

doi: 10.12029/gc20231010004

王文浩, 王春连, 王连训, 刘开源, 颜开, 余小灿, 游超, 刘殿鹤. 2025. 中国磷矿成因类型、成矿规律及重点找矿方向[J]. 中国地质, 52(1): 43–60.
Wang Wenhao, Wang Chunlian, Wang Lianxun, Liu Kaiyuan, Yan Kai, Yu Xiaocan, You Chao, Liu Dianhe. 2025. Origin types, metallogenic regularity and prospecting direction of phosphate deposits in China[J]. Geology in China, 52(1): 43–60(in Chinese with English abstract).

中国磷矿成因类型、成矿规律及重点找矿方向

王文浩^{1,2}, 王春连², 王连训¹, 刘开源^{2,3}, 颜开², 余小灿⁴, 游超^{2,5}, 刘殿鹤^{2,5}

(1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074; 4. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 5. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100091)

摘要:【研究目的】中国是世界磷矿资源大国,也是需求大国,2016年磷矿被纳入中国关键性矿产目录。随着对磷肥的需求日益增加、越来越多矿山的资源日趋枯竭,急需加大磷矿资源的地质找矿和勘查开发,而成矿规律研究是资源勘查开发的重要基础。【研究方法】本文在前人工作基础上,进一步对中国磷矿资源开发利用现状、矿床类型、时空分布规律及找矿方向等进行分析与归纳,初步总结中国磷矿成矿规律及重点找矿方向。【研究结果】中国磷矿资源丰富,但资源分布极不均匀,主要集中在云南、贵州、四川和湖北4省。依据成矿作用类型将中国磷矿划分为岩浆岩型、变质型、沉积型、次生型和鸟粪型磷矿床五大类;中国磷矿成矿时代广泛,但主要产磷时期为早寒武世梅树村期、晚震旦世陡山沱期、古元古代锦屏期。按照《中国成矿区带划分方案》,可将中国磷矿划分为27个Ⅲ级成矿区带,4个成矿亚带,其中滇东—川西南成矿带、大巴山—鄂西成矿带、湘黔成矿带为中国主要磷矿成矿带。重要找矿地区为云、贵、川、湘、鄂西以及北方部分地区,南方磷矿资源以沉积型磷矿床为主;北方磷矿以岩浆岩型为主,主要分布在河北和新疆等省份。【结论】磷关乎农业粮食安全、新能源及医疗等重要产业供应链安全稳定,作为人口大国的中国,对于磷化学品的需求量较大,面对中国磷矿分布不均匀及磷矿开采过度等问题,应加强对磷矿资源的调查研究及资源的高效综合利用研究,保障国内磷化产品供给及环境安全,推进资源的可持续发展。

关键词: 磷矿类型;时空分布规律;磷矿成矿带;找矿方向;矿产勘查工程

创新点: 对中国磷矿成因分类、时空分布规律进行概述,总结磷矿成矿规律,对中国重要磷矿找矿地区进行总结。

中图分类号: P619.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)01-0043-18

Origin types, metallogenic regularity and prospecting direction of phosphate deposits in China

WANG Wenhao^{1,2}, WANG Chunlian², WANG Lianxun¹, LIU Kaiyuan^{2,3}, YAN Kai², YU Xiaocan⁴,
YOU Chao^{2,5}, LIU Dianhe^{2,5}

(1. China University of Geosciences (Wuhan), School of Earth Sciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037,

收稿日期: 2023-10-10; 改回日期: 2024-03-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC2906605)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(KK2322、KK2005)和中国地质调查项目(DD20230291)联合资助。

作者简介: 王文浩,男,1999年生,硕士生,资源与环境(地质学)专业;E-mail: 1603894554@qq.com。

通信作者: 王春连,男,1983年生,研究员,主要从事沉积学及矿床学方面的研究;E-mail: wangchunlian312@163.com。

China; 3. China University of Geosciences (Wuhan), School of Earth Resources, Wuhan 430074, Hubei, China; 4. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 5. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

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

[Objective] China is a major country in terms of phosphate resources and major consumer. In 2016, phosphorus ore was included in the Catalogue of Key Mineral Resources in China. With the increasing demand for phosphorus fertilizer and the depletion of resources in more and more mines, it is urgently necessary to enhance geological prospecting and exploration development of phosphate resources. The study of mineralization regularities serves as an important foundation for resource exploration and development. **[Methods]** Building upon previous research, this article further analyzes and summarizes the current status of phosphate development and utilization, types of deposits, spatiotemporal distribution patterns, and prospecting directions in China. It provides a preliminary summary of the mineralization regularities and key prospecting directions for phosphorus ore in China. **[Results]** China possesses abundant phosphate resources, but their distribution is highly uneven, primarily concentrated in four provinces: Yunnan, Guizhou, Sichuan, and Hubei. Based on the types of mineralization processes, Chinese phosphate can be classified into five categories: magmatic rock-type, metamorphic-type, sedimentary-type, secondary-type, and guano-type deposits. The mineralization epochs of phosphate in China are extensive, with the major phosphate-bearing periods being the Meishucun period of Early Cambrian, the Duoshantuo period of Late Ediacaran, and the Jinping period of Paleoproterozoic. According to the "Division Scheme of Metallogenic Belts in China," Chinese phosphate can be divided into 27 third-level metallogenic belts and four metallogenic sub-belts. Among them, the Dianzhong-Southwestern Sichuan Metallogenic Belt, the Daba Mountains-Western Hubei Metallogenic Belt, and the Xiang-Qian Metallogenic Belt are the main phosphate metallogenic belts in China. Important prospecting areas include Yunnan, Guizhou, Sichuan, Hunan, Western Hubei, and some regions in northern China. Southern phosphate resources are mainly sedimentary-type deposits, while northern phosphate resources are predominantly magmatic rock-type deposits, primarily distributed in Hebei and Xinjiang provinces. **[Conclusions]** Phosphorus is crucial for agricultural food security, as well as for important industries such as new energy and healthcare. As a populous nation, China has a significant demand for phosphorus chemicals. In the face of uneven distribution of phosphate and issues related to excessive mining, it is necessary to strengthen the investigation and research on phosphate resources, as well as study the efficient comprehensive utilization of these resources. This will ensure the stable supply of domestic phosphorus products and environmental safety, while promoting the sustainable development of resources.

Key words: origin types; spatial and temporal distribution regularity; phosphate metallogenic belts; prospecting direction; mineral exploration engineering

Highlights: Origin types, metallogenic regularity and important phosphate prospecting areas of phosphate in China were summarizeed.

About the first author: WANG Wenhao, male, born in 1999, master candidate, majors in resources and environmental engineering (Geology); E-mail: 1603894554@qq.com.

About the corresponding author: WANG Chunlian, male, born in 1983, researcher, mainly engaged in sedimentology and mineral deposit research; E-mail: wangchunlian321@163.com.

Fund support: Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2023YFC2906605), Basic Research Funds for Public Welfare Research Institutes (No.KK2322, No.KK2005) and the project of China Geological Survey (No.DD20230291).

1 引 言

磷在养殖业、化工产业、医药、轻工业以及国防等诸多领域中被广泛应用。磷是生物体中必要的元素之一,构成 DNA 的主干以及在细胞能量转

移中起着关键性作用,对生物体的生长发育中起着至关重要的作用(杜春丽等, 2019; 肖晨星和高璐阳, 2022)。目前,大多数的磷矿资源产品都被投入到农作物的应用中,接近 80% 的资源被用于肥料制造(杜春丽等, 2019; 张汉泉等, 2020; 张亚明等, 2020; 赵玉凤等, 2021)。随着科技的发展进步,磷也逐渐

在其他领域起着重要作用,在新能源汽车的高速发展时期,主要的储能电池中磷酸铁锂正极材料对磷的需求量也持续增加。黑磷(2D BP)作为单元素二维半导体,具有高迁移率、各向异性、可调带隙等独特性能,在催化能源、光电器件、生物医学和阻燃材料等领域具有广泛的应用前景(Liu et al., 2021)。

虽然中国的磷矿储量位居世界第二,但磷矿平均品位却不及世界的平均水平(张亮等, 2017; 肖晨星和高璐阳, 2022)。从国家安全、战略以及经济产业等多角度出发考虑,中国在 2016 年已将磷矿列入关键性矿产资源。近年来,中国出台了一系列的环保政策,导致磷矿的实际产量未达到预期,受国际形势变化的影响,各国对于磷矿原料以及肥料的出口加以限制,受制于上述多方面、多角度的因素,各国对于磷矿的需求量将逐渐增加。

综上所述,磷矿作为中国关键性矿产资源,系统分析中国磷矿资源的成矿特征和成矿规律,对指导中国磷矿资源的找矿工作具有重要意义,也有助于中国新兴产业的科学布局和健康发展。本文在前人的研究工作基础上,系统地总结了中国磷矿的类型、时空分布规律及应用等方面,可为中国磷矿的找矿工作提供一定的参考。

2 国内外磷矿概况

2.1 世界磷矿资源概况

根据美国地质调查局 2021 年的数据,世界磷

矿资源十分丰富,资源储量约为 710 亿 t(图 1)。由于磷矿的形成条件比较特殊,世界上的磷矿分布比较集中,就储量而言,磷矿资源主要集中于摩洛哥和西撒哈拉,其中摩洛哥的磷矿主要分布于乌拉德、阿布顿高原和干图地区。自 2010 年起,该地区的磷矿储量已经超过 400 亿 t,占世界磷矿资源储量的 70% 以上,遥遥领先于其他国家(图 1)。中国的磷矿储量为 37.55 亿 t,占世界磷矿储量的 4.5%,位列第二。其他磷矿储量靠前的国家依次为埃及、阿尔及利亚、叙利亚、南非、巴西、沙特阿拉伯等国家及地区。世界磷矿的主要成因类型为沉积型磷矿、岩浆岩型磷矿两大类,部分地区具有少量的变质型及岛屿型磷矿床,其中沉积型磷矿床主要分布于非洲北部、中东、中国和美国等地区(图 2; Peir et al., 2017)。岩浆岩型磷矿床主要分布于俄罗斯、巴西、加拿大、挪威等地区。

由于磷矿资源分布不均匀,一些地区拥有丰富的资源,而另一些地区却面临资源匮乏的困境,这种资源的分布极不均匀可能会给全球农业和化肥的生产带来一系列问题,需要引起足够重视并采取相应措施。中国磷矿资源储量虽然位居世界第二位,但是资源占比仅为 4.5%,且品位不高。根据 United States Geological Survey(简称 USGS)数据统计(USGS, 2023),2022 年世界磷矿石的产量约 2.2 亿 t,中国产量 8500 万 t(占比 38.6%; 国家统计局数据显示 2022 年中国磷矿石产量为 1.05 亿 t),

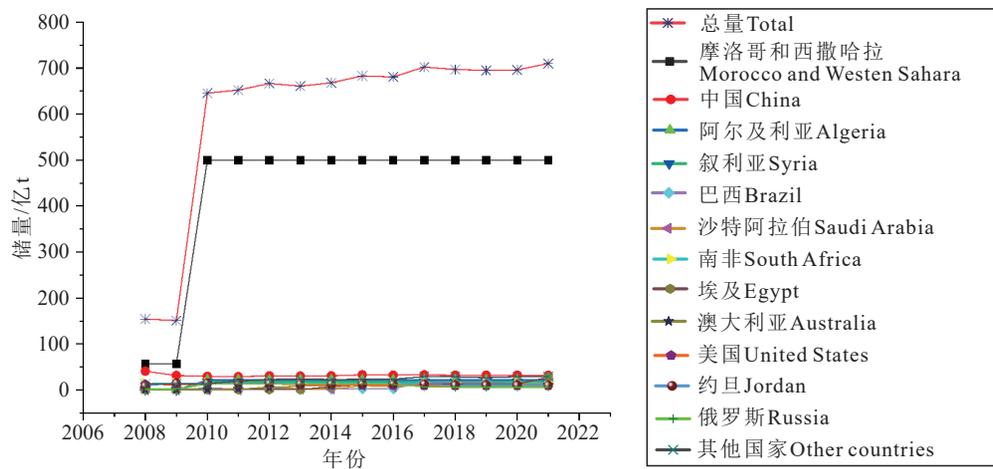


图 1 世界 2008—2021 年各国磷矿资源储量变化(据自然资源部, 2022; U. S. Geological Survey, 2023)

Fig.1 Global phosphate resource reserves change by country from 2008 to 2021(after Ministry of Natural Resources, 2022; U. S. Geological Survey, 2023)

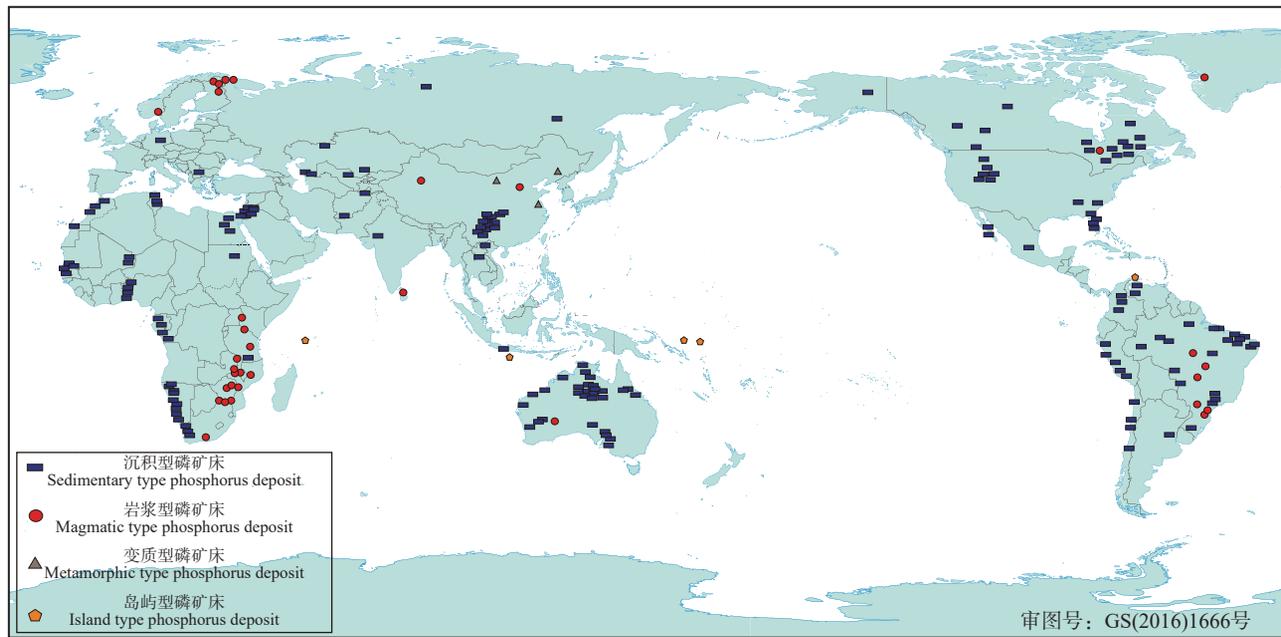


图2 世界磷矿床分布图(据 Peir et al., 2017; 吴发富等, 2021)

Fig.2 Distribution of global phosphate deposits (after Peir et al., 2017; Wu Fafu et al., 2021)

摩洛哥及西撒哈拉产量 4000 万 t(占比 18.2%), 美国产量预计 2100 万 t(占比 9.5%), 2022 年中国磷矿石储采比(储量/产量)仅为 22.4, 远低于世界平均值 327.3, 磷矿石开采严重过度。因此, 需要制定磷矿资源的开发利用规划、加强技术创新、提高资源开采效率和减少对环境的影响, 推动磷矿资源的可持续利用, 确保农业和化肥生产的可持续发展。

2.2 中国磷矿资源概况及开发利用现状

2.2.1 中国磷矿资源特征

磷矿是中国的优势资源, 自然资源部《中国矿产资源报告 2022》显示, 中国磷矿储量为 37.55 亿 t。中国的磷矿资源分布主要分布在贵州、四川、湖北、云南四省, 其磷矿储量资源占全国的 93.7%。其中云南磷矿储量为 15.03 亿 t, 全国占比 40%, 是全国磷矿储量最多的地区; 第二大储量地区为湖北, 磷矿储量为 7.81 亿 t, 全国占比 20.8%; 第三为四川, 磷矿储量为 7.1 亿 t, 全国占比 18.9%; 第四为贵州, 磷矿储量为 5.22 亿 t, 全国占比 13.9%(表 1, 图 3)。具有工业意义的磷矿类型主要为沉积型磷矿床、岩浆岩型磷矿床以及变质型磷矿床, 其中沉积型磷矿约占全国的 75%, 磷矿床品位相对较高、规模相对较大; 变质型和岩浆岩型磷矿占 24%, 其规模较小品位低, 但矿石易选(夏学惠等, 2011; 王莹

表 1 中国 2021 年各省(区)磷矿储量(据自然资源部, 2022)

Table 1 Phosphate reserves in China's provinces (regions) in 2021 (Ministry of Natural Resources, 2022)

省份/地区	储量/亿t	占比/%
云南	15.03	40
湖北	7.81	20.8
四川	7.1	18.9
贵州	5.22	13.9
其他省份	2.39	6.4
总量	37.55	100

等, 2022)。

中国虽然磷矿资源丰富, 但分布极不均匀, 呈现着南多北少的形势, 因此中国出现了“南磷北运, 西磷东调”的局面(田侠, 2016; 崔荣国等, 2019), 且富矿、易选矿少, 贫矿、难选矿多, P_2O_5 大于 30% 的富矿仅占总资源储量的 10%, 其中富矿主要分布于贵州省(杜春丽等, 2019; 张汉泉等, 2020; 张亚明等, 2020)。由于磷矿资源分布不均匀, 可能导致资源利用效率低下, 部分地区资源得不到充分利用, 影响资源的可持续利用。磷矿资源丰富的地区可能因为资源开采过度而面临环境问题, 如土地破坏、水资源污染等, 对当地生态环境造成负面影响。

2.2.2 中国磷矿伴生矿利用现状

在伴生矿的利用中, 外生磷矿中氟、碘、锶、稀

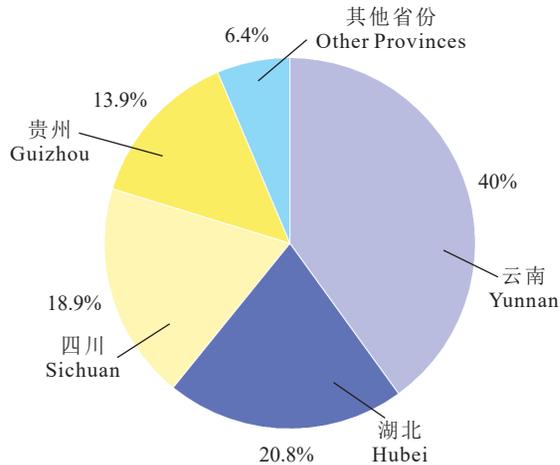


图 3 中国 2021 年各省(区)磷矿储量占比(据自然资源部, 2022)

Fig.3 Proportion of phosphate reserves in each province (region) in China in 2021 (Ministry of Natural Resources, 2022)

土等元素含量较多,同时含有丰富的脉石矿物质元素,因此具有较高的伴生元素利用价值。内生磷矿中磁铁矿、钛磁铁矿以及黄铁矿的含量较高,可以单独产出一种伴生矿物质元素(柳正等, 2006; 肖晨星和高璐阳, 2022)。目前,中国主要集中在氟、碘、稀土等伴生元素资源的开发和利用,而外生磷矿是这些伴生矿的主要来源。虽然伴生氟、碘和稀土等元素在外生磷矿中不具有独立开采价值,但元素含量较高,因此具有很好的综合利用价值(陈满志等, 2019; 肖晨星和高璐阳, 2022)。

中国磷矿伴生矿在开发利用上以贵州省为代表,贵州省已经逐步实现伴生碘、伴生氟、伴生稀土资源的产业化利用。据宋生琼等(2020)数据显示,伴生碘在贵州省查明资源储量 8.07 万 t,在磷块岩中碘元素以类质同象形式存在于磷质晶格中;伴生

氟在贵州省查明资源储量 4179 万 t,氟主要存在于碳氟磷灰石中,以 $\text{Ca}_{10}\text{F}(\text{PO}_4)_6$ 的形态存在,磷矿石平均含氟约 3%;伴生稀土在贵州省查明资源储量 85.89 万 t,伴生的稀土氧化物主要以类质同象形式存在于胶磷矿中。磷矿伴生矿资源利用前景可观,充分利用磷矿伴生资源可以拓展产业链,同时对化工行业污染治理具有积极作用,符合中国发展循环经济的基本国策(赵玉凤等, 2021; 肖晨星和高璐阳, 2022)。磷矿资源的梯级利用水平仍然有待提升,高附加值磷化学品及伴生资源开发能力仍然不足。

2.2.3 中国磷矿开采技术现状

磷矿资源的合理开发利用需要考虑磷矿开采回采率、选矿回收率和综合利用率(称为“三率”)三个方面,这是评价磷矿企业开发利用效果的主要指标(赵玉凤等, 2021)。具体来说,露天磷矿的开采回采率为 95.83%,高于全国平均水平 95.00%;地下磷矿的开采回采率为 79.52%,高于全国平均水平 77.95%;联合开采的磷矿的开采回采率为 95.17%,略高于全国平均水平 94.14%(柳正等, 2006; 张汉泉等, 2020)。世界磷矿重点区域采选指标统计结果(表 2)显示,中国磷矿生产中,平均磷矿 P_2O_5 品位约为 19.4%,略低于全球平均水平。尽管中国磷矿品位不高,但其选矿回收率却高达 89.97%,远超全球平均水平 63.01%。这一高效回收率主要得益于国内磷矿常采用洗矿富集和多种浮选流程,大幅提高了磷矿的回收率,中国磷矿开发技术已达到国际领先水平。

中国磷矿开采回采率和选矿回收率虽然已达世界领先水平,但在绿色开采技术上还未能得到较好提升,应加强绿色化技术的实施,开发磷化物及有机磷新型催化,缩减磷石膏的产生,并有效对磷

表 2 世界磷矿重点区域采选指标统计(据张亮等, 2017)

Table 2 Statistics of the mining and dressing indexes of the key phosphate areas in the world (after Zhang Liang et al., 2017)

地区	入选 P_2O_5 品位/%	精矿 P_2O_5 品位/%	选矿回收率/%	露采回采率/%	地采回采率/%
美国东南部	10.9	30.4	79		
美国西部	22.2	31.2	71.3		
南非	9.6	33.8	58.6		
北非	26	32.2	69.8		
西非	27.1	33.3	40.5	50~95	65~85
中东	24.7	31.4	71.4		
南美	9.6	33.8	58.6		
中国	19.4	29.2	89.97		
世界加权平均	19.61	30.2	63.01	50~95	65~85

石膏等污染物进行无害化处理,加大清洁能源的利用及节能技术的发展,做到绿色可持续发展。

2.2.4 中国磷矿选矿技术现状

从磷化工的视角来看,选矿可将磷矿中伴生的有害杂质排除掉。同时,随着优质可直接应用的磷矿储备逐渐减少,对于中低品位磷矿的选矿富集处理需求也日益增长,较好的磷矿选矿技术可满足下游湿法磷酸和高浓度磷肥等产品的生产需求。中国磷矿平均品位不高,因此选矿技术在开采和利用磷矿资源方面至关重要。针对不同类型和性质的磷矿,制定不同的选矿方案是关键。中国的磷矿选矿技术与国外的技术经验相似,主要包括浮选法、重选法、焙烧法、擦洗脱泥技术和重磁浮联合浮选等方法(孔汇贤, 2022)。浮选是最主要的方法,但是,在浮选中,高效的浮选药剂缺乏选择性,且存在较强的专属性,这是目前磷矿选矿面临的主要问题之一(闫雅雯等, 2021)。因此,加强研究浮选药剂,特别是开发新的药剂,对解决当前磷矿选矿的问题尤为关键,特别是针对沉积型磷矿的选矿(闫雅雯等, 2021; 孔汇贤, 2022)。高效选矿、新型磷酸解和湿法磷酸深度净化等关键技术尚未完全突破,选矿关键技术还有待提高。

3 中国磷矿矿床类型

磷矿的类型分类可按照成因、矿石及工业来进行分类。成因类型主要分为岩浆岩型磷矿、沉积型磷矿、变质型磷矿、次生型磷矿、鸟粪型磷矿 5 大类;矿石类型主要分为块状磷块岩、泥质条带状磷块岩、泥质条纹状磷块岩以及白云质条带状磷块岩四类;工业类型主要分为氟磷灰石、氯磷灰石、羟基磷灰石、碳磷灰石、碳氟磷灰石五类(韩豫川等, 2012; 夏学惠和郝尔宏, 2012; 彭飏等, 2020; 吴发富等, 2021)。按照成矿作用类型,结合控矿因素,可将中国磷矿床进一步划分为 16 个亚类以及 30 式(表 3; 韩豫川等, 2012; 夏学惠和郝尔宏, 2012; 徐志刚和朱明玉, 2015; 薛珂和张润宇, 2019; 彭飏等, 2020)。一级划分与地质作用相对应,二级划分以特定地质环境下的地质作用进行,三级划分依据不同矿床类型的特征与标志、成矿方式来进行(韩豫川等, 2012)。

岩浆岩型磷矿分为 7 个亚类,分别为超基性—

碱性岩型、超基性—碳酸岩型以及碳酸性岩型等 7 类(表 3)。其中,超基性—碱性岩型和超基性—碳酸岩型是最有远景的两种岩浆岩型磷矿类型(韩豫川等, 2012; 张苏江等, 2016; 东野脉兴等, 2018; 吴发富等, 2021)。岩浆岩型磷矿主要分布于华北以及西北等地区,中国已发现的碱性杂岩 40 多处(熊先孝等, 2007; 吴发富等, 2021)。岩浆岩型磷矿成矿作用与成岩过程中岩浆分异(结晶分异和重力分异)等有关,成矿作用主要受大地构造部位及深大断裂和岩浆岩条件控制,在大地构造上多产于稳定地台区,如中朝准地台北缘及塔里木准台东北缘,形成两条巨大的岩浆岩型磷矿成矿带(夏学惠等, 2009; 韩豫川等, 2012)。

沉积型磷矿可分为 3 个亚类,分别为震旦纪海相沉积岩型、寒武纪海相沉积岩型、泥盆纪海相沉积岩型(田升平, 2000; 薛珂和张润宇, 2019; 彭飏, 2020)。磷块岩主要产于稳定克拉通的边缘地带,其矿床主要形成于扬子、中朝、塔里木等地块的被动大陆边缘海相盆地之内,前寒武纪陡山沱期磷块岩矿床主要分布于鄂西—湘西—黔中一带,自北向南形成 4 个主要矿集区,分别为鄂西矿集区、东山峰矿集区、湘西矿集区以及黔中矿集区(邓小林等, 2009; 熊先孝等, 2010; 夏学惠和郝尔宏, 2012)。扬子陆块区早寒武世梅树村期磷块岩矿床分布于扬子西缘,因沉积环境、沉积相带以及含磷沉积建造不同,在微量元素的组成上有一定的区别,如碘、铀含量较高;磷块岩中 Br、Sr 的含量极高;含磷岩系以及磷块岩稀土总量偏高;硼元素的丰富度可作为沉积环境的判别标志(夏学惠和郝尔宏, 2012)。

变质型磷矿分为 3 个亚类,分别为绿岩带型、变质混合岩型和沉积变质岩型(夏学惠和郝尔宏, 2012; 吴发富等, 2021)。变质型磷矿主要分布在北方早、中前寒武纪变质岩中,位于华北地块东缘(熊先孝等, 2007; 夏学惠等, 2011)。这些磷矿床主要分布在中国秦岭—大别成矿省的桐柏—大别成矿带和苏鲁成矿带的前寒武纪变质岩中,包括安徽省宿松—肥东磷矿带、鄂西磷矿带和苏北磷矿带,赋矿层位主要为古元古代溇沱群锦屏组,主要分布在鄂、皖、冀、辽、苏等省(熊先孝等, 2007; 夏学惠等, 2009)。该磷矿类型的矿石可选性较好,具有较高的综合利用价值。因此,变质型磷矿是中国北方的

表 3 中国磷矿床分类 (据韩豫川等, 2012; 夏学惠和郝尔宏, 2012)

Table 3 Classification of phosphate deposits in China (after Han Yuchuan et al., 2012; Xia Xuehui and Hao Erhong, 2012)

大类	亚类	成矿时代	种类	地质分布	典型矿床
岩浆岩型磷矿床	超基性—碱性岩型	印支期 2.36 Ma	矾山式	华北地块北缘 燕辽沉降带	矾山、姚家庄、枣庄沙沟
	超基性—碳酸岩型	8.62~9 Ma	且干布拉克式	塔里木地块北缘 华北地块北缘	且干布拉克、蓟县马伸桥
	碱性岩型			辽宁、山西	辽宁凤城施家堡、山西紫金山
	碳酸性型		白云鄂博式	内蒙、新疆	白云鄂博、瓦吉尔塔格
	超基性岩型		卡乌留克塔格式	塔里木地块北缘 华北地块北缘	小张家口、卡乌留克塔格、团结村北山、 陕西凤县九子沟、青海上庄、栖霞观里
	基性岩型	6.2 Ma	马营式	华北地块北缘 塔里木地块北缘	马营、黑山、大庙、大西沟
	伟晶岩型		右所堡式	华北地块河北、内蒙	内蒙卓资、丰镇、河北右所堡、山西天镇
变质型磷矿	绿岩带型	太古宙	招兵沟式	华北古陆核 山东古陆核	丰宁招兵沟、山东莱芜雪野、掖县彭家、 山西灵丘
		太古宙	勿兰乌苏式	辽吉古陆核	建平县勿兰乌苏
	变质混合岩型	古元古代	麻山式	佳木斯地块	黑龙江鸡西麻山、林口余庆
		元古宙	海州式	华北地块东缘	海州、宿松、肥东、黄麦岭、甜水、浑江 板石沟
	沉积变质岩型	元古宙	布龙土式	华北地块北缘	内蒙古布龙土
		元古宙 中元古宙	罗屯式 东焦式	华北地块北缘 华北地块中部	辽宁罗屯、仰山、河北东焦 河北获鹿东郊、平山
沉积型磷矿床	震旦纪海相沉积岩型	震旦纪陡山沱期	开阳式	扬子地块西南缘	开阳、瓮安、福泉与丹寨
		震旦纪陡山沱期	荆襄式	扬子地块南缘	神农架、房县、保康、兴山、秭归、宜昌
		震旦纪陡山沱期	石门式	扬子地块南缘	湘西北、东山峰背斜构造两翼
		震旦纪陡山沱期	湘西式	扬子地块南缘	西部古丈、泸溪、辰溪
		早寒武世梅树村期	昆阳式	扬子地块西缘	云南昆阳、海口、滇东地区
		早寒武世梅树村期	马边式	扬子地块西缘	雷波牛寨、马颈子、川西
		早寒武世梅树村期	天台山式	扬子地块西缘南北两端	汉中天台山、金家河、迭部当多、文县关 家沟
		早寒武世梅树村期	新华式	扬子地块南部被动边缘	织金新华磷(稀土)矿
	寒武纪海相沉积岩型	早寒武世梅树村期	辛集式	扬子地块东缘与西北缘	河南鲁山辛集、宁夏贺兰苏峪口、山西芮 城水峪、甘肃马房子沟、安徽凤台、山西 永济清华、陕西景福山
		早寒武世梅树村期	平台山式	塔里木地块北缘	精河科古尔琴、尉犁西山布拉克、哈密平 台山、敦煌方山口、柯坪、库鲁克塔格
泥盆纪海相沉积岩型	早寒武世筇竹寺期	汉源式	扬子地块西北缘及东缘	汉源椅子山、水桶沟	
	早寒武世荷塘期	东溪式	浙江、江西及相邻地区	浙江东溪、夏禹桥、万市	
	中寒武世	大茅式	三亚被动陆缘	海南大茅	
	泥盆纪什那期	什那式	龙门山前陆 逆冲带	四川绵竹马槽滩、广西德保、都安、云南 广南布达、西藏纳多俄玛、新疆五工河	
	风化—淋滤 残积型		黄荆坪式		湖南湘潭黄荆坪
	洞穴堆积型		天等式		广西邕隆、天等、凤山、柳江福塘、象州 马坪、广东翁源
鸟粪型磷矿		西沙群岛式	南海岛屿	西沙群岛	

重要磷矿资源类型(韩豫川等, 2012; 李维等, 2015; 杜春丽等, 2019; 唐文龙等, 2021)。

次生型磷矿是由原有含磷层经过物化风化淋滤作用后, 所含磷质就地残积、异地迁移或以再沉

积等方式富集形成的磷矿床,这类磷矿资源规模多数较小(韩豫川等,2012)。根据磷矿形成过程和特点,次生型磷矿可分为风化-淋滤残积型、洞穴堆积型以及鸟粪型磷矿等三个亚类(韩豫川等,2012;唐文龙等,2021)。其中,风化-淋滤残积型磷矿的典型代表有湘潭黄荆坪磷矿床,矿石化学成分主要为 P_2O_5 ,其次为 SrO 、 SiO_2 及 CaO 等,并含有 Th 、 U 、稀土元素等组分(张苏江等,2016)。鸟粪型磷矿是由鸟粪堆积和淋浴所形成的磷质胶结珊瑚砂,经过成土作用后形成的高磷土壤,也被称为磷质石灰土。这种类型的磷矿资源主要分布于西沙群岛和南沙群岛中的太平岛等岛屿(韩豫川等,2012;夏学惠和郝尔宏,2012;吴发富等,2021)。

4 中国磷矿时空分布规律

4.1 时间分布规律

中国磷矿产出时期比较广泛,不同类型的磷矿产出时期不同,且并不是每个时期的磷矿都具有工业利用价值。中国具有工业价值的3个主要磷矿产出时期分别为早寒武世梅树村期、晚震旦世陡山沱期、古元古代锦屏期,其中陡山沱期、梅树村期也是世界的两大重要产磷期(表4;韩豫川等,2012;陈毓川等,2015)。

沉积型磷矿是中国磷矿的主要类型,同时其磷矿形成时期为中国磷矿的主要成磷时期,主要为震旦纪、寒武纪与泥盆纪(刘魁梧,1985;韩豫川等,2012;夏学惠和郝尔宏,2012)。陡山沱期磷块岩产出的层位为新元古界震旦系上统陡山沱组,同位素年龄距今有650~700(± 30)Ma;梅树村期磷块岩主要位于扬子板块西缘,产出的层位为古生界下寒武统梅树村期,同位素年龄为610(± 10)Ma至573(± 7)Ma(韩豫川等,2012)。这两个时期是中国磷矿最主要的形成时期,除了时代层位与分布不同之外,成矿特征和成矿规律几乎一致。

岩浆岩型磷矿形成时期相对较为集中。中元古代、印支期和燕山期是岩浆岩型磷矿主要的成矿时期(夏学惠和郝尔宏,2012;薛珂和张润宇,2019;吴发富等,2021)。超基性岩类、伟晶岩类以及基性岩类多数形成于前寒武纪时期,而超基性-碱性杂岩磷矿和碱性岩类则主要在寒武纪后(主要为印支期)集中形成(熊先孝等,2007;东野脉兴等,2018)。

晚期的岩浆岩型磷矿构成该磷矿类的主体,太古宙华北陆核区边缘、中元古代华北克拉通北缘裂谷区以及印支期和燕山期冀北、胶东岩浆岩带为岩浆岩的主要产出位置(韩豫川等,2012)。

变质型磷矿主要是在早、中前寒武纪(包括太古宙和古元古代)形成的,主要分布在华北地块东南缘(田升平,2000;韩豫川等,2012;唐文龙等,2021)。这种类型的磷矿矿石可选性较好,而且一些矿床中含有可供综合利用的矿物和元素,因此变质型磷矿是中国北方缺磷省区的重要磷矿资源之一。变质型磷矿以中元古代为主要成矿期,矿床广泛分布于华北克拉通地区,并且主要形成于新元古代陆核和古-中元古代裂谷区的古老地层以及变质基性-超基性岩中(田升平,2000;唐文龙等,2021)。

4.2 空间分布规律

中国的工业磷矿床分布于云南、湖北、四川、贵州、青海以及江西等省份和地区。沉积型磷矿床主要分布于扬子地块的云南、贵州、湖北、四川等省。岩浆岩型磷矿床主要分布于华北地区的河北、内蒙古、辽宁、山东,西北地区的陕西、新疆等省。变质型磷矿床主要分布于华北地区的河北北部、辽宁、吉林、安徽、江苏、湖北等地区(夏学惠等,2011)。

王莹等(2022)对中国磷矿成矿区带进行详细的划分,将中国磷矿划分为27个Ⅲ级成矿区带,4个成矿亚带。其中有三条成矿带为中国的主要磷矿成矿带(表4,图4),分别为滇东-川西南成矿带、大巴山-鄂西成矿带、湘黔成矿带,均属于扬子成矿省。

4.2.1 大巴山-鄂西成矿带

大巴山-鄂西成矿带位于大扬子古板块(米仓山-大巴山基地逆推带)下扬子板块(鄂中碳酸盐台地)。

该成矿带包含多个重要矿集区,神农架-宜昌矿集区和荆门-襄樊矿集区,包括著名的荆襄、宜昌、保康、神农架四个磷矿田,形成了大巴山-鄂西磷成矿带,在宜昌、荆襄、兴-神三大聚磷区已发现磷矿35处,其中大型有12处、中型17处(韩豫川等,2012;杨泰等,2023)。该成矿带地层主要为上震旦统陡山沱组、寒武系。根据含磷岩系岩石组合特征,将鄂西陡山沱组划分为两个岩性段,下段包含三层磷矿层(Ph1、Ph2、Ph3),第四层含磷层则仅

表 4 中国磷矿Ⅲ级成矿区(带)划分(据韩豫川等, 2012; 王莹等, 2022)

Table 4 Table of phosphate III mineralization zone division in China (after Han Yuchuan et al., 2012; Wang Ying et al., 2022)

成矿域		成矿省		磷成矿带		磷成矿亚带		典型矿床	全国Ⅲ级成矿区带编号
编号	名称	编号	名称	编号	名称	编号	名称		
I-4	滨太平洋成矿域	II-14	吉黑成矿省	III-P-1	佳木斯—兴凯成矿带			柳毛	III-53
		II-3	伊犁成矿省	III-P-2	伊犁成矿带			科古尔琴	III-9-②
I-1	古亚洲成矿域	II-4	塔里木成矿省	III-P-3	柯坪成矿区			苏盖特布拉克	III-13-①
				III-P-4	库鲁克塔格成矿区			且干布拉克、木穷库杜克	III-13-②
				III-P-5	北山成矿带			方山口、平台山	III-14-①
				III-P-6	龙首山成矿带			马房子沟、哈马胡头沟	III-18
				III-P-7	贺兰山—六盘山成矿带			苏峪口、景福山	III-59
				III-P-8	阴山成矿带			布龙土	III-58-①
				III-P-9	张家口—承德成矿带			矾山、右所堡、罗锅子沟	III-57-①、III-57-②
		II-5	华北陆块成矿省	III-P-10	冀东—辽西成矿带			葛家、勿兰乌苏、簸箕山	III-57-③、III-57-④
				III-P-11	辽东成矿带			甜水、罗屯、水洞、大顶子	III-56
				III-P-12	五台山成矿带			平型关、朴子沟、白家山	III-61-①
				III-P-13	华北陆块南缘成矿带			靖家山、石梯	III-63
		II-8	秦岭—大别成矿省	III-P-14	南秦岭成矿带			天台山、阳平关、金家河、赵家峡	III-66-②
				III-P-15	桐柏—大别成矿带			黄麦岭、宿松	III-67-①
III-P-16	苏鲁成矿带					大横山、锦屏、新浦	III-67-②		
I-4	滨太平洋成矿域			III-P-17	龙门山成矿带			马槽滩、岳家山、王家坪	III-73-①
				III-P-18	大巴山—鄂西成矿带	III-P-18-①	大巴山成矿亚带	朱家坝、杨家坝	III-73-①
						III-P-18-②	鄂西成矿亚带	保康、荆襄、宜昌、兴—神	III-73-①
				III-P-19	滇东—川西南成矿带			昆阳、晋宁、马边	III-77-②、III-76-①
		II-15	扬子成矿省	III-P-20	湘黔成矿带	III-P-20-①	湘西北—黔中成矿亚带	开阳、瓮福、鹤峰、新华、东山峰	III-77-①
						III-P-20-②	湘西成矿亚带	洗溪、张家滩、浦市	III-77-①、III-78
				III-P-21	桂北—湘中成矿带			浦市	III-78
				III-P-22	湘东成矿带			永和、麻田、黄荆坪	III-70
				III-P-23	浙西—赣东北成矿带			朝阳、前村、东溪	III-71-③
		II-16	华南成矿省	III-P-24	桂西成矿带			把荷	III-88
				III-P-25	南岭西段成矿带			上草	III-83-③
III-P-26	云开成矿带					湖村、小竹	III-85-①		
III-P-27	海南成矿带					大茅	III-90		

在荆襄、宜昌一带发育,并不具有工业价值,因此可作为上下段的分界线。神农架—宜昌矿集区和荆门—襄樊矿集区属于大巴山—鄂西磷成矿带,为浅

海台地相区,藻滩发育,成磷条件较好(韩豫川等, 2012)。该区地层发育齐全,其中变质岩系为中、新元古界,震旦系至三叠系主要为海相碎屑岩以及碳

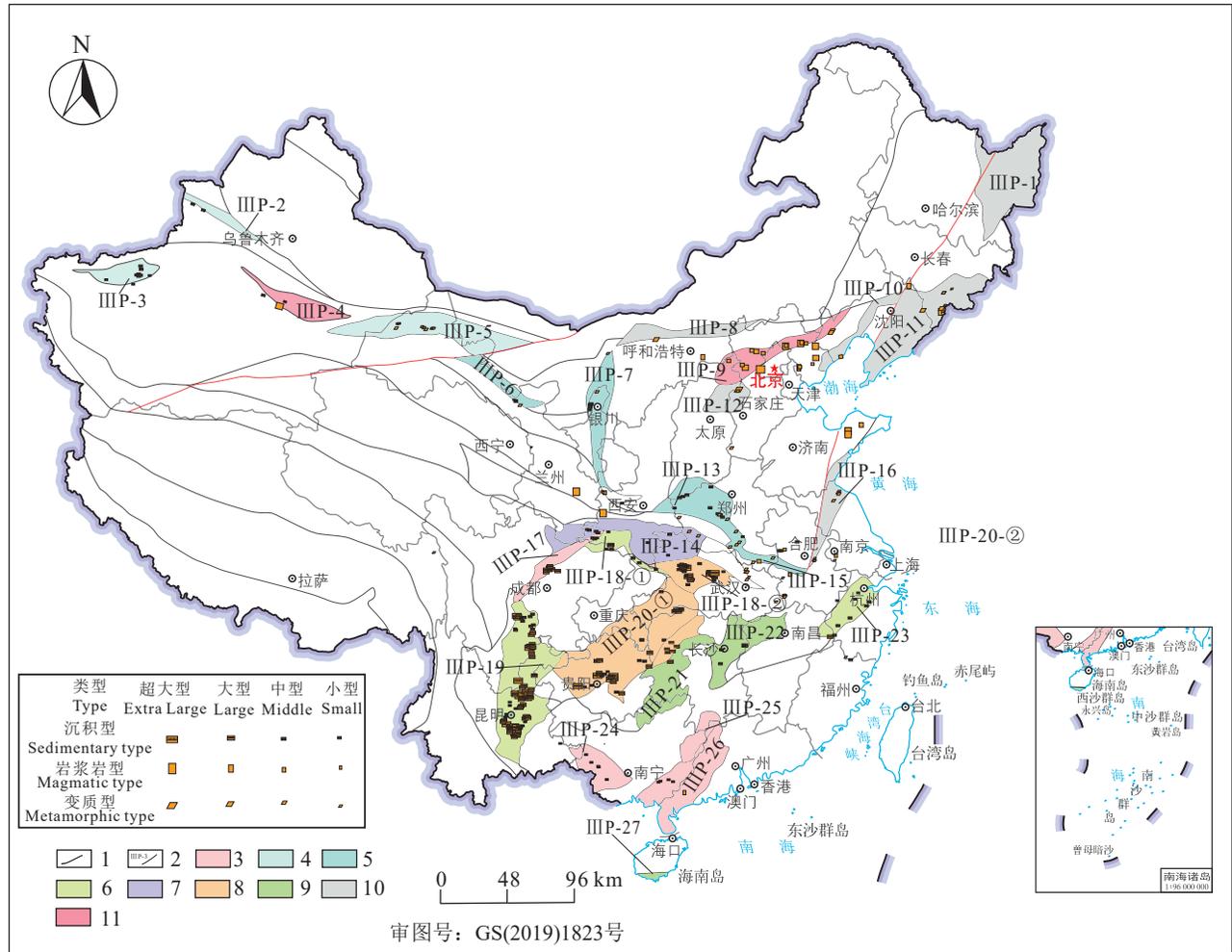


图4 中国磷矿分布及Ⅲ级成矿区带划分(据韩豫川等, 2012; 王莹等, 2022 修改)

1—二级成矿区带界线; 2—三级成矿区带界线及编号; 3—(四川、华南)泥盆纪沉积磷矿(什邡式); 4—(西北)寒武纪磷矿(平塔山式); 5—(华北)寒武纪磷矿(辛集式); 6—(南方)寒武纪磷矿(昆阳式、汉源式、大茅式); 7—(秦岭造山带)沉积磷矿(天台山式); 8—(上扬子)震旦纪磷矿(荆襄式、开阳式、新华式); 9—(下扬子)震旦纪磷矿(东溪式、朝阳式); 10—沉积变质磷矿(海州式、勿兰乌苏式); 11—岩浆岩型磷矿(右所堡式、且干布拉克式、砚山式)

Fig.4 Distribution of phosphate and division of grade III mineralization zone in China (modified from Han Yuchuan et al., 2012; Wang Ying et al., 2022)

1—II metallogenic zone boundary; 2—III metallogenic zone boundary and numbering; 3—Devonian sedimentary phosphate deposit (Shifang type) in Sichuan and South China; 4—(Northwest) Cambrian phosphate deposit (Pingtaishan type); 5—(North China) Cambrian phosphate deposit (Xinji type); 6—(South) Cambrian phosphate deposit (Kunyang type, Hanyuan type, Damao type); 7—(Qinling orogenic belt) sedimentary phosphate deposit (Tiantaishan type); 8—(Upper Yangtze) Cambrian phosphate deposit (Jingxiang type, Kaiyang type, Xinhua type); 9—(Lower Yangtze) Sinian phosphate deposit (Dongxi type, Chaoyang type); 10—Sedimentary metamorphic phosphate deposit (Haizhou type, Belanwusu type); 11—Magmatic phosphate deposit (Yousuopu type, Qieganbulake type, Fanshan type)

酸盐岩, 侏罗系至第四系则为内陆相盆地型沉积。已知该区各矿区规模巨大, 品位中等, 其中保康、神农架以及宜昌 3 个矿田发现的磷矿连成片, 范围大, 富矿数量较多, 是中国重要的磷矿矿集区(熊先孝等, 2010; 严炜等, 2015; 朱良英等, 2021)。

4.2.2 滇东—川西南成矿带

滇东—川西南成矿带位于上扬子古板块(康滇

基底断隆带与扬子板块南部碳酸盐台地)。

在该成矿带中, 有两个重要的磷矿矿集区, 分别是位于川西南—滇东北矿集区和昆明—玉溪的矿集区。该地区磷矿类型主要为海相沉积磷块岩型, 富含磷矿资源, 规模巨大(田升平等, 2004; 王莹等, 2022)。川西南—滇东北地区位于川滇成磷带的中部, 属于早寒武世梅树村期的川滇潮坪海湾,

具备有利于磷矿沉积的环境,因此含矿层分布广、规模大,有连续性的富矿体,磷矿资源潜力巨大。该地区位于扬子准地台西部边缘,属于扬子准地台形成的地块,为北高南低的菱形地形(韩豫川等, 2012; 李小燕等, 2018)。该地块周界活动性较强,北边界为大巴山深断裂,南界为南盘江深断裂,西南界为程海深断裂—红河深断裂,西南界为程海深断裂—红河深断裂。因此,地块内部的构造形成一定的差异性(韩豫川等, 2012)。早寒武世梅树村期含磷建造位于第一盖层震旦系上,受古构造和古地理因素的严格控制。在空间分布上,其含磷性呈现由西向东递减的趋势。特别是在靠近西部康滇古陆边缘的川滇拗陷区,形成了一个重要的聚磷中心,这个区形成了川滇成磷带(邓小林等, 2009; 韩豫川等, 2012)。

4.2.3 湘黔成矿带

湘黔成矿带位于上扬子古板块(扬子板块南部碳酸盐台地与上扬子东南缘被动边缘盆地)。

湘黔成矿带主要由开阳—瓮安矿集区、东山峰矿集区、清镇—织金矿集区组合形成。其中开阳—瓮安矿集区为扬子板块的主要富矿区,典型矿床有贵州省开阳磷矿、织金县新华磷矿和湖南省石门县东山峰磷矿等,含磷地层主要包括新元古界陡山沱组和下寒武统戈仲伍组(夏学惠等, 2011; 邢介奇等, 2022)。这些地层形成于不同的地质环境,其中包括近岸浅海磷块岩相(位于黔中地区)、浅海台地磷块岩相(位于东山峰地区)以及盆地边缘磷矿沉积(位于湘西地区)。在湘黔成矿带中,开阳—瓮安集矿区的规模巨大、品位高,是少有的富矿区。其中 P_2O_5 平均品位高于 30% 的有洋水、温泉及龙水等矿区的部分分段,几乎占扬子板块地区富矿储量的 90% 以上。开阳—瓮安磷矿带位于黔中台地,是一个波浪带,毗邻广海、傍海口和藻滩,是陡山沱期扬子浅海中最优秀的磷成矿带之一(韩豫川等, 2012)。

5 重点找矿方向

沉积型磷矿床的主要形成条件及成矿规律有:(1)震旦纪、寒武纪与泥盆纪时期为主;(2)海相沉积环境,生物活动迹象明显;(3)形成于构造运动沉降期;(4)滨海潮汐带,分为潮上—潮间和潮下浅海环境;(5)氧化环境为主;(6)低纬度至中纬度,半干

燥弱蒸发气候。岩浆岩型磷矿床形成主要条件及规律有:(1)古元古代、印支期和燕山期时期为主;(2)古老地台区,地台边缘与地台活化区的边缘带明显;(3)深大断裂控矿,矿床多分布于断裂交汇部位;(4)岩浆分异作用(结晶分异、重力分异);(5)超基性—碱性—碳酸岩杂岩区。变质型磷矿床主要形成条件及规律有:(1)早、中前寒武世(包括太古宙和古元古代)时期为主;(2)古隆起区边缘;(3)混合岩交代作用。

根据以上矿床成矿地质条件和矿床形成特征等综合信息,利用物探、化探、遥感等手段综合建立找矿模型,结合中国磷矿成矿时空分布规律,通过各地区的磷矿资源评价,综合分析中国磷矿找矿重点区域。未来中国磷矿找矿可集中在西南地区、华北地区、湖南省、湖北省以及新疆库鲁克塔格地区,以下分别对重点地区进行找矿远景分析。

5.1 西南地区

西南地区主要指云南、贵州、四川等,均主要呈现出富矿多、贫矿少等特点,矿床类型主要以原生沉积型磷矿床为主,成矿时代主要为震旦纪、寒武纪、泥盆纪。富矿形成主要与磷块岩的风化有关,磷块岩中常共伴生有硫磷铝锂矿、稀土、氟、钾、铀等重要矿床(田升平等, 2004; 邢介奇等, 2022)。西南地区磷块岩矿床主要形成于稳定克拉通边缘,因此主要分布于沉积岩区,特别是海相碳酸盐岩地层中。西南地区磷矿主要受地层层位和岩性的控制,矿体呈层状或似层状产于含矿岩系中(韩豫川等, 2012; 夏学惠和郝尔宏, 2012; 秦建华和刘才泽, 2016)。根据西南各省市区磷矿资源潜力评价成果报告及磷矿 I、IV、V 级成矿区带划分方案,划分了西南地区 15 处磷矿找矿远景区(图 5, 表 5),其中会东—华宁、峨边—汉源、马边—雷波、甘洛—越西、开阳—瓮安、织金—清镇、绵竹—什邡远景区为西南地区的重要远景区(表 5; 秦建华和刘才泽, 2016)。

5.2 湖北省

湖北省的磷矿主要分布在鄂西地区,其中包括宜昌地区(夷陵区、兴山县、远安县)共计 18 个主要矿区,荆襄地区(钟祥市、宜城县)共计 9 个主要矿区,兴神保地区(兴山县、神农架林区、保康县)共计 15 个主要矿区,以及东山峰地区(鹤峰县)共计

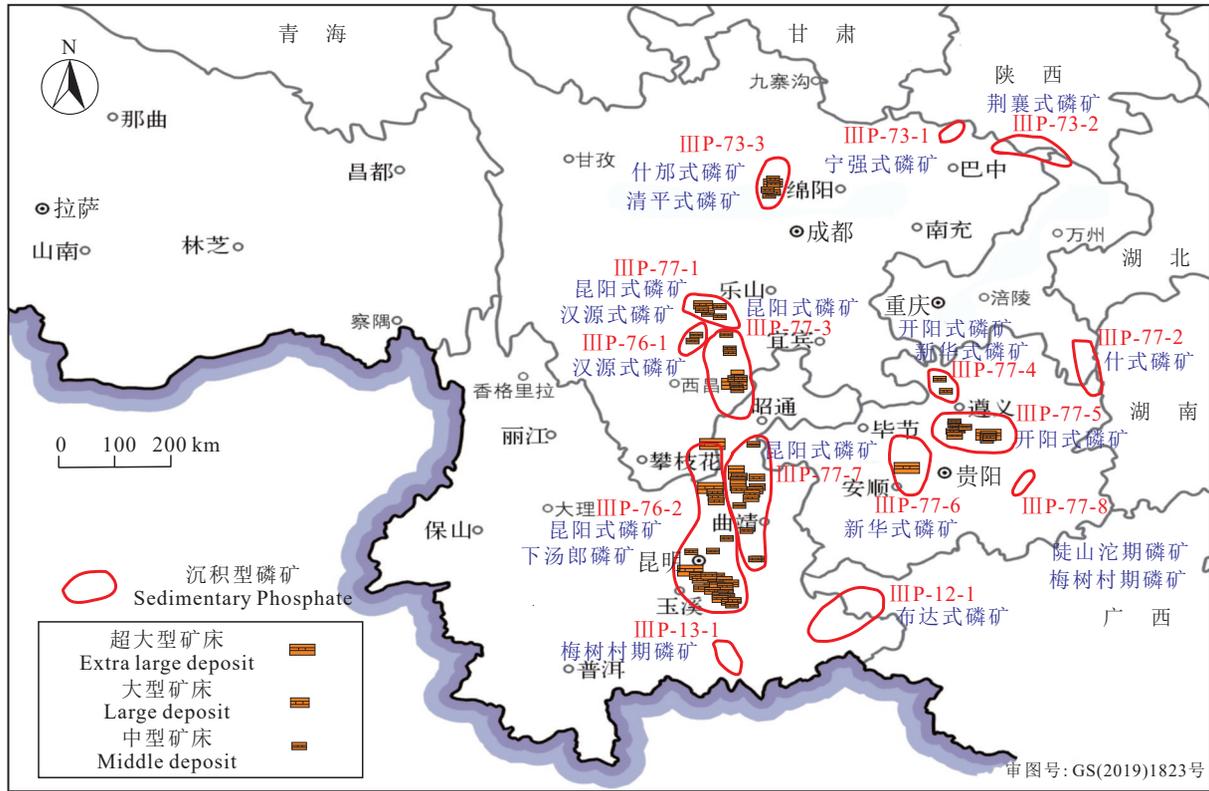


图5 西南地区磷矿找矿远景图(据秦建华和刘才泽, 2016 修改)

III P-73-1—旺苍—南江远景区; III P-73-2—万源—巫溪远景区; III P-73-3—绵竹—什邡远景区; III P-77-1—峨边—汉源远景区; III P-77-2—渝南—黔北远景区; III P-77-3—马边—雷波远景区; III P-77-4—金沙—遵义远景区; III P-77-5—开阳—瓮安远景区; III P-77-6—织金—清镇远景区; III P-77-7—会泽—宜良远景区; III P-77-8—丹寨—麻江远景区; III P-76-1—甘洛—越西远景区; III P-76-2—会东—华宁远景区; III P-12-1—右边海槽远景区; III P-13-1—蒙自—屏边远景区

Fig.5 Phosphate prospecting in southwest China (modified from Qin Jianhua and Liu Caize, 2016)

III P-73-1—Wangcang-Nanjiang prediction area; III P-73-2—Wanyuan-Wuxi prediction area; III P-73-3—Mianzhu-Shifang prediction area; III P-77-1—Ebian-Hanyuan prediction area; III P-77-2—Yunan-Qianbei prediction area; III P-77-3—Mabian-Leibo prediction area; III P-77-4—Jinsha-Zunyi prediction area; III P-77-5—Kaiyang-Weng'an prediction area; III P-77-6—Zhijin-Qingzhen prediction area; III P-77-7—Huize-Yiliang prediction area; III P-77-8—Danzhai-Majiang prediction area; III P-76-1—Ganluo-Yuexi prediction area; III P-76-2—Huidong-Huaning prediction area; III P-12-1—Right Trough prediction area; III P-13-1—Mengzi-Pingbian prediction area

4个矿区(表5; 朱良英, 2021)。磷矿的主要类型是沉积型磷矿, 赋存于震旦系陡山沱组下段(韩豫川等, 2012)。湖北省地质科学研究所和湖北省地质大队在预测区内已发现或已知的矿床外围或深部新增加了29处矿床, 总资源量达到34.7亿t, 其中最小预测区有12处大型规模及超大型规模磷矿床(熊先孝等, 2010; 严炜等, 2015; 朱良英, 2021; 杨泰等, 2023)。基于湖北磷矿成矿地质背景及空间富集规律, 结合湖北磷矿的勘查现状及开发强度, 宜昌远景区、兴—神—保远景区、荆襄远景区是湖北磷矿资源最为富集、储量最大的重要远景区域。

5.3 湖南省

湖南省是一个磷矿资源丰富的地区, 总共有

76处矿产地被发现, 其中38个探明了小型规模以上的储量。这些磷矿主要分布在湘西北和湘东北地区, 约90%以上的磷矿资源集中在常德、怀化、湘西、长沙等市州(图6)。湖南的磷矿类型以海相沉积磷块岩矿床为主, 主要成磷时期是震旦纪和寒武纪, 主要含矿层是震旦系陡山沱组和寒武系底部。根据全省磷矿床的分布情况以及成矿地质条件的结果分析, 湖南省的磷矿资源量预测划分为1个预测类型和5个远景区, 圈定了11处最小预测区(贾宝华等, 2019)。重要远景区分别分布在东山峰、大庸—泸溪和永和地区(表5)。

5.4 华北地区

华北地区磷矿资源主要集中在少数的矿集区,

表 5 中国磷矿重要找矿地区远景区一览 (据秦建华和刘才泽, 2016; 贾宝华等, 2019; 杨泰等, 2023)

Table 5 List of important prospecting areas for phosphate in China (modified from Qin Jianhua and Liu Caize, 2016; Jia Baohua et al., 2019; Yang Tai et al., 2023)

地区	远景区名称	最小预测区名称	备注	III级成矿带
西南地区	会东—华宁		重要	滇东—川西南成矿带
	峨边—汉源		重要	
	马边—雷波		重要	
	甘洛—越西			
	会泽—宜良			
	丹寨—麻江			
	金沙—遵义			
	开阳—瓮安		重要	湘黔成矿带
	织金—清镇		重要	
	渝黔—黔北			
蒙自—屏边				
右江海曹				龙门山成矿带
绵竹—什邡		重要		
旺苍—南江				
万源—巫溪				
湖北省	兴—神—保	湖北省保康县堰边上矿区 湖北省保康县白水河矿区 湖北省保康县桥沟矿区 湖北省保康县竹园沟矿区 湖北省兴山县瓦屋磷矿区IV矿段 湖北省神农架林区未洛石家河矿段	重要	大巴山—鄂西成矿带
	宜昌	湖北省宜昌磷矿黑良山矿区 湖北省远安县杨柳矿区 湖北省远安县莲花矿区	重要	
	荆襄	湖北省钟祥市胡集矿区莲花山矿段 湖北省鹤峰县走马矿区王家湾矿段 湖北省鹤峰县白果坪矿区	重要	
	东山峰	湖南省石门县东山峰磷矿杨家坪矿区 石门县东山峰磷矿鼓罗坪矿区 石门县东山峰磷矿大成湾坪矿区 石门县东山峰磷矿清官渡矿区 石门县东山峰磷矿板桥矿区 石门县东山峰磷矿枫箱坡矿区	重要	湘黔成矿带
	大庸—泸溪	泸溪县洗溪磷矿	重要	
	永和	浏阳市永和磷矿马鞍山—樟树冲矿段 浏阳市永和磷矿金狮冲矿段	重要	
黄荆坪	湘潭县黄荆坪磷矿区			
麻田	长沙县麻田区磷矿莲花塘矿段			
华北地区	内蒙古布龙图—百灵庙			阴山成矿带
	河南省嵩县—汝阳—确山一带		重要	华北陆块南缘成矿带
	河南省荆紫关—师岗一带			
	河北省丰宁		重要	张家口—承德成矿带
	河北省大庙		重要	
山西省芮城			五台山成矿带	
天津市马伸桥				—
库鲁克塔格	库鲁克塔格远景区	卡乌留克塔格铁磷矿 奥尔塘铁磷矿 大西沟铁磷矿	重要	库鲁克塔格成矿带

其中冀北、胶东、豫西南、内蒙古白云鄂博、东升庙和正目观等中大型矿集矿区资源是最为显著的。这些矿床主要为原生型和岩浆岩型为主, 变质型和沉积型次之。岩浆岩型磷矿主要产于中元古代、

印支期和燕山期, 广泛分布于山东、河北等地, 规模较大, 矿石易于选取, 且伴生的铁、钒、钛等元素有很好的综合利用潜力(夏学惠等, 2011)。基于对成矿地质背景、成矿特征、已发现的矿床、矿化点以

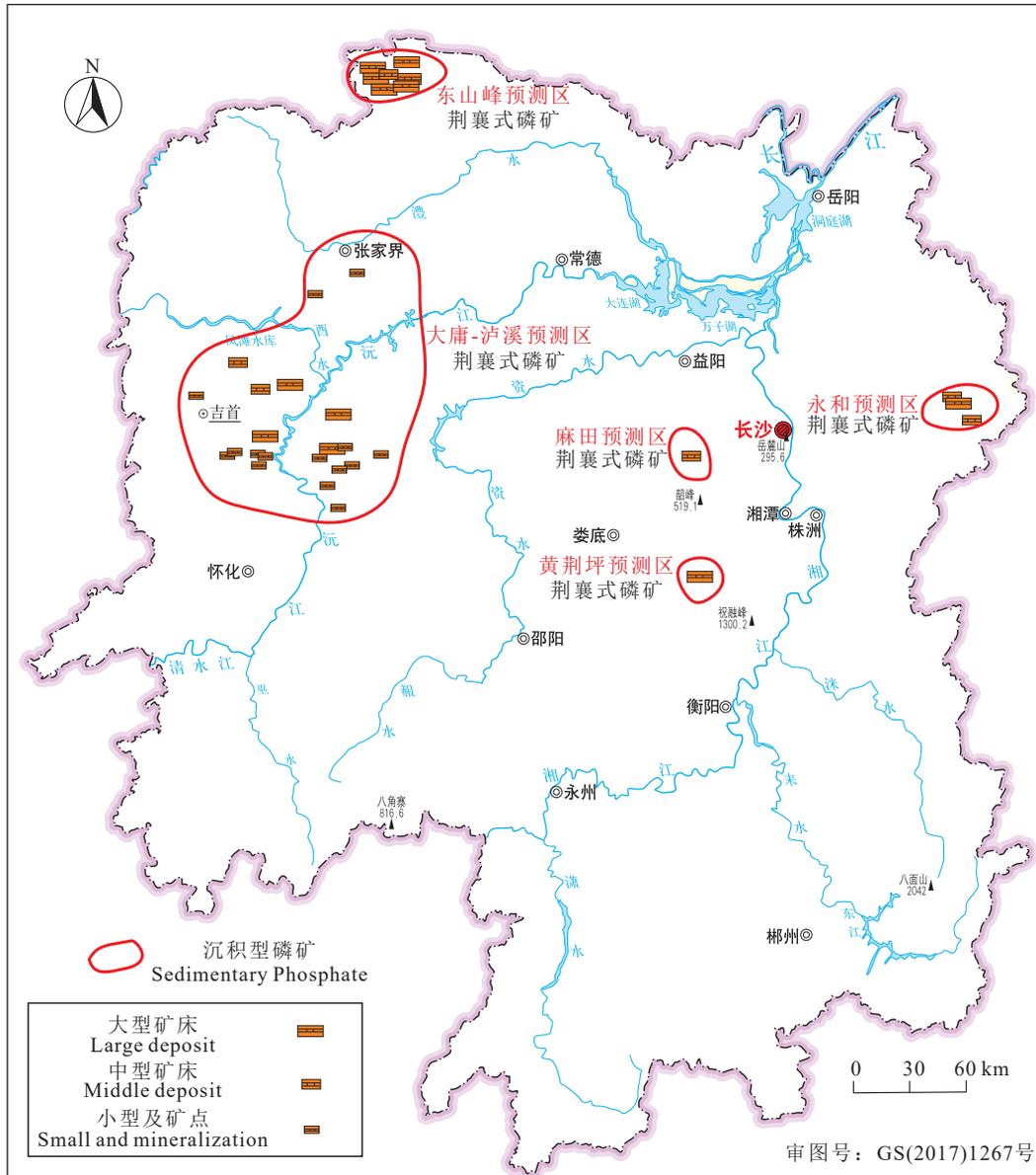


图6 湖南省磷矿找矿远景图(据贾宝华等, 2019 改)

Fig.6 Phosphate prospecting in Hunan Province (modified from Jia Baohua et al., 2019)

及综合利用条件等信息的研究, 华北地区划定 A 类预测区共有 7 个区域, 这些区域被认为具有较大的矿产资源潜力。通过对这些区域进行进一步的研究和勘探, 有望发现更多的矿床和矿化点, 并实现资源综合利用(表 5; 夏学惠等, 2011; 唐文龙等, 2021)。

5.5 库鲁克塔格地区

库鲁克塔格矿集区位于塔里木陆块东北缘的库鲁克塔格陆缘盆地。该区域由前震旦系变质基底、震旦系、古生界盖层和中生界后地台盖层所

组成。塔里木地块的北缘靠近哈萨克斯坦地块及塔里木地块的边缘带, 内生磷矿产于此地区, 地质构造条件十分优越(夏学惠等, 2009, 2011; 东野脉兴等, 2018)。内生磷矿主要形成于深大断裂控制的区域, 该地区的杂岩体主要受瓦吉尔塔格—库尔勒—兴地近东西向深断裂控制, 尉犁—兴地杂岩带则明显受到库尔勒—兴地深大断裂控制。含磷杂岩体主要分布在深大断裂旁侧或次级断裂构造交叉处。综合来看, 该地区具有非常大的磷矿资源潜力。进一步的研究和勘探有望发现更多的含磷杂

表 6 中国磷矿重要找矿远景区 1000 m 埋深以浅潜在资源 (据韩豫川等, 2012)

Table 6 China's phosphate ore important prospecting area 1000m buried deep to shallow potential resources (after Han Yuchuan et al., 2012)

成矿省	磷成矿区带	重要找矿远景区	潜在资源量/亿t
塔里木成矿省	库鲁克塔格成矿带	库鲁克塔格	2.6
华北陆块成矿省	张家口—承德成矿带	张家口—承德	0.5
秦岭—大别山成矿省	南秦岭成矿带	略阳	0.5
	苏鲁成矿带	海州	2.9
	龙门山成矿带	绵阳—什邡	1.9
	大巴山—鄂西成矿带	神农架—宜昌	32.8
扬子成块省	滇东—川南成矿带	川西南—滇东北	138.9
		滇池—抚仙湖	54.4
	湘黔成矿带	东山峰	21.4
		吉首—怀化	10.3
		开阳—瓮安	30.4
		清镇—织金	3.5

岩体, 推动该地区磷矿资源的开发与利用(夏学惠等, 2009; 韩豫川等, 2012)。

中国磷矿预测资源总量约有 500 多亿 t, 未查明磷矿储量为 300 多亿 t, 资源远景较为乐观(张亚明等, 2020; 赵玉凤等, 2021; 吴发富等, 2021)。其中扬子准地台地区、新疆塔里木盆地北缘、中朝准地台北缘以及海州—大悟地区等地区都为远景较好的磷矿找矿地区。在 1000 m 埋深以浅潜在磷矿资源中, 南方地区依旧为最优远景地区(韩豫川等, 2012), 其中位于滇东—川南成矿带的川西南—滇东北远景区潜在资源量最大, 为 138.9 亿 t(表 6)。

6 结 论

(1) 中国磷矿资源丰富, 储量为 37.55 亿 t, 资源相对集中, 主要集中在云南、贵州、四川和湖北 4 省。中国磷矿成因类型分为岩浆岩型、变质型、沉积型、次生型和鸟粪型磷矿床 5 大类, 其中沉积型磷矿为中国主要磷矿类型。

(2) 中国的主要产磷时期为寒武世梅树村期、晚震旦世陡山沱期、古元古代锦屏期, 按照《中国成矿区带划分方案》, 可将中国磷矿划分为 27 个Ⅲ级成矿区带, 4 个成矿亚带, 其中滇东—川西南成矿带、大巴山—鄂西成矿带、湘黔成矿带为中国主要磷矿成矿带。

(3) 根据成矿地质条件以及矿床地质特征等综合信息, 结合中国磷矿成矿时空分布规律, 未来中国磷矿找矿可集中在西南地区、华北地区、湖南省、湖北省以及新疆库鲁克塔格等地区, 可划分

31 个远景区, 其中有 15 个重要远景区。在远景分析中, 川西南—滇东北、神农架—宜昌、东山峰、开阳—瓮安、库鲁克塔格、海州以及张家口—承德等地区为中国重要找矿区, 可重点在这些地区进行磷矿的勘查。

(4) 加大磷矿调查力度及核心勘查技术攻关, 提升开采技术能力, 提高磷矿资源开采“三率”, 实现资源高效利用及绿色发展, 保障粮食安全及磷化学品供应稳定, 推进可持续发展。

References

- Chen Manzhi, Fu Yong, Xia Yong, Xie Zhuojun, Zhou Kelin, Zhang Peng. 2019. A prospective analysis on REE resources of the phosphorite-type REE ore deposits in China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 39(4): 345–358 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuchuan, Wang Denghong, Xu Zhigang. 2015. *Mineralization Regularity of Important Minerals and Regions in China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–795(in Chinese with English abstract).
- Cordell D, Drangert J O, White S. 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought[J]. *Global Environmental Change Part A: Human & Policy Dimensions*, 19(2): 292–305.
- 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).
- Deng Xiaolin, Yao Chaomei, Wang Jiping, Jiang Xinhua, Yang Gengsheng. 2009. Mineralized regularity of phosphorite in the Yangtze area[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 31(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Dongye Maixing, Xiong Xianxiao, Luan Junxia. 2018. The prospecting

- mark and prospecting methods of phosphate ore[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 40(4): 198–203 (in Chinese with English abstract).
- Du Chunli, Huang Man, Hong Shijia. 2019. Research review on development and utilization of phosphate resources in China[J]. *Natural Resource of China*, (4): 32–38 (in Chinese).
- Han Yuchuan, Xia Xuehui, Xiao Rongge, Wei Xiangsong. 2012. *Phosphate Deposits in China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–723(in Chinese).
- Jia Baohua, Huang Jianzhong, Huang Gefei, Meng Debao. 2019. *Potential of Important Mineral Resources and Prospecting Direction of Hunan Province*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1–490 (in Chinese).
- Kong Huixian. 2022. Progress and existing problems of phosphate ore beneficiation[J]. *Inner Mongolia Coal Economy*, 28(10): 144–146 (in Chinese).
- Li Wei, Gao Hui, Luo Yingjie, Gao Jun. 2015. Status, trends and suggestions of phosphorus ore resources at home and abroad[J]. *China Mining Magazine*, 24(6): 6–10 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoyan, Tan Shucheng, Ma Guoyin, Li Yongping, Yang Lin, Zhao Zhifang. 2018. Mine geological environment assessment of Kunyang phosphate mine area in Yunnan Province[J]. *China Mining Magazine*, 27(2): 91–96 (in Chinese with English abstract).
- Liu C, Shin J, Son S, Choe Y, Farokhzad N, Tang Z, Xiao Y, Kong N, Xie T, Kim J S, Tao W. 2021. Pnictogens in medicinal chemistry: Evolution from erstwhile drugs to emerging layered photonic nanomedicine[J]. *Chemical Society Reviews*, 50(4): 2260–2279.
- Liu Kuiwu. 1985. Sedimentary phosphate block rock structure type, genesis and metallogenic stage[J]. *Journal of Sedimentology*, 3(1): 29–41 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Wang Y, Song S, Zhang H. 2021. Tumor diagnosis and therapy mediated by metal phosphorus-based nanomaterials[J]. *Advanced Materials*, 33(49): e21103936.
- Liu Zheng. 2006. Development and utilization status and development strategy of phosphate ore resources in China[J]. *China Non-metallic Mineral Industry*, (1): 21–23 (in Chinese).
- Ministry of Natural Resources, PRC. 2022. China Mineral Resources (2022) [EB/OL]. https://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/kc_19263/zgkczy-bg/202209/t20220921_2759600.html.
- Peir K P, Lee A G. 2017. Sedimentary and igneous phosphate deposits: Formation and exploration: An Invited Paper[J]. *Economic Geology*, 112(3): 483–516.
- Peng Biao. 2020. Types and genesis of phosphorus lumps[J]. *Science and Technology & Innovation*, (15): 110–111 (in Chinese).
- Qin Jianhua, Liu Caize. 2016. *Mineral Resources in Southwest China*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1–313 (in Chinese).
- Song Shengqiong, Li Shibin, Guan Yongsheng, Ran Qiyang, Zeng Fang, Zhu Yiqing, Sun Yali, Zeng Zhaoxia. 2020. Problems and suggestions on the development and utilization of phosphate ores and associated ores in Guizhou province[J]. *China Mining Magazine*, 29(3): 24–28(in Chinese with English abstract).
- Tang Wenlong, Li Junjian, Hou Zhanguo, Song Lijun, Peng Yi, Zhang Tong, Ni Zhenping. 2021. Resources characteristics of phosphate deposits and potential analysis in North China[J]. *North China Geology*, 44(3): 33–40 (in Chinese with English abstract).
- Tian Shengping. 2000. Typical features and distribution of Chinese phosphate deposits[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 22(1): 11–16 (in Chinese with English abstract).
- Tian Shengping, Wang Qinglong, Zhu Hongjun, Zhu Yannong, Zhou Jianmin. 2004. Quantitative exploration and evaluation of weathered phosphate in southwest China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 26(4): 205–209 (in Chinese with English abstract).
- Tian Xia. 2016. Comprehensive evaluation and policy recommendation on mining resource of phosphorus in China[J]. *Natural Resource Economics of China*, 29(8): 29–31 (in Chinese with English abstract).
- U. S. Geological Survey. 2023. Mineral Commodity Summaries 2023 [R]. U. S. Geological Survey, <https://www.usgs.gov/publications/mineral-commodity-summaries-2023>.
- Wang Ying, Xiong Xianxiao, Dongye Maixing, Li Dairong, Qu Yunyan, Liu Qiuying, Huo Yanan. 2022. Prediction model and exploration prospect analysis of phosphate mineral resources in China[J]. *Geology in China*, 49(2): 435–454 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fafu, Wang Jianxiong, Liu Jiangtao, Zeng Guoping, Xiang Peng, Hu Peng, Xiang Wen Shuai. 2021. Distribution, geology and development status of phosphate resources[J]. *Geology in China*, 48(1): 82–101 (in Chinese with English abstract).
- Xia Xuehui, Hao Erhong. 2012. Genetic classification of China phosphorus deposits[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 34(1): 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Xia Xuehui, Yuan Jiazhong, Xi Guoqing, Yan Fei, Han Bin. 2009. The feasibility study and metallogenic prediction of endogenesis phosphorite resources in the northern edge of talimu platform[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 31(3): 129–158 (in Chinese with English abstract).
- Xia Xuehui, Yuan Junhong, Du Jiahai, Dongye Maixing. 2011. Distribution characteristics and resource potential of sedimentary phosphate deposits in China[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 33(2): 6–11 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Chenxing, Gao Luyang. 2022. Utilization of associated phosphate mineral resources[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 37(5): 27–30 (in Chinese).
- Xing Jieqi, Zhang Zeyang, Xian Haiyang, Jiang Yuhang, Liang

- Xiaoliang, Tan Wei, Zhu Jianxi. 2022. Enrichment mechanism, occurrence state and availability of REEs in the Zhijin phosphorite deposit, Guizhou, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 41(3): 505–516 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Xianxiao, Li Boyun, Yao Chaomei, Dongye Maixing, Wu Yinghui, Wu Guangfeng. 2007. The ore types and metallagenic gularities of phosphorite in the north China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 29(3): 159–168 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Xianxiao, Xue Tianxing, Chai Jiahong, Niu Guizhi. 2010. Geologic and resource prospective analysis of phosphorite concentrated district in western Hubei province[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 32(1): 1–10, 18 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhigang, Zhu Mingyu. 2015. Discussion about division schemes of mineral resources and commodity of China[J]. *Mineral Deposits*, 34(6): 1321–1345 (in Chinese with English abstract).
- Xue Ke, Zhang Runyu. 2019. Research progress on phosphate ore resource distribution and mineralization characteristics in China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 39(1): 7–14 (in Chinese with English abstract).
- Yan Wei, Fan Jianqiang, Chen Gecheng, Zhang Jun. 2015. Spatial enrichment law of phosphate ore resources in Hubei Province and its industrial layout[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 30(1): 103–110 (in Chinese with English abstract).
- Yan Yawen, Guo Yafei, Zhao Zeyang, Zhang Zhenghu, Luo Huihua. 2021. 2020 annual review of beneficiating phosphate ores in China[J]. *Chemical Minerals and Processing*, 50(9): 54–59 (in Chinese with English abstract).
- Yang Tai, Pan Yufang, Wang Yahui, Liu Liming. 2023. Characteristics of phosphate-ore in Hubei province and Screeing for provincial physical geological data of phosphorite[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 45(1): 87–91 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hanquan, Zhou Feng, Xu Xin, Xiao Linbo, Jin Yanfeng, Yu Hong. 2020. Development and utilization of phosphate ore in China[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 42(2): 159–164 (in Chinese with English abstract).
- 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): 105–112 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Sujiang, Yi Jinjun, Kong Linghu, Jiang Ailing, Liu Guiyun. 2016. Current status of phosphorite-ore resources in China and screening for national-class physical geological data of phopshorite[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 48(2): 1–5 (in Chinese).
- Zhang Yaming, Li Wenchao, Wang Haijun. 2020. Status quo of development and utilization of phosphate resources in China[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 49(6): 43–46 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yufeng, Li Wenchao, Wang Haijun. 2021. Current situation and thinking of phosphate ore resources development and utilization in China[J]. *Industrial Innovation*, 49(16): 62–63 (in Chinese).
- Zhu Liangying. 2021. The Combination of Scientific Research and the Production Yields Fruitful Results: A Major Breakthrough in Phosphate Prospecting and Exploration in western Hubei Province[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 43(1): 84–91 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈满志, 付勇, 夏勇, 谢卓君, 周克林, 张鹏. 2019. 中国磷块岩型稀土矿资源前景分析[J]. *矿物学报*, 39(4): 345–358.
- 陈毓川, 王登红, 徐志刚. 2015. 中国重要矿产和区域成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 1–795.
- 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.
- 邓小林, 姚超美, 王吉平, 江新华, 杨更生. 2009. 扬子地区磷矿成矿规律[J]. *化工矿产地质*, 31(1): 1–12.
- 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.
- 杜春丽, 黄曼, 洪诗佳. 2019. 中国磷矿资源开发利用研究综述[J]. *中国国土资源经济*, (4): 32–38.
- 韩豫川, 夏学惠, 肖荣阁, 魏祥松. 2012. 中国磷矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1–723.
- 贾宝华, 黄建中, 黄革非, 孟德保. 2019. 湖南省重要矿产资源潜力及找矿方向[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1–490.
- 孔汇贤. 2022. 磷矿选矿进展及存在的问题[J]. *内蒙古煤炭经济*, 28(10): 144–146.
- 李维, 高辉, 罗英杰, 高骏. 2015. 国内外磷矿资源利用现状、趋势分析及对策建议[J]. *中国矿业*, 24(6): 6–10.
- 李小红, 谈树成, 马国胤, 李永平, 杨林, 赵志芳. 2018. 云南省昆明磷矿矿区矿山地质环境评价[J]. *中国矿业*, 27(2): 91–96, 100.
- 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): 29–41.
- 柳正. 2006. 我国磷矿资源的开发利用现状及发展战略[J]. *中国非金属矿工业导刊*, (1): 21–23.
- 彭飏. 2020. 磷块岩的类型及成因[J]. *科技与创新*, (15): 110–111.
- 秦建华, 刘才泽. 2016. 中国西南地区矿产资源[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1–313.
- 宋生琼, 李士彬, 管永胜, 冉启洋, 曾芳, 朱宜清, 孙亚莉, 曾朝霞. 2020. 贵州省磷矿及伴生矿种开发利用面临的问题与对策建议[J]. *中国矿业*, 29(3): 24–28.
- 唐文龙, 李俊建, 侯占国, 宋立军, 彭翼, 张彤, 倪振平. 2021. 华北地区磷矿资源特征及潜力分析[J]. *华北地质*, 44(3): 33–40.

- 田升平. 2000. 中国磷矿基本特征及分布规律[J]. 化工矿产地质, 22(1): 11-16.
- 田升平, 王庆龙, 朱红军, 朱彦农, 周建民. 2004. 西南地区风化磷矿定量勘查评价[J]. 化工矿产地质, 26(4): 205-209.
- 田侠. 2016. 我国磷矿资源综合评价与政策建议[J]. 中国国土资源经济, 29(8): 29-31.
- 王莹, 熊先孝, 东野脉兴, 李代荣, 屈云燕, 刘秋颖, 霍延安. 2022. 中国磷矿资源预测模型及找矿远景分析[J]. 中国地质, 49(2): 435-454.
- 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.
- 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.
- 夏学惠, 袁家忠, 郝国庆, 阎飞, 韩彬. 2009. 塔里木地台北缘内生磷矿预测及资源远景评价[J]. 化工矿产地质, 31(3): 129-158.
- 夏学惠, 袁俊宏, 杜家海, 东野脉兴. 2011. 中国沉积磷矿床分布特征及资源潜力[J]. 武汉工程大学学报, 33(2): 6-11.
- 肖晨星, 高璐阳. 2022. 磷矿伴生资源的利用[J]. 磷肥与复肥, 37(5): 27-30.
- 邢介奇, 张泽阳, 鲜海洋, 姜玉航, 梁晓亮, 谭伟, 朱建喜. 2022. 贵州织金磷矿稀土富集机制、赋存状态及可利用性[J]. 矿物岩石地球化学通报, 41(3): 505-516.
- 熊先孝, 李博昀, 姚超美, 东野脉兴, 吴颖慧, 伍光峰. 2007. 中国北方磷矿矿床类型及成矿规律[J]. 化工矿产地质, 29(3): 159-168.
- 熊先孝, 薛天星, 柴家洪, 牛桂芝. 2010. 鄂西磷矿矿集区地质及其资源远景分析[J]. 化工矿产地质, 32(1): 1-10, 18.
- 徐志刚, 朱明玉. 2015. 关于中国矿产种类划分方案的讨论[J]. 矿床地质, 34(6): 1321-1345.
- 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.
- 严炜, 范建强, 陈葛成, 张均. 2015. 湖北省磷矿资源的空间富集规律及其产业布局[J]. 地质找矿论丛, 30(1): 103-110.
- 闫雅雯, 国亚非, 赵泽阳, 张正虎, 罗惠华. 2021. 2020年中国磷矿选矿年评[J]. 化工矿物与加工, 50(9): 54-59.
- 杨泰, 潘玉芳, 王雅惠, 刘莉茗. 2023. 湖北省磷矿资源特征及省级实物地质资料筛选[J]. 化工矿产地质, 45(1): 87-91.
- 张汉泉, 周峰, 许鑫, 肖林波, 金艳锋, 余洪. 2020. 中国磷矿开发利用现状[J]. 武汉工程大学学报, 42(2): 159-164.
- 自然资源部. 2022. 中国矿产资源报告 2022[EB/OL]. https://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/kc_19263/zgkczybg/202209/t20220921_275960.html.
- 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): 105-112.
- 张苏江, 易锦俊, 孔令湖, 姜爱玲, 刘桂云. 2016. 中国磷矿资源现状及磷矿国家级实物地质资料筛选[J]. 无机盐工业, 48(2): 1-5.
- 张亚明, 李文超, 王海军. 2020. 我国磷矿资源开发利用现状[J]. 化工矿物与加工, 49(6): 43-46.
- 赵玉凤, 李文超, 王海军. 2021. 中国磷矿资源开发利用现状与思考[J]. 产业创新研究, (16): 62-63.
- 朱良英. 2021. 科研与生产相结合结硕果——鄂西磷矿找矿勘查的重大突破[J]. 化工矿产地质, 43(1): 84-91.