

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.10.011

全球铂族金属资源分布、供需及消费格局

王丰翔^{1,2,3}, 李晓明⁴, 栾卓然³, 张伟波⁵, 张万益^{5*}WANG Fengxiang^{1,2,3}, LI Xiaoming⁴, LUAN Zhuoran³, ZHANG Weibo⁵, ZHANG Wanyi^{5*}

1. 内蒙古自治区岩浆活动成矿与找矿重点实验室/内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020;

2. 中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

3. 河北省战略性关键矿产资源重点实验室/河北地质大学, 河北 石家庄 050031;

4. 河北省地质环境监测院, 河北 石家庄 050021;

5. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

1. Inner Mongolia Key Laboratory of Magmatic Mineralization and Ore-Prospecting, Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China;

2. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;

3. Key Laboratory of Regional Geology and Mineralization/Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China;

4. Hebei Geological Environmental Monitoring Institute, Shijiazhuang 050021, Hebei, China;

5. Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China

摘要: 中国铂族元素(Platinum group elements, PGEs)矿产资源的需求量呈现不断增加的趋势, 对外依存度高达98%, 存在巨大的供应风险。从全球PGEs矿产资源的产出环境、分布特征和成因类型出发, 结合近10年全球PGEs矿产资源的开发与消费, 研判中国PGEs产业链的消费形势和供需格局, 深入分析世界和中国PGEs矿产资源的未来发展趋势, 提出保障中国PGEs资源安全供应的合理化建议, 以期实现PGEs资源的储量保障和合理配置。研究表明, ①全球PGEs资源储量稀缺, 空间分布集中, 主要分布在南非、津巴布韦、俄罗斯和北美等国家或地区, 中国探明PGEs资源量所占比重不足世界资源量的1%, 对外依存度高达98%; ②全球PGEs矿床成因类型多样, 但以产于镁铁质—超镁铁质大火成岩省内的岩浆型PGEs矿床为主, 占全球PGEs矿床数量10%的大型—超大型矿床则占据了世界PGEs资源量的85%。③近3年, 全球和中国PGEs勘查工作进入低谷期, 新发现资源较少。未来10年全球供应量将不会呈现明显的增长。与此同时, 由于全球PGEs供应量主要被欧美、南非和俄罗斯等矿业寡头控制, 中国大型PGEs矿业企业国际竞争力相对较弱; ④未来10年中国PGEs需求量将高达160~185 t, 年均增长率约为2.67%, 建立战略储备、稳定全球供应和加强循环利用势在必行。

关键词: 铂族元素; 资源分布; 供需形势; 形势分析; 战略性矿产; 矿产调查工程

中图分类号: P618.53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)10-1829-18

Wang F X, Li X M, Luana Z R, Zhang W B, Zhang W Y. Global PGEs resource distribution, supply and demand and consumption trends. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(10): 1829-1846

Abstract: The demand for PGEs mineral resources in China shows an increasing trend, and the external dependence is as high as 98%, which is a huge supply risk. This paper summarizes geological environment, distribution, and genetic type of the world-class PGEs deposits, and we also count supply and demand date of PGEs in China and the world in recent ten years (2011-2019), such as the exploration, consumption and the industrial chain. And then, we forecast the PGEs consumption, supply patterns and trends of China in next few years, and we also offer reasonable suggestions. Research shows that: ① Global PGEs reserve is scarce, but the distribution is

收稿日期: 2021-01-14 修订日期: 2021-10-09

资助项目: 中国地质调查局项目《国家地质调查成果集成与规划》(编号: DD20190464)、《境外大型矿产资源基地及资源潜力评价》(编号: DD20190437) 和河北地质大学博士科研启动基金(编号: BQ2018032)

作者简介: 王丰翔(1984-), 男, 助理研究员, 从事大型—超大型矿床研究。E-mail: wfx0316@163.com

* 通信作者: 张万益(1974-), 男, 教授级高工, 从事矿产勘查、矿床学及地质调查规划研究。E-mail: wanyizhang0810@qq.com

more concentrated, mainly distributed in South Africa, Zimbabwe, Russia and North America. China's proved PGEs resources accounted for < 1% of the world's resource, therefore external dependence is very high; ② the genetic types of the PGEs deposit is various, but the magmatic PGEs deposits, especially outpoted in mafic-ultramafic volcanic rocks, is the most important, with 10% large-superlarge deposits accounting for 85% of the world's PGEs resources; ③ The world's and China's PGEs exploration is at low ebb, and the increasing of PGEs resources and supply is not obvious. Especially, most of the world-renowned mining companies are mainly controlled by European and American, South African and Russian mining oligarchs, and China's large PGEs mining are relatively weak in international competitiveness; ④ China has established a relatively complete PGEs industrial chain, and the demand for PGEs in China in the next ten years may be as high as 160~185 t, with an average annual growth rate of 2.67%. Therefore, it is imperative to establish strategic reserve, stabilize global supply and strengthen recycling.

Key words: PGEs; resource distribution; supply and demand situation; trend research; mineral exploration engineering

关键矿产或关键金属是国际上新近提出的资源概念,指的是现今社会必需、但安全供应存在较高风险的一类矿产的总称,主要包括稀有金属(Li、Be、Rb、Cs、Nb、Ta、Zr、Hf、W、Sn)、稀土金属、稀散金属(Ga、Ge、Se、Cd、In、Te、Re、Tl)和部分稀贵金属(PGEs、Co等)。关键金属因其稀缺性和优良的物化性质,具有重要性、战略性、稀缺性、动态性等特征,由于资源、经济、环境、技术等原因,供应上可能存在一定障碍和风险,因此全球对战略性矿产的竞争日趋激烈^[1-3]。本次研究的铂族元素(PGEs)是中国重要的战略性稀贵金属资源,对其全球分布、供需及消费趋势进行研究十分必要^[2-3]。与其他关键矿产相比,PGEs矿产资源在经济和科技上均具有无法比拟的双重特性,先后被欧盟、美国等发达国家列为关键矿产目录^{①②③}。随着5G信息技术、高端装备制造、新能源汽车、节能环保等产业的发展,PGEs矿产资源的安全供应成为中国战略性新兴产业可持续发展的关键环节。需要指出的是,中国PGEs矿产资源的需求量呈现不断增加的趋势,其对外依存度高达98%以上,存在巨大的供应风险。

本文聚焦全球PGEs矿产资源,从产出环境、分布特征和成因类型出发,结合近10年(2011—2019年)全球PGEs矿产资源开发勘查现状、供需情况及具有国际影响力的矿业寡头的经营情况,研判全球PGEs产业链的消费形势和供需格局,深入分析世界和中国PGEs矿产资源的未来发展趋势,提出保障中国PGEs资源安全供应的合理化建议,以期实现PGEs资源的储量保障和合理配置。

1 PGEs特性及资源分布特征

1.1 PGEs特性

PGEs位于元素周期表第八副族,主要包括钌

(Ru)、铑(Rh)、钯(Pd)、锇(Os)、铱(Ir)和铂(Pt)。在自然界中,PGEs是地壳最稀缺的一类金属元素(约 0.5×10^{-9}),与金(Au)、银(Ag)统称为贵金属元素。铂族金属均具有高熔点(>1500℃)、抗腐耐磨、高延展性、热电性稳定、反光性强、低膨胀率、催化活性良好等优良的物理化学特性,被广泛应用于国防科学、尖端科技、汽车制造、电子元件、化工产业和珠宝首饰等支柱产业,是上天、入地、下海不可缺少的原料,因此被誉为工业上的“维他命”。

PGEs兼具亲铁和亲铜性,常与过渡金属(Cu、Fe、Ni、Ag和Hg)、后过渡金属(Bi、Pb和Sn)、准金属(Sb、As、Te)和非金属元素(Se和S)组成化合物。100多种含PGEs的矿物被发现,称为铂族矿物^[4]。在贫硫的环境下,PGEs表现出亲铁性,以自然元素的形式或以类质同象的形式形成合金(Pt-Ir、Os-Ir等合金);在硫含量较高的环境下,PGEs表现出强烈的亲铜性,易富集于硫化物内^[5]。根据密度(ρ)大小,PGEs可分为重铂族组(ρ 约为22 g/cm³)和轻铂族组(ρ 约为12 g/cm³),前者由Os、Ir和Pt三种元素组成,后者主要有Ru、Rh和Pd。根据元素共生特征,PGEs可分为Ir族组(IPGE, Os、Ir、和Ru)和Pd族组(PPGE, Rh、Pd和Pt)^[6]。在地幔部分熔融过程中,IPGE为相容元素,常保留于残存相中,如橄榄石、尖晶石、铬铁矿及合金等(如Os-Ir、Pt-Fe合金)难熔矿物内;PPGE在硫不饱和的条件下,是强不相容元素,当岩浆体系达到硫饱和时,会强烈进入硫化物熔浆^[7-10]。

1.2 产出环境与成因类型

世界级的PGEs矿床主要与岩浆型铜镍硫化物矿床共生,在成因与时空分布上与超镁铁质—镁铁质大火成岩省(面积大于 10^5 km²,岩浆持续时间跨度涉于50 Ma)有密切联系(表1)^[11-22]。与PGEs矿床有成因联系的LIPs的岩石主要为超镁铁质—镁

铁质组合,原生岩浆主要为拉斑玄武岩浆,产状以层状为主,代表岩体有南非布什维尔德杂岩体(Bushveld Complex)、俄罗斯诺里尔斯克-塔尔纳赫岩体(Noril'sk-Talnakh)和津巴布韦大岩墙(Great Dyke)。此外,全球具有巨大成矿潜力的找矿靶区还有斯蒂尔沃特(Stillwater)、德卢斯(Duluth)、奥涅加(Onega)、费多罗夫-帕纳(Fedorov-Pana)、布拉科夫斯卡娅(Burakovskaya)、波尔蒂莫(Portimo)、Wellgreen(威尔格林)、斯特拉(Stella)和法兰西岛(Lac des LLes)^[11-22](表 1)。

世界级的 PGEs 矿床一般与陆内伸展环境有关,主要的产出背景有:①古老克拉通内部或其边缘,特别是位于太古宙克拉通内部或其边缘。全球

几个古老的大陆克拉通(如南非罗得西亚-卡普瓦尔地盾、北欧波罗的地盾、北美地台)均有层状岩体和 PGEs 矿床(田)分布。②与地幔热柱多级演化有关的地区;例如俄罗斯的 Noril'sk 地区有大面积巨厚的(4 km)与地幔热点有关的玄武岩浆及相关的 PGEs 矿床(点),地幔柱活动引起的地壳隆升断裂可能是成矿物质向地壳运移的主要动力^[23];中国攀西地区产出有 PGEs 矿床,可能与峨眉山地幔热柱有关^[24]。③古陆碰撞的断裂环境,有热液活动的参与,如中国金川、新疆东天山地区,额尔齐斯铜镍矿带形成于碰撞造山晚期的弛张构造阶段^[25-30]。④部分 PGEs 矿床可能与陨石撞击碰撞事件触发的熔融事件有关,以加拿大的 Sudbury 最典型(表 2)^[31]。

表 1 主要镁铁质-超镁铁质火山岩省产出全球 97%以上的 PGEs 资源
(按 PGEs 金属量排序;数据据参考文献[11]④)

Table 1 The table showing world's large intrusion provinces with known PGEs deposits

侵入体(国家)	面积/km ²	岩体年龄/Ma	代表性矿床	矿石量@平均品位 /Mt@10 ⁻⁶	世界储量占比	资料来源
Bushveld Complex 布什维尔德杂岩体(南非)	75 200 000	2054.4±1.3	Merensky、UG2、Platreef	21700@3.46	73%	[12]
Noril'sk-Talnakh 诺里尔斯克-塔尔纳赫(俄罗斯)	10 100 000	290±2.8~226.7±0.9	Talnakh、诺里尔斯克、 马斯洛夫斯科	2080@4.84	10%	[13]
Great Dyke 大岩墙(津巴布韦)	8 190 000	2575.4±0.7	主硫化带、Boehmke Reef	2260@3.63	7.9%	[14]
Stillwater Complex 斯蒂尔沃特杂岩体(美国)	2 240 000	2704±4	东博尔德 J-M 矿脉、 斯蒂尔沃特	149@15	2.2%	[15]
Duluth Complex 德卢斯杂岩体(加拿大)	1 390 000	1095.94±0.18	诺斯迈特、桦木湖、马图里 (PGEs 的矿床)	2490@0.56	1.3%	[16]
Onega intrusion, 奥涅加侵入体(俄罗斯)	837 000	2050±70	普多日戈尔斯克矿床	517@1.62	0.81%	⑤
Fedorov-Pana intrusion 费多罗夫-帕纳侵入体(俄罗斯)	780 000	25326±6;2496±7	n.d.	458@1.7	0.75%	[17]
Burakovskaya intrusion 布拉科夫斯卡娅侵入体(俄罗斯)	645 000	2433±4; 2430±5	n.d.	587@1.10	0.62%	[18]
Portimo Igneous Complex 波尔蒂莫火成岩杂岩体(芬兰)	524 000	n.d.	n.d.	382@1.37	0.51%	⑤
Wellgreen intrusion 威尔格林侵入体(加拿大)	421 000	232.3±1	n.d.	461@0.91	0.41%	[19]
Skaergaard 斯卡加德侵入体(格陵兰)	227 000	55.59±0.3	Pd5 层	104@2.18	0.22%	[20-21]
Stella intrusion 斯特拉侵入体(南非)	210 000	3033.5±0.3	Kalplats 项目	137@1.53	0.20%	[22]
Lac des LLes 法兰西岛(加拿大)	207 000	2689±1	n.d.	56@3.68	0.20%	⑥

表 2 PGEs 矿床的主要类型及代表性 PGEs 矿床(据参考文献[31–32]修改)
Table 2 PGEs deposit type and representative PGEs deposits

矿床类型		矿床名称(国家或地区)		含矿岩性	矿体位置	矿化类型	矿石品位 /10 ⁻⁶	参考文献
岩浆型	铜镍硫化物型	整合接触型	BIC 的 Platreef(南非)	单斜辉石岩-斜方辉石岩	底部和边部	PGEs-Cu-Ni	5	[33]
		层状	BIC 的 Merensky(南非)	斜方辉石岩-铬铁岩-(方辉橄岩)纯橄岩-橄长岩	中部	PGEs-Cu-Ni	5~7	[34]
		层状	Stillwater 的 J-M 层(加拿大)	纯橄岩-橄长岩-斜长岩-辉长岩	中部	PGEs-Cu-Ni	20	[35]
		碰撞造山环境	金川(中国)	橄榄岩	中、下部	Cu-Ni-PGEs	0.2~4	[31]
	铬铁矿型	陨石撞击	Sudbury(加拿大)	苏长岩	下部	Cu-Ni-PGEs	1	[31]
		层状						
		脉型	BIC 的 UG2 层(南非)	铬铁矿	中部	PGEs-Cr	5~7	[36]
岩浆热液型	磁铁矿型	克拉通内部或边缘	Stella(南非)	磁铁矿-辉长岩	上部	PGEs-Ni		[22]
	砵卡岩	克拉通内部或边缘	Mcbratney(加拿大)	辉石-辉长质的岩体	围岩和岩体的接触处	PGEs-Au		[37]
	斑岩型	克拉通内部或边缘	Santo Tomasll(菲律宾) Ok Tedi(巴布亚新几内亚)	石英闪长玢岩		Cu-Au-PGEs		[38]
VMS 型		岛弧	Besshi(日本)	铝质粘土岩		Cu-Zn-PGEs	8	[39]
外生型	黑色页岩型	克拉通内部或边缘	俄罗斯干谷	含有机质的黑色页岩	围岩交代蚀变带处	Au-PGE 等多金属	8.3	[40]
	砂铂	克拉通内部或边缘	Zolotaya 砂金矿(俄罗斯)			Au-PGEs		[41]

从全球范围看,PGEs 矿床成因类型多样,可划分为岩浆型、热液型、VMS 型和外生型四大类^[32–41](表 2)。其中,就储量和矿床规模而言,岩浆型矿床占据绝对统治地位,全球探明的 22 个超大型 PGEs 矿床均为该类型矿床。根据矿化组合,岩浆型又可划分为铜镍硫化物型、铬铁矿型(UG2)和磁铁矿型(表 2)。

统计全球 PGEs 矿床的产出环境及成因类型,发现其特点如下:①岩浆岩成矿专属性强,超过 85% 的大型—超大型 PGEs 矿床产出在层状 LIPs 内部,主要与陆壳下岩浆房内结晶的深成镁铁质—超镁铁质岩石有关,矿床的容矿岩石为斜长岩—苏长岩—辉石岩、辉石岩、斜辉辉橄岩—纯橄岩等。超大型 PGEs 矿化与铜—镍矿化共伴生,典型的矿物组合 PGEs-Ni-Cu±Au、PGEs-Cr 和 PGEs-Au。此外,极

少数大规模 PGEs 矿化产出在与蛇绿岩有关的铬铁矿床及 Urals-Alaskan 型杂岩体内(表 1)。

②大型—超大型矿床的资源储量巨大,在有序的资源储量变化曲线上与中小型矿床具有明显的线性非拟合特征。超大型、特大型矿床的储量比中小型矿床大数百倍。超大型矿床仅占全球探明 PGEs 矿床数量的 15%,但资源量占据了全球 PGEs 资源量的 85%(表 1;图 1-a~c),体现了超大型矿床巨量金属工业堆积的成矿异常性。

③尽管成矿时代贯穿整个地质时代,但以元古宙和太古宙为主,古生代次之。古元古代可能为全球 PGEs 矿化的爆发期。超过 80% 的大型—超大型矿床的成矿时代集中在古元古代(1850~2485 Ma),尤其集中在 2410~2485 Ma;超过 10% 的矿床形成于太古宙,成矿时代集中在 2.5~2.7 Ga。砂岩型 PGEs 矿床的成矿时代一般为新近

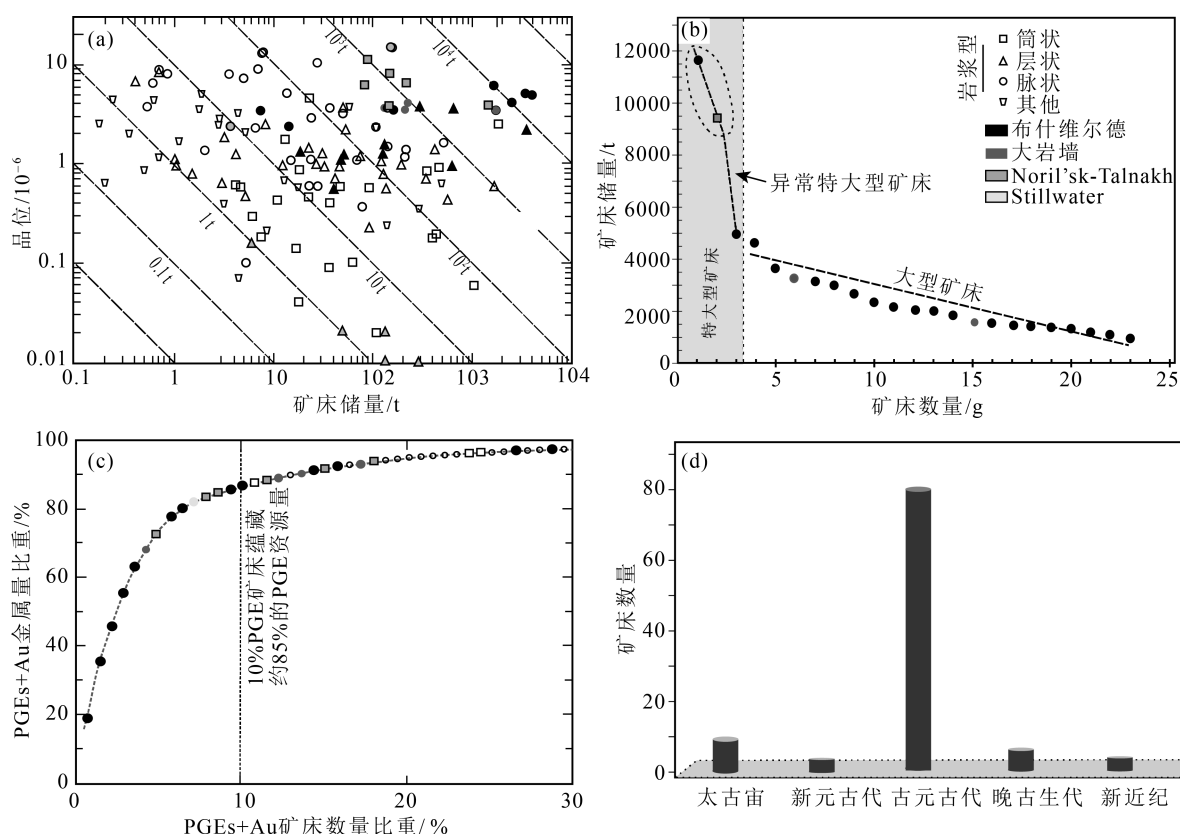


图 1 全球 PGEs 矿床储量/品位图解(a)、矿床数量与资源量(b)、数量与金属量比重(c)和成矿时代与矿床数量图(d)(数据据参考文献[11]④)

Fig. 1 Graphs showing the percent of contained metal against percent of deposits(a), the number vs.size(b), the number vs.metallicity(c) and the ore-forming age vs.number of deposits(d) in the world

纪(图 1-d)。^④成矿单元的偏在性。鉴于全球 PGEs 矿床的岩浆岩成矿专属性和成矿时代的偏在性,其成矿单元主要集中在冈瓦纳成矿域和劳亚成矿域,可能是由于这 2 个成矿域产出有一系列前寒武纪陆块;其次是环太平洋成矿域(图 1)。

1.3 资源储量与分布特征

截至 2019 年底,全球查明 PGEs 资源量和储量分别为 9.27×10^4 t 和 5.31×10^4 t^{④⑦[11]}。其中,铂、钯金资源量分别为 4.97×10^4 t 和 1.93×10^4 t,主要分布在非洲中南部、北美和欧洲—远东等地区,涉及的国家有南非、津巴布韦、俄罗斯、芬兰、加拿大和美国。除此以外,中国、澳大利亚、印度、博茨瓦纳、巴西也有少量分布(表 3;图 2、图 3)。

全球 PGEs 矿产资源分布极不均匀,集中度高,呈现出明显的成矿区域偏在性,主要分布在非洲中南部、俄罗斯和北美(图 2、图 3;表 3)。具体而言,非洲中南部 PGEs 资源集中度最高,探明储

量大于 7.46×10^4 t,占世界资源量的 74.69%(表 3;图 2、图 3);其次为俄罗斯,探明储量为 1.12×10^4 t,占全球资源量的 17.29%(俄罗斯 Pd 资源量在全球最丰富,占全球资源量的 46.83%);北美地区位居世界第三位,探明 Pt + Pd 储量 5025 t(美国和加拿大储量分别为 3646 t 和 1379 t),占全球 PGEs 资源量的 7.40%(图 2、图 3)。相比而言,中国的 PGEs 资源极其贫乏,探明资源量和储量分别为 954.49 t 和 134 t,不足全球探明储量的 1%(表 3)。

2 勘查开发和供需情况

2.1 勘查开发

全球 PGEs 主要有 2 个来源,分别从矿山获取 PGEs(一次性 PGEs)和二次回收 PGEs,前者占总供应量的 72%~78%。根据近 10 年(2010—2019 年)

表 3 全球主要 PGM 资源国储量、资源量和矿床(点)统计结果^{④⑦}

Table 3 Proven reserves and resources of the main PGM resource countries in world

国 家	储量 /t	资源量 /10 ⁴ t	世界比重	矿床(点)数量/个			
				大型-超大型	中型	小型	合计
非洲							
南 非	47001	6.893	74.40%	59	13	48	120
津巴布韦	3740	0.569	6.14%	7	0	7	14
博茨瓦纳	70	0.008	0.09%	0	0	2	2
坦桑尼亚	—	0.003	0.03%	0	0	1	1
欧洲-远东地区							
俄罗斯	—	1.124	12.13%	2	3	2	8
芬兰	—	0.042	0.45%	1	1	1	3
格林兰	19	0.002	0.02%	0	1	0	1
北美地区							
加拿大	1456	0.138	1.49%	1	4	1	6
美国	629.37	0.365	3.94%	2	0	0	2
大洋洲							
澳大利亚	54.32	0.024	0.26%	0	2	1	3
亚洲							
中国	134	0.095	1.03%	1	1		2
印度		0.002	0.02%		1		1
合计	53103.69	9.265					

注:矿床规模(按铂族金属储量)为大型≥10t,2t≤中型<10 t,小型及矿点<2 t;“—”表示数据未知

的统计数据,全球 PGEs 年产量维持在 400 t 左右,南非和俄罗斯是世界上最重要的 PGEs 产出国,产量占比 89.97%,在全球的 PGEs 产出市场中占有绝对优势地位(表 4)。具体而言,近 10 年南非一直是世界第一大铂金和第二大钯产出国,总产出 1333.3 t 铂和 774.4 t 钯,分别占全球产出的 72.54% 和 37.66%;俄罗斯则是世界第一大钯和第二大铂产出国,总产出 818 t Pd 和 227.5 t Pt,分别占世界总产量 39.78% 和 12.38%(表 4)。需要指出的是,从成本角度看,当前 PGEs 价格低于矿山现金成本价格,矿产的生产动力不强,出现 PGEs 大幅放量的概率极小。

2010—2019 年期间,全球 PGEs 勘查投入呈现倒“V”字形走势。2012 年,全球勘查资金 31160 万美元,为近 10 年的最高值。自此,2013—2019 年,全球勘查资金投入呈现波动下降的趋势,2017 年全球勘查投入仅 561 万美元,为近 10 年最低值。尤为明显的是,非洲一直是全球 PGEs 勘查投入最高的地区之一(图 4)。除 2017 年和 2018 年位于俄罗斯

和加拿大之后,其余年份均为世界勘查投入最高的地区,南非更是在 2010—2016 年连续 7 年的勘查投入位居世界第一位。北美、远东地区和澳大利亚也为全球 PGEs 勘查资金高的地区。就资金投入而言,澳大利亚和加拿大 2018 以来的勘查活动取得了一定的突破,可能为全球 PGEs “增储挖潜”的重要地区。

2.2 全球 PGEs 产业链

PGEs 具有优良的物理属性与催化属性,被广泛应用于工业级投资消费领域。总体而言,全球 PGEs 主要应用在:①汽车和航空工业,主要应用在汽车、飞行器(火箭和喷气式飞机)、精密机床、精密仪器等用的起火电触头材料和催化剂,以及火箭和卫星的高温涂层和圆锥体部分、高效燃料电池等,占总消费的约 59%,其中,清洁能源车系的氢原料电池中的应用可能成为未来应用的方向;②珠宝首饰,由于 PGEs 的产量较黄金更少,其用于装饰和投资用途比重较大,占总消费的 16%~23%;③电子元件,

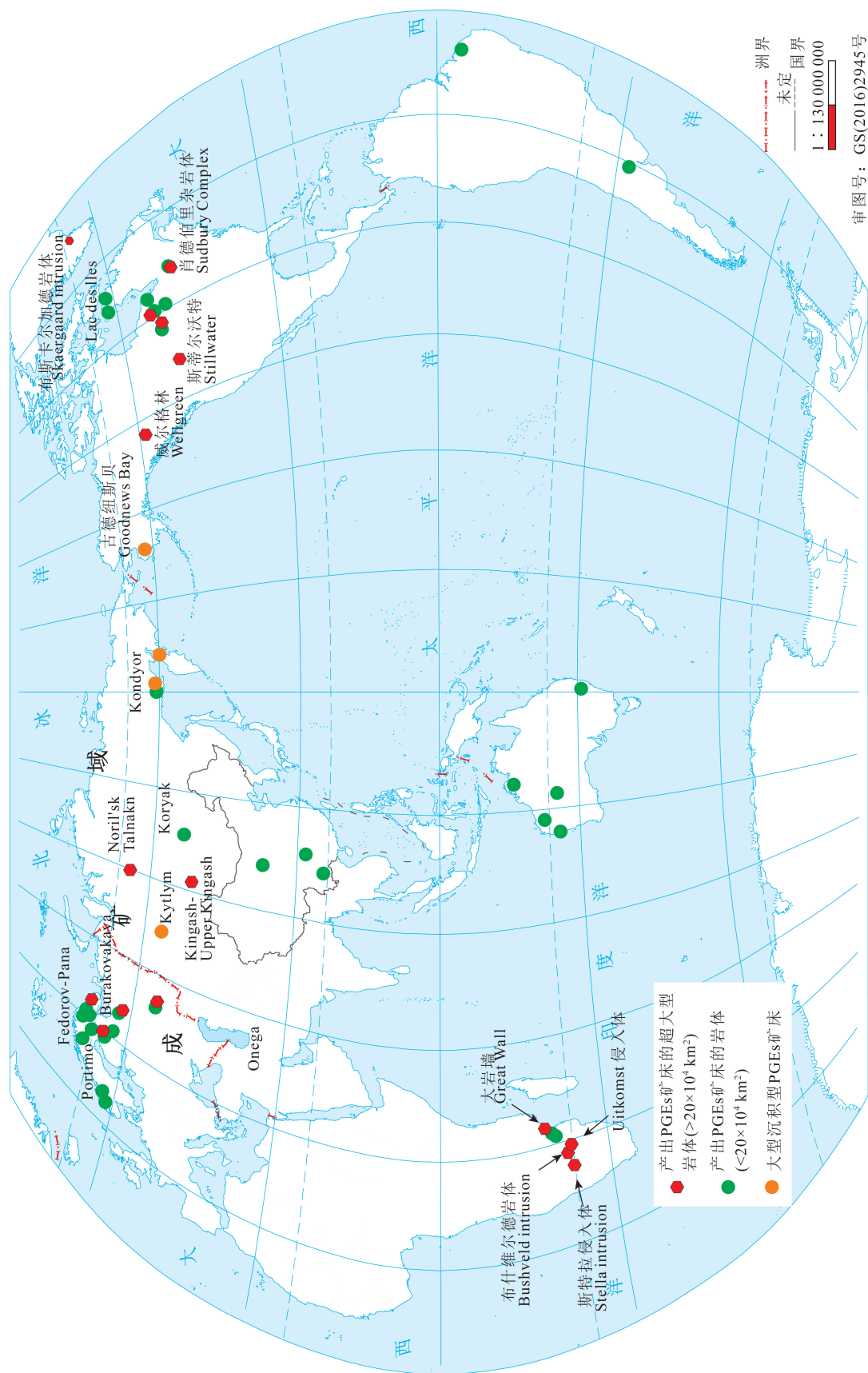


图 2 世界级PGEs矿床及主要产出岩体分布图 (据参考文献[42-43]修改)

Fig. 2 World map showing the locations of igneous intrusions and intrusive complexes of the global major PGEs deposit

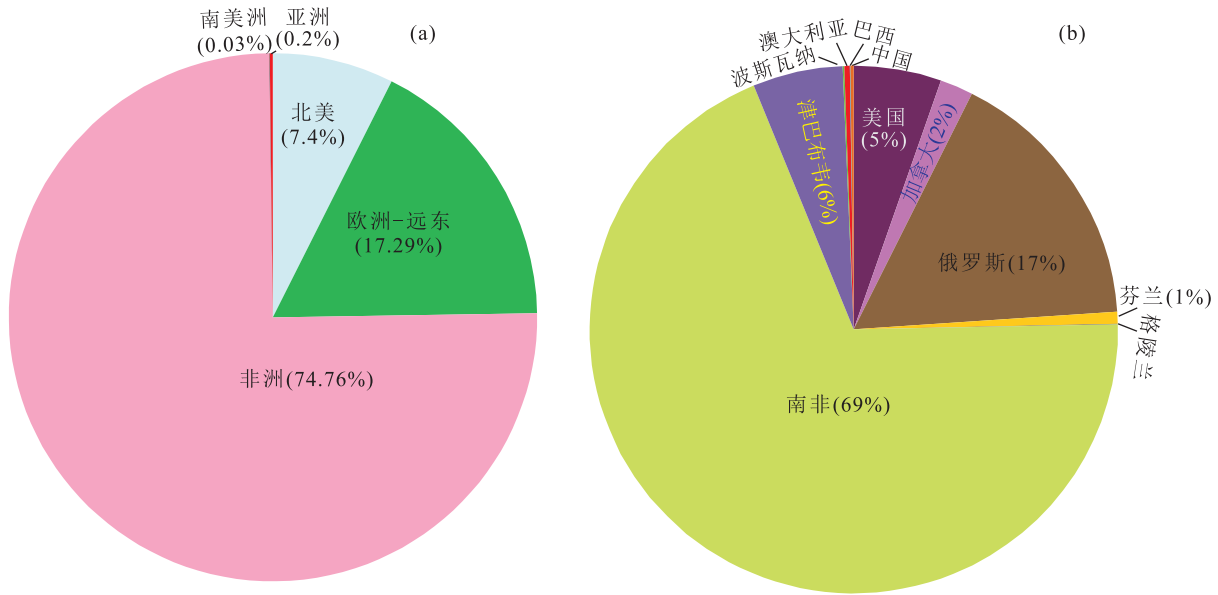


图3 全球 PGEs (Pt+Pd) 资源产出地区及所占比重(a) 和主要国家及所占比重(b) (数据据参考文献[11]④)

Fig. 3 The major regions and countries of Global PGEs (Pt+Pd) resources and their share

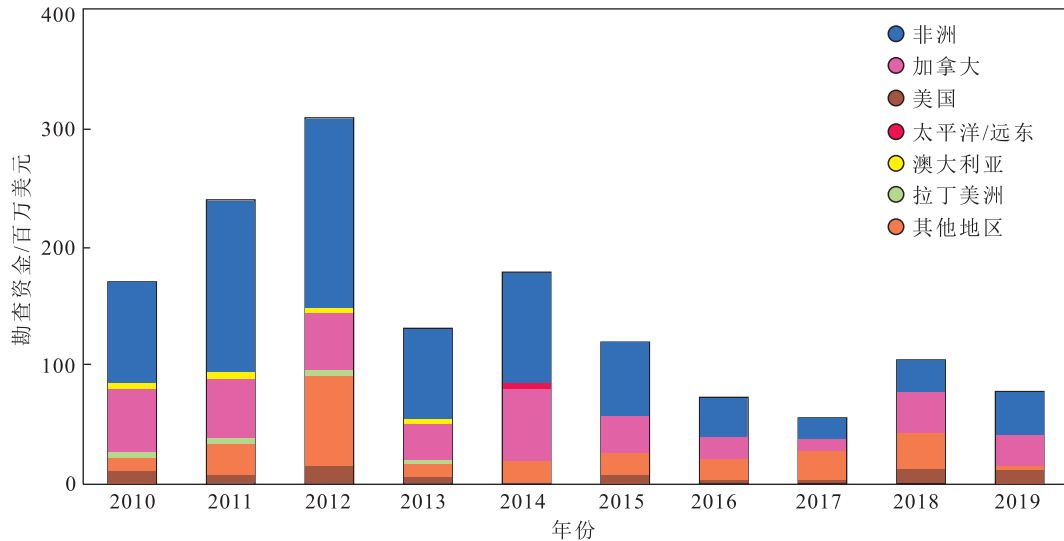


图4 全球 PGEs 勘查投入统计柱状图(数据据参考文献④⑦)

Fig. 4 this statistical histogram showing the global exploration budget

电气测量仪表、高效电子管的阴极及 X-射线管的阴极屏、各种电阻材料等;④化工工业,制备各种化工设备、器皿和原料,做催化剂广泛用在制硫酸、石油裂化、合成氨及光学高级玻璃的制造等方面。⑤原子能工业,主要应用于重水的生产、铀的分离,此外,投资和现代医学(牙合金)是近 10 年变动最大的领域,总需求占比较小(图 5、图 6-a)。

在铂族元素中,Pt 金属用途最广,除金融属性

用途外,主要用于汽车工业的尾气净化催化剂;此外,还应用于化工、电子工业、玻璃工业、石油工业及其他领域。汽车工业及珠宝业是全球 Pt 金属的主要消费领域,这两大领域的消费量占总消费量的 70%。Pd 的消费领域主要是汽车催化转化器和电子工业,也是轻载汽车的尾气净化催化剂,还用于电子工业、医疗合金、珠宝、化学工业及其他领域。Ru 和 Ir 均主要用于化工、电子工业、电气化学等仪

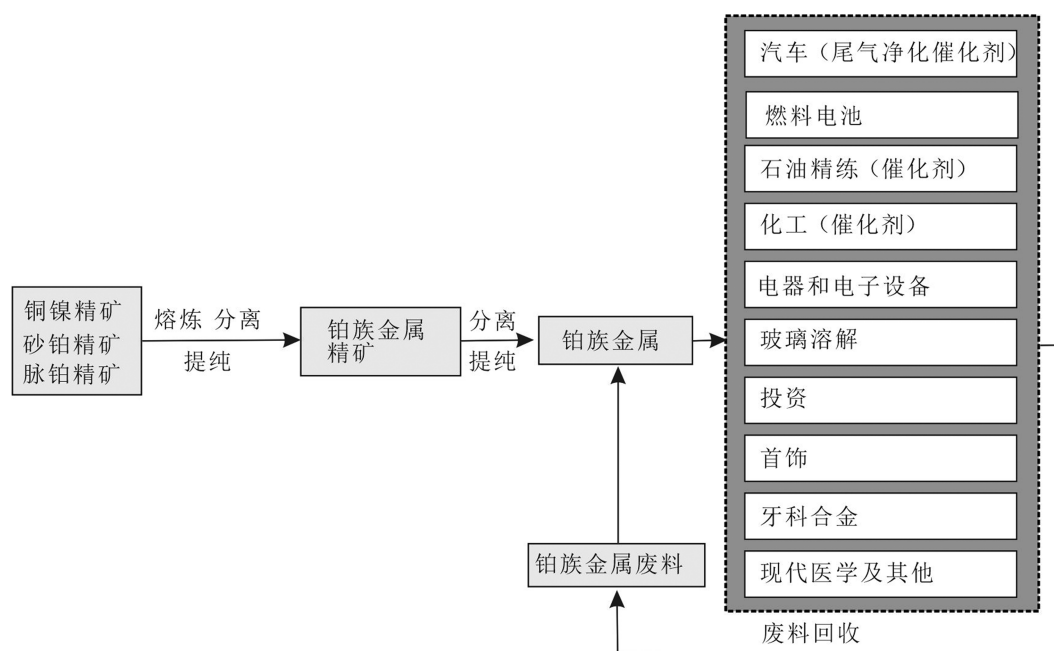


图 5 全球 PGEs 产业链

Fig. 5 Global PGEs industry chain

器等。Os 主要作为 Pt、Pd 添加剂及化工催化剂,应用于照相、电影技术等电子工业(图 5、图 6-a)。

2.3 主要消费和进口国家(地区)

2010—2019 期间,全球 PGEs 消费呈不断增长的趋势,增长率为 19.81%,其增长贡献率主要表现在 Pd 的消费,由 2010 年的 265.09 t 增加到 2019 年的 348.82 t,增长率为 31.59%;相比之下,Pt 金属的消费相对稳定,主要维持在 235 t 左右(表 4;图 7)。

欧盟、美国、中国和日本是全球 PGEs 消费的四大地区。近 10 年,中国、欧盟、北美洲、日本四大区域的 Pt 和 Pd 的消费量分别占全球消费量的 81.80% 和 85.65% (表 4): ① 欧盟近 10 年来一直是全球 PGEs 的消费国。Pt 和 Pd 金属近 10 年的消耗量分别位居世界第二和世界第一,年均消耗量分别为 59.39 t 和 70.80 t,主要应用于汽车尾气催化剂领域。据统计,欧盟单一汽车尾气催化剂中 PGEs 的消耗量为 4.2 g (Pt: 2 g; Pd: 2.2 g)^[44]。② 北美是全球传统的 PGEs 消费地区,PGEs 也被应用于汽车行业和航空航天行业。受美国次贷经济影响,北美汽车产量跌入低谷,北美 Pt 金属近 10 年一直徘徊在 30~40 t 和之间,Pd 消费呈现出大幅增长,其消费量在 60.68~92.84 t 之间。③ 日本曾是全球最大的 PGEs 消耗国。由于次贷危机和 2011 年大地震,日本

PGEs 的消费大幅降低,近 10 年 Pt 和 Pd 消费量均位于历史低位,消费量分别徘徊在 22.83~38.07 t 之间和 40.43~50.01 t 之间。日本 PGEs 的消费结构呈现多元化,汽车行业、珠宝首饰、现代医学和电子工业均是其主要消费领域。④ 近 10 年,中国逐步替代日本、欧盟成为全球最大消费国和进口国,对外依存度高达 98%,其主要消费特征将另有论述。

2.4 全球主要 PGEs 矿业企业

全球从事 PGEs 勘查开发的矿业公司有近百家,世界顶级 PGEs 公司仅十余家,主要被欧美、南非、俄罗斯等矿业寡头控制,控制全球产量的 90% (表 5)。这些矿业公司所控股的矿山主要位于非洲中南部(南非和津巴布韦)、北美和俄罗斯。其中,非洲中南部地区是全球优质 PGEs 项目最集中的地区,具有不可撼动的地位。据 2018 年数据统计,全球前 10 位和前 20 位的 Pt 项目分别有 7 个和 16 个;世界前 10 位和前 20 位的 Pd 项目分别拥有 6 个和 11 个。俄罗斯远东地区也是全球 PGEs 资源重点开采区,其开矿成本低廉而著称,仅 PJSC MMC Norilsk 镍业产量就占世界 Pd 产量的 35%,其经济效益十分可观。最近的统计结果显示,全球 PGEs 产业集中度很高,前四大 PGEs 矿业寡头的地位更为重要,占据全球 Pt 和 Pd 产量约 65%,主要情况如下。

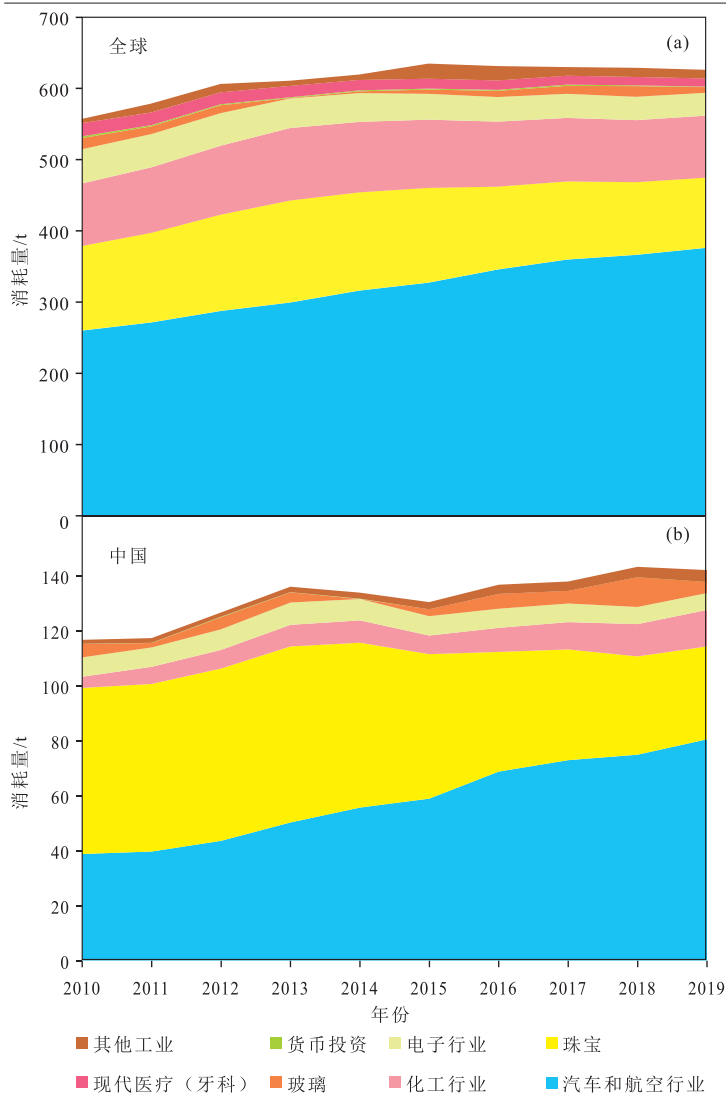


图6 2010—2019年全球PGEs消费(a)和中国PGEs消费(b)(数据据参考文献④⑦)

Fig. 6 Statistical chart showing the consumption of all the world and China from 2010 to 2019

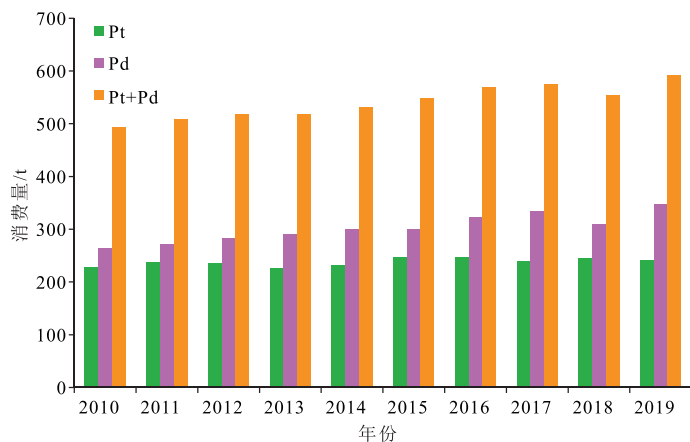


图7 全球PGEs(Pt, Pd)消费量④⑦[11]

Fig. 7 Global PGEs (Pt, Pd) consumption

① SBGL 公司。公司总部位于南非,拥有 30 个 PGEs 项目, Pt 权益储量为 1561.07 t, 权益资源量为 8802.21 t; Pd 权益储量为 863.68 t, 权益资源量为 2568.82 t, 是全球最大的 Pt 金属和第三大 Pd 金属生产公司。2018 年, Pt 和 Pd 产量为 52.81 t 和 26.45 t, 分别占世界总产量的 23.93% 和 11.03%。SBGL 控股矿山主要分布在南非和津巴布韦, 代表性矿山有 Kroondal、Rustenburg、Momosa。2019 年, SBGL 公司 PGEs 矿业勘查投入为 13.50 亿美元, 其中, 南非 1.1 亿美元, 津巴布韦 2.5 亿美元, 南非的勘查投入包含绿地、可研和矿山建设阶段; 津巴布韦的勘查投入为绿地和矿山建设阶段。

② 英美铂业公司。其是全球 PGEs 矿业的引领者, 全球控股 16 个 PGEs 项目, Pt 和 Pd 权益储量分别为 457.84 t 和 974.15 t, Pt 权益资源量分别为 2062.14 t, 为全球第二大的 PGEs 生产公司。2018 年, Pt 和 Pd 产量为 42.59 t 和 32.48 t, 分别占世界总产量的 19.30% 和 13.55%。该公司实际在产矿山 6 个, 其中 Mogalakwena、Amandelbult 和 Joint ventures (控股 50%) 是其产量最大的生产项目, 均位于非洲中南部, 近 3 年产量在 40~50 t 之间。矿山建设阶段是英美铂金矿业公司投入最高的阶段, 在南非和津巴布韦分别为 700 万美元和 200 万美元。

③ 英帕拉铂业控股有限公司。该公司 Pt 和 Pd 权益储量分别为 369.10 t 和 303.26 t, 对应的权益资源量为 2979.11 t 和 1594.35 t, 是全球第三大 Pt 和第四大 Pd 生产公司, 业务主要分布在南非、津巴布韦和加拿大。2019 年, 该公司 Pt 产量为 27.42 t, 占全球总产量的 14.29%, Pd 产量为 14.45 t, 占全球总产量的 6.93%。该公司参股或控股的 PGEs 项目有 20 个, 位于加拿大 (12 个) 和非洲中南部 (7 个)。其中在产项目共 4 个, 均位于非洲中南部, Impala 矿山是在产的最大项目, 近 3 年产量均维持在 20 t; 加拿大项目则主要处于绿地阶段和勘探阶段。2019 年该公司在南非的 PGEs 矿产勘查投入为 110 万美元, 其中可研阶段 9000 万美元, 矿山建设阶段 2000 万美元。

表 4 全球 PGEs 供应量、需求量及全球和中国产业链需求 (数据参考文献④⑦[11])
Table 4 Table showing the supply and demand of global PGEs, the market potential of different PGEs industrial chains in world and China

年份	2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019	
全球 PGEs 金属供应量/t	Pt	Pd	Pt	Pd	Pt	Pd	Pt	Pd	Pt	Pd	Pt	Pd	Pt	Pd	Pt	Pd	Pt	Pd	Pt	Pd
南非	147.7	82.3	147.4	83.5	130.1	74.4	135.9	75.6	100.2	62.5	140.7	82.5	132.9	76.7	133.4	79.9	134.3	79.5	130.7	77.5
俄罗斯	24.4	84.7	25.4	84.1	25	81.6	23	78.6	21.4	80.3	22.4	80.1	21.1	78.6	22	84.9	21.6	83.1	21.2	82
加拿大	4	11	8.4	17.4	6.9	17.3	6.8	16.5	8.7	18	7.5	16.1	8.3	15.9	7.2	14.5	6.6	15.2	6.9	18.3
美国	3.5	11.6	3.7	12.4	3.7	12.3	3.7	12.6	3.7	12.5	3.8	12.6	4	13.1	4.1	13.3	4.2	14.3	4.6	13.7
津巴布韦	8.9	6.9	10.6	8.1	10.4	8	12.7	9.8	12.4	10.1	12.4	10	15	12.1	14.9	12.3	14.9	12.3	14.3	11.3
其他国家	3.9	9.2	3.6	7.8	4.3	8.4	4.9	8.1	4.4	7.6	4.1	7.4	4.2	7.1	4	6.4	3.8	6.4	3.4	6.1
小计	192.3	205.6	199.2	213.4	180.3	202.1	187	201.2	150.7	190.9	190.9	208.8	185.6	203.4	185.6	211.3	185.3	210.7	181.1	208.9
供应总量	397.9	412.6	382.4	388.2	341.6	399.7	389	396.9	396	390										
全球 PGEs 金属需求量/t																				
北美	30.54	63.02	34.99	63.64	36.64	73.62	37.51	80	38.1	79.78	37.11	79.34	37.88	87.93	38.19	90.57	37.85	60.68	39.44	92.84
欧盟	61.12	62.52	62.27	69.11	56.3	67.37	54.37	65.69	58.57	68.12	61.74	71.57	64.76	73.09	61.37	75.11	57.51	75.36	55.95	72.84
日本	32.22	47.81	34.12	44.85	33.65	50.01	22.83	47.77	23.51	47.84	38.07	44.23	36.45	42.98	29.89	43.33	31.41	41.55	30.67	40.43
中国	64.29	52.19	63.73	52.69	70.32	55.58	75.15	60.28	70.73	62.58	69.3	60.68	66.5	69.73	64.66	73.53	67.84	75.3	61.43	80.9
其他地区	40.34	39.56	42.36	38.97	39.22	38.79	36.48	37.95	41.46	41.86	40.78	41.65	42.08	44.29	46.03	47.15	50.36	50.7	55.08	54.43
小计	228.52	265.09	237.47	269.26	236.1	285.4	226.3	291.69	232.4	300.18	247	297.47	247.7	318.03	240.2	329.69	245	303.6	242.57	341.5
需求总量	493.61	506.73	521.51	518.02	532.55	544.46	565.71	569.84	548.57	584.03										
金属 PGEs 产业链需求量/t																				
汽车和航空行业	94.21	165.6	96.86	174.7	92.56	194.8	92.44	206.8	97.1	219	98.19	229	98.47	247.3	99.13	260.4	98.22	268.1	99.78	276.2
珠宝首饰	71.26	24.8	75.39	21	81.06	18.6	85.63	16.4	83.2	15	81.24	10.2	72.75	9.2	69.52	8.9	66.09	8.3	64.69	8.1
化工行业	76.48	18.4	79.87	17.6	84.97	17	88.96	15.9	87	14.8	84.23	14	76.95	13.3	74.87	12.7	71.48	12.1	71.04	11.4
电子行业	8.8	11.5	7.96	12	7.06	11.8	6.28	12.7	6.07	12	5.69	11.6	5.54	14.3	6.13	14.6	7.22	15.7	7.43	16.2
玻璃	15.71	39.2	10.51	38.9	11.23	38.6	0.68	35.3	2.21	34.5	5.88	30.8	8.71	29.2	10.92	27.7	14.9	25.6	7.9	24.6
货币投资	15.36	2.5	17.39	1.9	19.32	1.2	20.19	1.2	21.77	1.4	20.68	1.4	22.61	1.4	23.27	1.7	24.07	1	25.01	0.9
其他工业	2.95	2.8	9.7	3.1	8.77	3.1	4.23	3.1	4.39	3.2	18.1	3.2	17.11	3.1	9.21	3.1	9.67	3.1	8.93	3.2
小计	284.77	264.8	297.68	269.2	305	285.1	298.4	291.4	301.7	299.9	314	300.2	302.1	317.8	293.1	329.1	291.7	333.9	284.78	340.6
中国 PGEs 产业链需求量/t																				
汽车和航空行业	6.7	32.1	5.7	34	5.4	38.2	6.7	43.6	7.9	47.8	7.1	51.8	8	60.8	9.1	63.8	9.2	65.7	9.6	70.9
珠宝首饰	47.6	12.8	50.4	10.6	54.3	8.4	57.6	6.4	54.7	5.3	51.7	0.9	43.4	0.1	40.2	0.1	35.8	0	33.8	0
现代医疗	2.7	0.1	4.1	0.1	4.3	0.1	4.8	0.1	5.7	0.1	5.1	0	6	0	6.1	0	7.2	0	8.3	0
化工行业	1.2	1.4	1.1	2.1	1.1	2.4	1	3.1	0.9	2.4	0.8	1.7	0.8	2.8	0.9	3.9	0.9	4.5	0.9	5
电子行业		5.8		5.9		6.4		7.1		6.9		6.2		6.1		5.8		5.4		5.2
玻璃	4.9		1.7		4.5		3.7		0		2.6		5.5		4.6		10.8		4.1	
其他工业	1.3	0.1	1.6	0.1	1.6	0	1.9	0.1	2.1	0.1	2.5	0.1	3.2	0.1	3.4	0.1	3.7	0.1	4.2	0.1
小计	64.4	52.3	64.6	52.8	71.2	55.5	75.7	60.4	71.3	62.6	69.8	60.7	66.9	69.9	64.3	73.7	67.6	75.7	60.9	81.2

表 5 2019 年全球和中国主要 PGEs 矿业公司的产量及排名^⑦

Table 5 Table showing the major PGEs mining company in world and China ,and also showing their production in 2019

公司(国家)	Pt 金属			Pd 金属		
	产量/t	全球比重	全球排名	产量/t	全球比重	全球排名
全球顶级 PGEs 矿业公司						
Sibanye-Stillwater Ltd.(南非)	52.81	27.52	1	26.45	12.69	3
Anglo American Platinum Ltd.(南非)	42.59	22.20	2	32.48	15.58	2
Impala Platinum Holdings Ltd.	27.42	14.29	3	14.45	6.93	4
PJSC MMC Norilsk Nickel(俄罗斯)	20.35	10.60	4	84.14	40.37	1
Lonmin Plc(英国)	17.20	8.97	5	7.35	3.53	7
Northam Platinum Ltd.(南非)	9.26	4.83	6	5.26	2.52	10
Zimplats Holdings Ltd.(津巴布韦)	8.40	4.38	7	6.66	3.19	9
Royal Bafokeng Platinum Ltd.	7.43	3.87	8	3.08	1.48	12
African Rainbow Minerals Ltd.(南非)	4.69	2.44	9	4.17	2.00	11
Vale S.A.(巴西)	4.20	2.19	10	6.78	3.25	8
Incwala Resources(Pty) Ltd.	3.78	1.97	11	1.61	0.77	14
Glencore Plc(瑞士)	3.46	1.80	13	9.42	4.52	5
Impala Canada Ltd.(加拿大)	0.51	0.27	22	7.55	3.62	6
中国主要 PGEs 矿业公司						
金川集团股份有限公司	1.28	0.67	18	0.75	0.36	18
云南黄金矿业集团股份有限公司	0.49	0.25	24	0.83	0.4	17
新疆新鑫矿业股份有限公司	0.12	0.06	34	0.02	0.01	29

④ PJSC MMC Norilsk Nickel。该公司主营地区为俄罗斯 Polar Division 和 Taimyr 半岛,拥有世界最大的 Pd 权益资源量,并拥有全球最大 Pd 生产商的地位和全球第四大 Pt 金生产商。2018 年,该公司 Pd 和 Pt 产量分别为 84.14 t 和 20.35 t,分别占全球比重的 35.10% 和 9.22%(表 5)。该公司从西伯利亚的 Noril'sk-Talnakh 地区到 Kola 半岛的铜镍硫化矿床中生产的 PGEs 约占俄罗斯的 95%。Polar、Kola 和 Finland 是其控股生产项目。

3 中国 PGEs 资源分布特征和开发利用现状

3.1 成因类型、时代和分布规律

截止 2019 年底,中国探明 PGEs 矿产资源量仅 954.49 t,不足全球探明资源储量 1%,远不能满足经济发展的需要^[45]。在已探明的 PGEs 储量中,Pt+Pd 储量大于 370 t,占总储量的 38.76%,位居世界第六位,主要分布在甘肃,其次为云南、四川、新疆、黑龙江、青海和河北,少数在宁夏、广西和辽宁。就产出环境而言,中国 PGEs 矿床主要产出在碰撞造山带

环境的基性—超基性侵入体内(金川、宝山、喀拉通克)、克拉通内部或边缘的基性—超基性层状杂岩体,以及与地幔热点有关的大岩浆省(金宝山、新街、红格)内。在空间分布上,与基性—超基性岩带,寄宿的 Cu、Ni、Cr、Ti 及有色金属矿体有成因联系。

就矿床类型而言,中国 PGEs 矿床基本囊括了岩浆型、热液型和外生沉积型 3 种大类,95% 以上的储量与岩浆矿床有关^[46-58](表 6)。根据共生矿物的特征,岩浆矿床可细分为铜镍硫化物(如金川)、铬铁矿型(如罗布莎)和钒钛磁铁矿型(如新街、红格)(表 6)。其中,铜镍型矿床的储量占中国探明储量的绝对优势地位(< 90%),突出表现在中国大型 PGEs 矿床主要为与基性—超基性岩体有关的铜镍硫化物型矿床,与世界级大型—超大型 PGEs 相同(如金川、金宝山)^[46-55]。就矿床品位和矿石品质而言,中国 PGEs 矿床的品位明显偏低,平均品位为 0.796×10^{-6} ,远低于世界级 PGEs 矿床。就成矿时代而言,中国 PGEs 矿床成矿时代跨度大,从前寒武

纪—新生代均有产出。综上所述,中国 PGEs 矿产资源的分布特征有:①资源储量较小,产出形式多为伴生矿种,缺乏单一的 PGEs 矿床,尚不能作为工业矿床单独进行开采,生产能力受限;②中国铂族元素地质勘查和研究程度较低,对规模较大的基性—超基性岩体开展含 PGEs 性综合评价工作不足;③成矿时代跨度大,成矿时代较新,与世界级含 PGEs 矿床相比,成矿时代有明显差异。

3.2 中国主要矿业企业

尽管中国 PGEs 矿床类型多样、分布广泛,但具有经济意义的大中型 PGEs 矿床十分稀缺。大型 PGEs 矿山仅限甘肃金川和云南金宝山,主要从铜镍矿体开发综合回收 PGEs。因此,中国真正建立 PGEs 的冶金工业始于金川有色金属公司投产。其控股的金川 PGEs 矿床金属储量约占全国总储量的 50%,是中国最重要的 PGEs 供应基地。2018 年,其 Pt 和 Pd 产量为 1.28 t 和 0.75 t,在全球均排名 18 位(表 5)。云南黄金矿业是中国第二大 PGEs 矿业公司,主要控制中国西南省份矿山,其 2018 年 Pt 和 Pd 产量为 0.49 t 和 0.83 t。此外,新疆新鑫矿业也产出一定量的 PGEs,2018 年 Pt 和 Pd 产量分别为 0.12 t 和 0.02 t。需要指出的是,开展循环经济,进行矿产资源综合利用,是中国充分利用低品位 PGEs 矿产资源的必由之路。

总体而言,国内中大型 PGEs 矿床数量少,严重制约了 PGEs 上游产业的发展,供需矛盾突出。因此,PGEs 矿产资源生产能力受到一定的限制,远远满足不了国内的消费需求量。寻求新的 PGEs 生产基地和“走出去”战略,逐步提升 PGEs 生产的能力应引起重视。

4 中国 PGEs 资源消费现状与趋势

4.1 中国 PGEs 消费量和主要进口源

近 10 年,中国逐步替代日本、欧盟,成为全球最大的消费国和进口国,对外依存度高达 98%(表 4)。具体而言,2016—2019 年期间,中国 Pt 和 Pd 金属的消费总量分别为 193.93 t 和 229.73 t,对应的年均消费量为 64.64 t 和 76.57 t,均高于世界其他国家。其中,Pt 金属的消费量稳居世界第一,占全球 Pt 消费量的 26.65%;Pd 的消费量接近北美地区(年均 81.37 t),占世界 Pd 消费量的 23.57%。为保证 PGEs 的供需平衡,将从国外大量进口 PGEs 矿产资

源,进口国主要为南非、俄罗斯、日本和津巴布韦。

4.2 主要消费领域

中国 PGEs 产业链完善,几乎囊括了全球重要的 PGEs 相关产业,其消费行业主要有:①汽车和航空行业,近 10 年,该行业 PGEs 消耗量呈快速增长的趋势,由 2010 年的 38.8 t 增加到 80.5 t,增加了 107.47%,所占比重由原来的 33.25% 增至 56.65%,接近世界平均消费水平(59.88%)。②首饰珠宝和投资行业,该行业消耗 PGEs 呈现大幅下降的趋势,由 2010 年的 60.4 t 下降到 2019 年的 33.8 t,降低了 44.04%,远高于世界平均消费水平(16.12%)。③化工行业,该行业消耗 PGEs 量呈现不断增长的趋势,由原来的 4.1 t 增至 13.3 t,增长了 3.24 倍,所占比重提高到 9.36%,逐步接近世界平均水平(13.89%)。④电子行业,该行业近 10 年 PGEs 消耗量呈现倒“U”字形产出,2013 年是近 10 年的峰值(8.1 t)。⑤玻璃制造业,该行业 PGEs 消耗量呈现出“V”字形展布,年度消费量变化较大,年度消耗量为 4.24 t。⑥现代医疗(牙科),现代医疗 PGEs 消耗量极少,2015 年以来消耗量均小于 1 t,低于世界平均消费水平。⑦其他行业,PGEs 产业链近 10 年不断延伸,其他行业消耗量由 1.4 t 增加到 4.3 t,增长率为 207.14%(图 6-b)。

4.3 消费趋势分析

2020 年是“十三五”收官之年,又遭遇 COVID-19 新冠肺炎世界大流行事件和贸易保护主义,中国经济总体形势以稳为主。因此,近 3 年是去产能、去库存叠加消费增速下滑的关键时期,与 PGEs 消费相关的汽车和航空行业、首饰和投资、化工、电子等产业将面临严峻考验。预计在短期内(2020—2023 年),上述产业仍处于弱市波动阶段,2024 年后,将开启新一轮高速增长,PGEs 的消费也随着上述产业的复苏再次增加。

(1)汽车和航空工业与 PGEs 的消费量。中国是全球最大的消费市场和汽车产出国,而汽车是 PGEs 最大的终端需求领域。2010—2018 年,汽车单车 PGEs 消费量呈现不断增加的趋势,由 2010 年的 1.964 g/辆增加到 2019 年的 3.130 g/辆。随着 China 6 汽车尾气排放标准的实施,单车 PGEs 消耗量可能也会有所增加。具体而言,汽车类型、体积和动力会影响汽车单车 PGEs 需求量:①柴油和汽油车系。柴油发动机的催化剂成本将大幅增加,PGEs

表 6 中国主要的 PGEs 矿床
Table 6 The major PGEs deposits in China

矿床类型	产出环境	矿床名称(省份)	赋矿岩体	矿化类型	矿石储量@品位	成矿时代	资料来源
岩浆型	铜镍硫化物型	碰撞造山环境的侵入体	金川(甘肃)	橄榄岩	Cu-Ni-PGEs	200.67 t PGEs @ $0.2\times 10^{-6}\sim 4\times 10^{-6}$	1509~1526 Ma [46]
		峨眉山地幔热点	金宝山(云南)	辉石岩	PGEs-Cu-Ni	48.4t @ 1.5×10^{-6}	255±4 Ma [47]
		碰撞造山环境的侵入体	喀拉通克(新疆)	角闪橄榄苏长岩	Cu-Ni-PGEs	3.9 t @ 2.3×10^{-6}	281~290 Ma [48-50]
	钒钛磁铁矿型	峨眉山地幔热点	安益(云南)	超基性岩、基性杂岩	Cu-Ni-PGEs	9.6 t @ $1.22\times 10^{-6}\sim 2.56\times 10^{-6}$	250~259 Ma [51-52]
		峨眉山地幔热点	荒草沟(云南)	超基性岩、基性杂岩	Cu-Ni-PGEs	5.34tPGEs@ 0.88×10^{-6}	250~259 Ma [51-52]
		峨眉山地幔热点	朱布(云南)	超基性岩、基性杂岩	Cu-Ni-PGEs	5.92t @ 0.95×10^{-6}	259~261 Ma [51]
	铬铁矿型	中亚造山带	五星(黑龙江)	铁质超基性岩	Cu-Ni-PGEs	8.33 t PGEs@ 0.78×10^{-6}	35~40 Ma [51,53]
		峨眉山地幔热点	杨柳坪(四川)	铁质基性-超基性岩	Cu-Ni-PGEs	27.98 t PGEs @ 0.49×10^{-6}	249~251 Ma [51]
		峨眉山地幔热点	新街、红格(四川)	辉长岩	Cu-Ni-PGEs	品位低,副产品	260 Ma [54]
		蛇绿岩套	罗布莎	镁铁质—超镁铁质岩、科马提岩	Cr-Fe-Cu-Ni-PGEs	品位低,副产品	中新世代 [55]
热液型		碰撞造山环境的侵入体	大道尔吉(甘肃)	蛇绿岩	Cr-Fe-Cu-Ni-PGEs	NA	463±1 Ma [55]
	斑岩型	岛弧和大陆边缘	德兴(江西)、玉龙(西藏)、多宝山(内蒙古)	花岗斑岩、石英斑岩、花岗闪长岩	Cu-Au-PGEs	$0.01\times 10^{-6}\sim 0.03\times 10^{-6}$	NA [56]
	砂卡岩型	大陆边缘	铜录山、铜山口(湖北)	酸性或基性侵入岩与碳酸盐岩接触带	Cu-Au-PGEs	$0.17\times 10^{-6}\sim 1.8\times 10^{-6}$	NA [57]
	中低温热液型	大陆边缘	三道沟(河北)、金山(江西)	蚀变岩、石英脉	Au-PGEs	$0.5\times 10^{-6}\sim 3\times 10^{-6}$ (三道沟)	燕山期 [58]
沉积成因	黑色岩系型	前陆盆地	大庸、慈利、盐源官房沟、峨眉龙池等	含炭(硅)质黑色页岩	Au-PGEs	$0.04\times 10^{-6}\sim 0.43\times 10^{-6}$	NA [58]
	砂矿型	前陆盆地	阿拉坦哈拉、酸刺沟、红坑等	现代河床、	Au-PGEs	$0.006\times 10^{-6}\sim 0.04\times 10^{-6}$	新生代 [56]

单车消耗量 5~10 g,而对应的柴油插电式混合动力车和柴油混合动力车单车 PGEs 消耗量基本相当;传统的汽油车以及对应的插电式和混合动力车单车消耗 PGEs 量为 2~5 g。考虑到技术进步,未来 10 年,中国柴油和汽油车系平均单车 PGEs 消耗量预测在 2.7~3.6 g 之间,其 PGEs 消耗量预测为 83.24~110.99 t 之间。如果以单车消耗量 3 g 计算,PGEs 消耗总量为 92.49 t(表 7)。②清洁能源车系。

表 7 未来十年中国汽车工业 PGEs 消耗量预测
Table 7 Forecast of PGEs consumption in China's automobile industry in the next decade

年份	产量/万辆	预测单车 PGEs 消耗量/(g·辆 ⁻¹)				
		2.7	3	3.2	3.4	3.6
柴油和汽油车系消耗 PGEs 量/t						
2026 年	3083	83.241	92.49	98.656	104.822	110.988
2030 年	3112	84.024	93.36	99.584	105.808	112.032
清洁能源车系消耗 PGEs 量/t						
年份	产量/ 万辆	预测单车消耗量/(g·辆 ⁻¹)				
		7.5	12.5	15	17.5	20
2026 年	30	2.25	3.75	4.5	5.25	6
2030 年	60	4.5	7.5	9	10.5	12
合计	产量/万辆					
2026 年	3113	85.491	96.24	103.156	110.072	116.988
2030 年	3172	88.524	100.86	108.584	116.308	124.032

注:汽车数量和单车 PGEs 的消耗量预测数据参考文献⑧⑨

电池电动车(BEV),为清洁能源车系之一,基本不消耗 PGEs;燃料电池汽车单车 PGEs 耗量则远高于传统车辆,单车消耗 PGEs 量为 10~20 g。目前,国内技术水平维持在单车 PGEs 耗为 0.3 g/kW,远低于丰田等顶级车企的商业化车型用量[0.17g/kW(约 20 g/辆)],海外最新研究成果[0.06g/kW(约 7.06 g/辆)],以及美国能源局研发的单车耗量[0.125 g/kW(14.7 g/辆)]。假设中国燃料电池汽车能实现或接近目前世界先进水平,单车 PGEs 耗量为 7.5~27.5 g/辆,其 PGEs 未来 10 年的消耗量则为 4.5~12 t(表 7)。

综上所述,预计 2026 年底,中国汽车车辆达 3183 万辆(含 100 万辆新能源),以柴油和汽油车系单车 PGEs 消耗量为 3 g 计算,PGEs 消耗总量为 92.49 t,清洁能源车系单车消耗量 12.5 g(渗透率 0.05%),则其消耗量为 3.7512.5 t,两者之和为 96.24 t。仍以以上系数预测,2030 年,中国 PGEs 消耗量为 100.86 t(表 7)。

(2)珠宝首饰与 PGEs 的消费量。珠宝首饰曾是中国 PGEs 消费的最大领域,一直维持在 40% 以上。然而近 10 年来,中国“白色首饰”仍缺乏明确的市场定位,其消费量则呈现较大跌幅。借鉴日本等发达国家,“白色首饰”的消费与人均 GDP、人口总量、20~30 岁人群数量关系密切^[59]。考虑到中国经济长期向好的基本态势仍未改变,20~30 岁的人群数量较高,“二孩”政策的全面放开等因素,中国

珠宝首饰消耗 PGEs 的数量可能回到历史高位。预计 2026 年和 2030 年底,中国“白色首饰”的 PGEs 消耗量分别为 40 t 和 60 t。

(3)化工行业与 PGEs 的消费量。与世界消费占比相比,中国化工行业 PGEs 消费量仍然偏低。由于中国日益趋紧的环境政策,中国化工行业 PGEs 消费量将接近世界水平。因此,以近 3 年年均消费量为基准,未来 10 年,其消耗量将在 16~20 t。

(4)玻璃制造业、电子工业与 PGEs 的消费量。近 10 年,中国玻璃制造业 PGEs 消耗量呈现出“V”字形展布,年平均消耗量为 4.24 t。随着产业转移的加快,中国玻璃制造业 PGEs 的消耗量可能呈现下降趋势,接近近 10 年的平均消耗值。尽管中国电子工业近 3 年呈现出下降趋势,但航空航天、大飞机制造等行业的快速发展,PGEs 消耗量在未来 10 年将呈现出一定的增长,但其消费总量可能不超过 10 t,基本维持在 4~5 t。

5 结论与思考

5.1 结 论

(1)全球 PGEs 资源总量稀缺,且空间分布不均,而中国是 PGEs 资源“小国”,其对外依存度极高(约 98%)。

(2)勘查数据显示,全球 PGEs 矿产资源勘查进入调整周期,找矿成效呈现降低趋势,指示未来 10 年的供应量可能不会有明显增长。

(3) 中国中大型 PGEs 矿床数量稀缺, 严重制约中国 PGEs 上游产业的发展。就全球大型—超大型 PGEs 矿床的产出环境和成因类型而言, 中国具有开发潜力的地方为新疆、甘肃、青海、四川等地。

(4) 中国 PGEs 产业链完整, 未来 5 年和 10 年的需求量将明显增加, 预计消费总量将达到 160~185 t。预计 2030 年, 中国汽车行业 PGEs 消耗量约为 100 t, 珠宝首饰维持在 40~60 t, 化工行业和玻璃制造业的消耗量将分别在 16~20 t 和 4~5 t 之间。然而, 国内 PGEs 矿山的产量难以在短时间内上升, 供需缺口将进一步扩大。

5.2 思考

PGEs 矿产资源的安全供应可能成为中国战略性新兴产业可持续发展的关键环节, 建立相应的国家 PGEs 战略储备机制。积极推行国家储备和民间储备相结合, 运用财政、金融等手段, 并鼓励企业储备, 以防止国际市场的突变, 提升中国 PGEs 的国内供应保障能力。与世界勘查投入相比, 中国 PGEs 的勘查活动也呈现出低位波动期, 因此应加强 PGEs 矿产潜力调查评价与规划, 摸清其成矿资源潜力, 为科学决策提供必要的地质资料。

加大国内 PGEs 资源勘查的同时, 中国需坚持“走出去”战略, 主要突破点有两点, 其一, 加强国家在 PGEs 获取方面的合作, 尤其可以借助金砖国家组织和中非合作论坛, 加强与俄罗斯、南非和津巴布韦之间的合作, 以保障 PGEs 资源供应的安全。其二, 积极培育具有国际竞争力的 PGEs 企业, 推动在全球 PGEs 勘查与开发, 尤其在非洲中南部和远东地区产出有大火山岩省的国家或地区, 开展资源潜力、开发条件、投资环境等综合评价, 综合运用财政、税收、金融等多种政策手段, 优化境外 PGEs 矿产资源的战略布局。

致谢:在数据收集和图件绘制过程中, 得到河北地质大学郭襄博士的大力帮助, 自然资源部信息中心闫卫东教授级高工对文章做了大量修改, 在此表示感谢。

参考文献

- [1] 余韵, 薛迎喜, 张福良. 国外关键矿产管理策略与借鉴[J]. 地质战略研究, 2019, 21(3): 1-19.
- [2] 侯增谦, 陈骏, 翟明国. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J]. 科学通报, 2020, 33(65): 3651-3652.
- [3] 王焰, 钟宏, 曹勇华, 等. 中国铂族元素、钼和铬主要矿床类型的分布特征及成矿机制[J]. 科学通报, 2020, 33(65): 3825-3838.
- [4] Cabri L J. The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements: Montreal, Quebec, Canada. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum Special Volume, 2002, 54: 13-130.
- [5] Frost D J, Mc Cammon C A. The redox state of earth's Mantle [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2008, 36: 389-420.
- [6] Naldrett A J, Hoffman E L, Green A H. The composition of Ni-sulfide ores, with particular reference to their content of PGE and Au [J]. Canadian Mineralogist, 1979, 17(2): 403-415.
- [7] Barnes S J, Naldrett A J, Gorton M P. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas [J]. Chemical Geology, 1985, 53: 303-323.
- [8] Peregoedova A, Barnes S J, Baker D R. The formation of Pt-Ir alloys and Cu-Pd-rich sulfide melts by partial desulfuration of Fe-Ni-Cu sulfides: results of experiments and implications for natural systems [J]. Chemical Geology, 2004, 208(1/4): 247-264.
- [9] Ambre L, Shirey S B, Lorand J P. Residual platinum-group minerals from highly depleted harzburgites of the Lherz massif (France) and their role in HSE fractionation of the Mantle [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(12): 3082-3097.
- [10] Coffin M F, Eldholm O. Large igneous provinces—Crustal structure, dimensions, and external consequences [J]. Reviews in Geophysics, 1994, 32(1): 1-36.
- [11] Schulz K J, De Young J H, Seal R R, et al. Critical mineral resources of the United States: economic and environmental geology and prospects for future supply: Platinum-Group Elements [M]. U. S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey, 2018: 1-89.
- [12] Scoates J S, Friedman R M. Precise age of the platiniferous Merensky Reef, Bushveld Complex, South Africa, by the U-Pb zircon chemical abrasion ID-TIMS technique [J]. Economic Geology, 2008, 103: 465-471.
- [13] Malitch K N, Badanina I Y, Belousova E A, et al. Results of U-Pb dating of zircon and baddeleyite from the Norilsk-1 ultramafic-mafic intrusion (Russia) [J]. Russian Geology and Geophysics, 2012, 53(2): 123-130.
- [14] Oberthür T, Davis D W, Blenkinsop T G, et al. Precise U-Pb mineral ages, Rb-Sr and Sm-Nd systematics for the Great Dyke, Zimbabwe constraints on Late Archean events in the Zimbabwe craton and Limpopo belt [J]. Precambrian Research, 2002, 113(3/4): 293-305.
- [15] Premo W R, Helz R T, Zientek M L, et al. U-Pb and Sm-Nd ages for the Stillwater complex and its associated sills and dikes, Beartooth Mountains, Montana—Identification of a parent magma? [J]. Geology, 1990, 18(11): 1065-1068.
- [16] Hoaglund S A. U-Pb geochronology of the Duluth Complex and related hypabyssal intrusions—Investigating the emplacement history of a large multiphase intrusive complex related to the 1.1 Ga midcontinent rift [M]. Minneapolis, Minn., University of Minnesota M.S., 2010: 112.
- [17] Nitkina E A. U-Pb zircon dating of rocks of the platiniferous Fedorova-Pana layered massif, Kola Peninsula [J]. Doklady Earth Sciences, 2006, 408(1): 551-554.

- [18] Bailly L, Augé T, Cocherie A, et al. New data on the age of the Burakovsky layered intrusion, Karelia [J]. *Doklady Earth Sciences*, 2009, 426(1): 534–538.
- [19] Mortensen J K, Hulbert L J. A U–Pb zircon age for a Maple Creek gabbro Sill, Tatamagouche area, southwest Yukon Territory [J]. *Geological Survey of Canada Paper*, 1992, 2: 175–179.
- [20] Corfu F, Lightfoot P C. U–Pb geochronology of the sublayer environment, Sudbury igneous complex, Ontario [J]. *Economic Geology*, 1996, 91: 1263–1269.
- [21] Hamilton M A, Brooks C K. A precise U–Pb zircon age for the Skaergaard intrusion—magmatic cooling history refinement and Paleogene igneous correlations, East Greenland [J]. *American Geophysical Union*, 2004, 32: 1–100.
- [22] Maier W D, Barnes S J, Gartz V, et al. Pt–Pd reefs in magnetitites of the Stella layered intrusion, South Africa—A world of new exploration opportunities for platinum–group elements [J]. *Geology*, 2003, 31(10): 885–888.
- [23] Coffin M F, Eldholm O. Large igneous provinces—Crustal structure, dimensions, and external consequences [J]. *Reviews in Geophysics*, 1994, 32(1): 1–36.
- [24] Ripley E M, Lightfoot P C, Li C S, et al. Sulfur isotopic studies of continental flood basalts in the Noril'sk region: Implications for the association between lavas and ore-bearing intrusions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(15): 2805–2817.
- [25] 胡素芳, 钟宏, 刘秉光, 等. 攀西地区红格层状岩体的地球化学特征 [J]. *地球化学*, 2001, 30(2): 131–139.
- [26] 汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比 [M]. 北京: 地质出版社, 1995: 14–209.
- [27] 秦克章, 汪东波, 王之田, 等. 中国东部铜矿床类型、成矿环境、成矿集中区与成矿系统 [J]. *矿床地质*, 1990, 18(4): 359–371.
- [28] 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 等. 新疆哈密黄山地区铜镍硫化物矿床的稀土元素特征及意义 [J]. *岩石学报*, 2004, 20(4): 935–948.
- [29] 孙赫, 秦克章, 李金祥, 等. 东天山图拉尔根铜镍钴硫化物矿床岩相、岩石地球化学特征及其形成的构造背景 [J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 157–168.
- [30] 王京彬, 王玉往, 何志军. 东天山大地构造演化的成矿示踪 [J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 461–469.
- [31] Barnes S J, Lightfoot P. The formation of magmatic Ni–Cu–PGE sulfide deposits [J]. *Economic Geology*, 2005, 190: 135–154.
- [32] 唐冬梅, 秦克章, 刘秉光, 等. 铂族元素矿床的主要类型、成矿作用及研究展望 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(3): 569–588.
- [33] Armitage P E B, McDonald I. Platinum–group element mineralization in the Platreef and calcilicite footwall at Sandsloot, Potgietersrus District, South Africa [J]. *Trans. Inst. Min. Metall.*, 2002, 111: 36–45.
- [34] Maier W D, Barnes S J, Ashwal L D, et al. A reconnaissance study on the magmatic Cu–Ni–PGE sulphide potential of the Tete Complex, Mozambique [J]. *South African Journal of Geology*, 2001, 104(4): 355–364.
- [35] Zientek M L, Cooper R W, Corson S R, et al. Platinum–group element mineralization in the Still–water Complex, Montana [C]// Cabri L J. The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum–group elements, Montreal, Quebec, Canada. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 2002, 54: 459–481.
- [36] Penberthy C J, Merkle R K W. Lateral variations in the platinum–group element content and mineralogy of the UG2 chromitite layer, Bushveld Complex [J]. *South African Journal of Geology*, 1999, 102(3): 240–250.
- [37] Olivo R G, Theyer P. Platinum–group minerals from the McBratney PGE–Au prospect in the Flin Flon greenstone belt, Manitoba, Canada [J]. *Canadian Mineralogist*, 2004, 42: 667–681.
- [38] Tarkian M, Koopmann G. Platinum–group minerals in the Santo Tomas II (Philex) porphyry copper–gold deposit, Luzon Island, Philippines [J]. *Mineralium Deposita*, 1995, 30(1): 39–47.
- [39] Pan Y M, Xie Q L. Extreme fractionation of platinum group elements in volcanogenic massive sulfide deposits [J]. *Economic Geology*, 2001, 96: 645–651.
- [40] Distler V V, Yudovskaya M A, Mitrofanov G L, et al. Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia [J]. *Ore Geology Reviews*, 2004, 24: 7–44.
- [41] Shcheka G G, Vrzheok A A. Associations of platinum group element minerals from the zolotaya gold placer, Primorye, Russian Far East [J]. *Canadian Mineralogist*, 2004, 42: 583–599.
- [42] 裴荣富, 梅燕雄, 瞿泓滢, 等. 大型–超大型矿床找矿新认知 [J]. *矿床地质*, 2013, 32(4): 661–664.
- [43] 王丰翔, 裴荣富, 江思宏, 等. 碱性岩相关铜–金(铂)矿床的研究进展 [J]. *地质通报*, 2017, 36(01): 140–153.
- [44] 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.
- [45] 中华人民共和国国土资源部. 中国矿产资源报告 [M]. 北京: 地震出版社, 2019: 1–90.
- [46] 汤中立. 中国镁铁、超镁铁岩浆矿床成矿系列的聚集与演化 [J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 113–119.
- [47] Zhou M F, Yang Z X, Song X Y, et al. Magmatic Ni–Cu–(PGE) sulphide deposits in China. The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum group elements [J]. *Can. Inst. Min. Metall. Spec.*, 2002, 54: 619–636.
- [48] 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等. 新疆北部 Cu–Ni–(PGE) 硫化物矿床成矿系列探讨 [J]. *矿床地质*, 2000, 19(2): 147–155.
- [49] 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 中国超大型镍铜铂岩浆硫化物矿床预测 [M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1–50.
- [50] 冯延清. 新疆喀拉通克晚古生代镁铁质岩体铜镍成矿作用与地球动力学背景 [D]. 长安大学博士学位论文, 2018.
- [51] 来雅文. 岩浆硫化铜镍型铂(铂族)矿床类型、分布与峨嵋玄武岩铂钼赋存状态研究 [D]. 吉林大学博士学位论文, 2006, 1–200.
- [52] Zhong Y T, He B, Mundil R Y. CA–TIMS zircon U–Pb dating of felsic ignimbrite from the Binchuan section: Implications for the termination age of Emeishan large igneous province [J]. *Lithos*, 2014, 204: 14–19.
- [53] 李光辉, 孙景贵, 黄永卫, 等. 黑龙江鸡东五星铂钼矿床含矿岩体的

- 锆石 U-Pb 年龄及其他地意义[J].世界地质,2010,29(1): 28-32.
- [54] Zhong H, Prevec S A, Wilson A H. Trace-element and Sr-Nd isotopic geochemistry of the PGE-bearing Xinjie layered intrusion in SW China[J]. Chemical Geology, 2004, 203: 237-252.
- [55] 王登红, 应立娟, 王成辉, 等. 中国贵金属矿床的基本成矿规律与找矿方向[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 71-81.
- [56] 耿林, 翟裕生, 彭润民. 中国铂族元素矿床特征及资源潜力分析[J]. 地质与勘探, 2007, 43(1): 1-7.
- [57] 王登红, 应汉龙, 骆耀南, 等. 试论与布什维尔德杂岩体有关的铂族元素-铬铁矿床成矿系列及其对中国西南部的意义[J]. 地质与资源, 2002, 11(4): 243-249.
- [58] 王登红. 中国西南铂族元素矿床地质、地球化学与找矿[M]. 地质出版社: 北京, 2007: 1-200.
- [59] 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.
- ① 美国内政部(USDI).《美国关键矿产目录清单(2018)》.2018.
- ② 欧盟委员会(European Commission).《2017 年关键原材料目录清单研究》.2017.
- ③ 欧盟委员会(European Commission).《2020 年关键原材料目录清单研究》.2020.
- ④ U. S. Geological Survey (USGS). Minerals Information. 2016-2019. [EB/OL] (2019-12) [2020-12] [http:// minerals. usgs. Gov / minerals / pubs / commodity/](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/).
- ⑤ Geological Survey of Finland. Platinum-group elements in Finland: Geological Survey of Finland database, 2011.
- ⑥ Baker C L, Kelly R I, Parker J. R., et al. Summary of field work and other activities 2003, with a section on regional geology of the Lac des Iles area, by Stone, D., Lavigne, M. J., Schnieders, B., Scott, J., and Wagner, D.: Ontario Geological Survey Open File Report 6120, 15-1 to 15-25.
- ⑦ S&P global market intelligence, Commodity Detail (SPGMI)/PLATINUM and Palladium, 2020. <https://platform.mi.spglobal.cn/web>.
- ⑧ 汽车产业中长期发展规划. 工信部联装[2017] 53 号. 2017.
- ⑨ 新能源汽车产业发展规划(2021—2035 年)(征求意见稿). 工业和信息化部装备工业司. 2019.