

doi: 10.12029/gc20210106

吴发富, 王建雄, 刘江涛, 曾国平, 向鹏, 胡鹏, 向文帅. 2021. 磷矿的分布、特征与开发现状[J]. 中国地质, 48(1): 82–101.

Wu Fafu, Wang Jianxiong, Liu Jiangtao, Zeng Guoping, Xiang Peng, Hu Peng, Xiang Wenshuai. 2021. Distribution, geology and development status of phosphate resources[J]. Geology in China, 48(1):82–101(in Chinese with English abstract).

磷矿的分布、特征与开发现状

吴发富, 王建雄, 刘江涛, 曾国平, 向鹏, 胡鹏, 向文帅

(中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205)

摘要:世界磷矿储量近 695 亿 t(2019 年), 但分布不均, 磷矿储量最为丰富的北非地区集中了全球 80% 以上的磷矿资源。该区域的摩洛哥和西撒哈拉是世界磷矿资源最为丰富的国家, 2019 年其磷矿储量达 500 亿 t, 占世界的近 72%。目前世界上主要利用的磷矿类型为沉积型磷块岩矿, 其最主要的成矿时代为震旦—寒武纪和中生代—新生代, 前者以中国西南部大量产出的海相磷矿床为代表, 后者以从摩洛哥和西撒哈拉到埃及一带的北非磷矿成矿省最为典型。2019 年排名世界前 10 位的产磷国为中国、摩洛哥和西撒哈拉、美国、俄罗斯、约旦、沙特阿拉伯、越南、巴西、埃及和秘鲁, 磷矿总产量逾 2 亿 t, 占世界总产量的 89.29%。传统上美国、俄罗斯、摩洛哥和中国等是世界磷矿的主要出口地区, 但随着北非和中东地区磷矿开发的不断深入和传统供给区资源的消耗, 近年来磷矿供应中心向北非、中东地区转移。2018 年世界磷矿粉出口前 10 位的国家有 5 个位于北非和中东地区, 且北非的摩洛哥是第一磷矿出口国。在磷肥的进出口方面, 近年世界磷肥进口国主要有印尼、巴西、美国、马来西亚、法国、澳大利亚、孟加拉国、罗马尼亚、巴拉圭和荷兰等, 出口国有中国、埃及、摩洛哥、以色列、澳大利亚、荷兰、黎巴嫩、墨西哥、秘鲁、阿根廷等。其中, 曾经的磷肥出口大国美国, 在 2006 年后逐渐转为磷肥进口国; 磷矿进口大国印度的磷肥近年来基本实现自给。中国以不占优势的磷矿储量(2019 年为 32 亿 t, 占世界储量的 4.61%), 在磷肥生产上除满足本国需要外还保持世界第一的磷肥出口, 近 10 年来的磷肥出口量都占世界的 18% 以上, 磷矿资源消耗速度快, 资源形势严峻。

关键词:磷矿; 地质特征; 储量; 产量; 世界分布

中图分类号: P618.42 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)01-0082-20

Distribution, geology and development status of phosphate resources

WU Fafu, WANG Jianxiong, LIU Jiangtao, ZENG Guoping,
XIANG Peng, HU Peng, XIANG Wenshuai

(Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract: The world's phosphate ore reserve nearly totals 69.5 billion tons (2019), but its distribution is uneven, more than 80% of which is concentrated in North Africa. Especially, Morocco and Western Sahara are the world's richest countries in phosphate resources, with reserves of 50 billion tons in 2019, accounting for nearly 72 percent of the world's total. At present, the sedimentary

收稿日期: 2020-09-14; 改回日期: 2020-12-16

基金项目: 中国商务部对外援助项目(201426)和中国地质调查局项目(DD20190443)联合资助。

作者简介: 吴发富, 男, 1980 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事境外区域地质矿产调查与研究工作; E-mail: 123988278@qq.com。

通讯作者: 刘江涛, 男, 1979 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事数学地质研究与地球化学调查工作; E-mail: hb.jtliu@foxmail.com。

phosphate deposit used in the world is the most important type, and most of these deposits were formed in two periods, Sinian–Cambrian and Mesozoic–Cenozoic. The former is represented by the large amount of Marine phosphate deposits produced in southwest China, while the latter is most typical of the North African phosphorous metallogenic province from Morocco and Western Sahara to Egypt. In 2019, the top 10 phosphorous producing countries were China, Morocco and Western Sahara, the United States, Russia, Jordan, Saudi Arabia, Vietnam, Brazil, Egypt and Peru, with a total phosphate ore output of more than 200 million tons, accounting for 89.29 percent of the world's total. Traditionally, the United States, Russia, Morocco and China are the main exporters of phosphate rock. However, with the development of the phosphorus resources in North Africa and the Middle East, coupled with the continuous reduction of phosphate resources in traditional supply areas, North Africa and the Middle East have gradually become a production and supply center of the world. Five of the world's top 10 phosphate rock exporters in 2018 were in North Africa and the Middle East, and Morocco in North Africa is the largest phosphate rock exporter. In terms of phosphate fertilizers, in recent years, the world's importers mainly include Indonesia, Brazil, the United States, Malaysia, France, Australia, Bangladesh, Romania, Paraguay, and the Netherlands; exporters are China, Egypt, Morocco, Israel, Australia, the Netherlands, Lebanon, Mexico, Peru and Argentina, etc. The United States, which was once a major exporter of phosphate fertilizer, gradually turned into an importer after 2006; India, a big importer of phosphate ore, has basically achieved self-sufficiency in phosphate fertilizer in recent years. With its undominant phosphate ore reserves (3.2 billion tons in 2019, accounting for 4.61% of the world's reserves), China is the world's largest exporter in terms of phosphate fertilizer production in addition to meeting its own needs. In the past 10 years, its phosphate ore resources account for more than 18% of the world's total phosphate fertilizer exports. For China, phosphate ore resources consumption speed is fast, its resource situation is not optimistic.

Key words: Phosphate; geological features; reserves; production; distribution

About the first author: WU Fafu, male, born in 1980, doctor, senior engineer, mainly engaged in geological survey and research in overseas regions; E-mail: 123988278@qq.com.

About the corresponding author: LIU Jiangtao, male, born in 1979, doctor, engaged in mathematical geology research and geochemical Survey; E-mail: hb.jtliu@foxmail.com.

Fund support: Supported by the Foreign Aid Project of the Ministry of Commerce of the People's Republic of China (No.201426) and the Project of China Geological survey (No.DD20190443).

1 引言

磷是重要的生命元素,也是重要的经济矿产资源,广泛应用于农业、养殖业、化工、医药、轻工和国防等领域,可用来制作化肥、黄磷、赤磷、磷酸及其磷化合物等。磷矿具有不可再生性、不可循环利用性等特点,属一次性矿产资源。据估计,世界磷矿可供开采300 a以上,而产磷大国摩洛哥的磷矿更是可开采2000 a以上(郝庆,2014;鲍荣华,2015),总体上世界磷矿可基本满足人类所需。但磷矿的分布不均,主要集中在西北非、中东、北美、中国以及俄罗斯等国家和地区,其中70%以上的磷矿位于西北非的摩洛哥和西撒哈拉(Hisao Ohtake and Satoshi Tsuneda, 2019)。据中国国家统计局的数据,2016年中国磷矿储量为32.4亿t,占世界的4.6%左右,居世界第二,但与世界第一的摩洛哥(储量为500亿t)相差很大,且中国磷矿丰而不富,贫矿多,

富矿少,难选矿多,易选矿少(刘建雄,2009),平均品位仅16.85%,远低于摩洛哥(33%)和美国(30%)(孙小虹等,2015)。在磷矿产量方面,近年来中国磷矿石产量稳居世界第1位,国家统计局数据显示,2019年中国磷矿石产量达9332.4万t,中国以不到全球5%的资源供应了全球53%以上的需求(崔荣国等,2019)。由于世界磷矿分布不均,欧美、印度等国家磷矿进口需求均较大,尤其欧盟国家92%的磷矿依靠进口(Hisao Ohtake and Satoshi Tsuneda, 2019),欧盟2017年提出的27种关键矿产中也列入了磷。本文对世界磷矿的分布与资源情况进行概述,对不同地区磷矿床的特征简要总结,并初步探讨世界磷矿的开发利用情况。

2 世界磷矿的资源禀赋与分布

2.1 世界磷矿的资源禀赋

世界磷矿产丰富,据美国地质调查局统计,

表1 2008—2019年世界磷矿主要资源国磷矿储量(亿t)

Table 1 The phosphate ore reserves of the world's top 22 countries from 2008 to 2019 (Unit: 100 million metric tons)

国家/地区	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
摩洛哥和西撒哈拉	57	57	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
中国	41	31.7	29.6	28.9	30.7	30.2	30.7	33.1	32.4	33	32	32
阿尔及利亚	/	/	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
叙利亚	1	1	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
巴西	2.6	2.6	3.4	3.1	2.7	2.7	2.7	3.2	3.2	17	17	17
沙特阿拉伯	/	/	/	/	7.5	2.11	2.11	9.6	6.8	14	14	14
南非	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	14
埃及	1	1	1	1	1	1	7.15	12	12	13	13	13
澳大利亚	0.82	0.82	0.82	2.5	4.9	8.7	10.3	10	11	11	11	12
美国	12	11	14	14	14	11	11	11	11	10	10	10
约旦	9	15	15	15	15	13	13	13	12	13	10	10
俄罗斯	2	2	13	13	13	13	13	13	13	7	6	6
哈萨克斯坦	/	/	/	/	/	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
秘鲁	/	/	/	2.4	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	4	4	2.1
突尼斯	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
以色列	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.3	1.3	1.3	1.3	0.74	0.67	0.62
塞内加尔	0.5	0.8	1.8	1.8	1.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
印度	/	/	/	0.061	0.061	0.35	0.35	0.65	0.65	0.65	0.46	0.46
墨西哥	/	/	/	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
多哥	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
越南	/	/	/	/	/	/	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
加拿大	0.25	0.15	0.05	0.02	0.02	0.02	0.76	/	/	/	/	/
其他国家	8.9	9.5	6.2	63	8.5	9.5	7.3	8.1	8.1	19	18.7	18.7
世界总储量	144.87	148.87	642.57	705.28	665.58	661.28	670.27	682.45	678.25	702.39	696.83	694.88

注:(1)中国2009—2016年的磷矿储量数据来源于国家统计局;(2)其他数据来源于美国地质调查局Mineral Commodity Summaries 2009—2020。

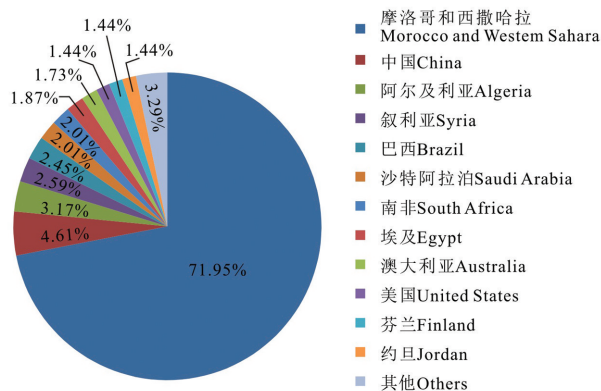


图1 2019年世界主要产磷国磷矿储量占比

Fig.1 Proportion of phosphate reserves of the world's top 12 resource countries in 2019

2019年世界磷矿储量为694.88亿t(表1),其中磷矿储量达10亿t以上的有摩洛哥和西撒哈拉、中国、阿尔及利亚、叙利亚、巴西、沙特阿拉伯、南非、埃及、澳大利亚、美国以及约旦等11个国家或地区(表1,

图1)。磷矿储量最高的国家是摩洛哥,达500亿t,占世界磷矿总储量的71.95%;中国磷矿储量32亿t,占世界磷矿总储量的4.61%,居世界第2位;阿尔及利亚磷矿储量22亿t,占世界磷矿总储量的3.17%,居世界第3位;叙利亚磷矿储量18亿t,占世界磷矿总储量的2.59%,居世界第4位;巴西磷矿储量17亿t,占世界磷矿总储量的2.45%,居世界第5位;沙特阿拉伯和南非磷矿储量都为14亿t,占世界磷矿总储量的2.01%,并列世界第6位;埃及磷矿储量13亿t,占世界磷矿总储量的1.87%,居世界第7位;澳大利亚磷矿储量12亿t,占世界磷矿总储量的1.73%,居世界第8位;美国和约旦磷矿储量都为10亿t,占世界磷矿总储量的1.44%,并列世界第9位。

从近年来世界磷矿储量的变化上看,由于摩洛哥和西撒哈拉的磷矿储量占据绝对主导地位,世界磷矿的变化趋势与摩洛哥磷矿变化趋势基本一致(表1,图2),显著变化发生在2010年,而且主要是

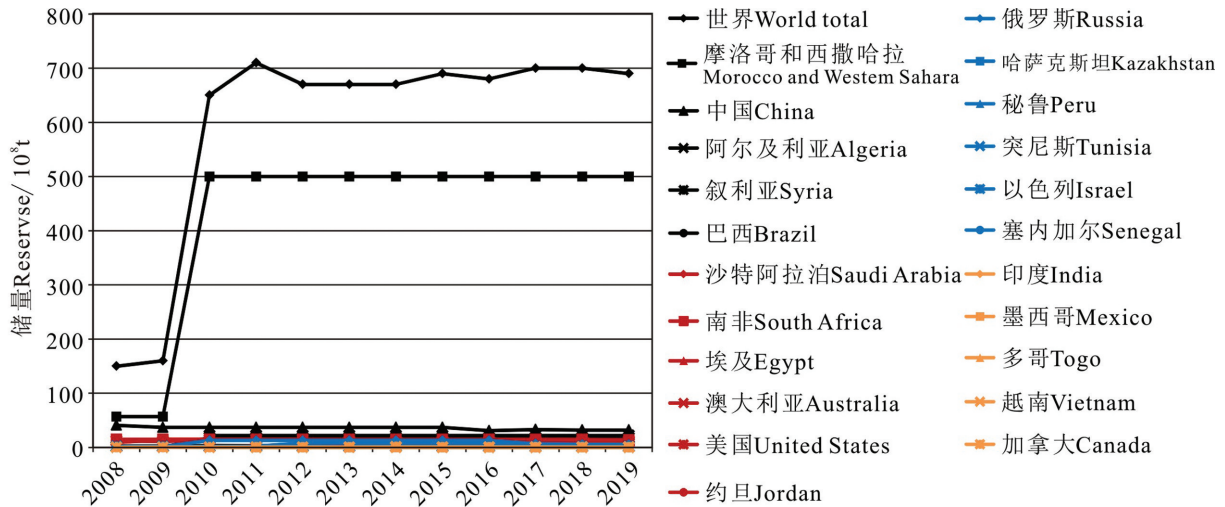


图2 2008—2019年世界主要产磷国磷矿储量变化趋势

Fig.2 Change trends of phosphate reserves of the world's top 22 resource countries from 2008 to 2019

由于摩洛哥和西撒哈拉磷矿储量的变化引起。2010年以前世界磷矿储量在144亿t左右,2010年由于摩洛哥和西撒哈拉磷矿储量的急剧增长(从2009年的57亿t猛增至2010年的500亿t),世界磷矿储量也随之大幅提高,从2009年的148.87亿t提高至2010年的642.57亿t。此后,摩洛哥和西撒哈拉的磷矿储量一直稳定在500亿t,而世界磷矿的储量也比较平稳,在642.57亿t到705.28亿t之间小幅

波动。除摩洛哥和西撒哈拉外,叙利亚的磷矿储量在2010年也有明显增加,从2010年之前的1亿t增加到2010年之后的18亿t;巴西的磷矿储量从2017年之前的3亿t左右增加到2017年之后的17亿t;沙特阿拉伯的磷矿储量在2017年显著增加后稳定在14亿t;埃及的磷矿储量2014年从1亿t大幅提升至7.5亿t,并在2015年和2017年再次提升到12亿t和13亿t;澳大利亚的磷矿储量显著增加发生在2015

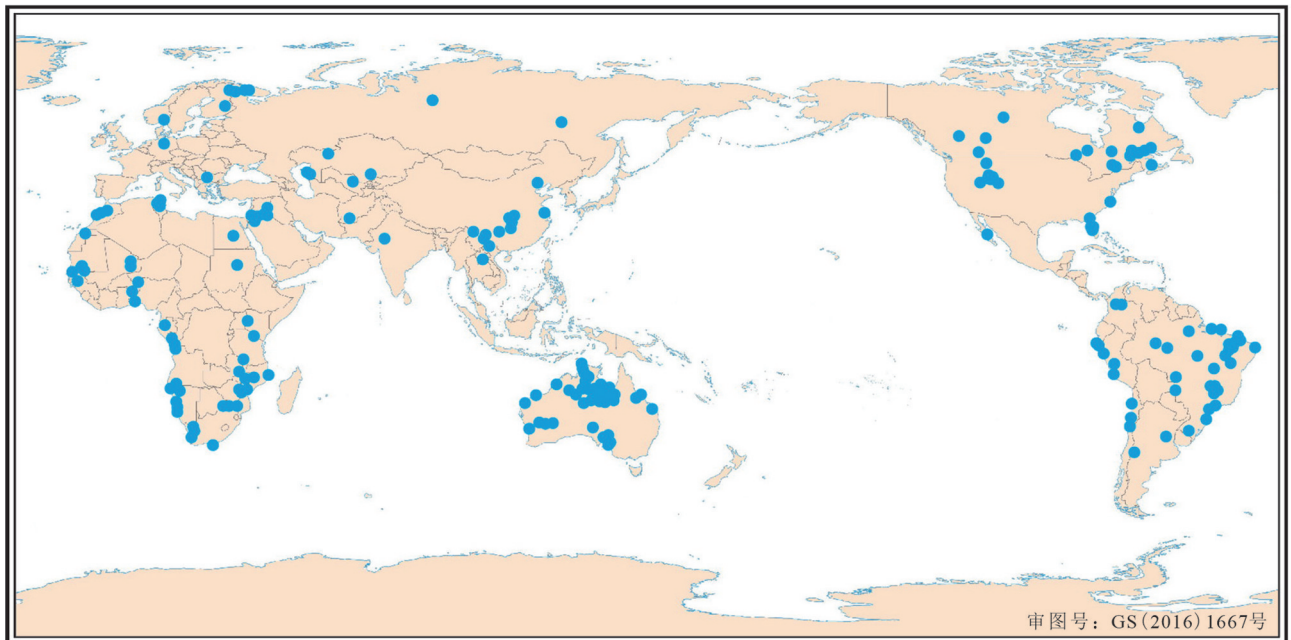


图3 全球磷矿床分布示意图(矿床数据来源于S&P Global 2020年4月的统计结果)

Fig.3 Distribution map of global phosphate deposits (data from the S&P Global in April 2020)

年,从不到5亿t增加到8.7~12亿t;俄罗斯的磷矿储量2010年从2亿t增加到13亿t,2016年后降到6~7亿t;美国、约旦、秘鲁、以色列等国近年以来磷矿储量均有所下降,中国、阿尔及利亚等国近年来的磷矿储量较平稳。

2.2 世界磷矿的分布

世界各大洲均不同程度有磷矿分布,但富集程度不同(常苏娟等,2010;靳立飞和周海东,2014;薛珂和张润宇,2019;崔荣国等,2019),据S&P Global数据统计,截至2020年4月全球共有332个磷矿床(图3),主要分布于东南亚、中东、非洲、澳大利亚、南美洲、北美洲东部和西部等地区。鲍荣华(2015)据美国地调局的统计数据进行分析显示,非洲和亚洲的磷矿资源分别占世界的80%和13%。

非洲,尤其是北非是磷矿集中产出的地区,区内磷矿资源最为丰富的国家或地区为摩洛哥和西撒哈拉、阿尔及利亚、南非、埃及、突尼斯等,著名的矿床(区)有摩洛哥的胡里卜盖(Khouribga),尤索菲亚(Youssoufia),本格里(Benguerir),阿尤恩(Laâyoune),阿尔及利亚的Djebel Kouif、Djebel Onk,南非的Glenover、Outeniqua,突尼斯的Kalaa Khasba、Kef Shfaier,塞内加尔的Taiba、Baobab,多哥人的Bassar、Kpeme以及埃及的Abu Tartur等。

亚洲的磷矿资源量仅次于非洲,在东亚和东南亚地区比较重要的磷矿有中国西南及中南地区的磷块岩矿,越南、老挝等地也有磷块岩矿产出。中国磷矿集中分布在扬子、华北及天山等三大成磷区(王海平和吕凤翔,2002),其中80%以上的磷分布于云南、贵州、四川、湖南和湖北等省内(赵省民等,2000),且多为 P_2O_5 品位大于30%的富矿石(常苏娟,2011;孙小虹等,2015)。在中亚和西亚地区的沙特阿拉伯、约旦、伊拉克、以色列、哈萨克斯坦等国也分布有磷矿床。亚洲地区主要的磷矿床有中国的开阳磷矿、谭家场高坪磷矿,越南的Lao Cai,老挝的Muong Feuong,哈萨克斯坦的Chilisai、Karatau,沙特阿拉伯的Al Jalamid、Umm Wual,约旦的Al-Hassa,伊拉克的Akashat及以色列的Negev Desert等。

美洲磷矿资源主要分布在美国、巴西和秘鲁,加拿大和智利等国也有磷矿产出。美国磷矿多位于佛罗里达州、北卡罗来纳、爱达荷以及犹他州等,加拿大的磷矿分布在其西部和东部地区。主要矿

床有美国的Blackfoot Bridge和Caldwell Canyon,巴西的塔皮拉(Tapira)及阿拉萨(Araxa),秘鲁的贝奥瓦(Bayovar)与塞丘拉(Sechura)。

澳大利亚境内有大量磷矿床分布,最大的浅海相磷矿床位于昆士兰州东北部乔治纳盆地。较大的磷矿床为Ammaroo和Dandaragan Trough等。欧洲磷矿资源主要分布于俄罗斯,在挪威、芬兰、德国和塞尔维亚等国也有磷矿分布。主要矿床有俄罗斯的OJSC Apatit、Seligdar,挪威Kodal,芬兰Siilinjarvi,德国Siegfried-Giesen和塞尔维亚Lisina等。

3 磷矿的地质特征

3.1 磷矿的主要类型

3.1.1 工业类型

磷矿石由磷矿物组成,其中的主要矿物为磷灰石,主要化学成分是磷酸钙,按附加阴离子的不同,磷灰石有氟磷灰石、氯磷灰石、羟基磷灰石、碳磷灰石、碳氟磷灰石5种。从工业利用的角度对磷矿石进行矿石类型划分,磷矿石的可选性和加工利用性与矿石矿物及脉石矿物的种类及数量有关,矿石矿物是划分主类的依据,脉石矿物是划分亚类的依据。根据矿石中磷矿物的结构特点,磷矿石类型目前可分为两大类:以隐晶质、显微晶质磷灰石为主的磷块岩型矿石和以显晶质磷灰石为主的磷灰岩和磷灰石型矿石。磷矿的主要脉石矿物包括硅质矿物、硅酸盐类矿物。根据脉石矿物中碳酸盐类矿物的含量以及选矿加工技术特征,可进一步将磷矿石划分为硅质及硅酸盐型(碳酸盐含量<30%)、混合型(碳酸盐含量介于30%~70%)和碳酸盐型(碳酸盐含量>70%)3个亚类(邵厥年等,2010)。

3.1.2 成因类型

20世纪以来,许多学者都对磷矿床的成因类型进行了深入研究。前苏联磷矿地质学者казакoв(1937)等根据沉积相的差异对沉积型磷矿进行了分类;шатский(1956)主要根据沉积建造的不同对沉积型磷矿进行了划分;叶连俊(1959)从磷矿的形成条件、形成时代、产状、矿石矿物组成及矿石化学组分等对磷矿床进行了较详细的分类。20世纪70年代以来,何起祥(1978)、东野(1980)、刘魁梧(1985)、叶连俊等(1989)等综合考虑了海相磷块岩的形成环境、形成阶段、形成作用等对磷矿床成因

类型进行了划分。宋叔和等(1994)在前人分类的基础上,结合其研究成果对磷矿床进行了系统总结,划分为原生磷矿床和次生型磷矿床两大类型,又进一步细分出7个亚类。其中原生型磷矿床包括:内生岩浆岩型磷矿床、外生浅海沉积型磷矿床、生物沉积磷矿床和沉积变质型磷灰石矿床4个亚类;次生型磷矿床包括:风化-再沉积磷矿床、风化-淋滤残积磷矿床和洞穴堆积磷矿床3个亚类。《矿产资源工业要求手册》(2010版)也对磷矿床进行了分类,根据成矿作用的不同分为:①生物化学沉积型磷块岩矿床(含磷层位主要是寒武系下统);②风化淋滤残积型磷块岩矿床;③沉积变质型磷灰岩矿床;④变质交代型磷灰岩矿床;⑤碱性、基性、超基性岩内生型磷灰石矿床;⑥偏碱性超基性岩内生型磷灰石矿床共6种类型(邵厥年等,2010)。

夏学惠和郝尔宏(2012)根据磷矿研究的新认识对磷矿进行了更细致的划分,总体上将磷矿床分为“内源”(即内生成矿作用形成的矿床)、“外源”(地球外营力作用下形成的矿床)与次生矿床3大类;又根据基本的成矿作用,再进一步分为“岩浆类”、“沉积型磷块岩类”、“变质类”并和“次生类”共4种类型;再根据成矿母岩类型(岩浆岩型磷矿床和变质型磷矿床)、成矿时代(沉积型磷块岩矿床)和具体的成矿作用(次生型磷矿床),细分为16种亚类(型)。东野脉兴等(2018)对磷矿床的主要类型也进行了论述,总结了世界主要成磷期。本文根据前人研究,对磷矿床主要成因类型进行了总结,在夏学惠和郝尔宏(2012)分类的基础上增加了5种亚类(表2)。

3.2 磷成矿作用及地质分布

前述磷矿分类反映的成因信息可以看出,岩浆作用、沉积作用以及生物作用等对磷的形成均有影响,磷矿床的地质分布往往与成矿作用有关,产出于相应的地质环境中。

3.2.1 岩浆岩型磷灰石矿床

岩浆岩型磷矿床也称磷灰石矿床,磷灰石是岩浆岩中普遍存在的副矿物,富集到一定规模时,就可能成为有经济价值的矿床(宋叔和等,1994)。岩浆岩型磷矿床主要与幔源岩浆活动密切相关,含矿母岩一般来自幔源(夏学惠和郝尔宏,2012),宋叔和等(1994)总结了3种与磷矿相关的岩浆杂岩:幔

源偏碱性超基性杂岩体、幔源含钒钛铁基性—超基性杂岩体和消减洋壳源的中—酸性杂岩。此外,伟晶岩、碳酸岩中也有磷矿分布(东野脉兴等,2018)。世界火成磷灰石矿中最重要的是与超基性—碱性—碳酸岩杂岩体有关的磷灰石矿床,该类型磷矿分布广、品位较高、规模较大(东野脉兴等,2018)。

岩浆岩型磷矿床主要产出在古老地台区,特别是地台边缘区以及地台与褶皱区的接触带,地台内部的活动带、裂谷带也是有利的成矿部位,世界上古老地台区如西伯利亚、非洲、北美、南美、塔里木、中朝、印度等地台内均有磷矿分布。区域性深大断裂对岩浆型磷矿有控制作用,主要表现在其控制了含磷杂岩体的产出,形成具有成矿远景的构造—岩浆岩带,含矿杂岩和磷矿体多沿主干断裂带或断裂交汇处产出。此外,环形构造、与深大断裂有关的线状构造以及受封闭爆发作用控制的管状和漏斗

表2 磷矿床分类(据夏学惠和郝尔宏,2012和东野脉兴等,2018整理)

Table 2 Classification of the phosphate deposits (Modified from Xia and Hao (2012) and Dongye (2018))

物源	类型	亚类	
内源	岩浆岩型磷矿床	超基性碱性岩型	
		超基性碳酸岩型	
		碱性岩型	
		碳酸岩型	
		超基性岩型	
		基性岩型	
		伟晶岩型	
		绿岩带型	
		变质型磷矿床	变质混合岩型
		沉积变质型	
外源	沉积型磷块岩矿床	早元古代海相沉积	
		晚前寒武纪海相沉积	
		寒武纪海相沉积	
		泥盆纪海相沉积	
		二叠纪海相沉积	
		晚侏罗世—早白垩世海相沉积	
		晚白垩世—古近纪海相沉积	
		新近纪—现代海相沉积	
		风化-淋滤残积型	
		次生	次生型磷矿床
		鸟粪堆积型磷矿床	

块构造等都与岩浆型磷矿有密切的时空成因联系(东野脉兴等,2018),已发现的重要的岩浆岩型矿床主要位于巴西、加拿大、芬兰、俄罗斯和南非(张亮等,2017),在南非、东欧等地有超基性-碳酸岩型磷矿床分布(夏学惠和郝尔宏,2012)。

3.2.2 变质型磷矿床

变质型磷矿床包括绿岩带型、沉积变质型和变质混合型3种。

绿岩带型磷矿产出于由绿岩-花岗岩地体和深变质岩系组成的古老陆核内,如中朝地块太古宙古老陆核,产磷岩系原岩建造以基性到酸性火山岩为主,发生了较强的混合岩化,磷矿产出与绿岩带基性火山岩有关(宋叔和等,1994),磷矿体主要赋存于黑云角闪岩、角闪黑云片麻岩和斜长角闪岩中,含磷岩系岩石组合为闪辉钛磁铁磷灰岩、磷灰石角闪片麻岩和磷灰石黑云角闪岩等,中国的绿岩带型磷矿主要分布在河北、辽宁、山东以及山西等地区(夏学惠和郝尔宏,2012)。

沉积变质型磷矿产出于元古宙地层中,在中国主要有古元古代早期、晚期和末期3个产磷层位(东野脉兴等,2018)。矿床产出的大地构造位置处于古板块边缘或其分裂出的微型古陆,即中间地块上,一般构成中小型矿床。古元古代晚期磷矿广泛分布于中朝地块,含磷地层以溇沱群为代表,该期是沉积变质磷矿的主要成矿期(东野脉兴等,2018)。古元古代时中朝地块是一个被动的大陆边缘,地块东缘接受沉积,构成巨大的海进到海退的旋回,在海侵岩系中又有若干小的旋回,在部分小海侵与海退岩系中,往往有磷的沉积,以致形成若干磷矿层(宋叔和等,1994)。含磷岩系由黑云斜长片麻岩、变粒岩云英片岩、白云质大理岩和炭质板岩等组成,其原岩主要是碎屑岩、砂质黏土岩、有机质泥岩、碳酸盐岩等的一套岩石组合(东野脉兴等,2018)。含磷岩石或矿石有细粒磷灰岩、云母磷灰岩、变粒磷灰岩和含磷大理岩等,原岩主要是碎屑岩、砂质黏土岩、有机质泥岩和碳酸盐岩等。

变质混合型磷矿石主要是由混合岩化交代作用促使磷酸盐中的磷质产生再结晶作用形成交代型矿石,交代型矿石与原始含磷层位有密切共生关系,故交代型矿体具一定的层控特征,沿走向延伸较稳定。在中国,该类磷矿位于吉黑褶皱系佳木斯

地块内(宋叔和等,1994)。

3.2.3 沉积型磷块岩矿床

沉积型磷块岩矿床是最主要的磷矿床类型,在适宜的海相环境下可以形成。其矿床成因研究始于19世纪,主要有生物成因说、化学成因说、生物-化学成因说、机械堆积成因说、洋流上升说、交代成因说及生物-成岩成磷模式等。

生物成因说最早由俄国学者 кейзерлинг(1845)提出,他认为磷块岩是由生物遗体分解而成。此后,Murray and Renard(1891)等都对生物成因说进行了研究和论述,磷块岩的形成还与海底升降运动及海侵运动有关。化学成因说最早由前苏联学者 казаков(1937)提出,基本原理为富含 CO_2 和 P_2O_5 的深层水随上升洋流到达浅海陆棚带,因温度升高、深度减小、 CO_2 压力降低,磷酸盐溶解度降低,使得磷酸盐过饱和而发生大规模沉淀。生物-化学成因说认为海洋中的浮游生物与磷的富集有关,具体表现在浮游生物的大量繁殖吸收了海水中的磷质,生物死亡后其残骸沉入海底淤泥中,在微生物作用下磷被分解出来,使得淤泥中的磷质富集,在化学营力下含高浓度磷的淤泥水向磷浓度低的水底底层扩散,扩散过程中磷酸盐围绕小的砂粒、矿物颗粒等聚集,形成磷酸盐结核,随着富集有机质淤泥的长期沉积,逐渐形成了磷块岩矿床(常苏娟,2011)。机械堆积成因说由 Grabau(1919)提出的,他发现磷酸盐沉积普遍与不整合及钙质基岩有关,是残余堆积形成的;萨尔温(1952)等提出北非晚白垩世至始新世磷块岩是“生成区”的磷质在机械作用下搬运至“堆积区”,堆积而形成磷块岩矿床,从而进一步发展了机械堆积成矿说。美国佛罗里达中新世—上新世磷块岩、非洲大陆西岸的白垩—新近纪磷块岩、中国的震旦纪和寒武纪磷块岩多为物理富集形成(叶连俊等,1979;东野,1980)。洋流上升说由 казаков(1937)提出,20世纪中 Mekelvey 和 Sheldon 等进一步发展了该成因理论。这一磷矿成因学说认为气候干旱和低纬度的辐散洋流上升地区是最有利的成磷地带,这种地区在北半球为大陆的西岸和北岸,在南半球为大陆的西岸和南岸。东野脉兴(1986)认为这一学说没有解决磷块岩堆积的具体地点及其构造-古地理环境问题,从而提出“陆缘坻”的概念,认为“陆缘坻”是磷质微生物的繁

衍场,磷质在这里富集并最终形成磷块岩矿,补充了洋流上升说的理论认识。交代成因说是Ames(1959)提出的,他通过碳酸盐的磷酸盐化作用研究,发现方解石的消失与磷灰石的出现是同时发生的,且形成的磷灰石还呈现出方解石假象,бушнн скъй(1964)认为大部分磷酸盐团粒是磷质交代粪粒的产物。南非大陆架浅海区现代沉积中存在着未磷酸盐化方解石与磷酸盐化方解石的共生现象,它们的结构特征和生物面貌均极相似,证实了交代作用的存在(Pareer and Siesser, 1972)。生物-成岩成磷模式由前苏联学者巴图林(1985)总结提出的,这一磷矿成因模式认为磷块岩的形成是多旋回反复进行的总和,每一个旋回包括5个阶段:第一阶段为磷质的补给,即上升洋流带来磷质(密文天,2010);第二阶段为磷质转化阶段,即生物吸收消耗磷;第三阶段为磷质沉淀阶段,即富含磷质的生物遗体、生物碎屑沉积于海底;第四阶段为磷质固结阶段,即沉积在海底的磷质通过成岩作用形成磷酸盐结核;第五阶段为磷酸盐富集阶段,多个旋回的不断重复及海水再冲刷作用使磷酸盐不断富集形成磷块岩。

3.2.4 次生磷矿床

次生磷矿床包括风化-淋滤残积型、风化-再沉积型以及鸟粪堆积型几种。

风化-淋滤残积型为原含磷岩层经风化后,其可溶性物质淋滤流失,而磷质则残留富集成矿,风化淋滤残积深度受地下水面控制。风化-再沉积型磷矿床,是先期磷矿或含磷层暴露于地表,经风化作用,遭受海侵,经海解作用再沉积形成的磷矿床,该类磷矿具有风化与沉积矿床的双重特点(宋叔和等,1994)。鸟粪磷矿系由鸟粪、树叶、死鸟等堆积,经细菌腐解、溶淋、淀积,交胶结珊瑚砂,经成土作用,形成高磷土壤,也称磷质石灰土(宋叔和等,1994),矿石多由胶磷矿和方解石组成,矿层自上而下可分为腐泥状鸟粪、粒状鸟粪、块状鸟粪和碎屑状鸟粪等4层,多沿岛屿分布,如中国南海诸岛(夏学惠和郝尔宏,2012)。

3.3 磷矿成磷时代及不同类型磷矿的资源禀赋

3.3.1 成磷时代

地史上发生了多次磷成矿作用,据常苏娟(2011)统计,元古宙、寒武纪、石炭纪、二叠纪、侏罗纪、白垩纪、古近纪、新近纪等地质时期都有磷矿形

成,东野脉兴等(2018)把世界的主要成磷期划分为8大成磷期,分别为古元古代(2.0~1.7 Ga)、晚前寒武纪(0.7~0.57 Ga)、早寒武世、中寒武世、二叠纪、晚侏罗世—早白垩世、晚白垩世—古近纪、新近纪—现代等8个时期,并提出早寒武世梅树村期、晚震旦世陡山沱期以及古元古代绵屏期是中国三大成磷期,其中早寒武世和晚震旦世成磷期的磷成矿活动主要发生在扬子地块,而古元古代绵屏期的磷成矿活动则发生在华北地块。

从不同类型的磷矿床来看,岩浆型矿床和变质型矿床多出于元古宙乃至更古老的太古宙古老地块内,如俄罗斯、西伯利亚、北美、南美、中朝、印度等地的古老地体中均分布有岩浆型磷矿床;绿岩带型磷矿产出于中朝地块太古宙地层内,中国北方及朝鲜北部元古宙地层中均有沉积-变质型磷矿产出。沉积型磷矿的产出时代极为广泛,8大成磷期均不同程度有沉积型磷矿产出,其中晚白垩世—古近纪成磷期的磷矿规模最为巨大,磷矿资源储量居世界第1位的摩洛哥的磷矿即为该期形成;中国的扬子地块区的磷矿也多为沉积型磷矿,占全国磷矿的80%以上,多形成于晚震旦世和早寒武世,最新的研究显示四川雷地区下寒武统内有含磷地层,具有重要的成矿意义(刘建清等,2020)。而次生型磷矿大多时代很新,为近—现代成矿,如鸟粪型磷矿床。

3.3.2 典型矿床

(1) Bengurir 磷矿床地质特征

西北非地区的晚白垩世—古近纪成磷期的形成的沉积型磷矿以摩洛哥中部Bengurir磷矿床为代表,该矿床是摩洛哥是摩洛哥磷酸盐集团下属4大矿山之一,在摩洛哥磷矿资源储量中占据着重要地位(东方财富网,2018)。矿床位于摩洛哥中南部重要城市马拉克什以北约60 km,产出于Gantour盆地的中心区域。赋矿建造由磷酸盐层和硅质碳酸盐岩互层组成,由下而上分为5层(Youssef等,2014):

麦斯里希特阶(Maastrichtian)磷酸盐层:底部为粗粒磷酸盐,顶部为硅质岩层或蛋白石,该磷酸盐层由一层黄色黏土层分为上下两段,是Gantour盆地的标志性建造。

达宁阶(Danian):该岩层底部通常为石灰石磷酸盐,顶部顶部为硅质岩层或蛋白石,是磷酸盐序列中重要的层位。

赞尼特阶(Thanetian):该磷酸盐层由砂质磷酸盐组成,顶部为一层泥灰岩。

伊普尔阶(Ypresian):由泥灰-硅质杂岩和磷酸盐组成。

卢台特阶(Lutetian):该层以厚层板状白云质-石灰石层为典型特征,标志着磷酸盐层的结束。

(2)云南滇池地区磷矿床地质特征

滇池磷矿区是云南省重要磷矿石资源基地(常苏娟,2011),该区磷块岩矿床形成于早寒武世,赋存于一套以浅海相硅质岩、磷块岩、碳酸盐岩等为主的沉积物中,矿床类型为沉积型磷块岩矿床。

含磷岩系由白云岩、含磷白云岩、含砂白云质磷块岩、磷块岩、硅质磷块岩及硅质岩等组成;厚度变化大,从10 cm左右到近70 m不等;矿体延伸稳定,走向上延伸可达10 km以上,倾向方向最大延伸可达近3 km。该矿床的磷矿石可分为原生含磷矿物(如氟磷灰石、微含碳的氟磷灰石)、次生含磷矿物(如银星石、磷铝石)两类,脉石矿物主要为碳酸盐类、硅质、黏土矿物、陆源碎屑等。矿石构造主要为条带状构造、块状构造、条纹状构造、透镜状构造及结核状构造(童顺智,2019)。

3.3.3 不同类型磷矿的资源禀赋

在磷矿的资源禀赋方面,沉积型磷块岩矿床是最主要的矿床类型,宋叔和等(1994)指出在已探明的工业磷矿储量,沉积型磷块岩矿床占78%以上;薛珂和张润宇(2019)统计认为全球工业开采的磷矿石有85%为沉积岩型磷矿;据美国地质调查局2019年的统计数据显示,仅非洲西北部摩洛哥的沉积型磷块岩矿床的磷矿储量就占到了世界磷矿总储量的71.95%。可见,沉积型磷矿在资源经济和成矿理论研究方面均有重要的意义,震旦-寒武纪为全球性成磷期,在亚洲、澳大利亚北部、非洲和南美洲等地都有大型磷矿发现,含磷地层都在大规模冰期之后沉积,显示磷块岩的形成与“雪球”事件结束后的古海洋环境变化及生态环境的重建有关(密文天,2010);非洲西北部马格里布地区磷矿储量为世界磷矿储量最大的地区,摩洛哥和西撒哈拉、阿尔及利亚、突尼斯、埃及一带的中生代-新生代盆地都有大规模的磷矿床,被称为北非磷矿成矿省(Lucas and Prévôt-Lucas,1995)。岩浆岩型磷矿床的资源储量仅次于沉积岩型,在世界磷矿总量中约

占20%(宋叔和等1994),俄罗斯科拉半岛的希宾(Khibing)与霞石正长岩有关的磷矿为特大型岩浆型磷矿床(鲍荣华,2015)。变质磷矿床和次生磷矿床的资源储量则相对较低。

4 世界磷矿的开发利用情况

美国、前苏联、摩洛哥等为传统磷酸盐大国(孙家寿,1991),在世界磷矿产储量和产量方面都占主导地位,但20世纪后期后均对磷矿石的出口逐渐进行限制,如美国1980年开始就减少磷矿石的出口(郝庆,2014)。中国磷化产业发展很快,据英国皇家国际事务研究所(Chatham House,2018)统计的世界磷肥交易数据,中国不仅在2006年以后实现了磷肥的自给,每年还有大量的磷肥出口。但中国磷矿开发中也存在资源消耗快、后继资源不足、矿产开采水平较低、资源节约与综合利用效率不高、磷化工产能严重过剩及地质灾害和环境污染风险加大等问题(郝庆,2014;张苏江,2014;崔荣国等,2019)。摩洛哥的磷矿由摩洛哥磷酸盐集团(Office Chérifien des Phosphates,简称OCP)负责开采、加工及进出口贸易,2018年摩洛哥磷酸盐及其衍生品的出口额占该国出口总额的18.8%(景宁等,2019),为其国家经济做出重要贡献。2008年起,OCP开始实施大规模投资计划,加快了扩张之路,拟通过加大投资力度,在2018—2027年,实现满足世界新增需求的50%,除在本国加大投资外,OCP还同非洲国家签署大量投资合作协议,在埃塞俄比亚、尼日利亚等国都拟投资建设化肥生产基地(据澎湃新闻网)。近年来,随着资源消耗加快以及北非和中东地区磷矿资源开发的深入,磷矿的供应中心已逐渐移向北非和中东地区。

4.1 世界磷矿产量及其变化

美国地质调查局及中国国家统计局的统计数据显示2019年世界磷矿产量为2.24亿t,磷矿年产量300万t以上的国家或地区有中国、摩洛哥和西撒哈拉、美国、俄罗斯、约旦、沙特阿拉伯、越南、巴西、埃及、秘鲁、以色列和突尼斯共12个(表3,图4)。磷矿产量排世界首位的是中国,其2019年磷矿产量为占世界年度产磷量的41.66%;相比之下,储量世界第1位的摩洛哥和西撒哈拉2019年磷矿产量尽管高居世界第二,但只占世界年度磷矿总产量的

表3 2008—2019年世界磷主要产磷国磷矿产量(千t)

国家/地区	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
中国	50741	60209	68070	81223	95296	108511	120438	142037	144398	123132	96326	93324
摩洛哥和西撒哈拉	25000	23000	25800	28000	28000	26400	30000	29000	26900	30000	34800	36000
美国	30200	26400	25800	28100	30100	31200	25300	27400	27100	27900	25800	23000
俄罗斯	10400	10000	11000	11200	11200	10000	11000	11600	12400	13300	14000	14000
约旦	6270	5280	6000	6500	6380	5400	7140	8340	7990	8690	8020	8000
沙特阿拉伯	/	/	/	1000	3000	3000	3000	4000	4200	5000	6090	6200
越南	/	/	/	/	/	2370	2700	2500	2800	3000	3300	5500
巴西	6200	6350	5700	6200	6750	6000	6040	6100	5200	5200	5740	5300
埃及	3000	5000	6000	3500	6240	6500	5500	5500	5000	4400	5000	5000
秘鲁	/	/	791	2540	3210	2580	3800	3880	3850	3040	3900	3700
以色列	3090	2700	3140	3100	3510	3500	3360	3540	3950	3850	3550	3500
突尼斯	8000	7400	7600	5000	2600	3500	3780	2800	3660	4420	3340	3000
澳大利亚	2800	2800	2600	2650	2600	2600	2600	2500	3000	3000	2800	2700
叙利亚	3220	2470	3000	3100	1000	500	1230	750	/	100	100	2000
南非	2290	2240	2500	2500	2240	2300	2160	1980	1700	2080	2100	1900
印度	/	/	1240	1250	1260	1270	1110	1500	2000	1590	1600	1600
塞内加尔	700	650	950	980	1380	800	900	1240	2200	1390	1650	1600
墨西哥	/	/	1510	1510	1700	1760	1700	1680	1700	1930	1540	1500
哈萨克斯坦	/	/	/	/	1600	1600	1600	1840	1500	1500	1300	1300
阿尔及利亚		1800	1800	1500	1250	1500	1500	1400	1270	1300	1200	1200
多哥	800	850	850	730	870	1110	1200	1100	850	825	800	800
加拿大	950	700	700	900	900	400	/	/	/	/	/	/
其他国家	7440	8620	6400	6820	5700	2830	2570	2470	2890	2980	2859	2900
世界总产量	161101	166469	181451	198303	216786	225631	238628	263157	264558	248627	225815	224024

注:(1)中国的磷矿储量数据来源于国家统计局;(2)其他数据来源于美国地质调查局Mineral Commodity Summaries 2009—2020。

16.07%;美国磷矿产量占世界年度磷矿总产量的10.23%,俄罗斯磷矿产量占世界磷矿总产量的6.25%,其余国家的磷矿产量在世界磷矿总产量中的占比均在5%以下。统计数据还显示,以上12个磷矿主产国的磷矿产量占了2019年度世界磷矿总产量的92.19%,亚洲和非洲是磷矿主产区。

近年来磷矿产量整体有较大幅度的增长,从2008年的1.61亿t增加到2016年的2.65亿t,2017—2019年间连续小幅下降,但2019年世界磷矿产量仍达2.24亿t,仍高于2012年之前的年度磷矿产量(表3,图5)。2006年中国磷矿产量超过美国跃居世界第1位,一直到2016年均逐年稳步增加,2016年起开始有较大幅度的下降,但截至2019年仍稳居世界第1位。近年来,磷矿产量排世界第2位和第3位的为美国和摩洛哥,两国年产量相近且变化不大,总体上美国的磷矿产量略显逐年下降的趋势,而摩洛哥则呈逐年小幅上升的趋势,2014年后摩洛哥的磷

矿年产量超过美国,居世界第2位。俄罗斯的磷矿年产量居世界第4位,多年来年稳定在1100万t左右,2014年后有小幅上涨,到2019年达1400万t。其他国家如约旦、沙特阿拉伯、越南、秘鲁、塞内加尔等都略有增涨;巴西、突尼斯、哈萨克斯坦、阿尔及利亚等国的磷矿产量则小幅下降,尤其叙利亚受战乱影响,2013—2018年间的磷矿产量急剧下降,2017和2018年产量仅10万t。其他国家的磷产量则波动不大。世界磷矿的产量变化主要受中国、摩洛哥、美国、俄罗斯等个主要产磷国的影响,4个国家的磷矿产量占世界磷矿总产量72%~80%,控制了世界磷矿的主要供给。尤其是第一产磷大国—中国对世界磷矿产量影响最大,世界磷矿产量变化曲线与中国相似。

作为世界磷矿储量最为丰富的摩洛哥,其磷矿产量近年虽然有一定增涨,并已跃居世界第2位,但磷矿产量占比仍比中国低25%;阿尔及利亚、叙利

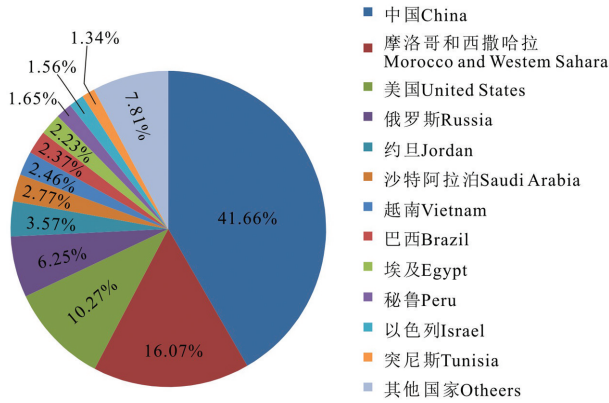


图4 2019年世界主要产磷国磷矿产量占比
Fig. 4 Proportion of phosphate outputs of the world's top 12 producing countries in 2019

亚、巴西、南非、埃及等国都是世界上磷矿储量靠前的国家(表1),但其磷矿年产量都不高(表3),磷矿产储量间不匹配,仍有很大潜力可挖;而中国、美国等产磷大国,随着磷矿资源的不断消耗,未来资源压力将进步增大。有统计分析表明世界磷矿的供应中心正从北美和东亚向北非、中东地区转移(张亮等,2017),从磷矿资源禀赋特征来看,这种资源供需格局的变化将会进一步扩大。

4.2 世界磷矿供需形势及其变化

4.2.1 世界磷矿粉进出口情况

(1)世界磷矿粉出口

中国、美国、俄罗斯等都曾经是磷矿出口大国,随着北非、中东等区磷矿开采的不断深入,国际上磷矿的供需形势发生显著变化。英国皇家国际事务研究所(Chatham House,2018)的世界矿产交易资

料显示,2000年以来北非、中东、东南亚(主要是中国)和俄罗斯为世界4大磷矿粉出口中心(图6a、b、c、d)。但俄罗斯和中国的磷矿出口量不断减少,磷矿出口中心向北非和中东偏移,到2012年以后,东南亚地区的磷矿出口量急剧低,世界上磷矿粉出口中心变为北非、中东和俄罗斯3大中心(图6e、f)。2018年3大磷矿出口中心磷矿粉出口占世界的78.29%,其中俄罗斯的磷矿粉出口量占世界的17.45%,中东地区的磷矿粉出口量占世界的14.23%,北非地区的磷矿粉出口量占世界的46.1%,可见北非地区的磷矿出口量占到绝对优势,这与该地区丰富的磷矿资源储量及近年磷矿产能的增长相关。

美国曾经是世界第二大磷矿出口国,但自1980年起开始减少磷矿出口(郝庆,2014),据英国皇家国际事务研究所(Chatham House,2018)的统计数据(表4,图7a),2000年以后美国磷矿粉年出口量多在10万t以下;中国的磷矿出口量从2001年的128.00万t快速下降到2018年的19.87万t,2015年更是降至4.58万t;俄罗斯的磷矿粉出口量也有所下降,从2000年的366.09万t下降到2012年的154.25万t,之后逐渐回升到2018年的249.65万t。相对应的是,2000年以来,位于磷矿粉主要出口中心北非的摩洛哥的出口量长期居世界第1位,出口量介于240~500万t(仅2009年较低,为165.16万t),并保持增长趋势。同样位于北非地区的埃及和阿尔及利亚的磷矿粉出口量也持继增长,两个国家的磷矿出口量在2014年和2007年分别达到126.57万t和131.42万t,

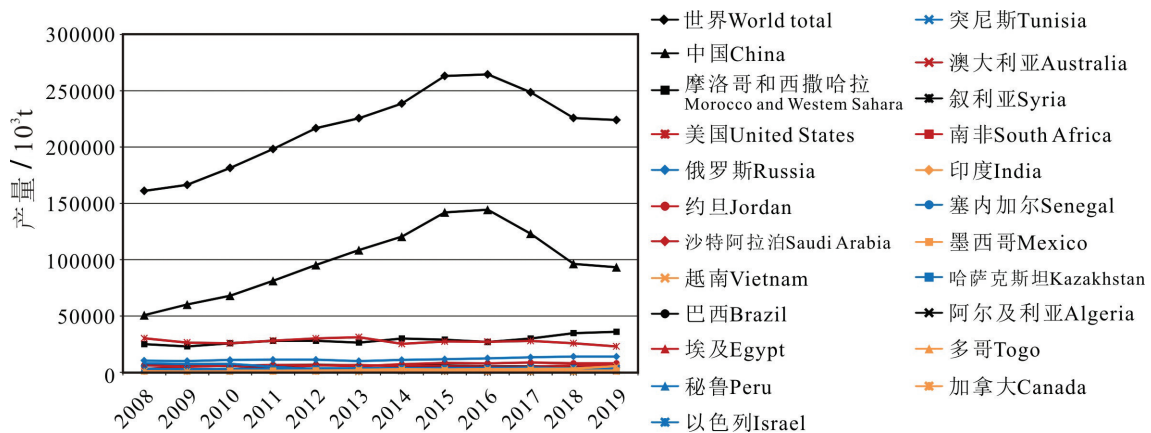


图5 2008—2019年世界主要产磷国磷矿产量变化趋势
Fig.5 Change trends of phosphate outputs of the world's top 22 producing countries from 2008 to 2019

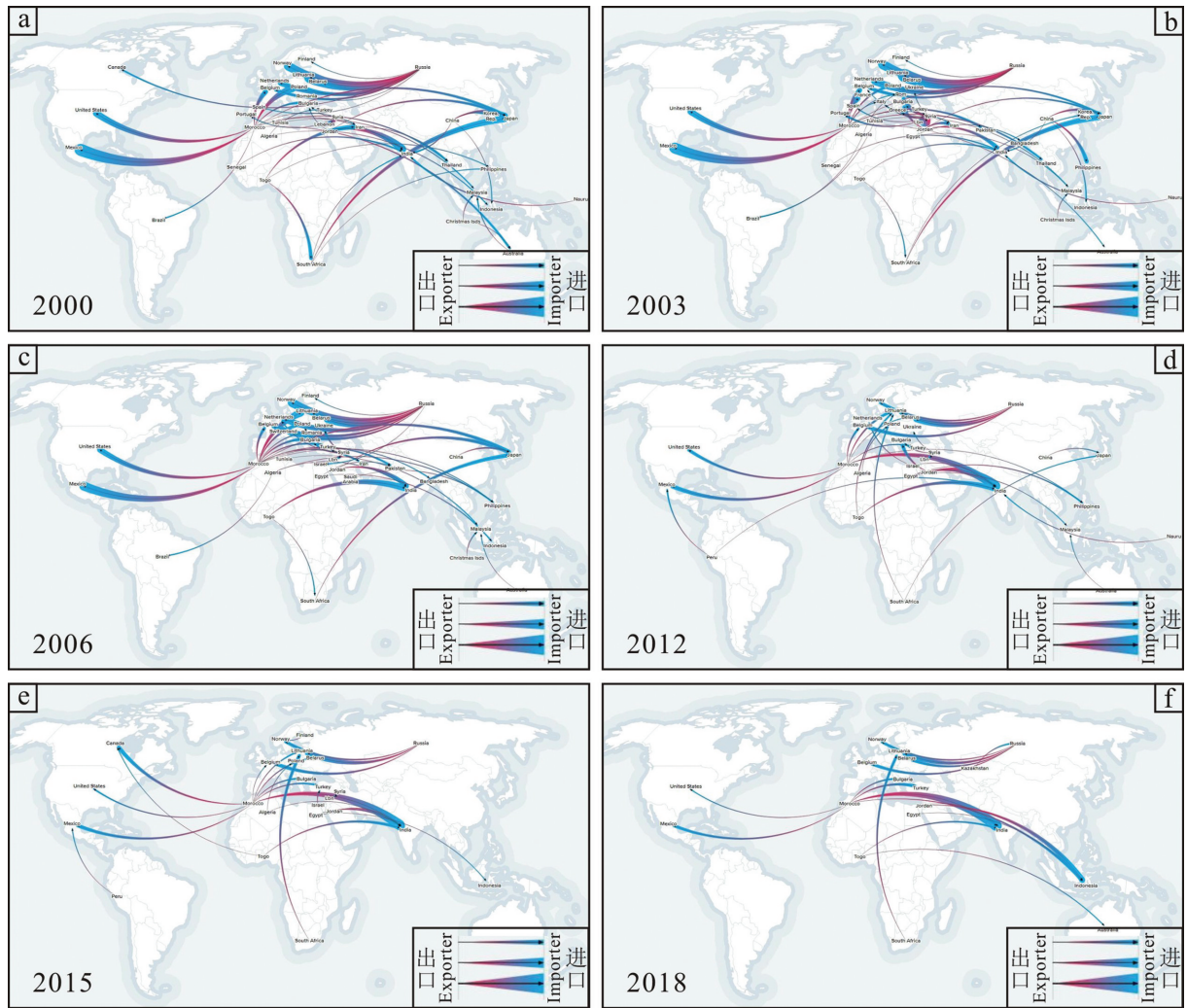


图6 2000—2018年世界磷矿供需形势图
 (资料来源:据网站 <http://resourcetrade.earth/data> 整理)

Fig.6 Global phosphate rock supply and demand situation from 2000 to 2018 (Data from the website ‘<http://resourcetrade.earth/data>’)

均居世界前列。中东地区的约旦和以色列的磷矿粉出口量也都位于世界前列,年出口量稳中有升,约旦的磷矿粉出口量多为数十万 t 到 100 多万 t, 2018 年达到 150.18 万 t, 以色列的磷矿粉出口量增长较快,从 2000 年的 7.12 万 t 增长到 2016 年的近百万 t, 之后小幅回落到 2018 年的 30.22 万 t。以上世界主要磷矿出口国磷矿粉出口量的变化也反映了磷矿出口中心的变化,出口量大且增长快的地区多为北非、中东地区。

(2) 世界磷矿粉进口

世界磷矿供需形势图(图6)同时也展现了不同地区/国家间磷矿进口的依存关系。2000年以来,世界磷矿主要进口地区为欧洲、北美、东亚、东南亚、

南亚。到2015年以后,东亚和东南亚地区的磷矿进口量显著减少(印度尼西亚除外,其磷矿进口量2015年后大幅上升)。北美地区进口的磷矿主要来自北非,欧洲进口的磷矿主要来自俄罗斯和北非,南亚和东南亚进口的磷矿主要来自北非、中东、西非和中国,东亚(日本)进口的磷矿主要来自南非、中国、中东和中亚。

英国皇家国际事务研究所(Chatham House, 2018)的统计数据(表5,图7b)显示,印度、印度尼西亚、立陶宛、土耳其、墨西哥、白俄罗斯、比利时、挪威、保加利亚、黎巴嫩等均为世界前10位的磷矿进口大国,2018年这几个国家的磷矿进口量占世界的75.18%。其中印度为最大的磷矿进口国,从2000年

表 4 2000—2018年世界主要磷矿出口国磷矿粉年出口量(万 t)

Table 4 Annual export amount of phosphate rock from the world's top 13 exporting countries from 2000 to 2018 (Unit: 10 thousand metric tons)

年份	摩洛哥	俄罗斯	约旦	多哥	埃及	南非	哈萨克斯坦	阿尔及利亚	塞内加尔	以色列	中国	阿联酋	美国
2000	445.87	366.09	84.71	71.09	3.72	43.80	2.92	12.76	11.00	7.12	96.55	0.56	5.03
2001	239.26	331.87	95.79	60.24	4.51	31.16	37.36	3.10	22.71	8.67	128.00	0.002	1.48
2002	253.74	358.10	89.59	17.55	3.58	35.36	20.68	14.43	16.91	7.79	78.96	0.0005	0.21
2003	273.33	339.29	109.87	31.43	12.26	26.99	3.31	15.22	9.18	5.43	103.70	0.0001	4.36
2004	296.60	352.02	117.53	38.32	34.32	24.03	22.23	24.86	0.00	4.43	105.38	0.0001	3.73
2005	313.27	356.67	122.84	45.11	69.23	19.37	10.64	38.89	0.00	8.68	52.84	0.0004	5.76
2006	414.21	294.26	57.77	62.48	43.37	15.72	6.39	91.50	0.00	3.80	17.22	0.67	7.13
2007	424.40	277.55	60.01	49.12	50.45	12.45	12.90	131.42	0.11	5.55	22.70	0.0001	6.98
2008	388.75	240.39	76.12	41.02	62.97	7.95	40.10	127.00	2.23	19.70	51.00	0.10	17.97
2009	165.16	242.89	39.47	29.80	53.93	5.01	16.50	82.35	1.25	49.85	9.58	0.00	10.33
2010	333.58	222.21	59.75	53.29	98.34	9.30	19.53	77.94	0.55	43.20	12.01	0.00	12.10
2011	326.98	145.58	127.87	48.30	56.49	14.21	36.04	99.68	4.57	43.15	17.78	3.15	3.59
2012	349.62	154.25	181.74	77.63	121.50	22.29	41.61	90.98	11.59	67.76	10.74	0.19	8.45
2013	352.88	217.40	92.93	50.64	79.46	10.21	24.02	84.89	8.82	94.72	11.42	0.62	17.29
2014	452.23	210.12	72.81	71.65	126.57	13.56	7.63	104.07	22.97	97.24	6.97	0.12	0.71
2015	460.24	175.02	64.11	63.45	108.52	55.20	22.08	110.29	39.99	94.10	6.02	0.05	0.07
2016	385.34	228.97	141.37	28.61	110.31	50.89	39.84	89.45	23.89	99.54	4.58	0.12	0.25
2017	488.07	244.10	181.42	49.97	114.40	47.57	56.91	84.35	48.30	69.34	16.32	0.15	0.14
2018	550.16	249.65	150.18	70.44	64.14	63.03	59.30	51.14	50.49	30.22	19.87	18.79	0.28

注:数据来源:据网站 <http://resourcetrade.earth/data> 整理。

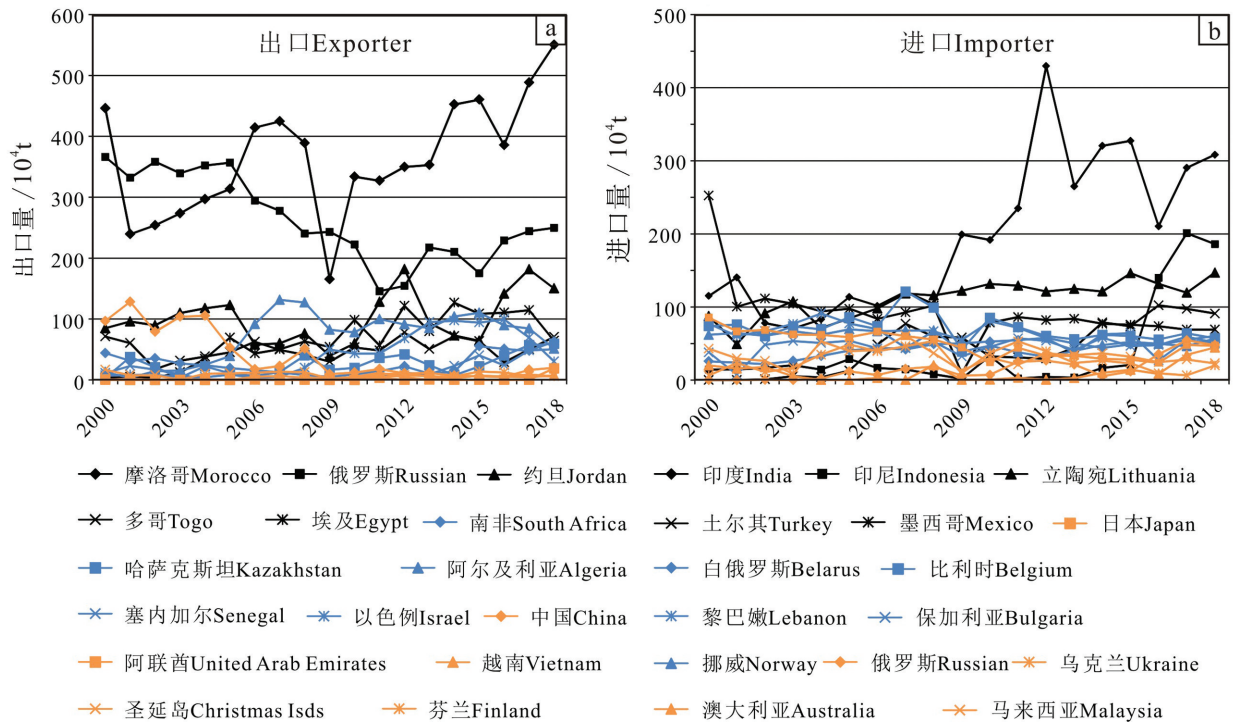


图 7 2000—2018年世界主要国家磷矿出口和进口变化图

Fig.7 Change trends of Annual export (a)/import (b) amount of phosphate rock for the world's top 15 trading countries from 2000 to 2018

表5 2000—2018年世界主要磷矿进口国磷矿粉年进口量(万t)

Table 5 Annual import amount of phosphate rock from the world's top 13 importing countries from 2000 to 2018 (Unit: 10 thousand metric tons)

年份	印度	印度尼西亚	立陶宛	土耳其	墨西哥	白俄罗斯	比利时	挪威	保加利亚	黎巴嫩	俄罗斯	美国	中国
2000	114.99	14.30	87.45	0.01	252.42	25.62	73.68	61.96	37.82	76.84	0.01	0.05	0.06
2001	140.31	14.47	49.28	0.01	100.23	23.94	75.95	64.35	7.40	60.49	0.01	0.06	0.01
2002	77.81	16.74	91.43	1.01	111.39	21.83	60.08	60.42	48.25	66.96	0.51	0.06	0.01
2003	70.51	20.22	107.69	5.27	104.32	26.23	73.36	66.95	53.40	76.74	0.01	0.05	0.002
2004	82.79	14.26	70.99	3.80	93.93	32.97	69.47	62.02	50.67	91.04	1.86	0.05	0.003
2005	113.57	28.56	84.50	12.92	97.56	40.42	85.87	69.43	53.66	77.29	11.69	0.07	0.03
2006	101.39	16.49	98.00	48.58	83.68	43.71	73.54	66.84	43.35	69.63	6.99	51.13	5.17
2007	120.97	14.40	118.36	76.92	92.61	41.82	121.01	67.63	43.46	43.99	15.30	53.43	4.11
2008	103.81	7.92	115.88	59.32	101.77	49.17	98.99	67.86	52.44	66.68	18.36	48.82	4.11
2009	198.97	1.92	122.10	58.13	8.92	50.25	41.40	38.89	32.34	54.72	6.01	37.90	3.24
2010	191.55	32.73	131.58	32.26	78.39	52.64	85.06	47.01	45.36	80.31	7.08	60.48	3.34
2011	234.79	2.19	129.09	30.92	86.13	54.53	72.30	37.89	57.03	71.41	24.98	40.20	0.003
2012	429.47	4.34	121.04	29.25	82.05	57.77	60.38	31.64	53.56	57.11	26.65	38.55	3.14
2013	264.88	3.34	124.91	44.17	83.73	50.24	55.69	39.73	40.97	37.08	21.13	47.63	0.004
2014	320.37	16.57	121.11	78.89	76.97	43.98	61.74	47.88	57.79	62.54	5.44	17.27	0.004
2015	327.19	20.75	146.19	73.42	75.62	48.86	60.30	52.21	46.58	64.22	11.85	21.21	0.04
2016	210.27	139.71	131.47	102.18	73.66	48.22	55.39	49.67	47.91	26.93	35.36	26.74	6.27
2017	290.20	200.87	119.44	97.31	69.03	55.12	63.83	46.31	59.16	54.95	54.30	36.97	12.27
2018	308.17	185.91	146.91	90.98	69.08	60.22	57.07	56.68	51.21	49.64	47.88	19.49	7.94

注:数据来源:据网站<http://resourcetrade.earth/data>整理。

以来均保持较大的磷矿进口量,进口量从2000年的114.99万t稳定上升到2018年的308.17万t,其中2012年达429.47万t,占世界磷矿进口量的31.53%,其磷矿进口量自2008年以来一直居世界首位。印度尼西亚2000—2015年的磷矿粉进口量在1.92~32.73万t之间波动,2016年后大幅上升到140万t以上,2017年更是高达200.78万t,并连续3年居世界第2位。欧洲地区的立陶宛、土耳其的进口量整体上升明显,分别从2000年的87.45万t和0.01万t上涨到2018年的146.91万t和90.98万t,2018年进口量分别居世界的第3位和第4位。白俄罗斯、比利时、挪威、保加利亚和黎巴嫩等洲国家的磷矿粉进口量也都位居世界前列,但增减不明显,年进口量多在数10万t左右波动。墨西哥也是磷矿进口大国,在2000年以252.42万t的年进口量居世界第1位,后逐渐小幅下降,但年进口量仍徘徊在世界前5之内,2018年以68.08万t居世界第5位。俄罗斯、美国和中国的磷矿进口量呈逐年上升趋势,但总进口量不高,直至2018年,其磷矿粉进口量仍仅分别占世界的3.35%、1.36%和0.56%。据美国地质调查局

的统计数据,2009年以前,美国的磷矿进口99%以上来自于摩洛哥,2010后从秘鲁进口的磷矿开始大幅上升,到2018年,从秘鲁进口的磷矿占美国总进口量的79%,从摩洛哥进口的磷矿仅占20%。

从近年来世界磷矿粉的进出口贸易情况来看,基本上形成了以北非、俄罗斯、中东为主要供给区,西非、南非、澳大利亚、秘鲁为辅助供给区,以欧洲、北美、东亚(日本)、东南亚、南亚为主要消费区的供需格局。

4.2.2 世界磷肥进出口情况

磷肥在农业生产中起着至关重要的作用,生产磷肥是磷矿的最主要用途,据张亮等(2017)的研究,世界上82%的磷矿用于生产磷肥。从而磷肥的进出口交易数据也是反映磷矿供需格局和磷矿开发利用的一个重要指标。磷肥的生产一方面体现了一个国家磷矿资源禀赋特征,同时也是其工业生产能力的体现。

(1) 世界磷肥出口

由于受磷矿资源储量、磷矿工业生产能力以及本国磷肥消费情况等多重因素的共同影响,世界各

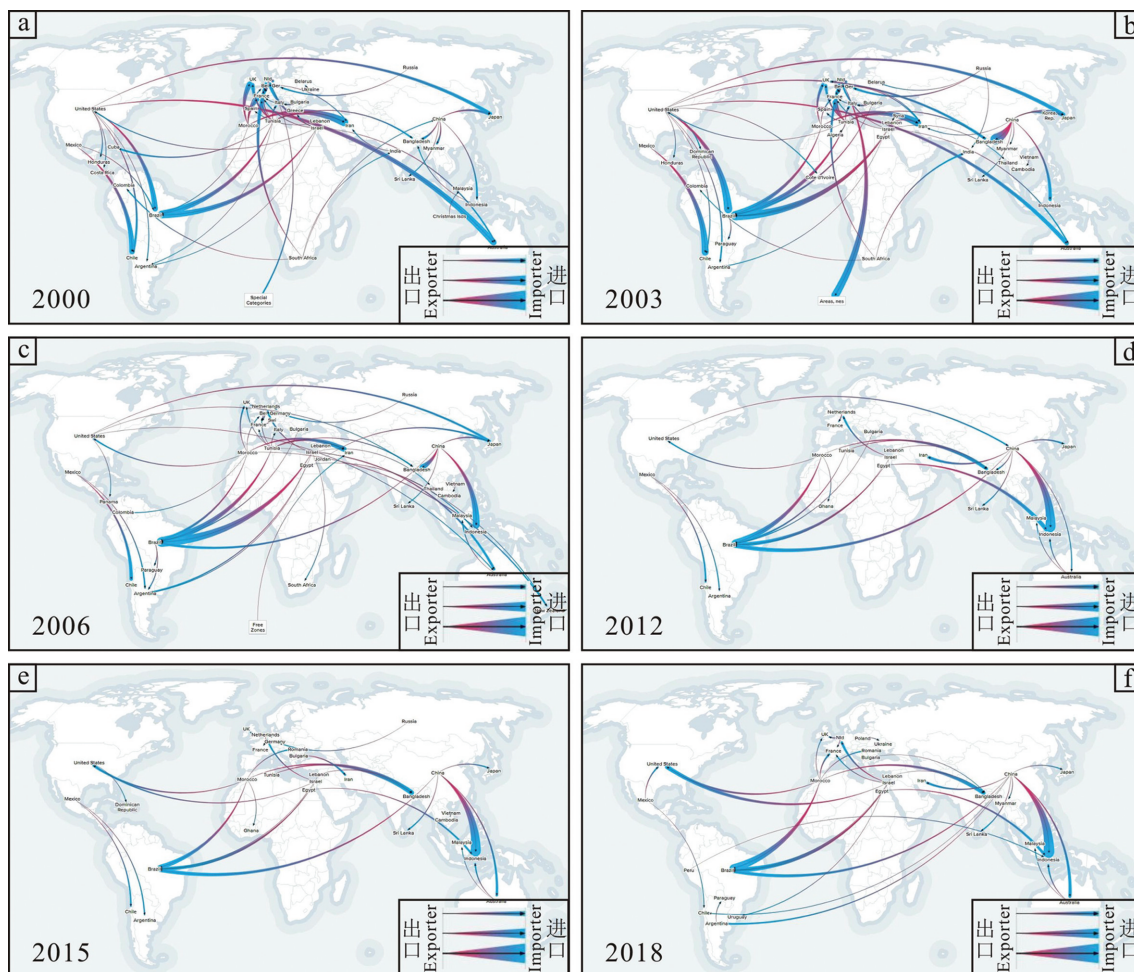


图8 2000—2018年世界磷肥供需形势图

(资料来源:据网站 <http://resourcetrade.earth/data> 整理)

Fig. 8 Global phosphatic fertilizer supply and demand situation from 2000 to 2018
(Data from the website 'http://resourcetrade.earth/data')

国间磷肥的进出口交易依存关系和磷矿有着较大区别(图8)。2000年前后,世界磷肥出口的地区或国家主要有北非、中东、北美(美国、墨西哥)、中国、南非以及俄罗斯等。2006年以后南非、北美的出口量显著减少,美国和南非的磷肥并逐渐转为进口为主,俄罗斯的磷肥出口量也有所降低。至2018年,世界磷肥的出口中心转为中国、北非和中东地区,出口量分别占到世界的20.02%、34.68%和14.15%。

世界主要磷肥出口国有中国、埃及、摩洛哥、以色列、澳大利亚、荷兰、黎巴嫩、墨西哥、秘鲁、阿根廷等。中国是近年来世界最大的磷肥出口国,据崔荣国等(2019)统计,2016年中国磷肥产量的15.8%用于出口,英国皇家国际事务研究所(Chatham House, 2018)的统计数据(表6,图8)显示,自2007

年以来,中国磷肥出口量长期居世界首位,年出口量都在世界的18%以上,且整体上呈逐年上升的趋势,2011年更是达245.76万t的出口量,占世界的29%。摩洛哥的磷肥出口量自2000年以来较为稳定的增长,从2000年的61.11万t增长到2018年的121.61万t,2013年后出口量上升到世界第2位。近年,埃及的磷肥出口量整体居世界第3位,但变化较大,其中2018年和2010—2012年的出口量均为世界第2位,其余年份的出口量多在世界前10以内作较大幅度波动,但整体上仍呈上升趋势。以色列2018年的磷肥出口量居世界第四,自2000年以来无显著增长,年出口量多在50~90万t之间波动,仅在2007年和2008年达到较高的94.6万t和121.38万t,之后迅速回落。2018年磷肥出口量排世界第五位

表6 2000—2018年世界主要磷肥出口国年出口量(万t)

Table 6 Annual export amount of phosphatic fertilizer from the world's top 13 exporting countries from 2000 to 2018 (Unit: 10 thousand metric tons)

国家	中国	埃及	摩洛哥	以色列	澳大利亚	荷兰	黎巴嫩	墨西哥	秘鲁	阿根廷	西班牙	俄罗斯	美国
2000年	45.38	3.96	61.11	57.75	3.27	24.70	9.66	21.82	0.01	0.01	1.02	9.96	66.58
2001年	36.10	18.44	48.84	59.89	2.46	34.57	13.57	25.80	/	/	0.39	12.46	63.08
2002年	60.29	17.07	48.14	53.28	7.75	35.79	18.67	13.06	0.02	/	0.19	13.11	65.84
2003年	69.09	5.04	46.29	/	0.04	35.92	20.43	16.63	0.02	0.0001	0.22	12.16	61.68
2004年	99.61	43.51	57.71	30.24	10.72	24.40	30.73	13.52	1.30	/	0.30	9.72	48.78
2005年	102.78	21.70	67.41	65.88	32.03	20.53	26.81	15.66	0.03	/	0.90	8.80	38.68
2006年	98.42	32.30	80.52	83.32	22.29	19.09	26.30	21.17	0.04	0.05	0.55	7.91	25.61
2007年	151.35	47.04	87.18	94.60	55.45	11.25	29.34	21.41	0.10	0.12	2.92	9.47	14.05
2008年	133.74	84.61	69.69	121.38	14.06	11.19	23.57	25.09	0.01	0.52	9.08	10.89	10.68
2009年	116.35	23.52	64.34	53.12	8.39	11.36	21.65	7.81	0.01	0.87	1.94	7.71	9.33
2010年	147.65	139.39	87.53	88.45	37.34	13.39	27.82	19.07	0.19	1.91	6.44	7.05	19.87
2011年	245.76	135.35	84.73	77.18	41.28	25.22	23.66	18.12	4.96	0.58	5.11	6.51	2.26
2012年	180.58	112.89	100.17	67.79	39.54	28.26	20.84	25.58	10.71	1.05	10.00	5.84	20.40
2013年	162.12	100.84	136.90	86.44	31.99	32.13	19.65	23.95	13.59	0.35	9.31	14.46	12.59
2014年	175.51	126.50	128.30	76.55	33.55	26.71	20.39	26.47	12.00	3.89	15.01	13.83	12.67
2015年	190.86	87.25	101.62	75.39	42.71	26.44	21.82	25.16	11.09	6.39	18.40	14.45	11.47
2016年	145.82	82.80	123.41	79.85	40.15	34.57	12.31	19.83	19.05	14.92	16.56	9.08	6.13
2017年	188.83	93.93	134.51	95.31	46.91	32.70	20.07	14.63	16.50	11.61	8.86	6.05	2.24
2018年	189.50	157.93	121.61	90.34	43.43	27.82	21.71	20.89	16.52	13.57	12.24	3.95	3.26

注:数据来源:据网站<http://resourcetrade.earth/data>整理。

的是澳大利亚,在2004以前,该国磷肥出口量很少,之后有较大幅度的提升,稳定在30~40万t/a。其后是荷兰、黎巴嫩、墨西哥,该3国磷肥年出口量相近,且自2000以来出口量都没有显著的变化,在10~30万t之间小幅波动。秘鲁、阿根廷和西班牙的磷肥出口量则增长明显,2000前后出口量均在1万t左右或远小于1万t,在2010年以后开始较快增长,到2018年分别达16.52万t、13.57万t和12.24万t,依次排世界第9、10和11位。俄罗斯虽然是磷矿出口大国,但其磷肥出口量一直不高,多在10万t以下或10万t左右,且多年来也没有增长的趋势。美国曾经是磷肥出口大国,在2006年以前出口量都在25万t以上,但近年来下降很快,到2018年其磷肥出口量仅为3.26万t,从2000年的世界第2位降到2018年的世界第25位。

(2)世界磷肥进口

从2000年到2018年,世界磷肥总进口量稳中略升,据英国皇家国际事务研究所(Chatham House, 2018)的统计数据,除2003年以1609.01万t的进口量出现较大波动外,其余年份增幅较稳定,从2000

年的536.51万t上升到2018年的823.20万t。在世界磷肥进出口形势图(图8)中可以看出2000年以来世界磷肥的进口地区主要为东南亚、南美、北美、欧洲、中东和东亚(日本)等,其中2018年世界磷肥主要进口国有印尼、巴西、美国、马来西亚、法国、澳大利亚、孟加拉国、罗马尼亚、巴拉圭、荷兰、英国和阿根廷等(表7,图9)。

东南亚地区磷肥进口量上升显著,从2000年的40.81万t上升到2018年的272.03万t,为世界磷肥进口量最大的地区。其次为南美地区,2000年进口量已达121.11万t,在2010年以前年进口量均大于东南亚地区居世界首位,但增长较慢且波动幅度较大,2010年以后逐渐被东南亚地区超越,2018年为211.95万t,低于东南亚地区。欧洲地区一直保持磷肥进口,但进口量有减少的趋势,特别是2005年以后下降明显,2000年的进口量为196.45万t,占世界的36.62%,2018的进口量降为134.61万t,世界占比下降到16.35%。南亚、中亚、北亚和中东等地区磷肥进口量也较大,但波动较大,增减趋势不明显。东亚地区的磷肥进口量下降明显,从2000的

表7 2000—2018年世界主要磷肥进口国年进口量(万t)

Table 7 Annual import amount of phosphatic fertilizer from the world's top 13 importing countries from 2000 to 2018 (Unit: 10 thousand metric tons)

年份	印尼	巴西	美国	马来西亚	法国	澳大利亚	孟加拉国	罗马尼亚	巴拉圭	荷兰	英国	阿根廷	乌克兰
2000	14.77	74.24	4.80	12.90	53.81	31.30	17.07	0.01	1.30	23.86	30.45	9.71	0.06
2001	10.76	84.21	8.24	2.53	51.23	35.73	22.74	0.05	1.97	19.98	27.62	8.37	0.55
2002	24.57	91.26	4.09	16.46	42.21	29.98	39.27	0.01	3.29	25.60	24.22	6.49	1.04
2003	12.85	121.28	186.38	9.83	136.09	42.30	41.59	3.83	4.34	276.14	68.52	10.55	0.65
2004	22.86	123.75	5.42	30.15	33.71	27.57	42.39	0.46	4.69	9.50	20.98	23.49	0.67
2005	46.25	95.64	6.00	36.78	34.06	27.25	60.04	1.79	6.34	13.42	17.68	31.26	0.27
2006	54.57	107.98	12.98	33.73	22.65	16.71	36.21	0.64	6.51	12.11	16.61	43.02	0.24
2007	54.92	164.92	23.20	41.37	26.79	19.48	24.54	2.47	5.77	10.16	21.65	47.46	0.21
2008	45.15	151.41	18.43	29.76	32.43	22.15	51.46	0.91	4.93	12.66	17.13	24.01	1.94
2009	34.83	111.46	4.00	8.14	11.66	8.37	49.46	0.83	7.66	8.07	13.31	8.47	0.01
2010	124.21	140.97	20.74	46.63	23.51	36.84	39.82	1.47	7.64	16.76	22.55	20.21	0.29
2011	163.64	182.22	21.93	33.26	35.56	13.73	74.78	2.69	12.76	17.20	18.21	27.40	0.04
2012	194.08	160.13	17.64	27.74	27.36	12.70	51.78	4.29	12.78	17.77	13.06	13.52	0.50
2013	112.81	206.57	21.21	29.09	32.30	18.39	50.45	17.36	12.82	20.14	16.14	15.21	0.27
2014	178.81	168.47	43.37	27.19	27.67	21.93	61.34	16.37	12.24	20.13	17.65	15.28	0.88
2015	197.81	126.73	30.16	31.84	24.39	34.13	61.65	14.29	14.26	19.71	14.24	9.57	1.46
2016	174.12	131.79	39.69	30.19	27.74	33.12	64.74	16.10	16.50	24.46	16.61	17.42	1.78
2017	212.94	110.62	35.11	45.89	30.41	27.42	42.66	21.64	20.42	27.31	15.54	9.97	3.67
2018	210.73	168.49	51.57	44.22	32.93	31.21	28.28	22.14	21.94	19.60	17.24	15.88	14.13

注:数据来源:据网站 <http://resourcetrade.earth/data> 整理。

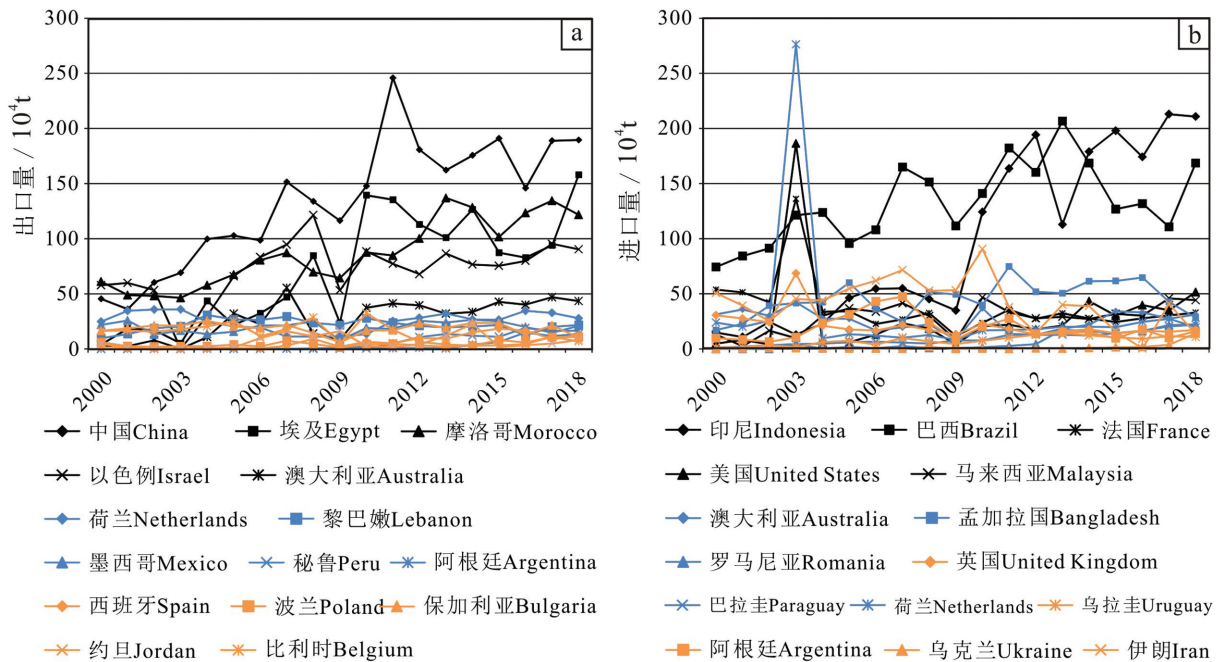


图9 2000—2018年世界主要国家磷肥出口(a)和进口变化图(b)

Fig.9 Change trends of annual export (a)/import (b) amount of phosphatic fertilizer from the world's top 15 trading countries from 2000 to 2018

21.70万t下降到2018年的10.31万t,2018年的磷肥进口量仅占世界的1.28%。印尼的磷肥进口量增长迅速,于2014年超过巴西后一直稳居世界首位;传统的磷肥出口国自2006年后出口量减少,逐渐转为进口,2018年进口量51.57万t,成为世界第3大磷肥进口国;印度在2012年以前的磷肥进口量相对较大,但近年来随着其国内磷肥产能的扩大,转为扩大磷矿石的进口,磷肥进口量大幅降低至每年数十到数百t,基本实现磷肥自给。

5 结 论

(1)世界磷矿资源丰富,近10年来储量介于643~705亿t,基本可满足人类生产生活所需。

(2)世界各大洲均有磷矿产出,但分布不均,主要集中在北非、中东、东南亚等地区,尤其是北非地区,集中了全球80%以上的磷矿资源。

(3)磷矿的成因类型包括岩浆岩型磷矿床、变质型磷矿床、沉积型磷块岩矿床和次生磷矿床4种,其中工业开采的磷矿石有85%为沉积岩型磷矿;沉积型磷块岩矿床最主要的形成时代为震旦—寒武纪(如中国西南部大量产出的海相磷矿床)和中生代—新生代(如从摩洛哥到埃及一带的北非磷矿成矿省)。

(4)世界主要磷矿产出国有中国、摩洛哥和西撒哈拉、美国、俄罗斯、约旦、沙特阿拉伯、越南、巴西、埃及和秘鲁等,这10个国家2010年以来的年度磷矿总产量在1.49~2.00亿t,占世界年度磷矿产量的82.20%~89.29%。

(5)近年来磷矿供应中心向北非、中东地区转移,具体表现在:世界磷矿出口量前10的国家中位于北非和中东地区的国家有5个,且北非和中东地区的磷矿粉出口量占世界的60.33%(2018年);磷矿进口大国多位于南亚、东南亚和欧洲,如进口量前10的印度、印度尼西亚、立陶宛、土耳其、墨西哥、白俄罗斯、比利时、挪威、保加利亚和黎巴嫩等,2010年以来上述国家年度磷矿粉进口量占世界年度总进口量的60.36%~75.18%。

(6)近年世界磷肥进口国主要有印尼、巴西、美国、马来西亚、法国、澳大利亚、孟加拉国、罗马尼亚、巴拉圭和荷兰等,出口国有中国、埃及、摩洛哥、以色列、澳大利亚、荷兰、黎巴嫩、墨西哥、秘鲁和阿根廷等;美国曾经是磷肥出口大国,在2006年逐渐

转为磷肥进口国;磷矿进口大国印度通过发展磷化工基本实现磷肥自给。

(7)中国磷矿储量(2019年为32亿t,占世界储量的4.61%)虽居第2位,但与世界第1位的摩洛哥(2019年为500亿t,占世界总储量的71.95%)相差很大,且贫矿多富矿少;另一方面中国磷磷肥出口量长期居世界第1位,近10年来的磷肥出口量都占世界的18%以上,但磷矿和磷肥进口量都很低,导致磷矿资源消耗速度快,应加大磷化工技术研发与科技创新,提高磷矿资源综合利用率。

References

- Bao Ronghua. 2015. Supply and demand structure of phosphate rock and its change [J]. *Land and Resources Information*, 2015(5): 48–51(in Chinese with English abstract).
- Chang Sujuan. 2011. The multi-layer Controlled Geological Characteristics and Mechanism of Phosphate Deposits in Eastern Yunnan [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 5–17(in Chinese with English abstract).
- Chang Sujuan. Zu Jieyong, Liu Yi, Yang Yongchao, Bai Guangshun. 2010. Situation of the world's phosphate resources [J]. *Industrial Minerals & Processing*, (9): 1–5(in Chinese with English abstract).
- Chatham House. 2018. 'resourcetrade.earth' [EB/OL]. <http://resourcetrade.earth/data>.
- Cui Rongguo, Zhang Yanfei, Guo Juan, Guo Zhenhua, Xiao Yuping. 2019. Development strategy of phosphate rock in China under global allocation of resources [J]. *Strategic Study of CAE*, 21(1): 128–132(in Chinese with English abstract).
- Dong Shunzhi. 2019. Geological characteristics and prospecting marks of the phosphate deposits in Dianchi areas, Yunnan Province [J]. *Resource Information and Engineering*, 34(1): 29–32 (in Chinese).
- Dongye Maixing, Xiong Xianxiao, Luan Junxia. 2018. The prospecting mark and prospecting method of phosphate ore[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 40(4): 198–203(in Chinese with English abstract).
- Dongye Maixing. 1992. History and development trend of genesis theory of marine phosphorite [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 14(3): 3–7 (in Chinese).
- Dongye Maixing. 1996. Upwelling oceanic currents & epicontinental chi [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 18(3): 156–162 (in Chinese with English abstract).
- Dongye. 1980. Genesis and classification of marine phosphorite [J]. *Geology of Chemical Minerals*, (2): 33–56 (in Chinese).
- Hao Qing. 2014. Status and suggestions on the development and utilization of phosphate resources in China [J]. *National Conditions*, 66(5): 51–55 (in Chinese).

- He Qixiang. 1978. Sedimentary Rocks and Deposits [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–394 (in Chinese).
- Hisao Ohtake, Satoshi Tsuneda. 2019. Phosphorus: Reserves, Production and Applications [C]// Hisao Ohtake and Satoshi Tsuneda. (eds). Phosphorus Recovery and Recycling. New York: Springer, 75–98.
- Jin Lifei, Zhou Haidong. 2014. Research on exploitation and utilization and sustainable development of phosphate resources in China [J]. China Population, Resources and Environment, 26(5): 417–420 (in Chinese with English abstract).
- Jing Ning, He Jingnan, Gao Shenhan, Chang Yuhan, Yuan Yiwan. 2019. Country(Region) Guide for Foreign Investment Cooperation–Morocco(version 2019) [R]. Economic and Commercial Office of the Embassy of the People's Republic of China in the Kingdom of Morocco, 1–102 (in Chinese).
- Liu Jianqing, He Li, Jiang Yongfu, He Jiawei, He Ping. 2020. Phosphorus bearing strata in Maidiping Formation of Lower Cambrian in Leibo area of Sichuan Province and its potential analysis of phosphate resources [J]. Geology in China, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200804.0937.004.html> (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianxiang. 2009. The analysis and prospect on the trend of exploitation and application of China's phosphate resource [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 24(2): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- Liu Kuiwu. 1985. The textures types, geneses and ore forming stages of sedimentary phosphorite [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 3(1): 29–43 (in Chinese with English abstract).
- Lucas J, Prévôt–Lucas L. 1995. Tethyan phosphates and bioproductites [C]// Nairn AEM (eds). The Ocean Basins and Margins. Plenum Press, New York, vol 8 (The Tethys Ocean), Springer 367–391.
- Mi Wentian. 2010. Phosphorites' Sedimentary Event in Sinian Doushantuo Period, West Yangtze area– the Cases Study of Weng'an Phosphorite in Guizhou and Yichang Phosphorite in Hubei [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–4 (in Chinese with English abstract).
- S & P Global. 2020. Metals & Mining Properties [EB/OL]. <https://platform.marketintelligence.spglobal.com/web/client?auth=inherit#office/screener?perspective=243327>.
- Shao Juenian, Tao Weiping, Zhang Yixun. 2010. Guide Book for the Industrial Requirement of Mineral Resources (version 2010) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 321–324 (in Chinese).
- Song Shuhe, Kang Yongfu, Tu Guangchi. 1994. Chinese Mineral Deposit Geology (Volume 3) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–59: 1–59 (in Chinese).
- Sun Jiashou. 1991. The prospect on the phosphate resource and phosphatic fertilizer in the world [J]. Hubei Chemical Industry, 1991(4): 39–43 (in Chinese).
- Sun Xiaohong, Chen Chunlin, Wang Gaoshang, Xiong Xianxiao, Gao Peng, Zhao Ming, Tang Yao. 2015. The Prediction of phosphate rock demand in China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 36(2): 213–219 (in Chinese with English abstract).
- U.S. Geological Survey. 2020. Mineral Commodity Summaries 2020 [R]. U.S. Geological Survey, <https://doi.org/10.3133/mcs2020>.
- Wang Haiping, Lu Fengxiang. 2002. Main geological characteristics of phosphorus deposit types and resources strategy analyses in China [J]. Mineral Deposits, 21(supp.): 921–924 (in Chinese).
- Xia Xuehui, Hao Erhong. 2012. Genetic classification of China phosphate deposit [J]. Geology of Chemical Minerals, 34(1): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Xue Ke, Zhang Runyu. 2019. Advances of researches on the distribution and metallogenic characteristics of phosphorous deposits in China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 39(1): 7–14 (in Chinese with English abstract).
- Ye Lianjun, Chen Qiyang, Zhao Dongxu. 1989. China Phosphate Rock [M]. Beijing: Science Press, 1–316 (in Chinese).
- Youssef Daafia, Ahmed Chakira, Essaid Jourani, Sidi Mohammed Ouabba. 2014. Geology and mine planning of phosphate deposits: Benguerir deposit Gantour Basin– Morocco [J]. Procedia Engineering, 83(2014): 70–75
- Zhang Liang, Yang Huipeng, Feng Ansheng, Tan Xiumin. 2017. Study on general situation and analysis of supply and demand of global phosphate resources [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, (5): 105–217 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Sujiang, Xia Haodong, Tang Wenlong, Cui Liwei. 2014. Current status and sustainable development of phosphorite resources in China [J]. China Mining Magazine, 23(supp.2): 8–13 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Shengmin, Nie Fengjun, Jiang Sihong. 2000. A brief discussion on the exploration and development of phosphate uranium resources in Northwest China [J]. Geology in China, (11): 26–28 (in Chinese).
- Багудио Г.Н. 1985. Seafloor Phosphorite Rock (translated by Dongye Changzheng) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–192 (in Chinese).

附中文参考文献

- 巴图林. 1985. 海底磷块岩 (东野长峰译) [M]. 北京: 地质出版社, 1–192.
- 鲍荣华. 2015. 世界磷矿供需格局及其变化 [J]. 国土资源情报, 2015 (5): 48–51.
- 常苏娟, 朱杰勇, 刘益, 杨永超, 白光顺. 2010. 世界磷矿资源形势分析 [J]. 化工矿物与加工, (9): 1–5.
- 常苏娟. 2011. 滇东磷矿多层次控矿地质特征及形成机理 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 5–17.
- 崔荣国, 张艳飞, 郭娟, 郭振华, 肖宇评. 2019. 资源全球配置下的中国磷矿发展策略 [J]. 中国工程科学, 21(1): 128–132.

- 东方财富网. 2018. 王的企业世界上最大的磷矿和磷肥生产商摩洛哥磷酸盐集团(OCP)[EB/OL]. <https://guba.eastmoney.com/news/300387,748412314.html>.
- 东野. 1980. 海相磷块岩的成因与分类[J]. 化工矿产地质, (2): 33-56.
- 东野脉兴, 熊先孝, 栾俊霞. 2018. 磷矿找矿标志与找矿方法[J]. 化工矿产地质, 40(4): 198-203.
- 东野脉兴. 1992. 海相磷块岩成因理论的沿革与发展趋势[J]. 化工矿产地质, 14(3): 3-7.
- 东野脉兴. 1996. 上升洋流与陆缘坳[J]. 化工矿产地质, 18(3): 156-162.
- 国家统计局. 2020. 主要矿产基础储量查询(统计报表)[EB/OL]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0C01&sj=2019>.
- 郝庆. 2014. 中国磷矿资源开发利用现状及建议[J]. 国情研究, 66(5): 51-55.
- 何起祥. 1978. 沉积岩和沉积矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1-394.
- 靳立飞, 周海东. 2014. 中国磷矿资源开发利用形势分析及可持续发展对策研究[J]. 中国人口资源与环境, 26(5): 417-420.
- 景宁, 何婧南, 郜申涵, 常煜涵, 袁艺婉. 2019. 对外投资合作国别(地区)指南——摩洛哥(2019年版)[R]. 中国驻摩洛哥大使馆经济商务参赞处, 1-102.
- 刘建清, 何利, 江永富, 何佳伟, 何平. 2020. 四川雷波地区下寒武统麦地坪含磷地层研究及磷矿资源潜力分析[J]. 中国地质, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200804.0937.004.html>.
- 刘建雄. 2009. 我国磷矿资源开发利用趋势分析与展望[J]. 磷肥与复肥, 24(2): 1-4.
- 刘魁梧. 1985. 沉积磷块岩结构类型、成因及成矿阶段[J]. 沉积学报, 3(1): 29-43.
- 密文天. 2010. 上扬子地区震旦纪陡山沱期成磷事件研究——以贵州瓮安、湖北宜昌磷矿床为例[D]. 成都: 成都理工大学, 1-4.
- 澎湃新闻. 2018. 了解摩洛哥工业巨头——摩洛哥磷酸盐公司(OCP)[EB/OL]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_2434129.
- 邵厥年, 陶维屏, 张义勋. 2010. 矿产资源工业要求手册(2010版)[M]. 北京: 地质出版社, 321-324.
- 宋叔和, 康永孚, 涂光焱. 1994. 中国矿床学(下册)[M]. 北京: 地质出版社: 1-59.
- 孙家寿. 1991. 世界磷矿资源及磷肥展望[J]. 湖北化工, 1991(4): 39-43.
- 孙小虹, 陈春琳, 王高尚, 熊先孝, 高鹏, 赵明, 唐尧. 2015. 中国磷矿资源需求预测[J]. 地球学报, 36(2): 213-219.
- 童顺智. 2019. 云南滇池地区磷块岩地质特征及磷矿床找矿标志[J]. 资源信息与工程, 34(1): 29-32.
- 王海平, 吕凤翔. 2002. 我国主要磷矿床类型地质特征及资源战略分析[J]. 矿床地质, 21(增刊): 921-924.
- 夏学惠, 郝尔宏. 2012. 中国磷矿床成因分类[J]. 化工矿产地质, 34(1): 1-14.
- 薛珂, 张润宇. 2019. 中国磷矿资源分布及其成矿特征研究进展[J]. 矿物学报, 39(1): 7-14.
- 叶连俊, 陈其英, 赵东旭. 1989. 中国磷块岩[M]. 北京: 科学出版社, 1-316.
- 张亮, 杨卉芃, 冯安生, 谭秀民. 2017. 全球磷矿资源开发利用现状及市场分析[J]. 矿产保护与利用, (5): 105-217.
- 张苏江, 夏浩东, 唐文龙, 崔立伟. 2014. 中国磷矿资源现状分析及可持续发展建议[J]. 中国矿业, 23(增刊2): 8-13.
- 赵省民, 聂凤军, 江思宏. 2000. 浅议我国西北地区磷铀矿产资源的勘查与开发[J]. 中国地质, (11): 26-28.