doi: 10.12097/gbc.2022.03.039

"双碳"背景下的清洁能源资源——钍

冯云磊¹,张万益²*,于维满³,陈骥²,方圆²,王丰翔¹ FENG Yunlei¹, ZHANG Wanyi²*, YU Weiman³, CHEN Ji², FANG Yuan², WANG Fengxiang¹

1. 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;

2. 中国地质调查局发展研究中心,北京100037;

3. 河北省地质矿产勘查开发局第一地质大队, 河北 邯郸 056106

1. Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China;

2. Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

3. No.1 Geological Team of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Handan 056106, Hebei, China

摘要:放射性元素钍(Th)有较广泛的工业用途,含钍核燃料清洁且高效,在"双碳"背景下得到了越来越多的关注。然而,世界 范围内钍资源的分布、生产和消费却极不均衡,因此亟需在资源-经济-环境系统中对钍资源分布格局和特征进行分析研究,建 立全面认识。通过梳理钍资源的勘查开发、生产加工及消费贸易数据,对中国和全球钍资源类型、分布、供需和消费形势展开分 析,明确钍在资源-经济-环境系统中的流动特征,并对资源发展规划提出建议。研究表明,全球钍资源丰富却分布不均,主要以 砂矿类型集中于印度、巴西等少数国家,而中国钍矿资源以碳酸岩型和碱性岩型为主,资源丰富但缺少准确的勘查数据;钍主要 来自于砂矿型独居石的采选和冶炼,工艺成熟,近10年全球钍产量呈波动上涨趋势;根据钍的流向分析,钍金属及其化合物主要 应用于能源、材料、冶金、医学等领域,而钍的环境排放集中于矿石采选过程。鉴于钍核燃料的发展潜力,未来钍产量上升空间较 大,能源领域的应用将更加广泛。中国优势钍矿床类型有别于其他国家,且亟需系统全面的资源调查工作,在"双碳"目标要求 下,开展钍提取工艺技术的创新与推广,合理规划发展钍基核电技术,具有重大的环境和经济意义。

关键词:Th 元素;独居石;矿产资源;绿色能源;双碳目标

中图分类号: P619.13 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2024)01-0101-16

Feng Y L, Zhang W Y, Yu W M, Chen J, Fang Y, Wang F X. Thorium: A kind of clean energy resource for "dual carbon" goals. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(1): 101–116

Abstract: Thorium is a kind of radioactive element of multiple industrial uses. Due to China's "dual carbon" goals, it attracts lots of attention in recent years because of its cleaner and more effective performance than uranium in nuclear power reactors. However, the distribution of thorium ore resources is uneven, as well as that of thorium (including concentrates, metal, and compounds) production and consumption. As a result, it is necessary to analyzes the state of thorium in detail globally based on the resource-economy-environment system. The method of material flow analysis is applied in this paper in order to unveil the characteristics of Thorium flow in the resource-economy-environment system. The distribution, genetic types, and exploration status of thorium deposits in the world and China are summarized respectively based on the analysis of statistics of thorium deposits exploration, industrial production, and international trade. The conclusions of this paper indicate that the abundant thorium resources, with placer type as the main genetic type, are centralized distributed in India, Brazil, the US, etc. However, carbonite type, alkaline type, and veins type are the main genetic types of thorium in China with an uncertain quantity. In the resource-economy-environment system, global thorium outputs decreased

收稿日期: 2022-03-21;修订日期: 2022-07-27

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: 冯云磊(1988-), 男, 博士, 讲师, 从事金属矿床和岩浆成矿过程研究。E-mail: yunlei_feng@126.com

^{*}通信作者:张万益(1974-),男,博士,教授级高工,从事矿产勘查及矿床学研究以及地质调查规划研究。E-mail:wanyizhang0810@qq.com

during 2010—2017 followed by a significant increase after 2018, of which the main source is the byproduct of monazite mining and concentrating. Thorium and its compounds are used in the field of energy, material, metallurgy, and medicine, while thorium emission is only associated with the mine and concentration of ores. Based on the analysis of thorium applications, it is supposed that the thorium output may continue increasing in the coming decade as a result of the growing uses of thorium in nuclear power reactors. It is necessary to carry out enough exploration on thorium in order to figure out the thorium resources in China because of the difference in genetic types between China and abroad. In order to achieve the aim of carbon peak and carbon neutralization, the government should carry out a series of policies to encourage the innovation and popularization of new techniques to improve thorium utilization and protect the environment.

Key words: thorium; monazite; mineral resources; green energy; dual carbon goals

Th 元素具有天然放射性, 自被发现以来, 被广泛 地应用于材料、冶金等领域, 并由于受中子轰击后可 产生²³³U, 被当作一种潜在的核燃料。在当前核安全 和环保要求不断提高的态势下, Th 元素由于地壳平 均含量高、核电安全系数高、产生核废料少等多个优 于传统核燃料的属性, 再次成为国际先进核能的研 发热点, 中国也正在开展钍基熔盐堆的攻关建设(江 绵恒等, 2012; 周兴泰等, 2019)。但是, 与应用领域 形成鲜明对比的是, 钍资源情况的相关研究一直处 于停滞状态, 尤其是全球资源分布、供需格局及变 化、物质流动等, 缺少新的研究与进展, 亟需开展比 较全面的研究, 以完善对钍在资源-经济-环境系统 中的认识。从物质流动的角度看, 钍在资源-经济-环境系统中的流动和迁移可大致分为4个阶段, 即 资源开采阶段、生产加工阶段、应用阶段、报废回收 阶段(图1), 分别对应钍的资源、经济和环境属性。



Fig. 1 Framework of thorium flow in the system of resource-economy-environment

本文以钍资源为研究对象,基于钍资源产出的 对约 地质环境,剖析钍矿床成因类型和时空分布规律,分 稀 析全球及中国的钍资源供需和消费格局及未来发展 石石 趋势;通过对 Th 元素在全产业链中的分析,明确 他重

Th元素在资源-经济-环境系统中的来源和流向,分析当前现状及未来发展趋势,以期为中国钍资源发展战略的制定与优化提供理论和数据支持。

1 钍资源成因类型、时空分布及开发利用情况

Th 是一种活泼的银白色放射性金属元素,原子 序数为 90,其单质具有较高的熔点(1750°C)、沸点、 (4790°C)和密度(11.72 g/cm³)。Th 元素具有天然放 射性,有 20 余种同位素,其中²³²Th 含量最高也最稳 定(张书成等,2005)。地壳中 Th 元素分布广泛,平 均地壳丰度可达 5.8×10⁻⁶,超过 Th 元素(1.7×10⁻⁶) 的 3 倍(黎彤,1984)。钍的成矿过程与多种地质作 用关系密切,其中机械风化作用、岩浆–热液作用与 Th 元素成矿关系较密切,钍矿床的时空分布亦具有 一定规律。

目前已知的含钍矿物约 120 多种,成因类型多 样,最主要的含钍矿物有独居石、铀钍石、氟碳铈 矿、铅铀钍石、铅钍石、铁钍石(集宁石)、磷钍石等 (郭承基,1959;杨敏之等,1980)。钍的主要来源有 2个,一是独居石砂矿,另一个是稀有、稀土矿产中 的伴生钍。其中,独居石是目前钍资源开采的主要 对象(苏正夫,2014),在砂矿型矿床中最富集(根据 稀土矿产地质勘查规范 DZ/T 0204—2002,中国独居 石砂矿边界品位 w_(REO) 为 100~250 g/m³),一般与其 他重砂矿物或稀土矿石一同被采集,开采数量大,是 生产钍相关合金、化合物及金属的最主要来源。而 稀有、稀土矿产中的伴生钍,目前不是主要的钍工业 来源,根据稀土矿产地质勘查规范 DZ/T 0204— 2002,中国这类矿产的稀土原生矿边界品位 w_(REO) 为 0.5%~1.0%。

1.1 全球钍资源成因类型、时空分布及开发利用情况

从全球范围看, 钍矿床成因类型多样, 可大致划 分为砂矿型、碳酸岩型、碱性岩型、脉型、其他矿床 类型五大类(OECD/NEA-IAEA, 2015)。就储量和矿 床规模而言, 砂矿型矿床是全球最主要的钍矿类型, 主要产于印度、澳大利亚、美国、巴西等国家(图 2; 表1)。

砂矿型钍矿床通常与大型构造(如断层、褶皱等)无关,沿海重砂矿床主要分布在大陆边缘,一般 不受大规模构造作用的影响(Van Gosen et al., 2014),但也有例外,如南澳大利亚 Eucla 盆地(Hou et al., 2008, 2011)。砂矿型含钍矿床含矿岩性变化 较大,一般为陆相碎屑岩类,重砂矿物较富集,独居 石是主要的含钍矿物,来源多为遭受风化破坏的花 岗岩、片麻岩或其他变质地层。该类型在美洲、大洋 洲及南亚地区较常见。



Fig. 2 The distribution of different thorium deposit types in the world

			Table 1 Global typical the	orium deposits and their	genetic type	es	
可	床类型	序号	矿床名称(国家或地区)	含矿/原岩岩性	品位/%	资源量/10 ⁴ t	成矿时代/物源时代
	冲积砂矿床	1	Idaho(美国)	砾石屑、沉积物	3.5-5*	钍6.4	白垩纪
	冲积砂矿床	2	North and South Carolina(美国)	粘土沉积屑	$5 \sim 7*$		古近纪/白垩纪
	冲积砂矿床	3	路易-格拉华杜-脑基(巴西)	风化花岗岩	$7 \sim 11*$	独居石0.06	元古宙
	冲积砂矿床	4	皮尔里斯、开兰顿、帕汉特等 10个冲积砂矿床(马来西亚)	河床冲积砂	2.27*	独居石3.5	中新世—更新世
	冲积砂矿床	5	尼日利亚	含锡石花岗岩	6.5*	钍0.2	
	冲积砂矿床	6	比里顿(印度尼西亚)	斑状黑云母花岗岩	3.4*		侏罗纪
	重矿砂	7	Chatrapur(印度)	重矿物体积分数约20%			
*1	重矿砂	8	Chavara bar(印度)	重矿物体积分数约73%			
砂矿型	海岸线沉积	9	Murray Basin(澳大利亚)	独居石质量分数0.2%~1.5%	1~1.5*		古近纪
	砂矿	10	Pulmoddai(斯里兰卡)	独居石体积分数0.4%			
	滨海砂矿床	11	尼印达卡拉-卡耶古拉姆(印度)	第三纪砂岩	8.5*		古近纪砂岩
	滨海砂矿床	12	玛纳瓦拉古利奇(印度)	片麻岩、混合岩	9.5*		太古宙
	滨海砂矿床	13	古特黑拉州(印度)	伟晶岩、混合岩	$5 \sim 7.4*$	独居石0.8	太古宙
	滨海砂矿床	14	巴耶(巴西)	花岗片麻岩、片麻状花岗岩		独居石3.8	太古宙/古近纪
	滨海砂矿床	15	利奥乐热挨尼罗至热西马(巴西)	花岗片麻岩、片麻状花岗岩	$5 \sim 6^*$	独居石7.9	太古宙/古近纪
	滨海砂矿床	16	巴拉-杜依塔巴波纳(巴西)	花岗片麻岩、片麻状花岗岩	$5 \sim 6^*$		太古宙/古近纪
	滨海砂矿床	17	帕拉巴(巴西)	花岗片麻岩、片麻状花岗岩	$5 \sim 6^*$		太古宙/古近纪
	滨海砂矿床	18	勃兰克(意大利)	凝灰岩	3.5*		第四纪
	滨海砂矿床	19	佛罗里达(美国)	片麻岩、花岗岩			太古宙/古近纪和第四纪
	滨海砂矿床	20	特拉瓦古尔-康钦州(印度)	片麻岩、花岗岩/砂岩	8*		太古宙/古近纪
	砾岩	21	Witwatersrand(南非)	砾岩			
	砾岩	22	Blind River-Elliot Lake(加拿大)	砾岩	6.5*		
	受变质砂矿床	23	勃兰特·利维尔(加拿大)	沉积岩	$0.02\sim 0.04*$	钍4.5	元古宙
	受变质砂矿床	24	帕尔米尔(美国)	片麻岩	9.3*		太古宙
	受变质砂矿床	25	立德尔别格洪河盆地(美国)	前寒武基底砾岩			古生代
	岩浆热液	26	白云鄂博(中国)	碳酸岩杂岩	0.02*	钍22	古生代
	碳酸岩	27	大芦翔(中国)	碳酸岩			
	碳酸岩	28	毛牛坪(中国)	碳酸岩			
	碳酸岩	29	微山(中国)	碳酸岩			
	碳酸岩- 碱性侵入岩	30	Powderhorn(美国科罗拉多州)	碳酸岩、辉石-正长岩			寒武纪
碳酸岩型	碳酸岩	31	Wet Mountains(美国科罗拉多州)	碳酸岩			前寒武纪
	碳酸岩	32	Bearpaw Mountains(美国蒙大纳州)	碳酸岩			前寒武纪
	碳酸岩	33	苏菲特库因(美国)	碳酸岩、片麻岩	0.08*	矿石2300	前寒武纪
	碳酸岩	34	潘达-黑尔矿床(刚果)	碳酸岩	$0.5 \sim 2.5**$	矿石1100	中生代
	碳酸岩	35	苏库露(乌干达)	碳酸岩	0.37~2.86**	烧绿石8.5	古近纪
	碳酸岩	36	齐尔瓦(马拉维)	碳酸岩	1**	矿石4500	中生代
	碳酸岩	37	姆利玛(肯尼亚)	碳酸岩	3**	矿石4200	古近纪

表1 全球代表性钍矿床及其成因类型

第43卷第1期

冯云磊等:"双碳"背景下的清洁能源资源——钍

105

							续表 1-1
矿床类型		序号	矿床名称(国家或地区)	含矿/原岩岩性	品位/%	资源量/10 ⁴ t	成矿时代/物源时代
	碳酸岩	38	Magnet Oove(美国阿肯色州)	碳酸岩			
	碳酸岩−碱性 侵入岩	39	Bear Lodge(美国)	碳酸岩杂岩	0.11*	1800	始新世
	风化	40	Mount Weld(西澳大利亚)	碳酸岩			元古宙
	热液交代	41	Mountain Pass(美国)	硫化物碳酸岩	0.03*	1670	
	碱性岩浆	42	Lemhi Pass(美国蒙大纳- 爱达荷边界)	独居石-钍—磷灰石 剪切体	0.43*		古元古代
	变质岩	43	帕岛乐尔洪区(美国)	石英黑云母片岩、 石英岩	0.3*		前寒武纪
臣之王曰	变质岩	44	斯际开姆斯克拉利(南非)	花岗片麻岩	1*		前寒武纪
脉型	变质杂岩	45	威特马金斯及科罗拉多 矿区(美国)	片麻岩、混合岩	0.1*		前寒武纪
	热液交代	46	加里福尼亚马金- 帕斯矿床(美国)	正长岩、碳酸岩	0.5*		前寒武纪
	脉型矿床	47	Nolans Bore (澳大利亚)	氟磷灰石脉	0.27*	2700	
	热液交代	48	Nechalacho(加拿大)	二长岩			
碱性岩型	碱性深沉岩	49	Lovozero(俄罗斯)	霞石正长岩			
	碱性深成岩	50	Khibiny (俄罗斯)	岩浆杂岩			
	碱性深成岩	51	Pilanesberg(南非)	正长岩			
	交代蚀变	52	云南建水(中国)	矽卡岩	矿石含钍0.75		
	残浆交代型	53	赛马(中国)	霓石霓霞正长岩	$0.15\sim 0.4*$		三叠纪
	碱性花岗岩	54	阿勒泰(中国)	花岗伟晶岩			二叠纪
	碱交代	55	龙首山(中国)	粗粒花岗岩			中元古代
	碱性花岗岩	56	黄山(中国)	蚀变花岗岩、伟晶岩			中生代
	碱性岩浆杂岩	57	Kvanefjeld(丹麦)	霞石正长岩			
	矽卡岩型	58	Tranomaro(马达加斯加)	透辉石岩、大理岩	0.45*		前寒武纪
	矽卡岩型	59	福特-多芬矿床(马达加斯加)	镁质石灰岩、白云岩			前寒武纪
	岩浆热液	60	相山(中国)	流纹英安岩、花岗斑岩	1*		侏罗纪
	岩浆热液	61	庐江砖桥(中国)	正长岩、粗粒砂岩	1.7*		中生代
	岩浆热液	62	Pea Ridge(美国密苏里州)	流纹岩	$0.23\sim 0.41*$		中元古代
甘油米亚	岩浆岩	63	Bancroft(加拿大)	花岗岩、伟晶岩	10*		
共他尖望	岩浆岩	64	Rössing(纳米比亚)	花岗岩、	钍3.3~8.0		
	岩浆岩	65	Crockers Well(澳大利亚)	花岗岩、伟晶岩			
	岩浆岩	66	Greenbushes(澳大利亚)	花岗岩、伟晶岩			
	岩浆岩	67	Radium Hill(澳大利亚)	花岗岩、伟晶岩			
	岩浆型	68	Mineville(美国纽约)	辉长岩、闪长岩	0.15*		前寒武纪
	变质型	69	Steenkampskraal(南非)	花岗片麻岩	针3.3~76		元古宙

注: 钍矿床信息据科特利亚尔等, 1958; Olson et al., 1964; Staatz, 1979; 徐国凤, 1987; Sørensen, 1992; Sidder et al., 1993; Andreoli et al., 1994, 2006; 徐光宪, 2005; Sheard et al., 2012; Anderson et al., 2013; 孟艳宁等, 2013; 熊欣等, 2013; Hoatson et al., 2014; 刘正义等, 2015; Van Gosen, 2016; 王凤岗等, 2016, René, 2017; 李庆, 2017; 史长昊, 2017; 江小强, 2020; *表示独居石中ThO₂含量; **表示烧绿石中ThO₂含量

碳酸岩型和碱性岩型钍矿床一般具有碱交代热 液蚀变围岩的特征(Verplanck et al., 2014), 但蚀变对 矿床形成的影响很小(Yang et al., 2011), 矿床元素共 生组合较复杂。碳酸岩型钍矿床的成矿物质可能来 源于硅酸盐母岩直接分异或熔离所产生的衍生岩 浆,或直接来源于碳酸地幔橄榄岩产生的原生熔体, 如原生岩浆相的碳酸岩型 Mountain Pass 稀土矿床 (Verplanck et al., 2014; Mariano, 1989a, b)。矿化一 般与碳酸(杂)岩或片麻岩关系密切,可产于碳酸岩 与片麻岩接触带(如美国苏菲特-库因矿床)或直接 受到断裂带控制(如刚果民主共和国的潘达-黑尔矿 床),亦或产于火山口机构中(如马拉维的齐尔瓦矿 床和肯尼亚的姆利玛矿床)。该类型在中国较多见, 是中国主要的含钍矿床类型,白云鄂博矿床即属于 此类型矿床,其已查明伴生钍资源量约为 22×104 t, 预测资源量约为 92.4×10⁴ t, 主矿的钍平均品位为 0.032%,但钍的利用率为0(徐光宪,2005)。

过碱性侵入岩相关的稀土矿床主要以层状、脉 状和浸染状产出,均与过碱性系列的岩浆演化有关, 常与二长岩、正长岩、霞石正长岩等碱性岩一同产 出,矿化一般位于侵入体上部、边部、接触带或围岩 裂隙中,热液交代现象明显。该类矿床在俄罗斯和 中国较多见。

脉型钍矿床一般产于变质沉积岩和变质火山岩 的剪切带、断裂带、接触角砾岩带中,常与碱性杂岩 和碳酸岩伴生,并伴有热液交代等作用。其含矿岩 性主要为片麻岩、正长岩、碳酸岩、石英岩等。脉型 矿床中主要含钍矿物为钍石、钍辉石和独居石,与一 些稀土矿物(褐帘石等)伴生(Boyle, 1982)。

各地质时代均有(含)钍矿床的成矿事件发生, 其中以前寒武纪和中生代较多,古生代、新生代稍次 之,前寒武纪和中生代可能为全球钍矿化的爆发 期。但是砂矿床的含矿物质(独居石等)从太古宙— 新近纪都有形成,砂矿的成矿原岩主要为太古宙片 麻岩或花岗片麻岩,而成矿作用主要发生在中生代 和古近纪。与钍成矿相关的碳酸岩和碱性岩体形成 时代主要集中于前寒武纪和中生代,而脉型钍矿床 较集中地形成于前寒武纪和古生代。

钍一般作为稀土矿石选冶过程中的副产品,经 济价值较低,导致目前针对钍资源的勘查和开发较 少,同时也缺乏直观的勘查数据。国际原子能机构 2014年发布的铀红皮书(OECD/NEA-IAEA, 2015) 中,对全球钍资源量及分布做了详细描述,但在较新的2018年和2020年铀红皮书(OECD/NEA-IAEA, 2019,2021)中,没有对应的数据更新。结合经济 合作与发展组织核能署及其他文献数据(René,2017), 目前全世界探明钍金属资源量总计约为640×10⁴t (表2),除南极洲外,全球其他大洲均有分布。

目前全球探明钍资源主要集中于印度、巴西、澳 大利亚、美国、埃及等16个国家和地区,资源储量共 计约460×10⁴t,其他国家合计约170×10⁴t(表 2;图 3)。 在全球已评价钍资源量的34个国家中,印度以约 84.6×10⁴t 钍资源储量成为全球钍资源第一大国,同 时也是亚洲钍资源开发利用最先进的国家之一,其 储量约占世界总储量的13%,其次为巴西(10%)、澳 大利亚(9%)、美国(9%)、埃及(6%)、土耳其(6%)和 委内瑞拉(5%),这7个国家占据全球近六成的钍探 明资源量。而中国缺乏钍资源量准确数据,据国际 原子能机构估算探明资源量大于10×10⁴t(OECD/NEA-IAEA, 2019),而赵长有(2006a, b, c)调查认为,中国

衣 4 王 环 社 陥 里 坈 り	そうしょう そうそう そうそう そうそう そうそう そうしん そうしん そうしん そうし	求钍储量	统计	•
-------------------	--	------	----	---

Table 2	Statistics	date of	global	thorium	reserve
---------	------------	---------	--------	---------	---------

国家	钍资源量/10⁴ t
印度	84.60
巴西	63.20
澳大利亚	59.50
美国	59.50
埃及	38.00
土耳其	37.40
委内瑞拉	30.00
加拿大	17.20
俄罗斯	15.50
南非	14.80
中国	>10.00
挪威	8.70
格陵兰	8.60
芬兰	6.00
瑞典	5.00
哈萨克斯坦	5.00
其他国家	172.50
全球总计	635.50

注:全球及中国钍资源储量数据据OECD/NEA-IAEA(2015, 2019)



Fig. 3 The distribution of thorium reserve and their shares in the world

钍矿预测资源量约 122.3×10⁴ t,此外,另有学者认为, 中国钍资源量仅次于印度,位居全球第二(林双幸 等,2016)。

据目前不完全统计,全球共有近 800 个含钍资 源矿点/潜在区/勘查区(Gambogi et al., 2013),其中最 主要的矿床类型为砂矿型独居石矿床(图 4-a),该类 矿床主要分布于印度、巴西、澳大利亚、美国、埃及 和委内瑞拉六国。澳大利亚、美国、巴西均以砂矿型 钍矿资源为主,少量为岩浆岩型和变质岩型;印度则 均为砂矿型钍矿(点),无其他类型钍资源;加拿大、 南非、挪威、埃及也有少量钍矿床分布(Staatz, 1974; 王兴无, 2003; 刘悦等, 2017)。此外,碳酸岩类钍矿 资源主要分布于中国、格陵兰岛、挪威、芬兰和瑞典。目前全球钍资源矿点/潜在区/勘查区以钍矿化 点居多,较多矿点处于生产状态,含钍产品主要为独 居石(图 4-b)。

1.2 中国钍资源成因类型、时空分布及开发利用情况

中国目前已发现的钍资源多以共生和伴生产 出,矿床类型多、资源丰富,主要集中分布在内蒙古、 广东、海南、湖南、四川等地。参照世界钍矿床成因 类型,中国钍矿床(点)也可划分为砂矿型、碳酸岩 型、碱性岩性、脉型和其他类型,其中,碳酸岩型、碱 性岩型和脉型钍资源是中国目前最丰富的类型(孟 艳宁等,2013)。

中国的砂矿型钍资源主要产于第四纪沉积物 中,分布在河谷、湖湾、海滨等地,可进一步划分为河 成(冲积)砂矿、海滩(滨海)砂矿。其中,前者分布于 黑龙江、辽宁、云南、湖南、湖北等地,后者分布于东 南沿海和台湾地区,含钍矿物主要为独居石,其次还 有钍石和方钍石等(仉宝聚等,2005)。

碳酸岩型、碱性岩型和脉型钍矿床是中国的优势钍矿类型,它们多与岩浆热液作用有关,常与稀土 矿产伴生,广泛分布于辽宁、新疆、江西、内蒙古、安 徽等地(陈肇博等,1996;王凯怡等,2002;范洪海等, 2003;赵长有,2006a,b,c;柯昌辉等,2021)。包头白 云鄂博矿是世界罕见的多元素共生矿,该矿床钍资 源量占中国资源总量比例甚高,潜力巨大。

其他类型钍矿床主要包括沉积型、沉积-变质型 和接触变质型,沉积型钍矿床主要赋存于古元古代 缺氧或无氧环境的古河道和网状河流中,主要分布 于辽宁、河北、福建、云南等地的前寒武纪地层中





Fig. 4 The amount and distribution of thorium mineralized spots / prospect areas / exploration areas in the world (a) and their exploration status (b)

(陈辉等,1987);沉积-变质型钍矿床主要产于前震 旦系底部砾岩和太古宇、元古宇沉积变质岩中,分布 于河北、辽宁、云南、福建等地;而接触变质型常发 育于碱性岩或花岗岩的接触带附近。

中国钍矿资源勘查工作程度非常低,由于国内 钍需求较低,钍矿资源一直不是勘查工作的主要目 标,通常作为铀或稀土勘查的伴生资源,虽然中国具 有钍矿资源的找矿潜力,但是目前尚未开展过针对 钍的系统勘查和调查评价工作。目前已开展的部分 相关地质工作中,已取得了一定的勘查成果。如2016— 2018年,中国地质调查局天津地质调查中心组织实 施"硬岩型铀钍等矿产资源远景调查与勘查示范"项 目,在北秦岭成矿带东段花岗伟晶岩型铀矿调查评 价过程中,于河南省西部栾川县、西峡县、鲁山县等 地区圈定了多处钍矿找矿远景区及多个钍矿化点。

中国钍资源开发主要来自独居石砂矿,每年钍 产品产量多为几百吨。钍作为生产稀土化合物过程 中的副产品从精矿石中被提炼出来。包头白云鄂博 矿稀土的利用率曾经约为10%,而钍资源几乎没有 利用(徐光宪,2005),造成了较严重的资源浪费。此 外,中国南方砂矿独居石中的钍资源利用程度也亟 需提高。

独居石矿产品的具体来源分别为进口砂矿、海 南海滨砂矿、湖南采砂产生的尾矿,与独居石采选相 关的企业主要分布在广西、广东和海南3个省份(苏 正夫,2014)。中国独居石矿产品主要依靠进口,自 从法国由于环保问题停止处理独居石后,中国很快 成为全球钍产品的最主要供应国(Gambogi et al.,2020)。

2 钍资源用途

钍矿资源同其他矿产品一样具有一般商品属 性。其市场交换不仅存在于国内矿石市场,世界进 出口贸易中也有大量的钍矿及相关产品交易。钍的 经济属性在资源-经济-环境系统中主要体现在生产 加工阶段和应用阶段。

生产加工阶段, 钍是提炼独居石中稀土元素的 副产品, 而独居石主要为砂矿选矿过程中的副矿产 品, 多以选矿尾矿出现(苏正夫, 2014)。在当前矿业 市场条件下, 没有单独以精选和提炼 Th 元素为目的 的工业生产活动。除上述途径外, 其余存于不同类 型矿石中的 Th 元素一般不会被有目的地提炼出来, 而是作为杂质或潜在资源,被残留于矿产品、尾矿和 渣库中。

应用阶段, 钍的用途主要集中在: ①能源领域, ²³²Th 由于具有放射性, 可作为核燃料应用于核电领 域; ②非能源领域, 钍由于自身及化合物的特殊属 性, 可应用于催化剂、陶瓷、光学、核医学和合金领 域(Gambogi et al., 2020)。

在能源领域,目前全球正在运行的钍核燃料实 验性/商业性反应堆主要有钍基盐熔堆、重水堆和快 中子堆 3 种类型,选用钍的放射性同位素²³²Th 作为 增殖燃料,²³²Th 通过吸收中子增殖为²³³U,再将²³³U 分离出来供给堆芯发生链式反应放热。²³²Th-²³³U 组 合在热中子裂变情形下效率优于²³⁸U-²³⁹Pu(IAEA, 2006)。

在非能源领域, 钍在催化剂、陶瓷、光学、核医 学和合金中具有较广泛的用途。作为催化剂, ThO₂ 可催化原油转化为各种轻组分, 或催化生产硝酸和 硫酸。钍作为添加剂可生产耐热性良好的高温陶 瓷。在光学领域, 钍的氟化物用于制作光学涂层的 减反射材料, 含 ThO₂ 的白炽气体罩能发出强烈的白 光。在核医学中, ²³²Th 可用于产生²¹²Pb 进行癌症治 疗。在合金制造中, 镀钍钨金属(主要用途之一)被 广泛应用于焊接、等离子切割、电子元件中。此外, Th 元素还被用作镁-镍合金的合金化剂, 用于耐热等 领域。可见, 钍或钍化合物是作为稳定的添加剂存 在于生产过程中或被封存于最终产品中, 生产过程 中可能存在 Th 元素向环境的排放, 但目前没有相关 文献报道。

与其他矿产资源相比,全球钍矿资源的年均需 求和消费量均较少且易于波动。这是由于相关应用 领域对钍(包括钍的合金、化合物和金属)的需求并 非是持续性的,而是间歇的、不需每年持续供应的, 存量有时即可满足生产需求(Gambogi, 2019)。

经济系统中,目前没有从报废产品中回收利用 钍的相关报道,工业生产过程中作为催化剂等用途 的钍,其回收利用率取决于循环利用工艺,而被封存 于最终产品(如合金、焊条、电子元件等)中的 Th 元 素,则将随产品的报废进入回收利用环节中,除一部 分随产品回收利用外,其余将随报废产品的分解排 向环境中。

2.1 全球钍资源生产、消费及需求分析

全球钍的主要工业来源为独居石冶炼,其他次

要来源较少报道且基本无数据可查,根据独居石各 年产量数据(Bray, 2012; Gambogi, 2013, 2016a, b, 2018, 2019; Gambogi et al., 2015, 2020; Madan, 2022), 2010—2020年期间, 全球独居石精矿产量总 体呈现先降后升的趋势(图 5),2010年全球独居石 精矿产量约为15785 t,后续呈现逐年下降的趋势,于 2013 年降至年产量 2678 t, 并在 2018—2019 年呈现 显著增长。2019年全球独居石精矿产量共计 34400 t, 主要来自巴西、印度、马达加斯加、马来西亚、尼日 利亚、泰国、美国、越南等国家,其中,马达加斯加以 约 21000 t 的年产量占该年全球独居石精矿产量的 约 61.1%, 其次为印度, 约 5000 t(约占 14.6%), 之后 依次为泰国(9.3%)、越南(6.4%)、美国(4.9%)、巴西 (3.4%)和尼日利亚(0.2%)。2016年以来,巴西和马 来西亚两国的独居石生产均呈现不同程度的下降趋 势,而印度、马达加斯加和越南年钍产量逐年增长。 随着 2018 年马达加斯加相关独居石精矿生产数据 的加入,全球产量出现约200%的激增,2019年独居 石精矿产量出现了约28%的增长。

近 10 年来,独居石生产主要集中于马达加斯加、印度、泰国、越南等国,期间年产量出现过较大波动,并于 2017 年以来逐年出现较大增长,除由于马达加斯加等国家相关数据被加入统计外,也可能缘于需求增长,世界多国新型钍基核能规划的实施将继续提高全球独居石精矿需求,进而推高全球独居石精矿的产量。此外,格陵兰的 Kvanefjeld、南非的 Steenkrampskraal 等超大型矿山企业的生产波动,也会对全球钍资源的生产造成影响(Gambogi et al., 2020; Madan, 2022)。

2.2 中国钍资源消费及需求分析

中国在核能方面具有长久发展规划,但铀资源 却相对有限,钍资源相对丰富,稳步发展 Th 元素核 能清洁能源,提高钍资源利用效率,将是确保中国长 期能源安全的一条有效途径(Anantharaman et al., 2008; Van Gosen et al., 2016)。

中国钍资源生产在世界上占有重要地位,中国 同时也是全球最大的独居石矿物进口国,主要进口 来自巴西、马达加斯加、泰国和越南的相关矿石。 2017年中国进口钍矿石(包括粗矿和精矿石)共计 6004 t,相比 2016年进口量下降约 16%,其中主要的 进口国分别为巴西(2900 t)、泰国(2560 t)、越南(359 t) 和马来西亚(130 t)(Gambogi et al., 2020)。此外,中 国进口的其他混合重矿物精矿石中也可能含有钍, 但这些钍资源目前并未进行明确划分(IHS Markit Inc, 2018)。

根据目前可查数据,中国 2015—2017 年 3 年间 钍矿资源进口量呈现先增后降的趋势(表 3),3 年进 口量分别为 4640 t、7120 t 和 6004 t,巴西和泰国为 中国钍矿资源的 2 个主要进口国(年进口量均超过 1000 t),以巴西为例,2015—2017 年由该国进口的钍 矿石分别占中国总进口量的 27%、52% 和 48%。

从中国矿石生产加工和进出口数据可以看出, 中国钍资源的相关生产较多地依赖进口矿石资源。 中国的砂矿型钍资源总量相对不突出,大量砂矿型 独居石依赖进口,而碱性岩型、碳酸岩型和脉型含钍 矿床相对丰富,却利用不足。

目前没有中国钍资源的具体消费数据,但其消费领域与全球类似,可分为能源领域和非能源领



I able 3 China's imports and sources of thorium ores and concentrates							
年份	国家进口量/t						
	巴西	泰国	越南	马来西亚	老挝	其他国家	合计
2014	NA	3570	NA	313	NA	NA	NA
2015	1230	1890	NA	609	495	416	4640
2016	3730	2670	402	321	NA	0	7120
2017	2900	2560	359	130	NA	55	6004

表 3 中国钍矿石和精矿进口量及进口国

注:数据据美国地质调查局(顾忠茂, 2007; OECD/NEA-IAEA, 2015; Xu, 2017; 徐洪杰等, 2018); NA表示无统计数据

域。结合中国的能源发展规划,目前和未来中国的 钍资源消费将集中于能源领域,非能源领域的钍资 源消费将随着替代产品的不断出现而逐渐降低。

在核电应用领域,中国计划 2040 年左右建成首 座百吨级钍基乏燃料盐干法批处理示范装置。中国 曾在1970年选择钍基熔盐堆作为发展民用核能的 起步点(顾忠茂,2007),上海"728 工程"建成了零功 率冷态熔盐堆,但限于当时的科技、工业和经济水 平,后转为建设轻水反应堆(徐洪杰等,2018)。2011 年,中国启动"未来先进核裂变能——钍基熔盐堆核 能系统(TMSR)"科技专项(江绵恒等, 2012; Martin, 2015; Xu, 2017), 重启钍基熔盐堆研究。目前,已在 熔盐堆原型系统与关键技术研发方面取得一系列重 要成果,已经建成世界上首座 TMSR 仿真装置、2 MW 液态燃料 TMSR 实验堆, 计划到 2025 年左右建成国 际第一个多功能小型模块化钍基熔盐堆研究设施; 到 2030 年左右全面实现掌握 TMSR 相关科学与技 术,开展熔盐堆的商业化推广;到2040年左右建成 首座百吨级钍基乏燃料盐干法批处理示范装置和在 线部分分离固态裂变产物示范装置,基本实现钍铀 燃料循环(周兴泰等,2019)。

因此,基于中国以上的核电能源发展规划,中国 在能源领域的钍资源消费量将不断增长。在目前白 云鄂博矿床中的钍资源未被有效利用的情况下,如 果未来短期内没有新的 Th 元素提取冶炼工艺突破 的话,随着核电消费需求的增加,中国钍资源市场将 会日趋严峻。而矿产开发利用过程中损耗和残留于 尾矿、废渣中的钍资源(如,白云鄂博至 2005 年主东 矿已采出钍 9.5×10⁴ t, 其中转入尾矿坝 7×10⁴ t, 损耗 达 2.5×10⁴ t, 且不能回收(徐光宪, 2005), 更是严重的 资源浪费和未来的环境隐患。

双碳背景下钍资源开发利用的前景 3

针资源合理地开发和利用具有可观的环境效 益,一方面可以减少矿业次生污染,另一方面可通过 减少能源产业的碳排放减轻环境影响。

3.1 利用钍资源可以减少矿业次生污染

Th 元素除具有放射性危害外,其化合物的化学 毒性相当于铅、锑、铜等重金属,进入有机体后多数 情况不能全部排出,进而导致不良影响(程建忠等, 2007)。钍在稀土矿物中较常见,但由于价值低,目 前在矿山选冶过程中综合利用率较低,每年有大量 钍资源残留于矿石、尾矿和废渣中,造成环境隐患。 中国白云鄂博矿区周边土壤中²³²Th平均值 12.79 mg/kg, 高于世界和中国平均值(7.5 mg/kg 和 9.88 mg/kg) (李若愚等, 2014), 在富钍花岗岩广泛发育的珠江三 角洲经济区,小飞蓬、白茅、五节芒等植株体内钍核 素含量高出背景区对照值 10~35 倍(张志强等, 2011),铁芒萁植株体内钍转移和富集系数均大于1, 是钍的超富集植物(江文静等, 2017)。钍资源开采 总量不大,如果能进行有效的综合利用,提高针资源 的利用率,减少不当的资源废弃和损失,则能够大幅 减少相关矿业采选对环境的扰动,降低环境危害。

3.2 钍是一种比铀更高效和清洁的核能源

钍在核反应堆发电过程中可全部被利用,利用 率是天然铀的 200 多倍(徐光宪, 2005)。Th 元素在 增殖反应中全部转化为²³⁵U,裂变产物在分离器分 离,铀和超铀元素被留在燃料中,最终排出的核废料 理论上不再含有钍。因此,所有 Th 元素完全转化为 其他元素,理论上没有含钍废弃物的产生,流向环境 中的钍极少。核电应用中的 Th 元素将不再出现于 报废回收阶段。此外, 钍基核反应堆更加清洁高效, 1t 钍所产电能相当于 250×10⁴t 煤发电(基于程建忠 等,2007 相关数据计算),发电过程中不产生 CO₂,无 需水冷却,产生更少的核废料,且废料放射性及毒性 更低。以钍基熔盐堆为例,采用氟化熔盐作为核燃 料载体或冷却剂,能够常压运行(设备简单)、高温输 出(适于核能综合利用),且不需水冷却(可建于水资 源不足地区),不仅可为干旱缺水地区提供电力,还 可高温制氢及吸收二氧化碳制甲醇等(IAEA,2006; 贺国珠等,2006;冷伏海等,2011)。因此,钍资源的 合理利用可大幅降低碳排放,实现绿色产业革命,减 轻有机化石燃料的开采能耗和过度燃烧使用,有效 缓解因 CO₂气体大量排放所造成的海平面上升及气 候变暖等环境问题,环境效益显著。

在资源系统中,矿石开采过程中产生的含钍尾 矿、矿渣构成了向环境系统最主要的钍排放,而对尾 矿、矿渣中钍的综合利用和回收也将极大影响钍资 源的利用效率和环境排放量。相比经济系统,资源 系统在矿石采选过程中产生的钍排放应更为主要。 特别是矿业开采加工过程中,矿石伴生的²³²Th 未被 利用且暴露于环境中,可通过风力作用、人为活动等 因素,增高矿区周边表层土壤中的钍含量(李若愚 等,2014)。除土壤外,随着钍核素在生物链中的迁 移和积累,包括动植物在内的整个生态系统安全也 会受到影响(Obed et al., 2005; Mahur et al., 2008)。 白云鄂博矿区地表γ辐射剂量高于天然辐射剂量近 5倍(苗金萍等, 1998, 2001), 该矿区周边土壤中钍核 素高于全国平均值6倍,并受到风向的显著影响(李 若愚等,2014)。土壤受到钍核素的污染后,会通过 富集、转运迁移到植物体内(于晓燕等, 2021)。植物 对钍核素的富集能力强于铀(于晓燕等, 2021),珠江 三角洲高钍地区多种钍超富集植物体内钍核素可高 出背景区对照值 10~35 倍(张志强等, 2011)。

3.3 钍替代铀进行核能发电是发展趋势

目前,新一代核反应堆已在国际上引起越来越 多国家和企业的关注,钍基核反应堆的研究与商业 开发项目不断在澳大利亚、比利时、巴西、加拿大、 中国、捷克等国家实施(Anantharaman et al., 2008)。 在核能领域中,钍被看作是良好的可持续利用核燃 料,虽然目前尚未建立完善的商业性钍燃料循环,但 用钍代替铀,是一个发展趋势。

人类对钍核燃料的探索与尝试由来已久,美国、 加拿大、德国、印度等国均对钍核燃料进行了一定程 度的基础研究、改进和测试反应堆实验(表 4)。高温 气冷反应堆和材料实验反应堆是目前开展数目最多的针基核反应堆项目(图 6),而美国是全球开展针基核反应堆项目最多的国家。

随着国际形式不断变化, 钍基核燃料的使用经 历了较多波折,对全球各国钍燃料反应堆进行统计 (表4)可见,大量钍核燃料探索与尝试项目集中出现 于 20 世纪 60—80 年代, 之后由于 80—90 年代铀产 品供大于求、价格下降,大多数国家钍燃料利用的研 究开发项目逐步终止,直到近10年才逐渐复苏(图6)。 全球范围内(据目前可查数据资料)有6项研究实验 和反应堆项目运行至21世纪,目前这些尚在运行的 实验和反应堆主要位于印度和加拿大,分别为印度 的 KAPS&KGS&RAPS、FBTR、KAMINI、DHRUVA 和加拿大的 NRU&NRX, 合计电功率约为 220 MWe、 热功率约为140 MWt。在重水反应堆方面,加拿大 原子能公司(Atomic Energy Canada Limited)在钍核 燃料研究中有超过 50 年的探索,目前正在进行约 25 项钍基核燃料的相关研究测试, 涉及 3 个研究用 反应堆和1个未运营反应堆(均为重水反应堆)。印 度也仍在重水反应堆中延续使用 ThO, 堆芯。在快 中子反应堆方面,俄罗斯基于前期探索研究,于 2016年在新建 BN-800型快中子反应堆中使用了 Pu/Th 燃料,目前净电功率 820 MWe,计划运行至 2056 年(World Nuclear Association, 2021)。

以钍基核燃料反应堆 45% ~ 50% 的热电转换效 率估算,目前全球在运行的钍燃料实验室/反应堆总 电功率约为 1110 MWe,以 Wigeland et al.(2014)估 算的非盐熔堆中 1.88 ~ 3.42 t/GWe 的钍消耗量估 算,在钍燃料反应堆日益增长的趋势下,将来全球钍 资源的需求将不断上涨。

在能源领域应用中,目前较多国家都在开展含 针核燃料的相关研究及反应堆实验测试。印度快中 子增殖试验堆于 2022 年首次实现商业化;挪威在 2018 年获批在商业运营反应堆中添加含钍核燃料; 中国科学院计划于 2030 年商业化运转 2 座钍基熔 盐堆(Xu, 2017);而在非能源领域,由于 Th 元素自身 的放射性隐患及其可替代性,相关应用已逐渐减 少。钇化合物已可替代白炽气体罩中的 ThO₂并起 到大幅提高亮度的作用;混有镧系、钇和锆元素的镁 合金,已能够取代镁-钍合金的功能,应用于航空航 天领域;铈和镧目前已能够作为钍的替代品用来制 作特殊焊条;应用在光学涂层中的氟化钍,目前也出

Table 4Thorium fission fuel reactors in the world until 2020									
序号	国家	项目名称	反应堆类型	电能	运行时间				
1	美国	Indian Point	轻水增殖反应堆、压力水冷反应堆	7.5 MWe	1962—1980年				
2	美国	Shippingport	轻水增殖反应堆、压力水冷反应堆	100 MWe	1977—1982年				
3	美国	Elk River	沸水反应堆	24 MWe	1963—1968年				
4	德国	Lingen	沸水反应堆	60 MWe	1973年结束				
5	印度	KAPS1, 2; KGS1, 2; RAPS2, 3, 4	加压重水反应堆	220 MWe	未知—尚在运行				
6	美国	Peach Bottom	高温气冷反应堆	40 MWe	1966—1972年				
7	美国	Fort St Vrain	高温气冷反应堆	330 MWe	1976—1989年				
8	德国	AVR	高温气冷反应堆	15 MWe	1967—1988年				
9	德国	THTR-300	高温气冷反应堆	300 MWe	1985—1989年				
10	英国、瑞典、挪威、瑞士	Dragon	高温气冷反应堆	20 MWt	1966—1973年				
11	美国	MSRE ORNL	熔盐增殖反应堆	7.5 MWt	1964—1969年				
12	印度	FBTR	液体金属快中子反应堆	40 MWt	1985年—尚在运行				
13	荷兰	SUSPOP/KSTR KEMA	水均质悬浮反应堆	1 MWt	1974—1977年				
14	加拿大	NRU&NRX	材料实验反应堆	NA	测试阶段				
15	印度	KAMINI	材料实验反应堆	30 kWt	1996年—尚在运行				
16	印度	CIRUS	材料实验反应堆	40 MWt	1960—2010年				
17	印度	DHRUVA	材料实验反应堆	100 MWt	1985年—尚在运行				
18	俄罗斯	BN800	快中子反应堆	820 MWe	2016年—尚在运行				

表 4 截至 2020 年全球各国钍燃料反应堆

注: 荷兰数据据Traffic et al.(1962); 俄罗斯数据据World Nuclear Association(2021); 其他数据据Van Gosen et al.(2016)和Martin(2012); NA表示 无数据





thorium based nuclear reactor projects since 1960 (c)

现了数款替代材料(U.S. Geological Survey, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021)。因此,虽然钍在非能源领域的应用将持续维持在较低水平,并可能有所降低,但随着钍基核燃料的不断商业化,钍在能源领域的需求和消费量将会不断增长。

3.4 中国开发利用钍资源具有很好的基础

中国钍资源丰富,除满足国内市场外,尚有部分 硝酸钍出口,但国内钍资源利用率低,存在资源浪费 和次生环境问题(石秀安等,2011)。

在资源勘查开发利用方面,中国钍资源面临

3个方面突出的问题:①由于从未开展过钍资源评价 工作,全国缺少系统完整的数据,现有的部分资源量 都是通过推测或共伴生矿产计算而来的数据;②中 国钍资源综合利用水平低下,已有大部分钍资源随 矿渣和尾渣掩埋,存在环境安全隐患;③缺乏有效的 政策支持,虽已研制了一些回收工艺,但由于国内没 有钍资源市场,未能有效推广利用。例如,为提高资 源利用效率,中国已禁止单一开采独居石矿,但独居 石矿石年进口量居高不下,下游独居石加工生产过 程中的污染主要为废气废水和放射性尾渣,虽然目 前已开发了 CaO-NaCl 焙烧分解等尾渣综合回收工 艺,能够实现独居石中钍的全回收和绿色循环,但目 前中国独居石生产企业均没有对所产废渣进行放射 性元素回收,仅是集中堆放积压,造成战略资源浪费 的同时,也对周围环境和当地居民身体健康造成不 利影响(张福良等, 2015)。除砂矿型独居石以外, 中 国还有大量稀土伴生型钍矿资源,白云鄂博矿钍资 源(ThO₂)储量可能居世界第二(约 22×10⁴ t)(徐光 宪,2005),其选矿作业采用"弱磁-强磁—浮选"联合 回收铁和稀土的工艺流程,铁和稀土达到了较高回 收率,但尾矿中还会残留约10.5%的氟碳铈矿和 2.74%的独居石(郑强等, 2017),包括Th在内的大量 有价元素由于残存于尾矿和废渣中而流失。

在生产加工方面,随铁精矿和稀土精矿进入钢 铁及稀土工业体系中的钍,其环境去向主要为进入 尾矿(约占 80%)、废渣(13.5%)、酸渣(约占 4.5%)和 最终产品(约占 2%)中(程建忠等,2007)。这部分未 被利用的钍矿资源是未来经济技术条件提升后的矿 产储备。但目前部分不良的处置方式、人为或自然 的破坏使这部分钍被浪费并造成潜在的环境危害, 不恰当的选矿工艺甚至会使尾矿中的钍无法被回收 利用。因此,亟需规范管理、采用和推广适当工艺技 术,综合回收利用钍矿资源,这不仅可满足国内外市 场需求,也将缓解含钍尾矿、废渣带来的环境污染 压力。

在钍应用中,虽然非能源领域的具体使用量无 法通过统计数据得知,但在中国钍基核能发展规划 中,未来钍在核能中的应用将会不断加深加强,在钍 基熔盐堆商业化运行后,不仅能满足新的电力需求, 也能有效代替煤炭等化石能源,减少 CO₂ 排放,助力 中国碳达峰和碳中和目标规划的达成。

因此,从资源-经济-生态环境角度出发,中国钍

资源开发利用亟需调整策略,摸清钍资源家底,提高 钍资源综合利用效率,推广回收利用工艺,将中国流 失于尾矿和工业废渣中的钍资源变废为宝,以充足 的资源保障钍基核能技术的高速发展,这不仅具有 能源战略意义,其环境意义同样重大,影响深远。

4 结论与思考

(1)在资源-经济-环境系统中, 钍主要来自于砂 矿型独居石矿石的采选和冶炼, 含钍产品用途广泛, 但随着在非能源领域中钍的替代品不断出现, 将来 钍的应用会主要集中于核电能源领域。钍开采和应 用都会对环境系统构成排放, 相比之下矿石采选所 造成的钍排放更应引起重视。

(2)从资源总量看,全球钍资源丰富,但分布不 平均,出产国较少,主要分布在印度、巴西、美国、澳 大利亚、中国等国家。中国钍资源总量较可观,但以 碳酸岩型和碱性岩型为主,且分布不均,砂矿型钍资 源在中国分布不广泛。

(3)中国碳酸岩型和碱性岩型钍矿床资源量巨 大,但是目前针对该类矿床的资源勘查与评价并不 完善。从战略性矿产规划、能源安全及未来消费需 求角度来看,亟需开展包括独居石砂矿型、碳酸岩型 和碱性岩型钍矿床的资源调查工作,摸清钍资源家 底。在国际矿产资源勘查开发方面,需加强与境外 钍矿资源国之间的资源调查合作,引导国内企业开 展国际钍资源矿业合作。

(4)中国优势钍矿资源类型有别于世界其他国 家,在资源开采阶段的主要来源为碳酸岩型和碱性 岩型钍矿石,但该部分钍资源大部分没有被有效地 利用,而在生产加工阶段大量的钍来自于进口独居 石矿石的冶炼提纯,钍资源存在较大浪费,亟需国家 在政策和财政上的支持,鼓励稀土资源共伴生钍资 源的回收,并加强综合利用技术的公关和推广,提高 钍资源利用率,合理规划发展钍基核电技术,减少能 源产业碳排放,缓解环境污染。

(5) 钍是重要的战略性矿产资源, 特别是在第四 代核能系统——钍基熔盐堆中, 钍优势明显, 全球钍 (矿石、金属及化合物) 近 10 年的产量呈现先降后增 的波动, 并可能在将来具有上升潜力。

致谢:本文的研究分析是基于前人相关研究及 统计学者的相关数据开展的, 谨向所有从事相关研 究的作者致以衷心感谢,并感谢审稿专家对本文提 出的宝贵意见及建议。

参考文献

- Anantharaman K, Shivakumar V, Saha D. 2008. Utilisation of thorium in reactors [J]. Journal of Nuclear Materials. 383 (1): 119–121.
- Anderson A K, Larson P B, Clark J G. 2013. Rare earth element zonation and fractionation at the Bear Lodge REE deposit, Wyoming[J]. Geological Society of America Abstracts with Programs, 45(5): 42.
- Andreoli M A G, Smith C B, Watkeys M, et al. 1994. The geology of the Steenkampskraal monazite deposit, South Africa —implications for REE-Th-Cu mineralization in charnockite-granulite terranes[J]. Economic Geology, 89(5): 994–1016.
- Andreoli M A G, Hart R J, Ashwal L D, et al. 2006. Correlations between U, Th content and metamorphic grade in the Western Namaqualand Belt, South Africa, with implications for radioactive heating of the crust[J]. Journal of Petrology, 47(6): 1095–1118.
- Boyle R W. 1982. Geochemical Prospecting for Thorium and Uranium Deposits[M]. Amsterdam: Elsevier: 1–498.
- Bray E L. 2012. Thorium[C]//USGS 2010 Minerals Yearbook. U. S. Geological Survey.
- Gambogi J. 2013. Thorium[C]//USGS 2011 Minerals Yearbook. U. S. Geological Survey.
- Gambogi J, Aquino K C. 2013. Thorium[C]//USGS 2013 Minerals Yearbook. U. S. Geological Survey.
- Gambogi J, Aquino K C. 2015. Thorium[C]//USGS 2013 Minerals Yearbook. U. S. Geological Survey.
- Gambogi J 2016. Thorium[C]//USGS 2012 Minerals Yearbook. U. S. Geological Survey.
- Gambogi J. 2016. Thorium[C]//USGS 2014 Minerals Yearbook. U. S. Geological Survey.
- Gambogi J, Ghalayini Z. T. 2020. Thorium [C]//USGS 2017 Minerals Yearbook. U. S. Geological Survey.
- Gambogi J. 2018. Thorium[C]//USGS 2015 Minerals Yearbook. U. S. Geological Survey.
- Gambogi J. 2019. Thorium [C]//USGS 2016 Minerals Yearbook. U. S. Geological Survey.
- Hoatson D M, Jaireth S, Miezitis Y. 2014. The major rare-earth-element deposits of Australia: geological setting, exploration, and resources [J].
 Revue De Psychothérapie Psychanalytique De Groupe, 64(3): 167–180.
- Hou B H, Frakes L A, Sandiford M, et al. 2008. Cenozoic Eucla basin and associated paleovalleys, southern Australia—Climatic and tectonic influences on landscape evolution, sedimentation and heavy mineral accumulation[J]. Sedimentary Geology, 203(1/2): 112–130.
- Hou B H, Keeling J, Reid A, et al. 2011. Heavy mineral sands in the Eucla basin, southern Australia— Deposition and province-scale prospectivity[J]. Economic Geology, 106(4): 687–712.
- IAEA. 2006. Nuclear Technology Review (2006) [R].
- IHS Markit Inc. Global trade atlas: London, United Kingdom, IHS Markit

Inc. (Accessed March 30, 2018, via https://www.gtis.com/gta/.).

- Madan M S. 2022. Thorium[C]//USGS 2018 Minerals Yearbook. U. S. Geological Survey.
- Mahur A K, Kumar R, Sonkawade R G, et al. 2008. Measurement of natural radioactivity and radon exhalation rate from rock samples of Jaduguda uranium mine and its radiological implications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B:Beam Interactions with Materials and Atoms, 266(8): 1591–1597.
- Mariano A N. 1989a. Economic geology of rare earth minerals[C]//Lipin B R, Mckay G A. Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. Washington D C. Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy, 21: 309–338.
- Mariano A N. 1989b. Nature of economic mineralization in carbonatites and related rocks[C]//Bell K. Carbonatites—Genesis and evolution: Boston, Mass., Unwin Hyman Ltd: 149–176.
- Martin R. 2012. Superfuel—Thorium, the Green Energy Source for the Future [M]. Palgrave Macmillian, New York: 1–262.
- Martin R. 2015. China details next-gen nuclear reactor program: MIT Technology Review, October 16. (Accessed April 5, 2018, at https://www.technologyreview.com/s/542526/china-details-next-gennuclearreactor-program/.).
- Obed R I, Farai I P, Jibiri N N. 2005. Population dose distribution due to soil radioactivity concentration levels in 18 cities across Nigeria[J]. Journal of Radiological Protection, 25(3): 305–312.
- OECD/NEA-IAEA. 2015. Uranium 2014: Resources, Production and Demand [R]. Vienna: IAEA: 1–505.
- OECD/NEA-IAEA. 2019. Uranium 2018: Resources, Production and Demand[R]. Vienna: IAEA: 1–458.
- OECD/NEA-IAEA. 2021. Uranium 2020: Resources, Production and Demand[R]. Vienna: IAEA: 1–484.
- Olson J C, Overstreet W C. 1964. Geologic distribution and resources of thorium[J]. U. S. Geological Survey Bulletin, 1204: 61.
- René M. 2017. Nature, Sources, Resources, and Production of Thorium[C]//Descriptive Inorganic Chemistry Researches of Metal Compounds. DOI: 10.5772/intechopen.68304.
- Sheard E R, Williams-Jones A E, Heiligmann M, et al. 2012. Controls on the concentration of zirconium, niobium and rare earth elements in the Thor Lake rare metal deposit, Northwest Territories, Canada[J]. Economic Geology, 107(81): 4.
- Sidder G B, Day W C, Nuelle L M, et al. 1993. Mineralogic and fluidinclusion studies of the Pea Ridge iron-rare-earth-element deposit, southeast Missouri, chap. U[C]// Scott R W Jr, Detra P S, Berger B R. Advances 294 Uranium for Nuclear Power Related to United States and International Mineral Resources —Developing Frameworks and Exploration Technologies. U. S. Geological Survey Bulletin, (2039): 205–216.
- Sørensen H. 1992. Agpaitic nepheline syenites—A potential source of rare elements [J]. Applied Geochemistry, (7): 417–427.
- Staatz M H. 1974. Thorium Veins in the United states [J]. Economic Geology, 69: 494–507.
- Staatz M H. 1979. Geology and mineral resources of the Lemhi Pass

thorium district, Idaho and Montana[J]. U. S. Geological Survey Professional Paper, 1049A: 90.

- Traffic W, Rise S. 1962. An Aqueous homogeneous zero-energy suspension reactor- II. Analysis of the neutron flux fluctuations in an aqueous homogeneous subcritical reactor with circulating UO₂ particles[J]. Journal of Nuclear Energy. Parts A/B. Reactor Science and Technology, 6.
- U. S. Geological Survey. 2017. Mineral commodity summaries 2017[R].U. S. Geological Survey: 1–202.
- U. S. Geological Survey. 2018. Mineral commodity summaries 2018[R].U. S. Geological Survey: 1–200.
- U. S. Geological Survey. 2019. Mineral commodity summaries 2019[R].U. S. Geological Survey: 1–200.
- U. S. Geological Survey. 2020. Mineral commodity summaries 2020[R].U. S. Geological Survey: 1–200.
- U. S. Geological Survey. 2021. Mineral commodity summaries 2021[R].U. S. Geological Survey: 1–200.
- Van Gosen B S, Fey D L, Shah A K, et al. 2014. Deposit model for heavy-mineral sands in coastal environments[R]. U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2010–5070–L, 51.
- Van Gosen B S, Tulsidas H. 2016. Thorium as a nuclear fuel[C]// Uranium for Nuclear Power. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 93, DOI: http://dx. doi.org/10.1016/B978-0-08-100307-7.000 10-7.
- Verplanck P L, Van Gosen B S, Seal R R, et al. 2014. A deposit model for carbonatite and peralkaline intrusion-related rare earth element deposits[R]. U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2010–5070–J, 58.
- Wigeland R, Taiwo T, Ludewig H, et al. 2014. Nuclear fuel cycle evaluation and screening —final report[R]. U. S. Department of Energy Report FCRD-FCO-2014–000106, 51.
- World Nuclear Association. 2021. Nuclear Power in Russia[R]. London, United Kingdom, World Nuclear Association.
- Xu H J. Status and perspective of TMSR in China[C]//Molten Salt Reactor Workshop: Villigen, Switzerland, 2017, January 23–25, Presentation, 63.
- Yang K F, Fan H R, Santosh M, et al. 2011. Mesoproterozoic carbonatitic magmatism in the Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, North China— Constraints for the mechanism of super accumulation of rare earth elements [J]. Ore Geology Reviews, 40: 122–131.
- 陈辉, 邵济安. 1987. 白云鄂博地区碳酸岩的形成方式及构造背 景[C]//中国北方板块构造论文集. 沈阳地质矿产研究所, 2: 73-79.
- 陈肇博, 范军, 郭智添, 等. 1996. 赛马碱性岩与成矿作用[M]. 北京: 原 子能出版社: 181-200.
- 程建忠,侯运炳.2007.白云鄂博矿钍资源及综合利用[C]//2007年中国稀土资源综合利用与环境保护研讨会论文集:22-40.
- 范洪海, 凌洪飞, 王德滋, 等. 2003. 相山铀矿田成矿机理研究[J]. 铀矿 地质, 19(4): 208-213.
- 顾忠茂. 钍资源的核能利用问题探讨[J]. 核科学与工程, 2007, (2): 97-105.
- 郭承基. 1959. 集宁石 (Jiningite)——一种新的釷石变种 [J]. 科学通报,

(6): 206–207.

- 贺国珠, 易艳玲, 孔祥忠. 2006. 铀-钍混合燃料反应堆的可行性分 析[J]. 原子核物理评论, 23(2): 101-102.
- 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 2012. 未来先进核裂变能——TMSR 核能系统[J]. 中国科学院院刊, 27(3): 366-374.
- 江文静, 王丹, 姚天月. 2017. 铀及其伴生重金属镉的根茎类富集植物的筛选[J]. 农业环境科学学报, 36(1): 39-47.
- 江小强.2020. 江西黄山铌钽矿床成矿岩体地球化学特征及成因分 析[D]. 成都理工大学硕士学位论文: 1-64.
- 村昌辉, 孙盛, 赵永岗, 等. 2021. 内蒙古白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿 床控矿构造特征及深部找矿方向[J]. 地质通报, 40(1): 95-109.
- 科特利亚尔,克里斯塔利内依. 1958. 资本主义国家钍矿床[M]. 北京: 地质出版社: 14-49.
- 冷伏海,刘小平,李泽霞,等.2011. 钍基核燃料循环国际发展态势分 析[J]. 科学观察, 6(6): 1-18.
- 李庆. 2017. 辽宁钍资源开发潜力及经济效益分析[J]. 国土资源, 2: 48-49.
- 李若愚, 李强, 陈胜, 等. 2014. 包头白云鄂博采矿区周边表层土壤中²³² Th 的分布特征[J]. 环境科学研究, 27(1): 51-56.
- 黎彤. 1984. 大洋地壳和大陆地壳的元素丰度[J]. 大地构造与成矿学, 8(1): 19-27.
- 林双幸,张铁岭.2016.加快钍资源开发促进我国核能可持续发展[J]. 中国核工业,(1):32-36,64.
- 刘悦, 丛卫克. 2017. 世界铀资源、生产及需求概况[J]. 世界核地质科 学, 34(4): 200-206.
- 刘正义, 孟艳宁, 范洪海, 等. 2015. 相山矿田钍成矿特征及其控制因素 的初步讨论[J]. 东华理工大学学报 (自然科学版), (3): 249-256.
- 孟艳宁, 范洪海, 王凤岗, 等. 2013. 中国钍资源特征及分布规律[J]. 铀 矿地质, 29(2): 24-30.
- 苗金萍, 李兴明. 1998. 包头地区天然放射性致环境 γ 辐射水平及居民 受照剂量的调查[J]. 中华放射医学与防护杂志, 18(6): 433-435.
- 苗金萍, 邢茹, 武恒. 2001. 包头地区稀土产品的放射性水平[J]. 中华放射医学与防护杂志, 21(3): 227.
- 石秀安, 胡永明. 2011. 我国钍燃料循环发展研究[J]. 核科学与工程, 31(3): 281-288.
- 史长昊. 2017. 甘肃龙首山地区碱交代型铀钍矿床地质及成矿流体研 究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1-50.
- 苏正夫. 2014. 独居石矿资源的综合利用研究现状[J]. 世界有色金属, (8): 31-33.
- 王凤岗, 范洪海, 范存琨. 2016. 马达加斯加南部 Tranomaro 地区钍矿 床成矿特征及其矿化成因探讨[J]. 世界核地质学, (1): 1-7.
- 王凯怡, 范宏瑞, 谢奕汉. 2002. 白云鄂博碳酸岩墙的稀土和微量元素 地球化学及其成因的启示[J]. 岩石学报, 18(3): 340-348.
- 王兴无. 2003. 全球铀资源、生产和需求[J]. 世界核地质科学, (1): 11-12,19.
- 熊欣,徐文艺,贾丽琼,等. 2013. 安徽庐江砖桥科学深钻内的铀钍赋存 状态研究[J]. 矿床地质, 32(6): 1211-1220.
- 徐光宪. 2005. 白云鄂博矿钍资源开发利用迫在眉睫[J]. 稀土信息, (5): 4-5,8.
- 徐国凤. 1987. 美国 Powderhorn 碳酸盐岩型钍、钛、铁、铌、稀土元素 矿床[J]. 地质科技情报, (1): 110.

- 徐洪杰, 戴志敏, 蔡翔舟, 等. 2018. 钍基熔盐堆和核能综合利用[J]. 现 代物理知识, 30(4): 25-34.
- 杨敏之, 李永春. 1980. 我国内蒙白云鄂博矿床铀钍石矿物的研究[J]. 科学通报, (12): 558-560.
- 于晓燕, 宋宇辰, 魏光普, 等. 2021. 轻稀土矿区土壤和植物中铀和钍核 素的分布特征[J]. 有色金属 (冶炼部分), 3: 109-115.
- 张福良, 李政林. 2015. 我国独居石资源开发利用现状及政策建议[J]. 现代矿业, (11): 1-4.
- 张书成, 刘平, 仉宝聚. 2005. 钍资源及其利用[J]. 世界核地质科学, (2): 98-103.
- 张志强,陈迪云,宋刚,等.2011.放射性核素土壤-植物吸收与钍、镭

富集植物的发现[J]. 环境科学, 32(4): 1159-1163.

- (仉宝聚,张书成. 钍矿成矿特征与地质勘查[J]. 世界核地质科学, 2005,(4): 203-210.
- 赵长有. 2006a. 白云鄂博的钍与铀 (一)[J]. 稀土信息, 7: 12-15.
- 赵长有. 2006b. 白云鄂博的钍与铀 (二)[J]. 稀土信息, 8: 13-14.
- 赵长有. 2006c. 白云鄂博的钍与铀 (三)[J]. 稀土信息, 9: 21-23.
- 郑强, 边雪, 吴文远. 2017. 白云鄂博稀土尾矿的工艺矿物学研究[J]. 东北大学学报:自然科学版, 38(8): 1107-1111.
- 周兴泰,李志军,陆燕玲,等. 2019. 钍基熔盐堆材料发展战略[J]. 中国 工程科学, 21(1): 29-38.