

doi: 10.12029/gc20201104001

孙宏伟, 许康康, 左立波, 任军平, 唐文龙, 古阿雷, 吴兴源, Chipilauka Mukofu, Alphet Phaskani Dokowe. 2023. 锆-钛矿产资源分布特点、类型、供需格局及开发利用现状[J]. 中国地质, 50(4): 1070-1081.

Sun Hongwei, Xu Kangkang, Zuo Libo, Ren Junping, Tang Wenlong, Gu Alei, Wu Xingyuan, CHIPILAUKA Mukofu, ALPHET Phaskani Dokowe. 2023. Distribution characteristics, types, supply-demand and development utilization status of zirconium and titanium resources[J]. Geology in China, 50(4): 1070-1081(in Chinese with English abstract).

锆-钛矿产资源分布特点、类型、供需格局 及开发利用现状

孙宏伟^{1,2,3}, 许康康^{2,3}, 左立波^{2,3}, 任军平^{2,3}, 唐文龙^{2,3}, 古阿雷^{2,3}, 吴兴源^{2,3},

CHIPILAUKA Mukofu⁴, ALPHET Phaskani Dokowe⁴

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 3. 中国地质调查局南部非洲矿业研究所, 天津 300170; 4. 赞比亚地质调查局, 卢萨卡 P.O. Box.50135, 赞比亚)

摘要:【研究目的】中国锆-钛矿产资源禀赋较差而市场需求较大,因此每年需大量进口锆-钛矿产资源,梳理锆-钛矿产资源分布、成矿类型及供需现状,对于进一步开展锆-钛矿产勘查及开发意义重大。【研究方法】本文系统收集和整理了全球锆-钛矿产资源禀赋、矿床类型、供需条件及资源潜力。【研究结果】全球锆矿资源主要以砂型锆英石为主,钛矿资源主要以钛铁矿和金红石为主,高品质钛矿资源也以沉积型砂矿为主。全球锆-钛矿产资源具有分布集中、供需分离等特点,主要表现为:锆矿资源主要集中在澳大利亚(71.43%)、南非(8.43%)和莫桑比克(2.57%)三个国家(占比80%以上),中国是全球最大的锆矿资源进口国,进口来源国主要为澳大利亚和南非;钛铁矿资源主要分布在中国(32.86%)、澳大利亚(22.86%)和印度(12.14%)等国,金红石资源则主要分布在澳大利亚(62.31%)、印度(14.87%)和南非(13.07%)等国,中国钛矿资源虽然储量占比高,但资源禀赋差(高品质钛矿依赖进口),是全球最大的钛矿资源净进口国,莫桑比克和越南是中国目前最大的钛矿资源海外来源地。【结论】锆-钛矿产资源未来仍是中国的紧缺矿种,应进一步加大勘查开发投入、拓展海外来源地、提升产业链发展水平,并尽快建立锆-钛矿产资源可持续发展及保障体系。

关键词: 锆-钛矿产; 矿床类型; 资源分布; 供需形势; 资源潜力; 矿产勘查工程

创 新 点: (1)对全球锆-钛矿产资源禀赋、矿床类型及供需格局等进行了梳理与分析;(2)为中国未来锆-钛矿产资源可持续发展提供了建议。

中图分类号: F426.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)04-1070-12

Distribution characteristics, types, supply-demand and development utilization status of zirconium and titanium resources

收稿日期: 2020-11-04; 改回日期: 2022-12-05

基金项目: 商务部技术援助外项目“援赞比亚东北地区航空物探与地质地球化学填图”([2015]352)、中国地质调查局项目“南部非洲国际合作地质调查”(DD20221801)联合资助。

作者简介: 孙宏伟,男,1986年生,高级工程师,主要从事地质矿产勘查研究工作;E-mail: shwcub@163.com。

通讯作者: 许康康,男,1986年生,高级工程师,主要从事地质矿产勘查研究工作;E-mail: xukang06@163.com。

SUN Hongwei^{1,2,3}, XU Kangkang^{2,3}, ZUO Libo^{2,3}, REN Junping^{2,3}, TANG Wenlong^{2,3}, GU Alei^{2,3},
WU Xingyuan^{2,3}, CHIPILAUKA Mukofu⁴, ALPHET Phaskani Dokowe⁴

(1. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. Southern African Mining Research Institute, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 4. Geological Survey Department of Zambia, Lusaka, P.O. Box.50135, Zambia)

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

[Objective] Zirconium and titanium resources in China are scarce and the market demand is large, heavily dependent on import. Sorting out the distribution of zirconium and titanium resources, metallogenic types and supply and demand status is of great significance for further zirconium and titanium exploration and development. **[Methods]** This paper systematically collected and sorted out the endowment, deposit types, supply and demand conditions and resource potentials of zirconium and titanium resources in the world. **[Results]** Zirconium resources in the world are mainly placer-type, titanium resources consist mainly of ilmenite and rutile, and high-quality titanium resources are also dominated by sedimentary placers. Zirconium and titanium resources in the world have the characteristics of concentrated distribution and separation between supply and demand, shown mainly as follows: Zirconium resources are mainly concentrated in Australia (71.43%), South Africa (8.43%) and Mozambique (2.57%) (accounting for more than 80%). China is the world's largest importer of zirconium resources, mainly from Australia and South Africa; Ilmenite resources are mainly distributed in China (32.86%), Australia (22.86%), India (12.14%) and other countries, while rutile resources are mainly distributed in Australia (62.31%), India (14.87%), South Africa (13.07%) and other countries. Although China's titanium resources account for a high proportion of reserves, its resource endowment is poor (high-grade titanium depends on imports), and it is the world's largest net importer of titanium resources, Mozambique and Vietnam are currently the largest overseas sources of titanium resources. **[Conclusions]** Zirconium and titanium resources are still in short supply in China in the future. We should further increase investment in exploration and development, expand overseas sources, improve the level of industrial chain development, and establish a sustainable development and security system for zirconium and titanium resources as soon as possible.

Key words: zirconium-titanium; deposit types; resources distribution; supply and demand situation; resource potential; mineral exploration engineering

Highlights: (1) The global zirconium titanium ore resource endowment, deposit types, supply and demand patterns were sorted out and analyzed; (2) Provided suggestions for the sustainable development of zirconium and titanium mineral resources in China.

About the first author: SUN Hongwei, male, born in 1986, senior engineer, mainly engaged in the mineral exploration and regional metallogenic research; E-mail: shwcub@163.com.

About the corresponding author: XU Kangkang, male, born in 1986, senior engineer, mainly engaged in the mineral exploration and regional metallogenic research; E-mail: xukang06@163.com.

Fund support: Supported by the projects of the Ministry of Commerce (No.[2015] 352) and China Geological Survey (No. DD20221801).

1 引 言

锆在地壳中的含量居第19位,是一种稀有金属,具有抗腐蚀性、超高的硬度和强度等特性,广泛应用于陶瓷、特种玻璃、航空航天、军工、核反应、原子能领域(刘英俊等,1984;孙宏伟等,2019),是稀缺的战略资源之一(张新安和张迎新,2011;陈其慎等,2016)。目前已知锆的独立矿物有38种(刘英俊等,1984;Hinton and Upton, 1991),主要是锆的硅酸

盐及氧化物,常见且具有工业价值的主要是锆石及斜锆石等。

钛是地壳中分布最广和丰度较高的元素之一,占地壳重量的0.61%,位居第9位,易与其他金属组成合金使其具有强度增加、膨胀系数降低等优异的物理性质和抗腐蚀性等化学性质,广泛应用于化工、电力、冶金等传统领域及航空航天、海洋工程、医药、休闲体育等新兴领域,是中国战略性新兴产业所需的重要高技术矿产(陈从喜等,

2020;李政和陈从喜,2020),在未来科技发展道路上占有重要地位。钛属于大离子亲石元素,主要以氧化物和硅酸盐的形式存在,目前已知的含钛矿物达140多种,常见且具有开采价值的主要为钛铁矿和金红石。

中国是目前世界上最大的锆-钛矿产资源消费国,但国内资源供给严重不足,大量依赖进口,其中锆对外依存度超过90%,钛精矿对外依存度也超过60%,供应风险均达中高级(陈其慎等,2016;刘皓阳和马哲,2017;孙宏伟等,2019;张晓伟等,2019;崇霄霄,2020;李政和陈从喜,2020;任军平等,2021;董津蒙等,2022),锆-钛矿产资源供应安全面临着巨大的挑战。本文通过收集整理国内外锆-钛矿产资源相关资料,对全球锆-钛矿产资源的分布、成因类型及勘查开发现状进行系统总结,为中资企业开展锆-钛矿产资源勘查投资和产业布局提供参考,并在此基础上提出如何保障中国锆-钛矿产资源可持续供应及锆-钛矿产行业更好发展的措施和建议。

2 全球锆-钛矿产资源禀赋

2.1 全球锆矿资源分布特征

世界各大洲均发现有锆矿资源,主要分布于大洋洲和非洲,美洲、亚洲、欧洲也有发现(图1)。据美国地质调查局统计(USGS, 2022),2021年全球锆矿资源储量(以 ZrO_2 计算)约为7000万t,其中澳大利亚(全球占比71.43%)、南非(全球占比8.43%)和莫桑比克(全球占比2.57%)合计5770万t,合计占比达80%以上(表1)。中国锆矿储量约为50万t,与美国基本一致,占全球总储量的0.71%,相比其他国家中国锆矿资源较为缺乏。锆矿品位方面,全球主要的锆矿资源国其锆矿品位多在5%~10%,而中国则多小于1%,整体品位较低(孙宏伟等,2019;Perks and Mudd, 2021)。

2.2 全球钛矿资源分布特征

钛矿资源集中在全球40多个国家,分布于除南极洲之外的各大洲(图1)。据美国地质调查局统计

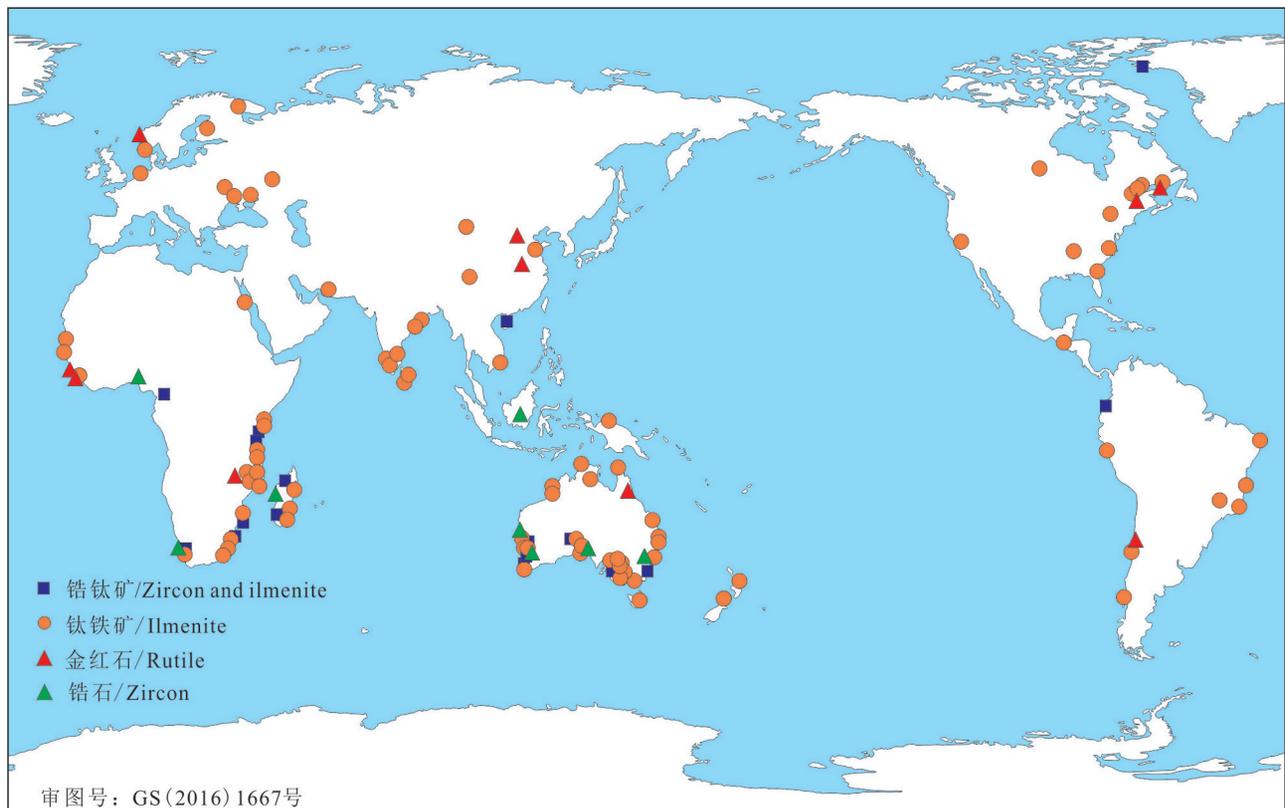


图1 全球主要锆-钛矿产资源分布图

Fig.1 Distribution of major zirconium and titanium resources in the world

表1 全球锆-钛矿产资源储量
Table 1 Global reserves of zirconium and titanium resources

| 锆 | 储量/万t | 占比/% | 钛铁矿 | 储量/万t | 占比/% | 金红石 | 储量/万t | 占比/% |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 澳大利亚 | 5000 | 71.43 | 中国 | 23000 | 32.86 | 澳大利亚 | 3100 | 62.31 |
| 南非 | 590 | 8.43 | 澳大利亚 | 16000 | 22.86 | 印度 | 740 | 14.87 |
| 莫桑比克 | 180 | 2.57 | 印度 | 8500 | 12.14 | 南非 | 650 | 13.07 |
| 美国 | 50 | 0.71 | 巴西 | 4300 | 6.14 | 乌克兰 | 250 | 5.03 |
| 中国 | 50 | 0.71 | 挪威 | 3700 | 5.29 | 莫桑比克 | 89 | 1.79 |
| 肯尼亚 | 30 | 0.44 | 加拿大 | 3100 | 4.43 | 塞拉利昂 | 49 | 0.98 |
| 其他国家 | 1100 | 15.71 | 南非 | 3000 | 4.29 | 马达加斯加 | 40 | 0.81 |
| / | / | / | 莫桑比克 | 2600 | 3.71 | 肯尼亚 | 17 | 0.34 |
| / | / | / | 马达加斯加 | 2200 | 3.14 | 其他国家 | 40 | 0.80 |
| / | / | / | 乌克兰 | 590 | 0.84 | / | / | / |
| / | / | / | 美国 | 200 | 0.29 | / | / | / |
| / | / | / | 越南 | 160 | 0.23 | / | / | / |
| / | / | / | 肯尼亚 | 50 | 0.07 | / | / | / |
| / | / | / | 其他国家 | 2600 | 3.71 | / | / | / |
| 世界总量 | 7000 | 100 | 世界总量 | 70000 | 100 | 世界总量 | 4975 | 100 |

注:数据源自USGS, 2022; 锆以ZrO₂计算, 钛以TiO₂计算。

(USGS, 2022), 2021年全球钛矿资源储量(以TiO₂计算)约为75000万t, 包括钛铁矿70000万t(93%)和金红石4950万t(7%), 其中钛铁矿主要分布于中国(全球占比32.86%)、澳大利亚(全球占比22.86%)、印度(全球占比12.14%)、巴西(全球占比6.14%)和挪威(全球占比5.29%), 五国钛铁矿储量全球占比达80%; 金红石主要集中在澳大利亚(全球占比62.31%)、印度(全球占比14.87%)、南非(全球占比13.07%)、乌克兰(全球占比5.03%)和莫桑比克(全球占比1.79%), 五国储量占全球的97%以上(表1)。当前工业可以利用的钛矿资源主要为钛铁矿, 金红石占比不足十分之一, 但全球金红石的品级(品位高、杂质含量少)远高于钛铁矿, 其面向对象主要是高端需求(陈其慎等, 2016; 张晓伟等, 2019)。中国是全球最大的钛铁矿资源国, 但主要为低品位难分选的钒钛磁铁矿, 资源禀赋较差。中国钛铁矿平均品位一般为5%~10%, 金红石平均品位一般为1%~5%, 多在1%~2%, 远低于全球主要钛矿资源国钛矿品位(孙仁斌等, 2019; 张晓伟等, 2019; 崇霄霄等, 2020; 丁建华等, 2020; 文俊等, 2022)。因此, 中国高品位钛矿资源主要依赖进口。

3 锆-钛矿产资源主要类型

3.1 锆矿资源主要类型

锆矿床按其成因可分为脉矿和砂矿两种类型(Uddin and Lundberg, 1998; Watson et al., 2006; 车

东等, 2016; 孙宏伟等, 2019; Suiekpayev et al., 2021)。其中脉矿型锆矿主要产于中酸性岩体中(Pidgeon et al., 1998), 其结构形态复杂, 分离共生矿物成本高且开采难度较大, 因此目前全球工业开采多以砂矿型为主(全球90%的锆矿来源于砂矿)。砂矿主要包括滨海砂矿、冲积砂矿以及残积砂矿, 其中尤以滨海砂矿最具工业开采价值, 规模和产量远大于冲积砂矿及残积砂矿(Peterson et al., 1986; Murty et al., 2007; 申正伟等, 2016; 车东等, 2016; 孙宏伟等, 2019; 任军平等, 2021)。中国锆矿资源主要分布在内蒙古和海南, 其中内蒙古锆矿资源主要为赋存于碱性花岗岩中的脉矿型, 尚未大规模开发; 海南则为滨海砂矿(张建文等, 2019), 是中国目前主要的开采对象, 但规模有限。

3.2 钛矿资源主要类型

国内外不同学者对钛矿床的成因类型提出过不同的划分方案, 主要包括岩浆型、冲积-坡积型、海滨砂矿型、火山沉积型、风化型和变质型(刘兰笙等, 1996; Janssen and Putnis, 2011; Ohara et al., 2020)。丁建华等(2020)综合国内外钛矿床的主要成因, 将钛矿床类型划分为岩浆型矿床、风化型矿床、变质型矿床和沉积型矿床4类, 本文主要参考该分类标准。

沉积型钛矿床是目前全球最重要的钛矿床类型, 多属于第四纪沉积型砂矿, 是由原生矿床或含钛矿物的岩石经风化剥离再经水流冲刷富集而成,

多分布于海岸、湖岸和河滩等地,尤以滨海沉积型为主。该类型矿床主要分布在澳大利亚、南非、莫桑比克及马达加斯加等国(孙宏伟等,2019;许康康等,2020,2021;任军平等,2021;Sun et al., 2021;王杰等,2022)。岩浆型钛矿床是由岩浆分异作用形成的,矿体直接产于岩体内,成矿母岩为镁铁质和超镁铁质岩,该类型矿床是中国最重要的钛矿床类型,攀西成矿带为典型代表(武斌等,2012;邢长明等,2012)。风化型钛矿床是原生钛矿床在风化作用下形成的,该类矿床多产在含矿岩体顶部的风化壳中。变质型钛矿床的形成往往与高压(超高压)变质作用有关,变质型钛矿床中钛主要来源于原岩。赵一鸣(2008)将变质型钛矿床分为榴辉岩型、角闪岩型、变质(粉)砂岩和变质铝硅酸盐型4种。

综上所述,全球锆-钛矿床主要以滨海沉积型砂矿为主,是目前最具经济价值的锆-钛资源,集中分布于大洋洲及非洲地区。中国钛矿资源虽然储量大,但多以原生矿为主,砂矿少,具有品位低且多伴生等特点,难于利用(吴贤和张健,2006;陈其慎等,2016;张晓伟等,2019)。

4 锆-钛矿产资源矿业开发

4.1 主要矿业活动

全球主要的锆-钛矿业项目主要分布于大洋洲、非洲以及亚洲地区,其中尤以大洋洲最为集中。统计数据显示(S&P Global Market Intelligence, 2021),全球目前共有176个锆-钛矿业项目,其中钛铁矿项目134个,金红石项目14个,锆矿项目6个,未分类锆-钛项目22个。矿业项目处于活动状态的共计79个,非活动状态85个,其他状态12个。所属矿业项目最多的国家是澳大利亚(62个),坦桑尼亚(11个)、南非(10个)、莫桑比克(8个)、加拿大(8个)以及马达加斯加(6个)和中国(6个)等也均有涉及(图2)。

4.2 主要矿业企业

全球锆-钛矿产资源及相关矿业项目主要集中在澳大利亚、英国、美国和爱尔兰等国大型矿业公司手中(表2),主要包括:澳大利亚艾路卡资源有限公司(Iluka Resources Limited),持有矿业项目主要为Eucla Basin、Perth Basin、Murray Basin 和 Sierra Rutile等(Iluka, 2019);英国力拓公司(Rio Tinto),持

有矿业项目主要为QMM、Richards Bay、Lac Allard 和 Kiswera 等(Rio Tinto, 2019);美国特诺公司(Tronox Holdings plc),持有矿业项目主要为Fairbreeze、Namakwa、Murray Basin Exploration Area、South West WA 和 Tiwest 等(Tronox, 2019);澳大利亚阿斯创公司(Astron Corporation Limited),持有矿业项目主要为Donald 和 Niafarang 等(Astron, 2019);爱尔兰肯梅尔资源公司(Kenmare Resources Plc),持有矿业项目主要为Moma 等(Kenmare Resources, 2019;任军平等,2021);澳大利亚贝斯资源有限公司(Base Resources Limited),持有矿业项目主要为Toliara 和 Kwale 等(Base Resources, 2019)。

5 锆-钛矿产资源供需现状

5.1 全球锆矿资源供需现状

5.1.1 主要锆矿资源生产国

统计数据显示(表3),2015—2021年全球锆矿资源产量为122~160万t,总体趋于平稳,近两年受疫情影响,产能下降较为明显,2021年总产量为122万t;主要生产国为澳大利亚(40万t)、南非(27万t)、中国(14万t)和莫桑比克(11万t)。

5.1.2 锆矿资源贸易现状

2020年,全球锆矿资源出口量为110万t,其中

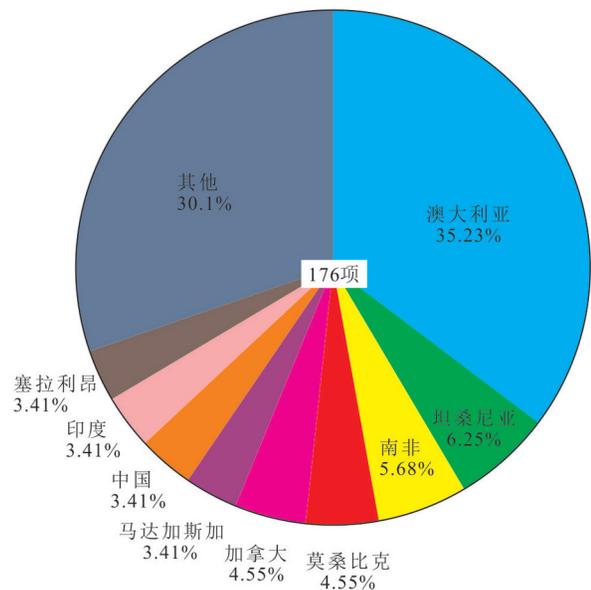


图2 全球主要锆-钛矿业项目国别分布
Fig.2 Distribution of major zirconium and titanium mining projects in the world

表2 主要矿业公司所控制的锆-钛矿产资源量
Table 2 Resources of zirconium and titanium controlled by major mining companies

| 序号 | 矿业公司 | 所属国家 | 资源量/万t | | | 总资源量/万t | 产能/万t |
|----|-----------------------------|------|--------|-----|-------|---------|--------|
| | | | 锆石 | 金红石 | 钛铁矿 | | |
| 1 | Sheffield Resources Limited | 澳大利亚 | 3296 | 241 | 16693 | 20230 | 46.39 |
| 2 | Tronox Holdings Plc | 美国 | — | — | — | 16429 | 29.10 |
| 3 | Kenmare Resources Plc | 爱尔兰 | 1000 | 330 | 15000 | 16330 | 104.33 |
| 4 | Rio Tinto | 英国 | 556 | — | 15120 | 15676 | 111.60 |
| 5 | Iluka Resources Limited | 澳大利亚 | 1654 | 992 | 9924 | 12570 | 102.10 |
| 6 | Savannah Resources Plc | 英国 | 380 | 220 | 8100 | 8700 | 45.60 |
| 7 | Exxaro Resources Limited | 南非 | 788 | — | 7309 | 8097 | — |
| 8 | Astron Corporation Limited | 澳大利亚 | 2213 | 932 | 3728 | 6873 | — |
| 9 | Base Resources Limited | 澳大利亚 | 432 | 210 | 5064 | 5706 | 40.00 |
| 10 | Diatreme Resources Limited | 澳大利亚 | 386.4 | 414 | — | 800.4 | 7.94 |

注:数据源自S&P Global Market Intelligence, 2021。

南非为全球最大的锆矿资源净出口国,共计33.2万t,占比达30.18%,其次为澳大利亚(25.36%)、莫桑比克(9.55%)、塞内加尔(7.36%)及印度尼西亚(5.81%)等(图3)。进口贸易方面,中国为全球最大的锆矿资源净进口国,2020年共计进口锆矿资源67.9万t,占比达61.73%,其次为西班牙8.73万t(7.94%)、荷兰3.23万t(2.94%)等(图4)。

5.2 全球钛矿资源供需现状

5.2.1 主要钛矿资源生产国

2015—2021年全球钛矿资源(钛铁矿+金红石)产量为630~880万t(表4),其中2021年产量为883万t;钛铁矿主要生产国为中国(210万t)、南非(82万t)、加拿大(69万t)、澳大利亚(66万t)和莫桑比克(59万t);金红石主要生产国为澳大利亚(14万t)、塞拉利昂(12万t)、南非(11万t)、乌克兰(9.4万t)和肯尼亚(7.4万t)。

表3 全球锆矿资源产量

Table 3 Global production of zirconium resources

| 国家 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 澳大利亚 | 57 | 45 | 60 | 56 | 55 | 40 | 40 |
| 南非 | 38 | 36 | 40 | 35 | 37 | 28 | 27 |
| 中国 | 14 | 14 | 14 | 14 | 8 | 14 | 14 |
| 莫桑比克 | 5 | 7 | 8 | 5 | 5 | 11 | 11 |
| 塞内加尔 | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 | 6 | 7 |
| 印度尼西亚 | 11 | 11 | 12 | — | — | 6 | 6 |
| 美国 | 8 | — | 5 | 10 | 10 | 3 | 3 |
| 肯尼亚 | — | — | — | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 其他国家 | 11 | 10 | 11 | 17 | 17 | 12 | 11 |
| 合计 | 153 | 132 | 160 | 148 | 144 | 123 | 122 |

注:数据源自Mineral Commodity Summaries 2015—2021, USGS(ZrO₂/万t)。

5.2.2 钛矿资源贸易现状

2020年,全球钛矿资源出口量为680万t,其中莫桑比克为全球最大的钛矿资源净出口国,共计130万t,占比达19.12%,其次为南非(9.7%)、塞内加尔(7.35%)、乌克兰(7.35%)、马达加斯加(7.24%)、澳大利亚(7.21%)及越南(7.00%)等(图5)。进口贸易方面,中国为全球最大的钛矿资源净进口国,2020年共计进口钛矿资源240万t,占比达35.29%,其次为美国62.5万t(9.19%)、加拿大33.5万t(4.93%)等(图6)。尽管中国是全球最大的钛矿资源生产国之一,但对于高品质钛精矿仍需大量进

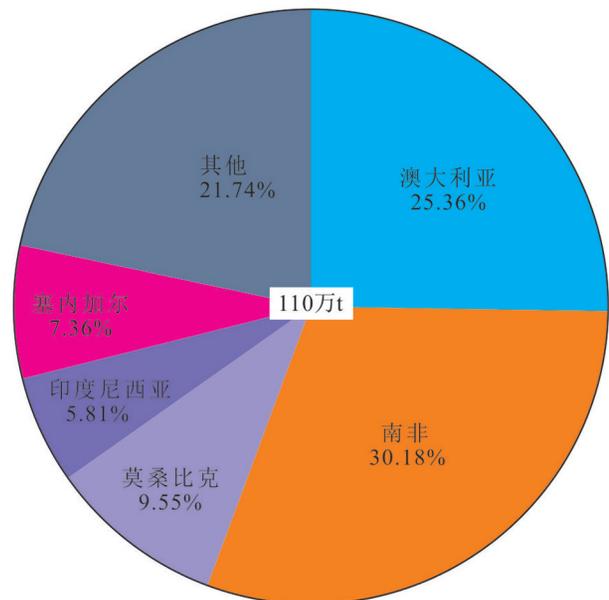


图3 全球主要锆矿资源出口国占比(数据来源:Resourcetrade.earth, 2020)

Fig.3 Proportion of major zirconium resource exporters in the world (data sources:Resourcetrade.earth, 2020)

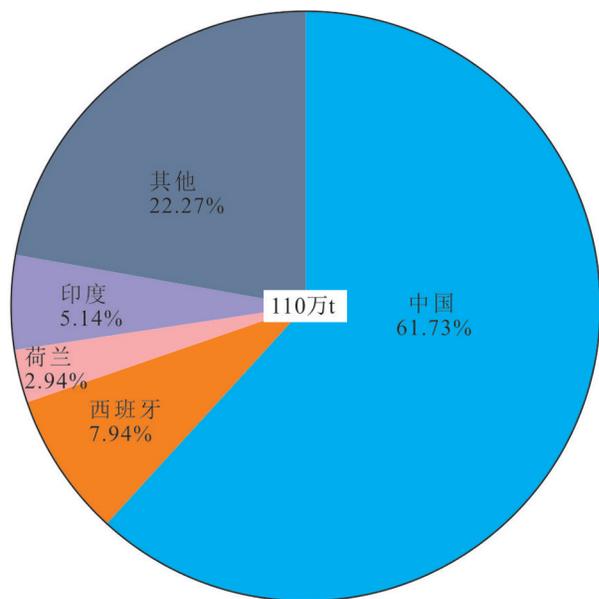


图4 全球主要锆矿资源进口国占比份额(数据来源: ResourceTrade.earth, 2020)

Fig.4 Proportion of major zirconium resource importers in the world (data sources: ResourceTrade.earth, 2020)

口,自2013年以来,中国钛精矿对外依存度一直处于60%以上(李政和陈从喜,2020)。

5.3 中国锆-钛矿产资源供需格局

5.3.1 锆矿资源供需格局

2011—2020年,中国锆矿资源进口量在45.6~82.9万t,其中2020年为67.9万t(图7)。而进口来源国方面,澳大利亚为中国最大的锆矿资源来源国,2020年共进口20.6万t,占比达30.34%,其次为南非19.4万t(28.57%)、莫桑比克8.75万t(12.89%)等(图8)。

5.3.2 钛矿资源供需格局

2011—2020年,中国钛矿资源进口量在140~240万t,其中2020年为最高的240万t(图9)。而进口来源国方面,莫桑比克为中国最大的钛矿资源来源国,2020年共进口74.4万t,占比达31%,其次为越南42.1万t(17.54%)、肯尼亚26.8万t(11.17%)等(图10)。

6 中国锆-钛矿产资源利用趋势

目前,中国锆矿资源的消费领域仍主要集中在

表4 全球钛矿资源产量(TiO_2 /万t)

Table 4 Global production of titanium resources (TiO_2 /万t)

| 矿种 | 国家 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 钛 铁 矿 | 中国 | 85 | 84 | 80 | 210 | 210 | 280 | 280 |
| | 南非 | 128 | 102 | 130 | 77 | 82 | 102 | 100 |
| | 莫桑比克 | 46 | 54 | 55 | 58 | 59 | 97 | 97 |
| | 加拿大 | 60 | 60 | 48 | 63 | 69 | 60 | 60 |
| | 澳大利亚 | 72 | 78 | 90 | 72 | 66 | 48 | 48 |
| | 挪威 | 26 | 26 | 26 | 24 | 26 | 44 | 44 |
| | 乌克兰 | 38 | 21 | 35 | 37 | 38 | 46 | 43 |
| | 塞内加尔 | 26 | 25 | 30 | 30 | 29 | 30 | 36 |
| | 马达加斯加 | 14 | 9 | 14 | 23 | 30 | 25 | 31 |
| | 越南 | 36 | 24 | 30 | 11 | 15 | 14 | 22 |
| | 肯尼亚 | 27 | 28 | 38 | 27 | 20 | 20 | 19 |
| | 印度 | 18 | 18 | 20 | 32 | 32 | 17 | 18 |
| | 美国 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | 巴西 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 3 | 7 |
| 其他国家 | 8 | 7 | 9 | 8 | 9 | 7 | 7 | |
| 合计 | | 609 | 551 | 620 | 689 | 702 | 803 | 822 |
| 金 红 石 | 澳大利亚 | 38 | 38 | 45 | 14.1 | 14 | 19 | 20 |
| | 塞拉利昂 | 11.3 | 13 | 16 | 11.4 | 12 | 11.4 | 12 |
| | 乌克兰 | 9 | 9.5 | 9 | 9.4 | 9.4 | 9.5 | 9.5 |
| | 南非 | 6.7 | 6.7 | 6.5 | 10.3 | 11 | 8.6 | 9 |
| | 肯尼亚 | 7.1 | 8.4 | 8 | 9 | 7.4 | 7.3 | 7.1 |
| | 印度 | 1.8 | 1.9 | 2 | 1.5 | 1.4 | 1.1 | 1.1 |
| | 塞内加尔 | — | 0.9 | 1 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1 |
| | 莫桑比克 | — | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 0.6 | 0.9 |
| | 其他国家 | 1.4 | 0.8 | 1.5 | 2.1 | 2.9 | 1.3 | 1.3 |
| 合计 | | 75.3 | 79.9 | 89.7 | 59.5 | 59.8 | 59.7 | 61.9 |
| 合计(钛铁矿和金红石) | | 684.3 | 630.9 | 709.7 | 747 | 761.8 | 862.7 | 883.9 |

注:数据源自 Mineral Commodity Summaries 2015—2021, USGS。

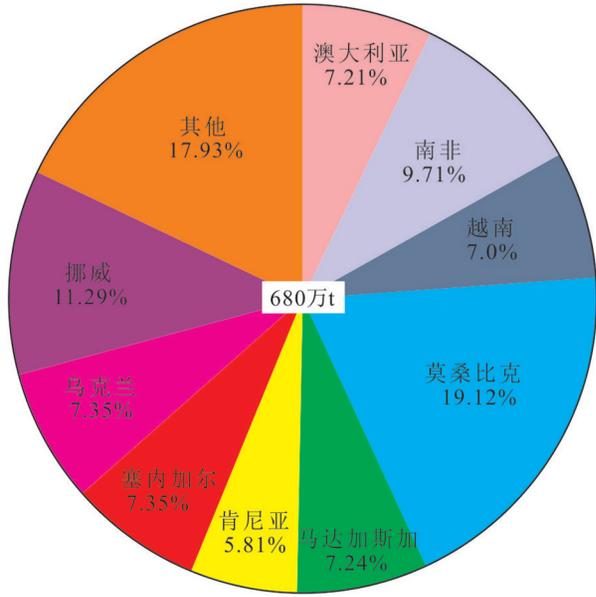


图5 全球主要钛资源出口国占份额(数据来源: Resourcetrade.earth, 2020)

Fig.5 Proportion of major titanium resource exporters in the world (data sources: Resourcetrade.earth, 2020)

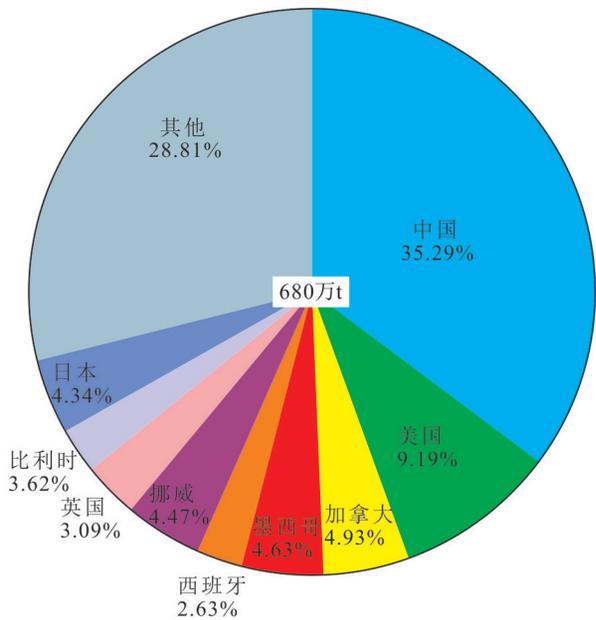


图6 全球主要锆资源进口国占份额(数据来源: Resourcetrade.earth, 2020)

Fig.6 Proportion of major titanium resource importers in the world (data sources: Resourcetrade.earth, 2020)

陶瓷、化学锆及电熔锆等领域(虞平, 2011, 2016; 黄淑梅等, 2014; 孙宏伟等, 2019), 但近年来锆矿资源在航空航天、核反应及原子能领域的消费占比逐渐

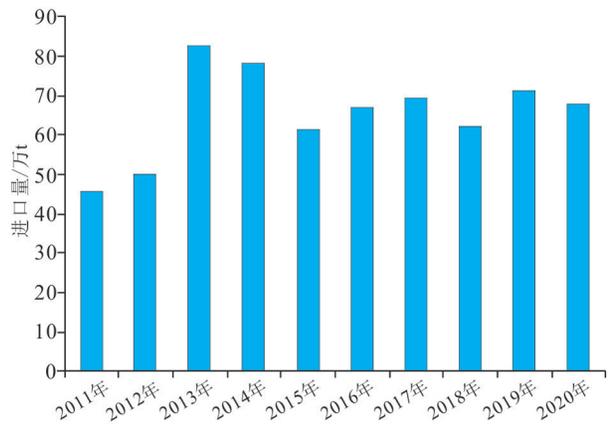


图7 2011—2020 中国锆矿资源进口量(数据来源: Resourcetrade.earth, 2020)

Fig.7 Zirconium resource imports from 2011 to 2020 (data sources: Resourcetrade.earth, 2020)

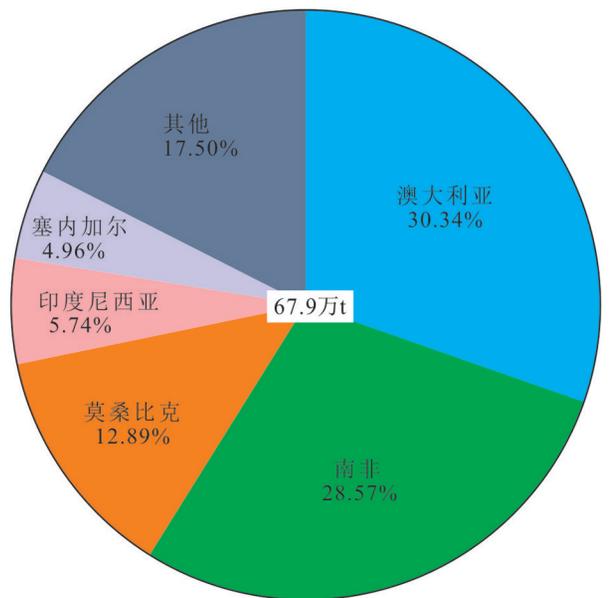


图8 2020年中国锆矿资源进口来源(数据来源: Resourcetrade.earth, 2020)

Fig.8 China imported zirconium resource in 2020 (data sources: Resourcetrade.earth, 2020)

升高。未来,随着高新技术行业中的锆制品如高纯化学锆、电容锆以及精密铸造等需求量的增加,对锆矿资源的需求仍将保持较快增长(谭化川等, 2015; 薛翻琴等, 2016; 孙宏伟等, 2019)。而随着中国核电事业进入快速发展阶段,也将催生核级锆新需求。因此,即使传统领域对锆矿资源的需求减弱,中国对锆矿资源的需求仍将保持较快增长,在国内锆矿资

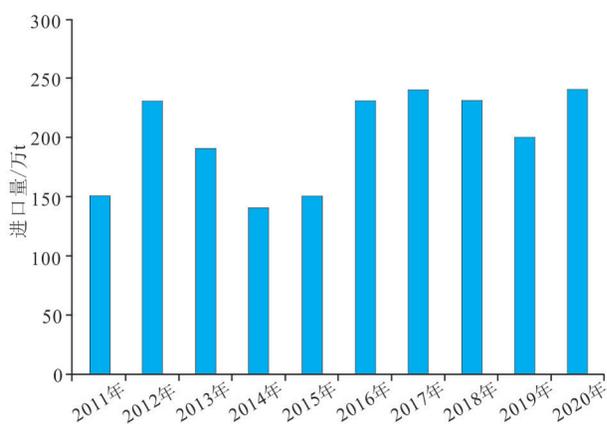


图9 2011—2020中国钛矿资源进口量(数据来源: Resourcetrade.earth, 2020)

Fig.9 Titanium resource imports from 2011 to 2020 (data sources: Resourcetrade.earth, 2020)

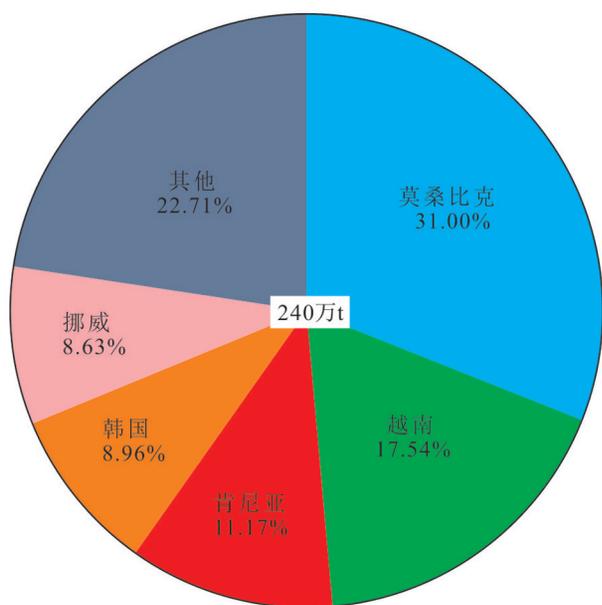


图10 2020年中国钛矿资源进口来源(数据来源: Resourcetrade.earth, 2020)

Fig.10 China imported titanium resource in 2020 (data sources: Resourcetrade.earth, 2020)

源不足的大背景下,对外依存度将持续高位运行。

中国工业用钛方面仍以传统化工、电力、冶金、制盐等领域为主,其中钛白粉(主要用于建筑涂料)更是占比达60%左右,而新兴航空航天、海洋工程、医药及休闲体育等领域占比不足30%(吴景荣等,

2014;张晓伟等,2019;陈从喜等,2020)。未来随着中国房地产市场的收缩,传统领域的钛矿资源消费量将有所下降,但在中国经济高质量发展的要求下,航空航天、海洋工程、休闲体育以及医药等钛资源新兴领域需求将快速增长(姚震和邓锋,2018),这也将进一步加大中国对高品质钛矿资源的需求,可能导致进口量的进一步提升。

7 结 论

(1)全球锆-钛矿产资源具有分布集中、供需严重分离的特征,其中锆矿资源主要集中在澳大利亚(67.29%)、南非(10.41%)和莫桑比克(2.88%)三个国家,占比80%以上。全球钛铁矿资源主要分布在澳大利亚(32.47%)、中国(29.87%)、印度(11.04%)、巴西(5.58%)和挪威(4.81%);金红石资源则主要分布在澳大利亚(61.51%)、印度(15.69%)、南非(12.94%)、乌克兰(5.30%)和莫桑比克(1.87%)。

(2)中国是全球最大的锆-钛矿产资源消费国,也是最大的净进口国,澳大利亚和莫桑比克分别为我国最大的锆、钛矿资源来源国;南非和莫桑比克分别为锆、钛矿资源最大出口国(2020年)。

(3)中国锆矿资源短缺,主要依赖进口,而中国钛矿资源尽管丰富,但资源禀赋差,高品质钛矿亦需进口。未来需要进一步加大勘探开发投入,并不断推进产业结构调整,提升产品竞争力,形成一个稳定、安全、多元、健康的资源利用与保障体系。

(4)非洲东海岸锆-钛矿产资源储量大、开发程度低且以经济价值高的砂矿型为主,未来将是全球锆-钛矿产资源的主要潜力区,莫桑比克、坦桑尼亚、肯尼亚、马达加斯加等将是锆-钛矿产开发的重点潜力国。

致谢:在成文过程中,中国地质调查局天津地质调查中心贺福清工程师给予了指导和帮助,匿名审稿专家和编辑老师提供了宝贵的意见,在此一并表示衷心的感谢!

References

- Astron Corporation Limited. 2019. Annual Report[EB/OL]. <http://www.astronlimited.com.au/business/ANNUAL-REPORTS.aspx>.
- Base Resources. 2019. Annual Report[EB/OL]. <https://www.baseresources.com.au/investors/reports/>.
- Che Dong, Wang Jianping, Wu Qixin, Gu Ya, Yu Chao. 2016. China's

- zirconium resource situation and suggestions for sustainable development[J]. *Resources and Industries*, 18(3): 23–28 (in Chinese with English abstract).
- Chen Congxi, Cui Rongguo, Li Zheng, Zhang Yingxin. 2020. Research progress, definition, classification, and application prospect of high-tech minerals[J]. *Land and Resources Information*, 10: 5–11 (in Chinese with English abstract).
- Chen Qishen, Yu Wenjia, Zhang Yanfei. 2016. *Point Stone: Research on the Development of Global Mineral Resources Industry in the Next 20 Years*[M]. Beijing: Science Press, 483–497(in Chinese with English abstract).
- Chong Xiaoxiao, Luan Wenlou, Wang Fengxiang, Qiu Tiedong, Zhang Wanyi. 2020. Overview of global titanium resources status and titanium consumption trend in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 40(2): 162–170 (in Chinese with English abstract).
- Ding Jianhua, Zhang Yong, Li Lixing, Li Houmin. 2020. Metallogenic geological characteristics and titanium resources potential in China[J]. *Geology in China*, 47(3): 627–644 (in Chinese with English abstract).
- Dong Jimeng, Ren Junping, Sun Hongwei, Gu Alei, Zhang Jinrui, Wang Jie, Zuo Libo, Peng Lina. 2022. Mineral resources and investment environment in Mozambique[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(1): 184–195 (in Chinese with English abstract).
- Hinton R W, Upton B G J. 1991. The chemistry of zircon: Variations within and between large crystals from syenite and alkali basalt xenoliths[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(11): 3287–3302.
- Huang Shumei, Chen Weidong, Wang Yunfeng, He Lei, Guo Wei. 2014. Current situation and developing strategy of the zirconium oxychloride industry in China[J]. *Titanium*, 31(2): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Iluka Resources Limited. 2019. Annual Report[EB/OL]. <https://www.iluka.com>.
- Janssen A, Putnis A. 2011. Processes of oxidation and HCl-leaching of Tellnes ilmenite[J]. *Hydrometallurgy*, 109 (3/4): 194–201.
- Kenmare Resources. 2019. Annual Report [EB/OL]. <https://www.kenmareresources.com/investors/reports-and-presentations>.
- Li Zheng, Chen Congxi. 2020. Development status of global titanium resources industry[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 42(2): 245–250 (in Chinese with English abstract).
- Liu Haoyang, Ma Zhe. 2017. Analysis of the zirconium resources security in China[J]. *China Mining Magazine*, 26(9): 6–10 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lansheng, Xie Liangzhen, Li Yongsen, Zhang Yuxu. 1996. *Atlas of Black Non Ferrous Metal Mineral Resources in China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–88 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin. 1984. *Element Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1–548 (in Chinese with English abstract).
- Murty V G K, Upadhyay R, Asokan S. 2007. Recovery of zircon from Sattankulam deposit in India—problems and prospects[C]//The 6th International Heavy Minerals Conference "Back to Basics", the South African Institute of Mining and Metallurgy. South Africa, 69–74.
- Ohara S, Naka T, Sunakawa K, Kubuki S, Senna M, Hashishin T. 2020. Emergence of ferromagnetism due to charge transfer in compressed ilmenite powder using super-high-energy ball milling[J]. *Scientific Reports*, 10: 1–7.
- Perks C, Mudd G. 2021. A detailed assessment of global Zr and Ti production[J]. *Mineral Economics*, 34: 345–370.
- Peterson C D, Komar P D, Scheidegger K F. 1986. Distribution, geometry, and origin of heavy mineral placer deposits on Oregon beaches[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 56: 67–77.
- Pidgeon R T, Nemchin A A, Hitchen G J. 1998. Internal structures of zircons from Archaean granites from the Darling Range batholith: implications for zircon stability and the interpretation of zircon U–Pb ages[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132 (3): 288–299.
- Ren Junping, Wang Jie, Gu Alei, Zuo Libo, Sun Hongwei, Dai Chaocheng, Xu Kangkang, Tang Wenlong, Peng Lina, Wang Feicui, Xing Shi, Liu Zijiang. 2021. Development status and investment environment of the ilmenite–zircon resources in Mozambique[J]. *Geology and Resources*, 30(1): 45–52 (in Chinese with English abstract).
- Resourcetrade.earth. 2020. The import and export data about zirconium and titanium in the world[EB/OL]. <https://resourcetrade.earth/?year=2020&importer=156&category=1534&units=value&autozoom=1>.
- Rio Tinto. 2019. Annual Report[EB/OL]. <https://www.riotinto.com/invest/reports/annual-report>.
- S & P Global Market Intelligence. 2021. *Metals & Mining Properties* [EB/OL]. <https://platform.mi.spglobal.com/web/client?auth=inherit&overridecdc=1&ignoreidmcontext=1#office/screener?perspective=243327>.
- Shen Zhengwei, Zhang Fangfang, Han Cong, Han Sipeng, Zhao Jingwen. 2016. Situation analysis and sustainable development suggestion of zirconium resources in China[J]. *China Mining Magazine*, 25(3): 16–20 (in Chinese with English abstract).
- Suiekpayev Y S, Sapargaliyev Y M, Dolgoplova A V, Pirajno F, Seltmann R, Khromykh S V, Bekenova G K, Kotler P D, Kravchenko M M, Azelkhanov A Z. 2021. Mineralogy, geochemistry and U–Pb zircon age of the Karaotkel Ti–Zr placer deposit, Eastern Kazakhstan and its genetic link to the Karaotkel–Preobrazhenka intrusion[J]. *Ore Geology Reviews*, 131: 104015.
- Sun Hongwei, Ren Junping, Wang Jie, Gu Alei, Wu Xingyuan, He Fuqing, Zuo Libo, Chipilauka Mukofu, Alphet Phaskani Dokowe,

- Ezekiah Chikambwe, Liu Zijiang, Xing Shi. 2021. Age and geochemistry of the granitoids from the Lunte area, Northeastern Zambia: Implications for magmatism of the Columbia supercontinent[J]. *China Geology*, 4(4): 658–672.
- Sun Hongwei, Wang Jie, Ren Junping, Zhang Weibo, Tang Wenlong, Wu Xingyuan, Dang Zhicai. 2019. Present situation and utilization trend of zirconium resources in the world[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 39(5): 98–105 (in Chinese with English abstract).
- Sun Renbin, Wang Qiushu, Yuan Chunhua, Zhang Chao, Zhang Xingang, Ba Teer. 2019. Analysis of global titanium resources situation[J]. *China Mining Magazine*, 28(6): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Tan Huachuan, Zhang Yanfei, Chen Qishen, Yang Yongqiang, Zhang Yalong. 2015. The demand trend of zircon resources and analysis of supply and demand in China from 2015 to 2025[J]. *Resources Science*, 37(5): 998–1007 (in Chinese with English abstract).
- Tronox Holdings plc. 2019. Annual Report[EB/OL]. <https://www.tronox.com/?s=annual+report>.
- Uddin A, Lundberg N. 1998. Cenozoic history of the Himalayan–Bengal system: Sand composition in the Bengal basin, Bangladesh[J]. *GSA Bulletin*, 110: 497–511.
- USGS. 2015. Mineral commodity summaries 2015[EB/OL]: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/mcs/mcs2015.pdf>.
- USGS. 2016. Mineral commodity summaries 2016[EB/OL]: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/mcs/mcs2016.pdf>.
- USGS. 2017. Mineral commodity summaries 2017[EB/OL]: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/mcs/mcs2017.pdf>.
- USGS. 2018. Mineral commodity summaries 2018[EB/OL]: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/mcs/mcs2018.pdf>.
- USGS. 2019. Mineral commodity summaries 2019[EB/OL]: https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs2019_all.pdf.
- USGS. 2020. Mineral commodity summaries 2020[EB/OL]: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>.
- USGS. 2021. Mineral commodity summaries 2021[EB/OL]: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>.
- USGS. 2022. Mineral commodity summaries 2022[EB/OL]: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2022.pdf>.
- Wang Jie, Liu Xiaoyang, Ren Junping, Sun Kai, Gong Penghui, He Fuqing. 2022. Precambrian mineralization in Tanzania[J]. *North China Geology*, 45(1):101–110 (in Chinese with English abstract).
- Wen Jun, Zhu Helin, Liu Zhicheng, Zhang Hangfei, Zhang Jinyuan, Zhao Wei, Guo Wenyan, Chen Dongfang. 2022. Discovery of a new type of sedimentary titanium deposit at the bottom of Xuanwei Formation of Upper Permian in Muchuan area, southern Sichuan[J]. *Geology in China*, 49(2): 673–674 (in Chinese with English abstract).
- Watson E B, Wark D A, Thomas J B. 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(4): 413–433.
- Wu Bin, Can Junxing, Tang Yuqiang, Zou Jun, Yu Zhou. 2012. Geological features of the vanadium–titanium magnetite deposit in the Hongge Area and its geophysical prospecting [J]. *Geology and Prospecting*, 48(1): 140–147 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jingrong, Wang Jianping, Xu Yu, Mi Kuifeng. 2014. Current situation, problems and countermeasures of titanium resources in China[J]. *Mining Research and Development*, 34(1): 108–112 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xian, Zhang Jian. 2006. Geographical distribution and characteristics of titanium resources in China [J]. *Titanium Industry Progress*, 23(6): 8–13 (in Chinese with English abstract).
- Xing Changming, Wang Yan, Zhang Mingjie. 2012. Volatile and C–H–O isotopic compositions of giant Fe–Ti–V oxide deposits in the Panxi region and their implications for the sources of volatiles and the origin of Fe–Ti oxide ores [J]. *Science China: Earth Sciences*, 42(11): 1701–1715 (in Chinese with English abstract).
- Xu Kangkang, Liu Xiaoyang, Sun Kai, He Shengfei, Gong Penghui, Wu Xingyuan, Sun Hongwei. 2020. Zircon U–Pb LA–MC–ICP–MS dating and geological significance of the granitoids in the Ubendian Belt, southwestern Tanzania[J]. *Geological Survey and Research*, 43(1): 55–62 (in Chinese with English abstract).
- Xu Kangkang, Sun Kai, He Shengfei, Gong Penghui, Zhang Hang, Lu Yiguan. 2021. Detrital zircon U–Pb dating of the garnet mica schist and its geological implications in the Solwezi area, Northwestern Zambia[J]. *North China Geology*, 44(3): 1–3 (in Chinese with English abstract).
- Xue Fanqin, Tan Huachuan, Zhang Yanfei. 2016. The global supply and demand trend of zircon resources[J]. *China Mining Magazine*, 25(8): 47–52 (in Chinese with English abstract).
- Yao Zhen, Deng Feng. 2018. Discussion on the evolution and development trend of titanium resources industry in China[J]. *Metal Mine*, 23(6): 61–64 (in Chinese with English abstract).
- Yu Ping. 2011. Current situation and prospects of zircon sand market in China[J]. *China Metal Bulletin*, 21: 20–21 (in Chinese with English abstract).
- Yu Ping. 2016. Current situation and future trends of zircon sand supply and demand in China[C]// *International Zirconium Industry Conference in 2016*, 16–20.
- Zhang Jianwen, Wang Haidong, Gong Wenyong, Ma Chongzhen, Zhang Hua, Liao Qian. 2019. Analysis on the development and utilization situation of zirconium resource in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 39(5): 106–110 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Xiaowei, Zhang Wanyi, Tong Ying, Ouyang Jiangcheng, Song Minglei. 2019. Current situation and utilization trend of global titanium resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 39(5): 68-75 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xin'an, Zhang Yingxin. 2011. Improve the exploitation and utilization of high-tech minerals-rare earth, rare metal and rare-scattered elements to a strategic height[J]. Land and resources information, 6: 2-7.
- Zhao Yiming. 2008. Genetic types, distribution and main geological characteristics of rutile deposits [J]. Mineral Deposits, 27(4): 520-531 (in Chinese with English abstract).
- ### 中文参考文献
- 车东, 王建平, 吴起鑫, 顾亚, 余超. 2016. 我国锆资源形势及可持续发展建议[J]. 资源与产业, 18(3): 23-28.
- 陈从喜, 崔荣国, 李政, 张迎新. 2020. 高技术矿产的内涵、分类及应用前景[J]. 国土资源情报, 10: 5-11.
- 陈其慎, 于汶加, 张艳飞. 2016. 点石-未来20年全球矿产资源产业发展研究[M]. 北京: 科学出版社, 483-497.
- 崇霄霄, 栾文楼, 王丰翔, 邱铁栋, 张万益. 2020. 全球钛资源现状概述及我国钛消费趋势[J]. 矿产保护与利用, 40(2): 162-170.
- 丁建华, 张勇, 李立兴, 李厚民. 2020. 中国钛矿成矿地质特征与资源潜力评价[J]. 中国地质, 47(3): 627-644.
- 董津蒙, 任军平, 孙宏伟, 古阿雷, 张津瑞, 王杰, 左立波, 彭丽娜. 2022. 莫桑比克矿产资源特征及投资环境[J]. 地质通报, 41(1): 184-195.
- 黄淑梅, 陈伟东, 王运锋, 何蕾, 郭薇. 2014. 中国氧化锆产业现状及发展对策[J]. 钛工业进展, 31(2): 1-7.
- 李政, 陈从喜. 2020. 全球钛资源行业发展现状[J]. 地球学报, 42(2): 245-250.
- 刘皓阳, 马哲. 2017. 中国锆资源安全分析[J]. 中国矿业, 26(9): 6-10.
- 刘兰笙, 谢良珍, 李永森, 章雨旭. 1996. 中国黑色有色金属矿产图集[M]. 北京: 地质出版社, 1-88.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1-548.
- 任军平, 王杰, 古阿雷, 左立波, 孙宏伟, 戴朝成, 许康康, 唐文龙, 彭丽娜, 汪翡翠, 邢仕, 刘子江. 2021. 莫桑比克钛锆砂矿资源开发现状及投资环境分析[J]. 地质与资源, 30(1): 45-52.
- 申正伟, 张方方, 韩聪, 韩思鹏, 赵靖文. 2016. 我国锆资源现状分析及可持续发展建议[J]. 中国矿业, 25(3): 16-20.
- 孙宏伟, 王杰, 任军平, 张伟波, 唐文龙, 付超, 吴兴源, 党智财. 2019. 全球锆矿资源现状与利用趋势[J]. 矿产保护与利用, 39(5): 98-105.
- 孙仁斌, 王秋舒, 元春华, 张潮, 张鑫刚, 巴特尔. 2019. 全球钛资源形势分析[J]. 中国矿业, 28(6): 1-6.
- 谭化川, 张艳飞, 陈其慎, 杨永强, 张亚龙. 2015. 2015-2025年中国锆英砂资源供需形势分析[J]. 资源科学, 37(5): 998-1007.
- 王杰, 刘晓阳, 任军平, 孙凯, 龚鹏辉, 贺福清. 2022. 坦桑尼亚前寒武纪成矿作用[J]. 华北地质, 45(1): 101-110.
- 文俊, 竹合林, 刘治成, 张航飞, 张金元, 赵伟, 郭文彦, 陈东方. 2022. 川南沐川地区上二叠统宣威组底部发现新类型(沉积型)钛矿床[J]. 中国地质, 49(2): 673-674.
- 吴景荣, 王建平, 徐昱, 宓奎峰. 2014. 中国钛资源开发利用现状和存在的问题及对策[J]. 矿业研究与开发, 34(1): 108-112.
- 吴贤, 张健. 2006. 中国的钛资源分布及特点[J]. 钛工业进展, 23(6): 8-12.
- 武斌, 曹俊兴, 唐玉强, 邹俊, 余舟. 2012. 红格地区钒钛磁铁矿地质特征及地球物理找矿的探讨[J]. 地质与勘探, 48(1): 140-147.
- 邢长明, 王焰, 张铭杰. 2012. 攀西地区超大型钒钛磁铁矿床挥发份组成及其C-H-O稳定同位素研究: 对挥发份来源和矿石成因的约束[J]. 中国科学, 42(11): 1701-1715.
- 许康康, 刘晓阳, 孙凯, 何胜飞, 龚鹏辉, 吴兴源, 孙宏伟. 2020. 坦桑尼亚乌本迪带内花岗岩类的LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb年龄及地质意义[J]. 地质调查与研究, 43(1): 55-62.
- 许康康, 孙凯, 何胜飞, 龚鹏辉, 张航, 卢宜冠. 2021. 赞比亚西北省Solwezi地区石榴云母片岩的碎屑锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. 华北地质, 44(3): 1-3.
- 薛翻琴, 谭化川, 张艳飞, 杨永强, 张亚龙. 2016. 全球锆英砂资源供需格局分析[J]. 中国矿业, 25(8): 47-52.
- 姚震, 邓锋. 2018. 中国钛矿资源产业演变与发展趋势探讨[J]. 金属矿山, 23(6): 61-64.
- 虞平. 2011. 我国锆英砂市场现状及展望[J]. 中国金属通报, 21: 20-21.
- 虞平. 2016. 中国锆英砂供需现状及未来趋势[C]//2016国际铝业大会论文集, 16-20.
- 张建文, 王海东, 龚文勇, 马崇振, 张华, 廖乾. 2019. 中国锆矿资源开发利用形势分析[J]. 矿产保护与利用, 39(5): 106-110.
- 张晓伟, 张万益, 童英, 欧阳江城, 宋明磊. 2019. 全球钛矿资源现状与利用趋势[J]. 矿产保护与利用, 39(5): 68-75.
- 张新安, 张迎新. 2011. 把三稀金属等高新技术矿产的开发利用提高到战略高度[J]. 国土资源情报, 6: 2-7.
- 赵一鸣. 2008. 金红石矿床的类型、分布及其主要地质特征[J]. 矿床地质, 27(4): 520-531.