; resource security

0 引言

铂族金属(Platinum Group Metals, PGMs)包括铂(Platinum, Pt)、钯(Palladium, Pd)、铑(Rhodium, Rh)、铱(Osmium, Os)、铼(Iridium, Ir)和钌(Ruthenium, Ru)六种元素,与黄金和白银同属贵金属,是兼具工业和金融双重属性的战略性关键矿产。铂族金属在地壳中的元素丰度低,年产量整体不高,但从汽车尾气处理催化剂到高精度电子元件,再到生物医药、航空航天等高科技领域,铂族金属都发挥着不可替代的作用^[1-3]。

近年来,全球铂族金属的消费量总体上呈缓慢增长趋势,亚洲、欧洲及北美地区是目前世界上铂族金属消费的三大区域,其中,中国、日本、欧洲及北美地区的铂族金属消费量约占七成,但欧美及日本等发达国家和地区的铂族金属消费量呈下降趋势,而中国、印度等发展中国家已成为拉动铂族金属消费的主力,中国自 2009 年起成为全球最大的铂族金属消费国,目前占全球铂族金属消费量的近三成^[1,4]。

然而,根据《中国矿产资源报告》,我国铂族金属矿产储量在 2022 年为 87.69 t, 2023 年为 80.91 t, 呈不断下降趋势。根据自然资源部、中国地质调查局等统计数据,我国铂族金属资源总量稀少,探明的铂族金属主要分布在甘肃、云南和四川等地,已多年无新增铂族金属矿产资源储量^[1,5]。其中,甘肃金川铜镍铂矿和云南金宝山铂钯矿的铂族金属占比最大,但资源品位低且多为共伴生矿床。目前,甘肃金川铜镍铂矿的副产物铂族金属年产量不超过 3.5 t, 而云南金宝山矿的铂族金属年产量不超过 2 t, 产量极其有限^[3,6]。也即,在资源供应方面,我国铂族金属因地质储量匮乏,本土年供应不到 10 t,但在资源需求方面,我国对铂族金属的年需求量从 2014 年的 140 t 增长至 2019 年的 165 t,再到 2023 年接近 200 t,我国铂族金属的资源需求量是本土资源供应量的 20 倍以上,供需严重失衡,对外依存度达到 98% 以上^[1,6]。为此,面对本土资源禀赋匮乏的国情,如何保障我国铂族金属矿产资源安全是一个令人深思的现实问题。

产业链复杂网络的典型结构主要包括原材料、生产加工、市场销售、终端用户和回收利用等环节,信息和合约在各个环节之间双向流动,彼此之间因物料流产生紧密且复杂的价值网络关联^[7-9],如图 1 所示。与此类似,铂族金属的全球产业链也是一个

复杂且高度关联的网络,从初始的资源勘探、开采,到中间的冶炼、加工,再到终端的应用、回收等,每一个环节都与其他环节紧密相连,在这个网络中,任何一个环节的变动都可能对整个产业链产生深远的影响^[1,10]。

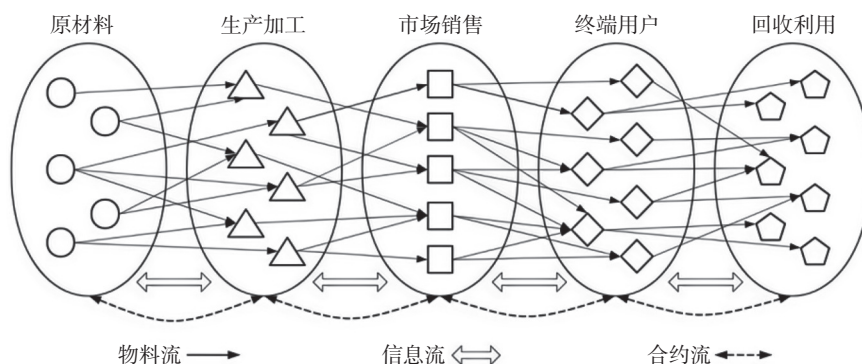


图 1 产业链复杂网络的典型结构

Fig. 1 Typical structure of complex network of industrial chains

根据铂族金属的元素生命周期特性,可将其产业链网络分为主要过程和次要过程,其左侧是采矿和精炼等初级生产,右侧则是从地上资源转变为城市矿产的循环过程^[11-13],如图 2 所示。本文基于循环视域探讨铂族金属全球产业链之间的复杂网络关联,先梳理铂族金属的地下资源,以及转向地上资源实现城市矿产资源循环的必要性,之后从铂族金属的工业和金融两方面出发讨论其背后的价值、价格等关键问题,再从未来趋势中探讨影响铂族金属全球产业链的主要敏感因素,以及我国铂族金属资源安全的应对策略。

1 从地下资源到地上资源

1.1 地下资源:资源量集中且有限

铂族金属在过去很长时间里曾被认为是一种来自外太空的神秘恒星物质,到 18 世纪后期,因其独

特的物理化学性质,如高熔点、惰性、优良的催化性能等,铂族金属才逐渐被熟识。铂族金属元素主要集中在地核和地幔中,在大陆地壳中的自然丰度很低,从铱的 0.02 ng/g(ppb)到铂、钯的 0.5 ng/g(ppb),除了部分以天然金属单质出现,其主要以微量或痕量元素形式存在于岩石中,且多与超基性岩浆活动关系密切,大部分与硫、VA 族(又称为元素周期表 15 组,如氮、磷、砷等元素)和 VIA 族(又称为元素周期表 16 组,如氧、硫、硒等元素)的配体结合,形成常见的硫化型或氧化型铂族金属矿物聚集^[1,11-12]。

图 3 展示了全球分布于克拉通区域的主要铂族金属矿床的情况。由图 3 可知,铂族金属地下资源主要集中在古老的太古宙-元古宙克拉通区域,以及大规模岩浆活动形成的侵入体地区,这些侵入体与超镁铁-镁铁质复合体相关,因此,赋存于大型岩浆矿

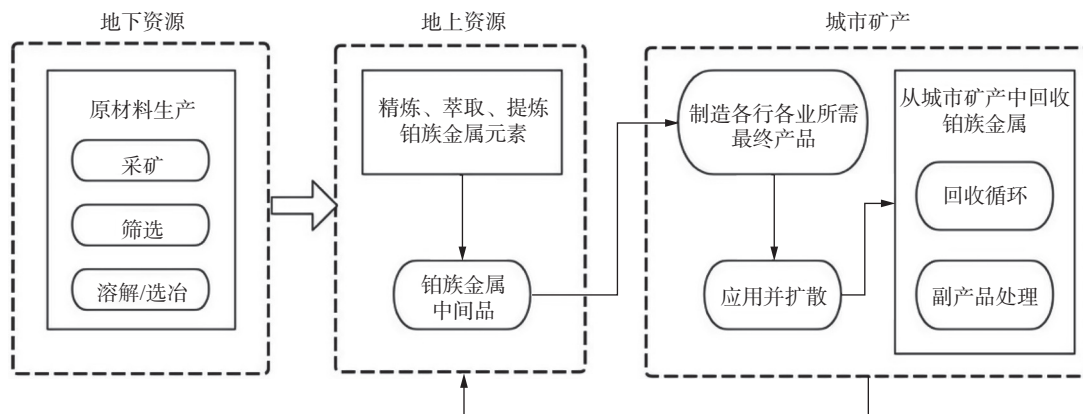


图 2 铂族金属的元素生命周期循环

Fig. 2 Elemental life cycle of platinum group metals

床中的铂族金属主要富集在超镁铁质科马提岩中镍硫化物中。例如, 俄罗斯诺里尔斯克矿区的多个含铜镍的侵入体中就伴生铂族金属矿床, 目前已有大量文献对该类型的铂族金属成矿过程、岩浆演化进行了深入研究^[1,14-15]。近年来, 对蛇绿岩体中类似的镁铁质铬铁矿矿物学特征的研究已证实, 这些地区的铂族金属元素浓度在硫化物熔体中至少比其他地方高一万倍, 这意味着该类型的地质构造可能成为未来的铂族金属重要找矿靶区之一^[16-17]。

铂族金属的地质赋存情况决定了其资源分布格局, 全球铂族金属资源主要集中在南非、津巴布韦、俄罗斯、美国和加拿大等地, 其中, 南非的铂族金属资源最为丰富, 约占全球总储量的 70% 以上^[1,3,14,18]。当前, 铂族金属的矿床主要在南非的布什维尔杂岩体、津巴布韦的大岩墙矿床、俄罗斯的诺里尔斯克矿床等地, 见表 1。

1.2 地上资源: 矿业寡头特征明显

铂族金属资源集中且有限, 资源国的寡头特征尤其明显, 在南非等全球最丰富的铂族金属地下资源国, 也相应诞生了具有影响力的铂族金属地上资源全球寡头。根据中国地质调查局统计, 全球前十位的铂族金属生产企业中, 南非有 7 家, 分别是斯班尼黄金(Sibanye Gold Ltd.)、英美铂业(Anglo American

Platinum Ltd.)、英帕拉铂业(Impala Platinum)、隆明公司(Lonmin Plc)、诺瑟姆铂金(Northam Platinum Ltd.)、皇家巴福肯铂业(Royal Bafokeng Platinum Ltd.)、非洲彩虹矿业(African Rainbow Minerals Ltd.)、俄罗斯有 1 家, 为诺里尔斯克镍业(Norilsk Nickel), 津巴布韦有 1 家, 为新达控股(Zimplats Holdings Ltd.)、巴西有 1 家, 为淡水河谷(Vale S.A.)^[19-21]。因国际大型矿业公司相互之间常有兼并购和交叉持股, 全球重要的铂族金属矿产资源企业(包括矿山采掘、精矿提炼和产品贸易等类型)见表 2。

根据美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)、国际矿业协会(International Mining Alliance, IMA)、世界铂金投资协会(World Platinum Investment Council, WPIC)等数据, 南非是铂族金属的主要生产国, 其铂、钯和铑的产量居全球第一位; 俄罗斯在钯和铂的全球市场中占有重要地位; 加拿大在钯的全球市场中也扮演着重要角色。钌和铱则更为稀少, 两者通常以钌铱矿伴生于砂铂矿中, 铱在铂族金属中的比例通常为 2%~4%, 南非以外铂族金属矿床中铱的品位通常在 1%, 而钌更是微量或痕量^[13,22], 使得全球钌和铱的出产低且无法准确统计, 推测年产量在 10 t 左右, 年贸易量则更少^[12,14-16]。全球铂族金属的贸易流动概况见表 3。



图 3 全球分布于克拉通区域主要铂族金属矿床情况

Fig. 3 Major platinum group metal deposits globally distributed in the Craton Region

表 1 主要铂族元素矿床类型

Table 1 Main types of platinum group element deposits

矿床类型	特征描述、典型品位及主要矿床
梅林斯基型 ^A	①特征: 广泛分布、侧向连续的超镁铁质岩矿层或薄礁, 含有少量分散的镍铜硫化物, 这些矿床常在大型层状镁铁质-超镁铁质复合体中通过岩浆作用形成 ②品位: 梅林斯基矿层礁中, 铂、钯为 5~7 g/t; 铂/钯比约为 3, 是全球铂钯铑的主要来源 ③主要矿床: 南非, 布什维尔德杂岩体 (Bushveld Complex), 梅林斯基矿层礁 (Merensky Reef); 津巴布韦, 大岩墙 (Great Dyke); 美国, 斯蒂尔沃特杂岩体 (Stillwater Complex), J-M 矿层礁 (J-M Reef); 澳大利亚, 穆尼穆尼杂岩体 (Munni Munni Complex)
铬铁矿型 ^A	①特征: 类似于梅林斯基型, 但由大量铬铁矿、稀疏普通金属硫化物矿层组成 ②品位: UG2 矿层中, 铂、钯为 4~8 g/t, 铑为 0.3~0.6 g/t, 铂/钯比约为 2.5, 是全球铂、钯、铑的主要来源 ③主要矿床: 南非, UG2 矿层; 美国, 斯蒂尔沃特杂岩体
接触型 ^A	①特征: 存在于层状侵入体的不均匀基底接触带中, 铂族金属元素矿化区域分布广泛 (可达公里级别), 但不连续, 伴低品位镍-铜 ②品位: 南非的帕拉特里夫矿层中, 铂、钯为 1~4 g/t, 铂/钯比约为 1, 副产物包括镍铜, 是全球主要的铂族金属资源类型 ③主要矿床: 南非, 布什维尔德杂岩体, 帕拉特里夫 (Platreef); 美国, 德卢斯杂岩体 (Duluth Complex); 加拿大, 伊勒湖 (Lac des Iles)、东布尔湖 (East Bull Lake); 波兰, 波尔蒂莫 (Portimo)
杜纳石管状矿体 ^A	①特征: 不整合的管状杜纳石矿体, 直径可达 1 km, 是极高品位的铂族金属矿化体 ②品位: 3~2 000 g/t, 但大部分矿体已开采完毕, 资源近枯竭 ③主要矿床: 南非, 布什维尔德杂岩体中的昂瓦赫特 (Onverwacht)、德里科普 (Driekop) 和穆伊霍克 (Mooihoek)
与陨石撞击相关 ^B	①特征: 存在于撞击熔融岩、围岩断裂角砾岩区域中的镍铜硫化物矿床 ②品位: 铂、钯为 1~10 g/t, 大部分矿床主要开采镍铜, 含少量铂族金属副产物 ③主要矿床: 加拿大, 萨德伯里 (Sudbury)
与裂谷型和大陆洪积玄武岩有关 ^B	①特征: 存在于亚火成岩中, 与大陆洪积玄武岩及剪切带有关的镍铜硫化物矿床 ②品位: 俄罗斯的诺里尔斯克矿床中, 铂族金属元素可达 2~100 g/t, 平均铑含量为 7.31 g/t, 铂含量为 1.84 g/t ③主要矿床: 中国, 金川铜镍矿床; 俄罗斯, 诺里尔斯克矿床 (Norilsk Deposits)
与科马提岩相关 ^B	①特征: 存在于富镁科马提岩 (火山岩和侵入岩) 中的镍铜硫化物矿床 ②品位: 一般含量为几百 ppb, 局部地区高于 1 g/t, 铂/钯比通常小于 1 ③主要矿床: 澳大利亚, 坎巴尔达 (Kambalda); 俄罗斯, 佩切加区 (Pechenga district); 加拿大, 汤普森矿化带 (Thompson Belt)、安加瓦矿化带 (Ungava Belt)

注: ①铂族金属元素矿床 (角标 A); ②镍铜主导型, 副产品为铂族金属元素 (角标 B); ③本表首次出现的译名均在括号内标注外文原名, 下同。

2 工业价值: 从地上资源到城市矿产

2.1 地上资源的扩散: 产业网络庞大且复杂

当前, 铂族金属因其广泛的工业价值而被大量应用, 使得铂族金属从地下资源转为地上资源后扩散至人类社会各个领域, 在从地下资源提炼萃取铂族金属元素过程中, 其常见的中间产品见表 4。

铂族金属更具体的细分应用领域, 让铂族金属地上资源扩散后也呈一定的行业聚集特性。例如, 在汽车领域, 全球环保意识和汽车尾气排放标准不断提高, 大量铂族金属用作尾气处理催化剂, 而新能源汽车快速发展, 大容量动力电池等领域对铂族金属的用量也进一步增加; 在元器件领域, 新型电子产品更新换代, 铂族金属用于制造高精度元器件的用量不断攀升; 在航空航天领域, 人类不断深入太空, 铂族金属因其高温稳定性和抗腐蚀性能而被广泛应用于涂层、发动机、涡轮叶片等关键部件^[2,3,5,23]。铂族金属的主要应用行业或领域, 见表 5。

此外, 铂族金属在新兴科技产业中的应用也进

一步拓展了其地上资源的扩散范围。例如, 由铂族金属制备的纳米材料具有一种金属、半导体和导体聚合物形成的一维纳米结构, 在诸多应用场景中展示了其独特的电、光、磁和机械特性^[18]; 在芯片等电气领域, 铂族金属元素是制造新型显示器, 以及增加多层陶瓷电容器、混合集成电路的存储容量的重要原材料, 还可用于制造液晶显示器^[19]。此外, 铂族金属还广泛应用于食品保鲜、密闭空间空气净化等现代生活场景。与此同时, 自 Barnett Rosenberg 发现顺铂对细胞增殖的抑制作用, 铂便开始以重要的抗癌药物进入临床医学应用中, 顺铂、卡铂、奥沙利铂等含铂配合物目前在抗癌治癌、病毒检测生物芯片、活性物质示踪、金属配合物发光探针、义齿义肢修复材料等方面都有重要应用^[20-21]。随着铂族金属与人类社会的关系越来越密切, 已有学者开始关注低浓度铂族金属元素暴露对动物和人类健康影响的研究^[24]。

自 20 世纪 70 年代以来, 全球铂族金属地下资源

表 2 全球主要铂族金属矿产资源企业

Table 2 Global major platinum group metals mineral resource enterprises

企业名称	总部	在产矿山、业务和简介等
英美铂业 (Anglo American Platinum)	南非	①在产矿山: 莫加拉奎纳矿 (Mogalakwena)、阿曼德尔布尔特矿 (Amandelbult)、莫托托洛矿 (Mototolo) ②业务和产品: 冶炼和精炼, 主要是铂、钯 ③英美铂业为英美资源集团 (Anglo American) 的下属公司, 在南非运营多个矿场, 是全球最大的铂族金属初级生产商, 约占全球年供应量的 40%
英帕拉铂业 (Impala Platinum)	南非	①在产矿山: 英帕拉矿 (Impala)、津普莱特矿 (Zimplats)、米莫萨矿 (Mimosa) ②业务和产品: 采掘、冶炼和精炼, 主要涉及铂、钯 ③在南非运营多个矿场加工自有矿石, 并拥有多个精炼厂, 是全球铂族金属市场的另一个重要参与者
斯班-静水公司 (Sibanye-Stillwater)	南非	①在产矿山: 马里卡纳矿 (Marikana)、鲁斯腾堡矿 (Rustenburg)、斯蒂尔沃特矿 (Stillwater) ②业务和产品: 采掘、冶炼和精炼, 主要涉及铂、钯 ③全球顶尖的铂金、钯金及其他铂族元素生产商
诺里尔斯克镍业 (Norilsk Nickel)	俄罗斯	①在产矿山: 诺里尔斯克矿床、塔尔纳赫矿 (Talnakh) ②业务和产品: 采掘、冶炼和精炼, 主要涉及钯、镍 ③全球最大的镍和钯生产商之一, 还出产铂、铜、钴和金等副产品
北美钯金 (North American Palladium)	加拿大	①在产矿山: 伊勒湖钯矿 ②业务和产品: 采掘、冶炼, 主要是钯 ③现已被英帕拉铂业收购
金川集团 (Jinchuan)	中国	①在产矿山: 金川铜镍矿 ②拥有世界第三大硫化镍铜矿床, 是中国最大、世界领先的镍钴生产基地和铂族金属提炼中心
庄信万丰 (Johnson Matthey)	英国	①成立于 1817 年, 主要发展催化剂、贵金属和专用化学品核心技术 ②全球著名的铂族金属精炼技术提供商, 专注铂族金属回收等可持续发展
贺利氏 (Heraeus)	德国	①成立于 1851 年, 主要业务包括贵金属的精炼、贸易和回收等 ②在全球范围内提供铂族金属等贵金属生产以及技术服务
优美科 (UMICORE)	比利时	①成立于 1805 年, 主要业务包括材料技术和贵金属回收等 ②以贵金属为中心, 专注催化剂、能源与表面技术、回收三大业务板块
田中贵金属 (TANAKA)	日本	①成立于 1885 年, 主要业务: 制造、贸易、回收和技术服务等 ②开展产业用贵金属制品的制造和销售, 以及提供作为宝石饰品及资产的贵金属商品
贵研铂业 (Sino-Platinum)	中国	①建于 1938 年, 隶属于昆明贵金属研究所, 与美国贵金属研究所、柏林贵金属研究所并称为世界三大知名贵金属研究所 ②中国贵金属龙头企业, 于 2003 年在上海证券交易所上市, 主要从事贵金属工业材料研究、开发和生产经营

表 3 全球铂族金属供需概况

Table 3 Overview of supply and demand for global platinum group metals

类别	铂	钯	铑	钌	铱	钉
主要供应国	南非 俄罗斯 津巴布韦	俄罗斯 南非 加拿大	南非 俄罗斯	南非 俄罗斯	南非 俄罗斯	南非 俄罗斯
主要需求国或地区	中国、北美、欧洲、日本等					
数量/(t/a)	160~170	210~220	数量极少	3~4	约 30	30~35

的开采产量逐渐增加, 而铂族金属地下资源已多年未有大型增量, 因此, 评估铂族金属从地下资源转换为地上资源之后的扩散、积累、循环的潜在影响也越发受到重视。广阔的工业应用场景支撑着持续增长的市场需求, 有限的地下资源也代表着铂族金属的全球产业链需要从地上资源中开发新的替代品, 降低对地下资源的依赖程度, 满足不断升级的市场需求。

2.2 城市矿产的集中: 含铂废料的回收循环

城市矿产也称都市矿山、城市矿藏等, 从 20 世纪 60 年代由美国城市规划学家 Jacobs 提出将城市作为未来矿山的构想, 到日本学者南条道夫在 1988 年首次对这一概念进行确切定义, 此后的城市矿山在日本备受关注^[25-26]。2010 年 5 月, 我国首次将城市矿产界定为“工业化和城镇化过程中产生和蕴藏在废

表 4 铂族金属的中间产品

Table 4 Intermediate products of platinum group metals

类型	形态、用途等	部分 HS 编码
浓缩物	对原矿进行破碎、磨矿和浮选等工序后得到的产品,铂族金属元素浓度较高	711011 铂(未锻造或粉末状)
精矿	通过高温熔炼,将硫等杂质从铂族金属元素浓缩物中分离出来的一种中间产品	711019 铂(半成品形式)
精粉	高纯度的铂族金属粉末,已可用于催化剂、电子工业等领域	711021 钯(未锻造或半成品)
冶炼渣	冶炼后的副产品,含有少量铂族金属元素,可进一步回收处理	711029 钯(半成品形式)
化合物	与其他元素形成的化合物,如铂碳、铂铵、钯盐等,用于催化剂和化工原料	711031 铑(未锻造或半成品)
催化剂	含铂族金属元素的催化剂,如汽车尾气催化剂是铂族金属用量最大的领域之一	711039 铑(半成品形式)
条、锭	将精炼后的铂族金属浇铸成条状或锭状,用于进一步工业加工或作为投资产品	711041 铱、铱和钌(未锻造或粉末状)
		711049 铱、铱和钌(半成品形式)

注:①HS 编码(Harmonized System Code, 协调制度编码)是由世界海关组织(WCO)制定的国际标准商品分类系统,用于对商品进行分类和识别。②表内只列示部分主要的铂族金属商品编码(HS 前六位),含铂族金属元素的其他商品编码暂未列示。

表 5 铂族金属的主要应用领域

Table 5 Main application areas of platinum group metals

领域	占比、主要元素等
A-汽车催化转化器	约占 51%, 主要涉及铂、钯及铑
B-珠宝首饰	约占 16%, 主要涉及铂、钯
C-金融投资	约占 9%, 主要涉及铂、钯
D-电子产品	约占 9%, 主要涉及铂、钯、铑及铱
E-化学工业	约占 5%, 主要涉及铂、铑、铱及钌
F-其他行业	主要包括玻璃生产、牙科、油气炼化、生物医药等

旧机电设备、电线电缆、通信工具、汽车、家电、电子产品、金属和塑料包装物、肥料中,可循环利用的钢铁、有色金属、稀贵金属、塑料、橡胶等资源”。由此可见,城市矿产是对废弃资源再生利用的形象比喻,其利用量相当于原生矿产资源^[12,27]。

矿产资源一般意义上的供给主要来自四个渠道,即国内一次资源开采、国外一次资源进口、国内二次资源循环、国外二次资源进口。自《禁止洋垃圾入境推进固体废物进口管理制度改革实施方案》于 2017 年开始推行,我国进口的国外二次资源已大幅减少,而随着我国对资源安全的重视,以及国内废物废料激增,作为二次资源的城市矿产越来越受到关注^[28-29]。城市矿产与固体废物、可再生资源等概念略有不同,是人类社会工业化和城市化的产物,是一种相对于地下原生矿产,具有经济价值、环境价值和战略价值的资源。自工业革命以来,全球越来越多的矿产资源从地下采掘至地上,作为循环经济的重要组成部分,城市矿产与原生矿产相比具有显著的战略效益、环境效益和经济效益,不仅具有绿色、高效和高品位等优点,还一定程度上对原生矿产起到资源替代、应急储备、风险管理等作用^[23,30-31]。2021 年 7 月,我国在《“十四五”循环经济发展规划》中提出全面推行循环型生产方式,建立资源循环型产业体系,而开发利用城市矿产可减轻资源禀赋和环境

污染的两方面约束,是实现循环经济的重要载体^[32]。

2023 年,《世界经济论坛报告》指出,全球废弃物产量等城市矿产预计将从 2016 年的 20.1 亿 t 增加到 2050 年的 34.0 亿 t。以城市矿产中价值最高的电子废弃物为例,电子设备中的各种元素存在于复杂零部件中,如电子废弃物被填埋或未无害处理,不仅损害环境,还浪费了其宝贵的多种矿产元素。从电子废弃物中回收的主要元素包括贵金属(金、银)、铂族金属、普通金属(铜、铝、镍、锡、锌和铁等)、重点金属(汞、铍、钢、铅、镉、砷和锑等)、稀有金属(碲、镓、硒、钽和锗等)。电子废弃物中部分贵金属平均品位^[25-26,33-34]见表 6。

铂族金属物化特性稳定,其元素随着各类应用、终端产品逐渐扩散进入现代社会复杂的产业网络中,并最终聚集在人类社会的城市矿产中,因此,相比于铂族金属地下原生资源的低品位,电子废弃物中铂、钯等元素浓度显著高于一般的地下原生矿石,这意味着开发高效的回收方法或工艺从城市矿产中回收铂族金属不仅具有经济可行性,而且可能更加清洁环保^[29,32]。当前,铂族金属回收技术不断发展,一些新的提取、冶炼工艺被开发出来,但从城市矿产中回收铂族金属元素,目前真正进入大规模工业应用阶段的还是只有湿法工艺和火法工艺^[25,35-37]。以铂族金属回收应用最成熟的湿法冶金工艺为例,该工艺在卤素/卤化物盐离子、双氧水等强氧环境中,先通过酸性溶液或碱性溶液诱导铂族金属元素浸出,之后采用金属沉淀、金属配合物还原、电化学反应等方法以粉末形式分离出金属单质。因铂族金属六种元素的化学性质有一定差异,目前工业回收主要是为获取铂和钯,从城市矿产中回收铂族金属的主流工艺,见表 7。

在从城市矿产中回收铂族金属等贵金属的新技术和新工艺方面,由美国 IBC 公司(IBC Advanced Technologies)开发的等离子体电弧熔炼技术正在进行工业规模试验,该方法基于 1987 年获诺贝尔化学

表 6 电子废弃物中金、银、铂、钯的平均品位
Table 6 Average grades of gold, silver, platinum and palladium in E-waste

设备种类	单位: g/t			
	金	银	铂	钯
音视频设备	31	674	—	—
收音机	68	520	—	8
DVD 播放器	100	700	—	21
	83	413	—	12
	81	905	—	—
个人计算机	250	1 000	—	110
	230	1 000	—	90
	156	775	—	99
	300	600	—	—
电脑键盘鼠标	600	700	40	100
	428	875	—	95
	70	700	—	30
	9	150	—	3
阴极射线管显示器	20	280	—	10
	17	280	—	10
	110	1 600	—	41
液晶显示器	60	250	—	19
	490	1 300	—	99
打印机	47	350	—	9
	54	40	—	21
电话	50	2 244	—	241
移动电话	368	3 573	—	287
	1 067	2 171	—	137
小型 IT 和通讯设备	1 300	5 700	—	470

资料来源: 文献 [26] 和文献 [33], 笔者整理; 注: “—” 表示暂无数据。

奖的分子识别技术 (Molecular Recognition Technology, MRT), 可直接从含氯溶剂中选择性分离和回收单种铂族金属元素^[27]。与此同时, SuperLig 的高选择性金属分离技术使得固相萃取成为可能, 该技术所需化学试剂更少, 回收率更高, 对生态环境友好, 目前, 已应用于比利时优美科、日本田中、南非英帕拉铂业及中国贵研铂业等铂族金属提取冶炼企业^[18,25,36]。

表 7 城市矿产中回收铂族金属的主流工艺

Table 7 Mainstream processes for the recovery of platinum group metals from urban minerals

工艺	简介及代表性企业
湿法回收	①通过化学试剂将含铂族金属元素的废料溶解, 将铂族金属元素转化为离子络合物, 然后经离子交换、萃取、沉淀等步骤进行分离提纯
	②常见的湿法工艺有含氰化物、盐酸-氧化剂工艺等, 湿法回收工艺具有操作简单, 但废水排放量大 (一般 1 t 废催化剂产生 20~30 t 废水), 产生有毒气体, 占地面积大, 铑浸出率低、物耗高
火法回收	①将含铂族金属的废料与助熔剂、捕集剂熔炼, 载体造渣, 铂族金属元素与捕集剂形成合金, 从而使元素富集
	②常见的火法工艺有铅捕集、铜捕集、铊捕集、铁捕集等, 国际知名的铂族金属贵金属回收企业对核心技术和装备高度保密, 不公布任何细节
	③目前国际大型企业多数采用火法熔炼捕集铂族金属元素, 代表性企业主要有中国贵研铂业、德国贺利氏、比利时优美科、英国庄信万丰、美国怡球资源 (Multimetco) 等企业, 日本则有三菱 (Mitsubishi)、田中贵金属、日矿金属 (Nippon) 等多家知名企业

一些国家以立法形式推动从城市矿产中回收铂族等贵金属, 例如, 日本通过《家电回收法》等立法措施积极推动从城市矿产中回收金银、铂族等贵金属, 将再生铂族金属的使用占比提高至 30%; 与此同时, 优美科、田中贵金属、庄信万丰等在铂族金属领域拥有完善回收业务布局和先进回收技术的国际企业, 除了主动在部分国家和地区布局铂族等贵金属回收业务, 还积极配合当地的城市矿产管理措施, 2010 年以来, 部分发达国家和地区的废汽车催化剂中铂族金属回收量占比一直保持在 50% 以上, 但发展中国家的相应占比不足 10%^[35]。值得注意的是, 我国铂族金属循环回收利用起步较晚, 相关的技术和企业整体实力薄弱。1971 年, 抚顺石化三厂成功开展了从废催化剂中回收铂族金属元素, 随后合资组建了抚顺石化三厂催化剂联营贵金属厂, 每年回收铂族金属约 450 kg。2000 年, 我国开放贵金属市场, 目前参与从城市矿产中回收加工铂族金属的企业近 200 家。此外, 我国企业大多采用氰化物和等离子体高温铁捕集 (湿法)、铅捕集 (火法) 等工艺, 成本高、回收率低、环境负担重, 整体上我国从城市矿产中回收铂族金属的相关技术和企业实力薄弱^[35,38]。

综上所述, 地上资源再循环正发挥着越来越重要的作用, 从城市矿产中回收铂族金属是经济高效的。然而, 大量含铂族金属元素的城市矿产在地上资源的扩散中流失, 从全球的铂族金属回收率来看, 中国以及其他国家和地区的铂族金属回收率均处于较低水平。鉴于现在部分专利技术的铂族金属回收率可达 99% 以上, 全球的铂族金属回收率普遍不高的主要原因可能不在于技术方面, 而在于含铂族金属元素的城市矿产管理方面^[25-26,29,35]。

3 金融投资: 从地上资源到交易机构

3.1 价格波动特征: 跌宕中具有确定性

很长一段时间内, 铂族金属被投资者视为商品交易市场的“安全天堂”资产, 其在金融市场的热捧程度甚至一度超过黄金, 但价格波动剧烈^[4,39-41]。例如,

铂价在2001年互联网泡沫破灭前夕达到自20世纪90年代以来的最高水平,为645美元/oz,然而就在同年10月,铂价暴跌至400美元/oz,但随后在次年又开始回升;2007年12月,铂价创下1544美元/oz的高点,并在2008年3月达到2276美元/oz的峰值,但在2008年金融危机时急剧下降到900美元/oz。2015年,大众“柴油门”事件导致公众对柴油等燃油车前景谨慎看好,随着电动车崛起,内燃机汽车会逐渐消亡的论调使得市场看空铂金,铂价开始失去动力,2020年铂价已跌至600美元/oz以下,目前正从超跌状况中缓慢复苏,如图4所示。

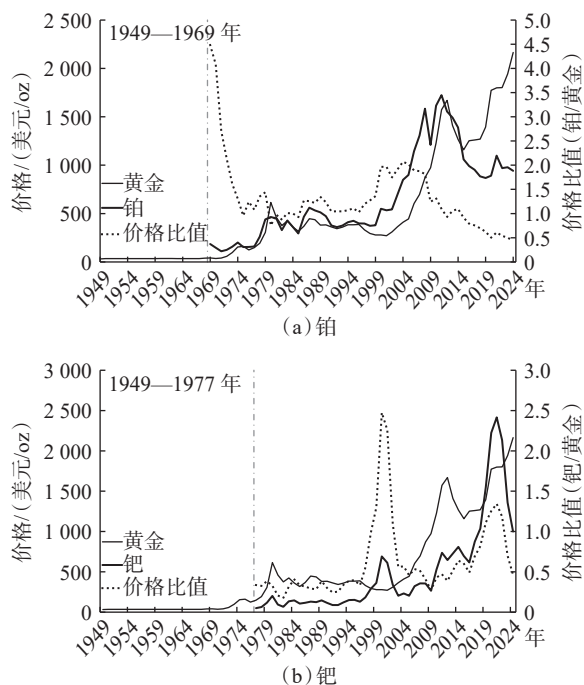


图4 1949—2024年铂、钯价格及与黄金价格比值

Fig. 4 Prices of platinum and palladium and their ratio to gold prices from 1949 to 2024

钯价与铂价有相似但呈现很大的差异,钯价自有记录的1979年开始有很长一段时间处于无趋势的横盘状态,在20世纪90年代后半期逐渐走高,在2000年曾达到创纪录的高点但随之开始下探,然后又开始增长。2008年金融危机导致钯价一路震荡攀升至588美元/oz,达到自2001年以来的最高点并又开始回落,这也印证了钯价比铂价更不稳定,在接下来的几年内,钯价经历了翻倍、回落和重新上涨的反复跌宕。自2018年后,钯价逐渐超过铂价,其在2019年10月的价格曾达到2500美元/oz,而此时铂价在800~950美元/oz之间徘徊。新冠疫情之后,全球市场和各行各业都经历了剧烈震荡,对钯和铂的价格也产生了重大影响,在2020年4月分别震荡至2000美元/oz和700美元/oz的高位,之后价格迅速

回落。

与此同时,钷、铱、钌、铑这四种铂族金属的价格更不稳定,主因是这四种金属不仅全球产量更低,其市场也远比铂、钯更小,且基本集中在几个狭窄的领域和范围,实际的浮动市场几乎不存在,因此,钷、铱等铂族金属的市场缺乏流动性,目前主要由少数全球做市商主导价格^[42-43]。图5展示了1994—2024年

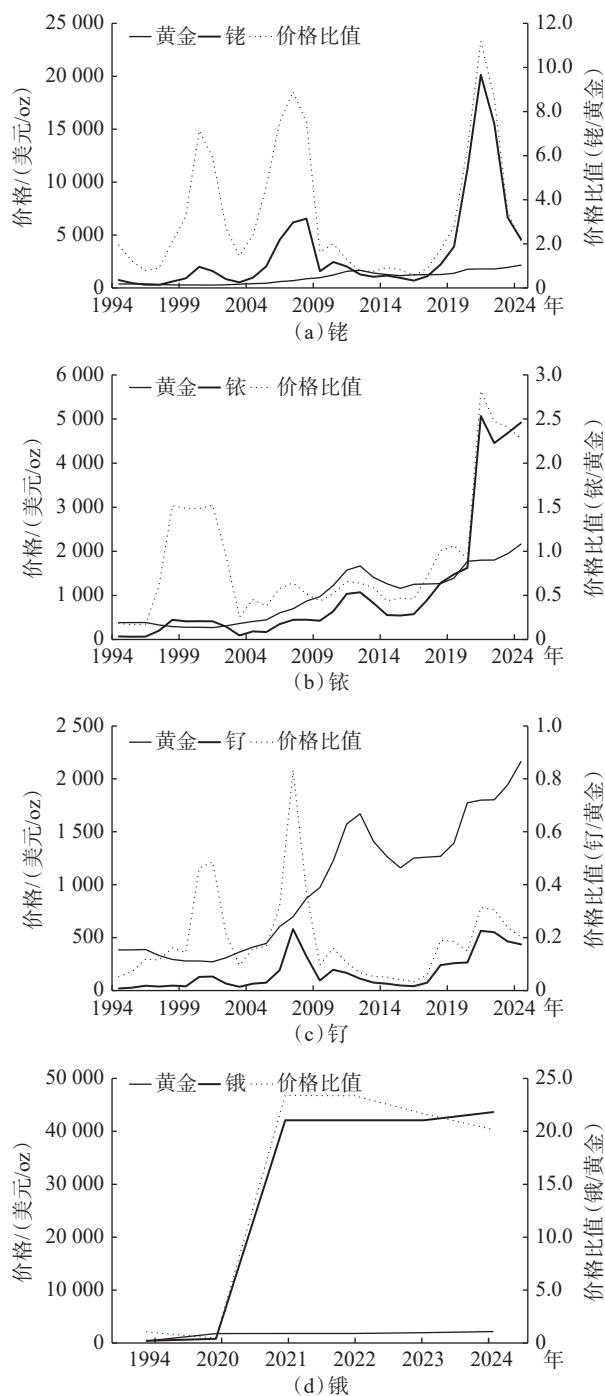


图5 1994—2024年钷、铱、钌、铑价格及与黄金价格比值

Fig. 5 Prices of rhodium, iridium, ruthenium and osmium and their ratio to gold prices from 1994 to 2024

铑、铱、钌、钇的历史价格及与黄金价格比值。由图5可知,将钇、铱、钌、铑与黄金的价格曲线进行比较,可推测铑价的一些主要峰值价格更多是由于供需失衡,如在2008年和最近的2020年左右出现价格峰值但随之回落,价格波动剧烈。钌价的变化通常与铑价有一定同步性,这些价格的波动可能除了主要是因供需引起,但更重要的原因可能是上述金属市场特殊,使得其价格波动容易被剧烈放大,从而让做市商的投机行为成为可能。

铂族金属的价格行为一直以来备受关注,其价格行为主要受到两方面的影响。一方面,铂族金属在各个领域的应用需求持续增长。其中,除了汽车、化工等传统行业对铂族金属的需求尤为明显,其他应用领域对铂族金属的需求也不断上升,市场需求在一定程度上推动了其价格的波动。另一方面,铂族金属的价格波动也受到社会政治和矿山资源本身的影响,例如,英美资源集团在2012年因财务紧张,南非矿工加薪未果罢工导致社会动荡,进而使得铂族金属价格飙升,而南非部分矿山因资源逐渐枯竭,开采成本越来越高,地下资源开采量下降使得地上资源供应减少,这些因素都引发了铂族金属价格的震荡^[44-45]。综合来看,铂族金属价格的波动剧烈且复杂,这意味着预测铂族金属价格的走势需要综合考虑多方面的因素,并对市场动态和资源状况保持密切关注。

3.2 价格驱动因素:持久的供需紧平衡

在需求方面,由于电动汽车和氢能源汽车的发展,以及催化转化器的需求增长,长期看来,铂族金属尽管价格波动明显,但其需求趋势仍指向上升^[1,46]。在供应方面,南非和俄罗斯作为全球铂族金属的两大主导国,其政策的任何重大变化或调整,都将决定全球铂族金属的结构性变化和价格波动^[2,15,47]。南非的政局和劳工纠纷虽然是影响其铂族金属地下资源产出的重大因素,但矿业作为南非的支柱产业,即使价格波动无常,但其仍有持续动力生产和供应铂族金属^[48]。俄罗斯拥有资源储量丰富的铂族金属矿床,是全球铂族金属市场的另一个重要角色,相关研究认为,俄罗斯预计有着约6.9万t的铂族金属总储量,可持续供应到2102年甚至更久,其铂、钯成品库存也十分巨大,虽然俄罗斯政府从苏联时期至今尚未改变其关于铂族金属的任何政策,但俄罗斯对其铂族金属的生产、库存等并没有透明资料披露,这为暗箱操纵价格留下了可能性,在俄乌战争导致其受国际制裁的大背景下,不排除俄罗斯矿业寡头在未来干预全球铂族金属市场的可能性^[45,49]。

除了需求和供给之外,采矿、加工和回收等可持续发展问题也是铂族金属价格的另一大驱动因素^[26,28,49]。全球正在致力低碳绿色可持续发展目标对铂族金属的供需产生重大影响,并可能成为铂族金属一个长期的涨跌关键因素,这不仅是因铂族金属在清洁能源领域的广泛应用,重要的是铂族金属的开采、生产和回收本身就产生了大量的温室气体排放。另外,从城市矿产回收铂族金属方面来看,虽然矿产资源的回收率增长缓慢,但占比仍然逐年增长^[26,29,50]。2019年,从城市矿产中回收的铂约占总需求的27%,回收的钯约占总需求的30%,回收的铑约占总需求的32%,这不仅减缓了地下资源枯竭带来的负面影响,也极大提高了资源利用效率,只是铂族金属价格波动也会影响城市矿产的回收进程^[24,40]。历史上,美国和欧洲的政策变化已经表明了这一点,美国汽车制造商在20世纪90年代提高了钯用量,使得钯价下行,钯价不断攀升。但欧洲的情况却正好相反,当时欧洲汽车制造商因更严格的环保标准,加之柴油车产量有所增加,使得铂的需求增加并拉升了钯价。总的说来,排放法规和汽车催化剂生产等因素将继续作为铂族金属价格的主要驱动力之一。

关于铂族金属的价格驱动因素,不仅要关注其工业应用价值,还要考虑金融投资属性。铂族金属的期货市场和现货市场主要受到纽约商品交易所(NYMEX)、伦敦金属交易所(LME)、东京商品交易所(TOCOM)的影响,叠加其他机构参与的衍生品交易则展现出不同的价格动态,这些差异可能源于合约到期日、交易成本、开盘时间、买卖价差等因素,有学者利用时间序列模型(EGARCH、VEC model)、爆炸多泡模型(Explosive Multiple Bubble Technology model)等揭示了贵金属现货和期货价格中的显著波动特性,这表明价格模型需要综合考虑包括安全天堂金属效应(Safe Heaven Metals Effect)和经济放缓期间的需求变化等多重因素^[40,51]。此外,铂族金属的价格也会因汇率波动而大幅波动,例如,当澳元价值较低而铂族金属以美元计较高时,投机者利用汇率差套利的行为可能会引起铂族金属价格剧烈波动。总的说来,外汇汇率与宏观经济的产业周期和总体趋势有很大偏差,美元价值的起伏也对铂族金属的价格也形成了重要影响,在市场分析中不可或缺^[39]。

理论上,一种商品在某个时间点上应该有一个共同价格,这意味着如果遵循这一规则,铂族金属市场也应该从区域规模到全球规模有着一定的协整性。虽然信息化和数字化让如今的价格可靠性变得更加具有可行性,铂族金属市场相对于其他特定商品而

言也更容易实现标准化,但由于贸易壁垒和交易成本存在,实际上的地区和全球在未来很难实现整合^[52-53]。另外,2020年的全球疫情对所有金融和商品资产造成了严重冲击,但这种影响被证实是短暂的,金银铂钯等贵金属价格并未受到显著抑制。面对不确定的未来和一些即将显现的经济政策(如美国对俄罗斯的制裁、与中国之间的贸易冲突等),尤其是在经济衰退预期和投资者寻求“现金为王”以弥补损失的背景下,铂族金属价格可能更主要受工业前景负面效应的影响^[2,15,46]。

综上所述,关于铂族金属的价格驱动因素,虽然需要综合考虑自然灾害、生产事故、电力短缺、安全问题、能源政策和成本、社会动荡等传统矿产资源领域的多种因素,但更关键的是其工业应用和金融投资的双重属性,铂族金属的有限资源叠加全球需求逐步增长,需求和供给(包括城市矿产回收)之间相互影响导致全球铂族金属大部分时候都处于紧平衡或弱短缺状态,这才是铂族金属最主要的价格驱动因素。

4 未来趋势

4.1 地下资源的勘探开发趋势

南非、俄罗斯和加拿大等国虽然拥有约九成的全球已查明的铂族金属地下资源储量,但多年的开采也使部分矿山趋于枯竭,因此,寻找更多的铂族金属地下资源显得尤为重要。有研究表明,在大洋底部的硫化物矿床中开采铂族金属是具有广阔前景,但因国际立法、成本费用等现实约束,至少在很长时间内,人类向海洋进军寻找铂族金属更多是探索性的科研工作^[54]。另外,有天文学家猜想太空中有许多星球是由纯黄金、纯白银甚至是纯铂、钯、铑等“地球人定义的贵金属”组成,这使得探索宇宙空间的地外资源极其鼓舞人心,然而现实中这只是存在于科幻片里的未来场景^[55]。

考虑人类现有工程技术水平,在新地质构造或新成矿理论中寻找铂族金属,可能是在中长期内扩充铂族金属地下资源和原生矿产的最可行性方案。此外,在铂族金属地下资源开采过程中,提高铜镍初级精矿中铂族金属的元素回收率,研究更先进的硫化物铂族元素冶炼萃取技术等,都是当前铂族金属地下资源领域高效利用的重大趋势^[1,12,56]。在新构造或新成矿理论中探索铂族金属的未来找矿靶区情况见表8。

矿业项目通常投资大、周期长、风险高,矿产资源型项目易受矿产价格、外汇汇率、资本支出等影响,经济周期对采矿业的影响也显而易见。全球铂

族金属的地下资源和地上资源的存量规模都不高,当铂族金属的价格高起时,针对铂族金属地下资源的勘探开发便会蓬勃发展。随着新型探勘技术和设备不断涌现,借助大数据、人工智能等对现代信息技术手段实现对铂族金属地下资源开发全过程的深入优化,通过推行绿色开采技术,减少环境影响,实现铂族金属地下资源的高效利用^[57-58]。

4.2 地上资源的循环回收经济

地质矿产采掘业的成功不仅依赖于技术进步,还需要资源所在地的广泛支持,这是矿业公司环境、社会和治理(Environmental Social and Governance, ESG),以及企业社会责任(Corporate Social Responsibility, CSR)的核心组成部分,也是其长期可持续性的基石。铂族金属地下资源的采掘所需的资金和矿山运营成本巨大,而其中的开采加工等具有环境负效应,因此,相比于地下资源,推动地上资源的城市矿产回收具有更低的生产成本和更友好的环境效应^[6,19,25,49,59]。国内外部分公司的资源循环技术应用概况见表9。

如果将铂族金属地下资源的开采加工更多归于工程技术问题,从铂族金属地上资源中循环回收利用则是城市矿产的废料管理问题,在铂族金属地下资源未有大的勘探增储之前,从城市矿产中回收铂族金属地上资源为行业提供了新的思维路径,而更先进的技术是推动新思维、新路径的关键^[2,15,19,23,47]。例如,已有研究关注纳米尺寸的碳材料或金属氧化物吸附溶液中的铂族金属元素,实现元素的有效分离和浓缩富集;也有研究尝试生物冶金技术来萃取元素,自然界有些特定细菌或微生物能吸附电子废弃物中的铂族金属元素,该技术不仅减少对化学溶剂依赖,而且其操作条件温和且环境影响小;另外,也有研究表明物联网(IoT)通过在城市矿产循环回收中部署智能传感器,可更高效地调控整个工艺过程,优化资源和能源。值得注意的是,2017年以来,近一半的铂和钯被应用于汽车催化转化器,这意味着除了上文讨论的城市矿产中的电子废弃物,未来陆续进入报废阶段的汽车及其尾气处理装置也是铂族金属地上资源的重要城市矿产来源。

在铂族金属地上资源循环回收的绿色化学和工艺领域,因铂族金属的六种元素具有相似的原子结构和化学性质,其特殊的电子层结构赋予了铂族金属高电负性和极化特性,易形成多价络合物,在铂族金属的分离提纯方面已逐步发展出传统有机溶剂萃取和离子液体萃取等两种绿色铂族金属循环回收利用技术^[35,36,60]。其中,传统有机溶剂萃取工艺简单、流

表 8 其他类型铂族金属矿床的未来找矿靶区

Table 8 Future search targets for other types of platinum group metal deposits

矿床类型	特征描述、典型品位及主要矿床实例
阿拉斯加或阿拉斯加-乌拉尔型	①特征: 在小型超镁铁质复合体中富集铂族金属元素, 少数地区可开采到原生矿化体 ②品位: 一般品位较低, 但局部极高富集 ③未来重要的找矿靶区: 俄罗斯, 乌拉尔·尼日尼塔吉尔(Nizhny Tagil, Urals); 加拿大, 图拉梅恩复合体(Tulameen Complex)
砂砾型	①特征: 在河流沉积砂砾层中富集的铂族金属元素 ②品位: 通常品位较低, 但偶有零星富矿区 ③未来重要的找矿靶区: 俄罗斯, 乌拉尔; 哥伦比亚, 乔科河(Choco River); 阿拉斯加, 古德纽斯湾(Goodnews Bay); 新西兰, 南岛(Southland)
蛇绿岩	①特征: 铂族金属元素富集于蛇绿岩体下部的豆荚状铬铁矿床中, 后期的热液作用有利于元素富集 ②品位: 品位不均, 局部富集 ③未来重要的找矿靶区: 英国, 恩斯特(Unst); 菲律宾, 赞巴莱斯(Zambales); 俄罗斯, 肯皮尔赛(Kempirsai); 沙特阿拉伯, 阿莱(AIAs)
红土	①特征: 由超镁铁质岩石的强烈热带风化作用形成的铂族金属元素残留富集 ②品位: 整体品位较低, 铂约为 0.5 g/t ③未来重要的找矿靶区: 埃塞俄比亚, 尤博多(Yubdo)
脉状矿床	①特征: 镁铁-超镁铁质岩中含镍、铜和铂族金属元素的多金属矿脉热液活动, 铂族金属元素沿剪切带再沉积 ②品位: 铂、钯品位约数十 g/t, 富集区可达数百 g/t ③未来重要的找矿靶区: 美国, 新腾布勒(New Rambler); 南非, 沃特伯格(Waterberg); 加拿大, 拉斯本湖(Rathbun Lake)
不整合关联矿床	①特征: 由热液作用形成的铂族元素, 富集在变质沉积岩与氧化沉积岩的不整合处附近, 常伴有金、铀元素在断层处富集 ②品位: 铂、钯品位较低, 局部金可达 4.31 g/t ③未来重要的找矿靶区: 澳大利亚, 加冕山(Coronation Hill); 巴西, 塞拉佩拉达(Serra Pelada)
斑岩矿床	①特征: 与火成侵入体相关的铂族金属元素在斑岩铜矿床中局部富集 ②品位: 铂族金属元素通常小于 1 g/t ③未来重要的找矿靶区: 保加利亚, 埃拉齐特矿(Elatsite); 希腊, 斯库里耶斯矿(Skouries); 俄罗斯, 阿克苏格矿(Aksug); 菲律宾, 圣托马斯二号矿(Santo Tomas II)
页岩及其他沉积岩	①特征: 铂族金属元素富集于黑色页岩层中, 通常较薄但可能广泛分布 ②品位: 一般含量小于 1 g/t, 但局部地区含量非常高 ③未来重要的找矿靶区: 波兰, 库普费尔页岩(Kupferschiefer); 加拿大, 育空(Yukon); 西伯利亚, 苏霍伊洛格(Sukhoi Log)
碳酸盐及碱性复合体	①特征: 铂族金属元素富集于小型碳酸岩-磷钛铁矿火成杂岩复合体中, 以及辉长岩中的富钯铜硫化物矿化体 ②品位: 品位普遍较低 ③未来重要的找矿靶区: 南非, 帕拉博拉(Palabora); 巴西, 卡塔劳和伊帕内马(Catalãoand Ipanema); 俄罗斯, 科夫多尔(Kovdor); 加拿大, 科德韦尔杂岩体(Coldwell Complex)、马拉松(Marathon)

表 9 国内外部分公司的资源循环技术应用概况

Table 9 Overview of resource recycling technology applications in some domestic and foreign companies

公司	资源循环技术应用领域的概况
比利时优美科	①旗下电子垃圾处理厂是全球最大的废弃物金属及贵金属提取公司 ②开发了 Vals'Eas 等工艺, 已成为世界上电子废弃物火法处理的代表性企业, 年处理 25 万 t 以上含二次金属料的地上资源, 实现了金银、铂族金属等数十种有色金属的绿色高效回收
日本同和	①一家以冶炼、环境及循环再利用、电子材料、金属加工为主的典型循环企业 ②开发了 Dowa 等工艺, 针对不同地上资源分别采用湿法浸出和火法熔炼, 主金属回收率达 90% 以上, 年处理电子废弃物等城市矿产达 5 万 t 以上
瑞士 Xstrata	①自 2002 年开始致力于电子废弃物等矿产地上资源的循环应用研究 ②开发了 Xstrata-Noranda 等工艺, 主金属回收率达 88% 以上, 年处理量达 10 万 t
瑞典 Boliden	①自 1980 年起就开始商业化处理电子废弃物等城市矿产地上资源 ②开发了 Boliden-Kaldo 等工艺, 主金属回收率达 92% 以上, 年处理量达 1.2 万 t 以上, 已累计处理电子废弃物 30 多万 t
格林美股份	①国内从事废旧电池及电子废弃物等地上资源循环回收的龙头型企业 ②开发了 Green Eco-Manufacture 等工艺, 年处理废弃物资源总量 400 多万 t 以上, 回收铜、镍、金、银、铂族金属等二十多种金属
中国节能环保集团	①拥有 500 多家下属企业, 旗下汕头公司是国内火法处理废旧电路板典型企业 ②开发了熔池熔炼处理废旧电路板等新工艺, 主金属回收率达 95% 以上, 尾气中二噁英含量也低于国家标准
其他	整体而言, 国外复杂二次资源综合回收技术较国内更为先进和完善, 我国公司仍存在一定差距

资料来源: 文献[25], 笔者整理。

程短,回收率较高,但萃取过程存在溶剂回收成本高、物耗高、后续浸出废水量大等问题;而新型绿色溶剂的离子液体因其结构和物化性质可针对性调整,虽然造价高昂且多处于试验阶段,目前已成为铂族金属离子萃取分离的绿色化学研究热点。未来可进一步对萃取剂改进、工艺流程优化等实现铂族金属地上资源循环回收利用的绿色高效。总的说来,当前从电子废弃物、报废汽车等地上资源中回收铂族金属元素不仅关注更高的回收率,而且还关注经济环境效应,已逐渐走向更加遵循绿色的工艺原则^[23,29,36,42],见表 10。循环回收流程如图 6 所示。

表 10 铂族金属地上资源循环回收利用的绿色流程及趋势
Table 10 Green processes and trends in the recycling of above-ground resources of platinum group metals

绿色化学	绿色工艺
使用循环可再生原料	坚持可持续性目标
更安全的溶剂和试剂材料	安全与无毒设计
减少有害合成	无害输入和输出
高稳定的催化试剂	物质多样性最小化
减少化学衍生品	降低工艺复杂程度
节能且提高产出	有效利用能量和材料
预防污染,安全隐患最小化	以商业为导向,工业效率最大化

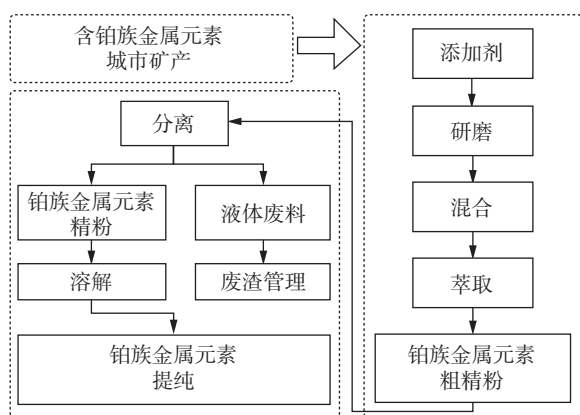


图 6 铂族金属地上资源循环回收流程

Fig. 6 Recycling process of above-ground resources of platinum group metals

全球铂族金属的市场和行业的寡头特征显著,为保持在地缘政治中获得更多的独立性,对重视铂族金属资源安全的国家和地区而言,城市矿产所含铂族金属的元素丰度大多高于地下资源,从城市矿产中回收铂族金属的单位成本可能会低于地下资源开采,潜力巨大,但这也可能会挑战寡头主导的全球铂族金属的话语权,成为全球铂族金属市场的另一个关键价格驱动因素^[41-43]。因此,政府和行业的决策者需分析和规划包括铂族金属在内的关键原材料产

业链供应链,这就要求未来深化行业协作理念发展铂族金属地上资源的循环回收经济,这种理念着眼于产品的整个生命周期,从设计制造、使用到最终的回收再利用。通过设计可回收性、减少资源消耗、延长产品寿命、支持再利用和二次制造等关键元素,以实现产品设计和生产过程中的资源最大化利用^[25,26,36]。

从 2014 年到 2023 年,铂族金属的全球需求量持续攀升,仅以铂为例,其需求量从 796.7 万 oz 增至 848.4 万 oz,虽然铂的供应量从 515.4 万 oz 增至 602.0 万 oz,回收量也从 204.5 万 oz 增至 226.1 万 oz,但供需之间的差异表明铂始终处于资源紧平衡状态^[2,15,46]。因矿产资源禀赋、矿石开采加工等行业远离公众视线,但城市矿产却是公众日常生活范围内触手可及的概念,因此,提升公众意识是未来实现铂族金属地上资源循环经济可持续的关键之一。通过公众教育、公共宣传活动、可持续消费倡议、社区参与和志愿活动甚至激励措施,可增强公众对铂族金属的重要性认知,以及从城市矿产中回收铂族金属带来的环境利益和经济利益,而且这种意识的提升也有助于激发消费者和社会更积极地参与包括铂族金属在内的各类城市矿产回收活动,并鼓励公众在日常生活中做出更环保的选择^[23,30-31]。

合理利用城市矿产,让包括铂族金属在内的各类地上资源进入循环回收利用过程不是发达国家的特权,但发展循环经济需要特定的基础设施设备,而这些配套并非在全球所有地方都容易获得,因此,地上资源的循环经济取决于行业对城市矿产的废料管理工作,这也表明政府的监管支持是铂族金属地上资源回收乃至整个城市矿产管理路中至关重要的因素^[23,26,29,42]。部分国家已通过制定强制性法律要求,确保电子产品的制造商、分销商和消费者负责其产品的回收和处理。例如,欧盟的 WEEE(废弃电子电气设备)指令规定,制造商必须负责回收其在市场上销售的电子产品,该规定不仅要求收集和处理废弃物,还要求制造商在设计产品时考虑到易回收性和减少有害物质使用。在激励措施与补贴政策方面,政府可鼓励在采购政策中引入可持续性标准,要求采购的产品必须符合环保设计和可回收性标准,并提供税收优惠、补贴或资金支持,鼓励企业投资于回收设施和技术的升级。此外,城市矿产等地上资源回收具有全球性的特点,国际合作对于设立统一的回收标准和处理规范尤为重要,未来将通过国际条约和协议,共同努力解决跨境电子废物流动的问题,促进全球范围内的资源回收和可持续利用。

5 关于我国铂族金属资源安全的策略与启示

5.1 循环视域下的敏感因素

本文基于循环视域梳理铂族金属全球产业链的复杂网络关联,归纳影响铂族金属的地下资源勘探开发、地上资源循环回收的主要敏感因素包括五个方面。一是资源供给与需求,资源供给与需求是影响铂族金属产业链的关键因素。铂族金属资源的供给目前主要来自于地下资源,供应有限且不稳定,而来自于工业等领域的应用越来越广泛,需求不断增长,资源供给与需求是否平衡对于铂族金属的全球产业链稳定至关重要。二是铂族金属价格,铂族金属的价格直接决定了其金融价值和投资吸引力。铂族金属价格虽然波动剧烈且难以预测,但对于铂族金属资源而言,当价格上升时,会激励更多的地下资源勘探和开发活动,同时促进地上资源的循环回收。反之,当价格下跌时,可能会导致部分项目减产或搁浅,进而影响铂族金属全球产业链。三是外汇汇率,外汇汇率对包括铂族金属在内的贵金属价格有着重要影响。铂族金属是全球性交易商品,其价格通常以美元计价,因此,外汇汇率的波动会直接影响铂族金属的购买或投机。例如,当资源国货币贬值时,以外币计价的铂族金属价格会相对上升,从而可能刺激资源国出口和外国需求。四是金融市场行情。金融市场波动尤其是与贵金属相关的投资市场变化,会直接影响铂族金属全球产业链。例如,当投资者看衰全球经济前景时可能会将资金转向贵金属等避险资产,从而推高铂族金属价格并进而影响铂族金属的全球产业链。五是城市矿产回收。全球对环保意识的提高和对资源循环利用的重视,城市矿产回收正成为铂族金属的重要供应来源,而城市矿产回收的进展情况,包括回收技术的发展、回收渠道的完善、政策支持等,都会影响铂族金属的产量和成本,进而对铂族金属的全球产业链产生影响。

除了上述敏感因素,政策因素、地缘冲突和全球贸易格局变化也在铂族金属全球产业链的敏感因素中占有重要地位^[44,49,61]。例如,对环保标准的提高可能会增加铂族金属开采和冶炼成本,进而影响其市场价格,新的勘探开采加工技术提高了铂族金属的利用率,而贸易格局变化、贸易政策调整甚至贸易壁垒都可能影响铂族金属的全球产业链稳定和发展。

5.2 策略与启示

二十大报告提出“巩固优势产业领先地位,在关系安全发展的领域加快补齐短板,提升战略性资源供应保障能力”,战略性关键矿产对保障国防安全及经济安全至关重要,已成为大国博弈的焦点之一^[42,44-46]。

铂族金属作为全球争夺的战略性关键矿产,不仅具有重要的工业应用价值,也是全球金融市场的投资商品,其工业和金融的双重属性在未来将支撑铂族金属在地下资源、地上资源的循环经济框架下以城市矿产回收利用为主导的可持续发展趋势。我国除了要继续密切关注全球铂族金属的地下资源,还应重视铂族金属的地上资源,本文对铂族金属的全球产业链进行分析并归纳其循环视域下的敏感因素,关于我国铂族金属资源安全也提出一些启示与建议。

1)在城市矿产管理和资源循环利用方面,我国城市矿产管理方面应进一步完善立法体系建设,还应把握重点精准政策,建立再生资源回收公共服务等动态追踪机制。另外,我国包括铂族金属在内的部分废料标准,如物料收集、回收、再造及产品评价等的标准缺乏,再加上铂族金属元素种类多、品位差异大,导致技术推广应用缺失依据,建议整合铂族金属循环利用产业资源,支持绿色先进技术的规模以上企业,给予相应的政策支持,加快建设从地下资源到地上资源、从地上资源的扩散到城市矿产的集中、再从城市矿产中回收利用的铂族等贵金属的全链条标准体系,为产业高质量发展创建绿色低碳的生态环境,努力提高我国企业在国内外市场上的综合竞争力。

2)在供应链的资源保障方面,应从关注地下资源转向重视地上资源。理论上来说,矿产地下资源开采不可能永续,即使是最大最富的矿床也会枯竭,得益于技术进步,使得替代品更加易得。国际形势和地缘政治的不确定性凸显了供应链风险和安全应对策略的重要性,绿色低碳可持续发展目标已在全球达成共识,现有实践表明,在人类社会开展循环经济是可行性的,因此,就铂族金属而言,除了加大铂族金属替代品研发并在国内建立铂族金属储备制度外,也应由关注地下资源转向重视地上资源,除了回收工艺,还可将生产者责任延伸(EPR)模式有机融入二次资源的政策,相关的废料循环、高效物流、环境低负荷化等城市矿产开发利用管理体系均应引起重视。

3)在产业链的价值网络方面,应尝试摆脱铂族金属的全球“茧房效应”。基于价值网络而关联的产业链在各种力量博弈下,铂族金属的全球产业链并未自然实现优化,原因是矿业天然会因资源而诞生一些产业链网络的系统寡头。从历史价格可看出,铂族金属市场中的非理性和投机力量强于传统的供需规则,地下资源稀缺且集中使得铂族金属的寡头特性不断增强,这也造成在其全球产业链网络中的

“茧房效应”，价格机制无法超脱于寡头控制而实现真正意义上的市场化。全球贵金属交易市场为铂钯提供了一种混合型估值偏差，而从城市矿产中回收铂族金属的比例不断提高，未来将有助于打破铂族金属全球产业链价值网络中寡头控制的“茧房效应”。

参考文献(References):

- [1] 王丰翔, 李晓明, 栾卓然, 等. 全球铂族金属资源分布、供需及消费格局[J]. 地质通报, 2022, 41(10): 1829-1846.
WANG Fengxiang, LI Xiaoming, LUAN Zhuoran, et al. Global PGEs resource distribution, supply and demand and consumption trends[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(10): 1829-1846.
- [2] Heraeus. 2024 铂金年刊(中文版)[R]. 2024.
- [3] 张若然, 陈其慎, 柳群义, 等. 全球主要铂族金属需求预测及供需形势分析[J]. 资源科学, 2015, 37(5): 1018-1029.
ZHANG Ruoran, CHEN Qishen, LIU Qunyi, et al. World demand and analysis of supply and demand of platinum-group metals[J]. Resource Science, 2015, 37(5): 1018-1029.
- [4] 包顿, 程天泽. 铂族金属供需及市场价格展望[J]. 贵金属, 2018, 39(2): 81-86.
BAO Dun, CHENG Tianze. Supply-demand analysis and market outlook for platinum group metals[J]. Precious Metals, 2018, 39(2): 81-86.
- [5] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2023[R]. 2023.
- [6] 李鹏远, 周平, 齐亚彬, 等. 中国主要铂族金属供需预测及对策建议[J]. 地质通报, 2017, 36(4): 676-683.
LI Pengyuan, ZHOU Ping, QI Yabin, et al. The supply and demand prediction and suggestions of platinum-group metals in China[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(4): 676-683.
- [7] 张其仔, 许明. 中国参与全球价值链与创新链、产业链的协同升级[J]. 改革, 2020(6): 58-70.
ZHANG Qizai, XU Ming. China's participation in global value chain and synergistic upgrade of innovation chain and industry chain[J]. Reform, 2020(6): 58-70.
- [8] 刘明宇, 芮明杰. 价值网络重构、分工演进与产业结构优化[J]. 中国工业经济, 2012(5): 148-160.
LIU Mingyu, RUI Mingjie. Reconstruction of value network, the evolution of division and the industrial structure optimization[J]. China Industrial Economics, 2012(5): 148-160.
- [9] 钟维琼, 代涛, 李丹. 钢铁产业链全球物流网络分析[J]. 中国矿业, 2018, 27(5): 61-65.
ZHONG Weiqiong, DAI Tao, LI Dan. Analysis of global material flow network of steel industry chain[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(5): 61-65.
- [10] MOOIMAN M B, SOLE K C, DINHAM N. The precious metals industry: global challenges, responses, and prospects[J]. Metal sustainability: Global challenges, consequences, and prospects, 2016: 361-396.
- [11] 刘凤山, 王登红. 中国铂族金属矿床找矿方向初探[J]. 中国区域地质, 2000(4): 434-439.
LIU Fengshan, WANG Denghong. Direction in prospecting for platinum-group metal deposits in China[J]. Regional Geology of China, 2000(4): 434-439.
- [12] British Geological Survey. Platinum[R]. 2009.
- [13] 张金池, 刘贵清, 龚卫星, 等. 铱资源应用现状及市场分析[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(2): 121-123.
ZHANG Jinchi, LIU Guiqing, GONG Weixing, et al. Application status and market analysis of iridium resource[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2024, 42(2): 121-123.
- [14] FORTIER S M, HAMMARSTROM J H, RYKER S J, et al. USGS critical minerals review[J]. Mining Engineering, 2019, 71(5): 35-47.
- [15] Johnson Matthey. 2024 庄信万丰铂族金属市场报告(中文版)[R]. 2024.
- [16] 马腾, 张万益, 贾德龙. 铂资源现状与需求趋势[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(5): 90-97.
MA Teng, ZHANG Wanyi, JIA Delong. The present situation of platinum metal resources and demand trend[J]. Conservation and Utilization of Mineral resource, 2019, 39(5): 90-97.
- [17] 黎华, 黄凡, 周伟金, 等. 广西贵金属矿产资源特征、成矿规律与找矿方向[J]. 中国矿业, 2024, 33(8): 225-237.
LI Hua, HUANG Fan, ZHOU Weijin, et al. Resource characteristics, metallogenic regularity and prospecting direction of precious metal minerals in Guangxi[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(8): 225-237.
- [18] HUGHES A E, HAQUE N, NORTHEY S A, et al. Platinum group metals: a review of resources, production and usage with a focus on catalysts[J]. Resources, 2021, 10(9): 93.
- [19] 邢正杰, 常雨乐, 吴王平. 铂族金属的应用、供需和循环利用[J]. 贵金属, 2023, 44(S1): 40-45.
XING Zhengjie, CHANG Yule, WU Wangping. Application, supply, demand and recycling of platinum group metals[J]. Precious Metals, 2023, 44(S1): 40-45.
- [20] ODULARU A T, AJIBADE P A, MBESE J Z, et al. Developments in platinum-group metals as dual antibacterial and anticancer agents[J]. Journal of Chemistry, 2019, 2: 1-18.
- [21] 王轶, 操齐高, 贾志华, 等. 贵金属在医药领域的应用与发展[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(S1): 165-170.
WANG Yi, CAO Qigao, JIA Zhihua, et al. Application and development of precious metals materials for medical application[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(S1): 165-170.
- [22] 熊宗国. 铱资源状况及处理工艺[J]. 贵金属, 1994, 15(3): 59-64.
XIONG Zongguo. The resources of osmiridium and its processing[J]. Precious Metals, 1994, 15(3): 59-64.
- [23] 何朋蔚, 彭亚山. 城市矿产开发利用: 前景、影响因素及管理政策[J]. 中国矿业, 2023, 32(10): 1-10.
HE Pengwei, PENG Yashan. Urban mineral development and utilization: prospects influencing factors and management policies[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(10): 1-10.
- [24] BURLAKOV S J, VINCEVICA-GAILE Z, KRIEVANS M, et al. Platinum group elements in geosphere and anthroposphere: interplay among the global reserves, urban ores, markets and circular economy[J]. Minerals, 2020, 10(6): 558.

- [25] 郭学益,田庆华,刘咏,等.有色金属资源循环研究应用进展[J].中国有色金属学报,2019,29(9):1859-1901.
GUO Xueyi, TIAN Qinghua, LIU Yong, et al. Progress in research and application of non-ferrous metal resources recycling[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1859-1901.
- [26] GHISELLINI P, NCUBE A, CASAZZA M, et al. Toward circular and socially just urban mining in global societies and cities: present state and future perspectives[J]. *Frontiers in Sustainable Cities*, 2022, 4: 930061.
- [27] Molecular Recognition Technology™-IBC Advanced Technologies [EB/OL]. <https://ibcmrt.com/>.
- [28] 曾现来,李金惠,耿涌,等.碳中和背景下我国典型战略性金属中长期可持续供给路径[J].中国科学院院刊,2023,38(8):1099-1109.
ZENG Xianlai, LI Jinhui, GENG Yong, et al. Pathways for medium- and long-term sustainable supply of typical strategic metals in China in context of carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(8): 1099-1109.
- [29] 刘航.中国城市矿产资源开发利用现状、问题及对策[J].中国矿业,2018,27(9):1-6.
LIU Hang. Current situation, problems and countermeasures of urban mineral resources development and utilization in China[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(9): 1-6.
- [30] 魏伟,李金铠,郭崇慧.基于知识图谱的中国城市矿产研究进展[J].资源科学,2021,43(3):489-500.
WEI Wei, LI Jinjia, GUO Chonghui. Evolution of urban mineral resources research based on knowledge maps[J]. Resource Science, 2021, 43(3): 489-500.
- [31] 王昶,孙桥,左绿水.城市矿产研究的理论与方法探析[J].中国人口·资源与环境,2017,27(12):117-125.
WANG Chang, SUN Qiao, ZUO Lyushui. Research on theories and methods of urban minerals[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(12): 117-125.
- [32] 关于印发“十四五”循环经济发展规划的通知[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/07/content_5623077.htm.
- [33] CHANCEREL P, MESKERS C E M, HAGELÜKEN C, et al. Assessment of precious metal flows during preprocessing of waste electrical and electronic equipment[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, 13(5): 791-810.
- [34] HAGELÜKEN C. Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling—a holistic approach for interface optimization between pre-processing and integrated metals smelting and refining[C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2006.
- [35] 张深根,何学峰,史志胜,等.铂族金属循环利用技术开发现状及展望[J].中国工程科学,2024,26(3):120-130.
ZHANG Shengen, HE Xuefeng, SHI Zhisheng, et al. Recycling of platinum group metals: development status and prospect[J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(3): 120-130.
- [36] 殷喜平,菅金鑫,何学峰,等.铂族金属萃取分离技术研究进展[J].有色金属(冶炼部分),2023(9):30-42.
YIN Xiping, JIAN Jinxin, HE Xuefeng, et al. Research progress in extraction and separation of platinum group metals[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2023(9): 30-42.
- [37] 徐敬斌,李建平,高标,等.铂族废催化剂湿法分离回收技术[J].稀有金属,2023,47(12):1689-1704.
XU Qibin, LI Jianping, GAO Biao, et al. Hydrometallurgy separation and recovery technology for platinum group spent catalysts[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47(12): 1689-1704.
- [38] 曹礼梅,邱兆富,张巍,等.化工废催化剂污染特征及资源化途径[J].化工进展,2021,40(10):5293-5301.
CAO Limei, QIU Zhaofu, ZHANG Wei, et al. Pollution and utilization of chemical industry spent catalysts[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(10): 5293-5301.
- [39] 王喜保.贵金属的价值偏移和价格波动[J].贵金属,2017,38(S1):187-191.
WANG Xibao. Value deviation and price fluctuation of precious metals[J]. Precious Metals, 2017, 38(S1): 187-191.
- [40] BAO D. Dynamics and correlation of platinum-group metals spot prices[J]. *Resources Policy*, 2020, 68: 101772.
- [41] 张华,鹿爱莉.对矿产品国际贸易定价权本质的探讨[J].中国矿业,2020,29(1):41-45.
ZHANG Hua, LU Aili. Discussion on the essence of pricing rights of mineral international trade[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(1): 41-45.
- [42] YAKOUMIS I, PANOU M, MOSCHOVI A M, et al. Recovery of platinum group metals from spent automotive catalysts: a review[J]. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021, 3: 100112.
- [43] ERICSSON M, TEGEN A. Global PGM mining during 40 years: a stable corporate landscape of oligopolistic control[J]. *Mineral Economics*, 2016, 29(1): 29-36.
- [44] 林君.矿产资源保障与国家安全[J].太平洋学报,2023,31(10):1-9.
LIN Jun. Mineral resources and national security[J]. Pacific Journal, 2023, 31(10): 1-9.
- [45] 王永中,万军,陈震.能源转型背景下关键矿产博弈与中国供应安全[J].国际经济评论,2023(6):147-176.
WANG Yongzhong, WAN Jun, CHEN Zhen. Geopolitical game and China's supply security in critical minerals amid energy restructuring[J]. International Economic Review, 2023(6): 147-176.
- [46] 中国黄金协会铂钯分会, Metals Focus. 全球铂族金属年鉴2024(中文版)[R]. 2024.
- [47] 中国黄金协会铂钯分会. 中国铂钯年鉴2024[R]. 2024.
- [48] 何金祥.南非矿产工业的现状、挑战和前景[J].中国矿业,2019,28(11):48-51.
HE Jinxiang. Current situation, challenges and prospects for the mining industry of South Africa[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(11): 48-51.
- [49] 彭忠益,宋羽婷.以金属资源循环利用保障国家金属资源安全[J].人民论坛,2023(13):65-67.
PENG Zhongyi, SONG Yuting. Recycling of metal resources to ensure the security of national metal resources[J]. People's Tribune, 2023(13): 65-67.
- [50] GRAEDEL T E. The prospects for urban mining[J]. Bridge, 2011, 41(1): 43-50.
- [51] PHILLIPS P C, SHI S, YU J. Testing for multiple bubbles: limit theo-

- ry of real-time detectors[J]. *International Economic Review*, 2015, 56(4): 1079-1134.
- [52] 韩胜飞. 从一价定律看市场整合研究的信息要求[J]. 国际商务(对外经济贸易大学学报), 2010(3): 89-97.
HAN Shengfei. On market equilibrium and integration[J]. *International Business*, 2010(3): 89-97.
- [53] 陈其慎, 张艳飞, 邢佳韵, 等. 新质生产力与矿产资源新格局[J]. *中国矿业*, 2024, 33(5): 1-8.
CHEN Qishen, ZHANG Yanfei, XING Jiayun, et al. New quality productive forces and new pattern of mineral resources[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(5): 1-8.
- [54] EVANS K, REDDY S M, MERLE R, et al. The origin of platinum group minerals in oceanic crust[J]. *Geology*, 2023, 51(6): 554-558.
- [55] RÍOS MUÑOZ F, PEÑA RAMÍREZ C, MEZA J, et al. Platinum group metals extraction from asteroids vs earth: an overview of the industrial ecosystems, technologies and risks[J]. *Mineral Economics*, 2024, 37(4): 681-700.
- [56] 苏本勋, 刘霞, 袁庆哈, 等. 流体在岩浆型铬铁矿和铂族元素成矿过程中的作用及意义[J]. *地质学报*, 2022, 96(12): 4091-4100.
SU Benxun, LIU Xia, YUAN Qinghan, et al. Role and significance of fluids in magmatic-type chromite and platinum-group element mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(12): 4091-4100.
- [57] 彭忠益, 卢珊, 胡翔. 大数据驱动下国家矿产资源安全现代化治理: 逻辑理路与模式构建[J]. 中南大学学报(社会科学版), 2023, 29(2): 11-21.
PENG Zhongyi, LU Shan, HU Ao. Big-data-driven national mineral resources security management: logical path and model construction[J]. *Journal of Central South University (Social Science)*, 2023, 29(2): 11-21.
- [58] 吴初国, 汤文豪, 张雅丽, 等. 新时代我国矿产资源安全的总体态势[J]. *中国矿业*, 2021, 30(6): 9-15.
WU Chuguo, TANG Wenhao, ZHANG Yali, et al. Overall trend of China's mineral resources security in the new era[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(6): 9-15.
- [59] 李彦龙. 利益相关者理论视野中的跨国矿业企业社会责任[J]. *中国矿业*, 2019, 28(7): 32-36.
LI Yanlong. The social responsibility of transnational mining companies in the perspective of stakeholder theory[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(7): 32-36.
- [60] 张纯熹, 董海刚, 赵家春, 等. 铂的萃取分离技术研究进展[J]. *贵金属*, 2023, 44(2): 81-87.
ZHANG Chunxi, DONG Haigang, ZHAO Jiachun, et al. Research progress in the separation of platinum by solvent extraction[J]. *Precious Metals*, 2023, 44(2): 81-87.
- [61] 崔祖霞. 我国战略性矿产资源保供形势分析与思考[J]. *中国矿业*, 2023, 32(7): 10-14.
CUI Zuxia. Analysis and reflection on the situation of strategic mineral resources conservation in China[J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(7): 10-14.