

文章编号: 1000-4734(2019)01-0007-08

中国磷矿资源分布及其成矿特征研究进展

薛珂^{1,2}, 张润宇^{1*}

(1.中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 2.中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 磷矿是一种重要的不可再生资源, 已被列入我国战略性矿产目录, 对国民经济和人类生存具有举足轻重的作用。虽然我国磷矿资源储量丰富, 但区域分布和产量极不均衡, 优质磷矿石消耗严重。为此, 本文简要概述了我国磷矿资源的利用现状与区域分布特征, 重点总结了磷矿床的主要类型、地质成因与矿物组成等方面的最新研究进展。研究表明, 我国磷矿资源储量和 P_2O_5 含量高于 30% 的优质富矿集中在云、贵、鄂、川、湘等南方五省。海相沉积型磷矿床是我国磷矿最主要的地质成因, 其中早震旦世—早寒武世磷块岩约占磷矿总储量的 80% 以上。目前磷矿资源耗竭与供给危机凸显, 亟需深化成矿机制的科学研究, 加大资源找矿和勘探力度, 进一步提高对中低品位磷矿资源的开发利用程度, 以保障我国磷矿产业的可持续发展。

关键词: 中国; 磷矿; 资源分布; 成因; 矿物组成

中图分类号: P617; P619.213

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2019.39.002

作者简介: 薛珂, 女, 1995 年出生, 硕士研究生, 研究方向为地球化学. E-mail: xueke17@mails.ucas.ac.cn

Advances of researches on the distribution and metallogenic characteristics of phosphorous deposits in China

XUE Ke^{1,2}, ZHANG Run-yu^{1*}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As an important non-renewable resource, the phosphorous deposit has been listed as a national strategic mineral resource and plays a vital role in the national economy and survival of mankind. Although phosphate mineral resources are abundant in China, but the regional distribution and production are extremely uneven, especially the high-quality phosphate ores are seriously consumed in China. Consequently, the present utilization status and regional distribution characteristics of phosphorous resources in China have been briefly elaborated in this study. As well, the latest progresses of researches on the main ore types, geological genesis and mineral composition of the phosphorous deposits have been summarized. The research shows that China's phosphate resources and almost all of the rich ore deposits with P_2O_5 grade of ores higher than 30% are concentrated in five provinces including Yunnan, Guizhou, Hubei, Sichuan, and Hunan provinces in southern China. Marine sedimentary phosphorous deposit is the most important genetic type of deposits. Especially, the early Sinian and early Cambrian phosphorite ores account for over 80% of the total phosphorous resources/reserves in China. However, the crisis of depletion and the remaining supply of phosphate resources is highlighted at present. It is urgent to deepen the scientific research on the metallogenic mechanism, to intensify resource prospecting and exploration efforts, to further improve methods for the development and utilization of medium- and low-grade phosphate resources, in order to ensure the sustainable development of the phosphate industry in China.

Keywords: China; Phosphorous deposits; Resource distribution; Genesis; Mineral composition

收稿日期: 2018-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 41573133); 国家自然科学基金委员会-贵州喀斯特科学研究中心联合资助项目 (编号: U1612442); 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室 2018 年开放课题 (编号: SKLEG2018909)

* 通讯作者, E-mail: zhangrunyu@vip.gyig.ac.cn

磷在农业、化工、医药、食品等领域有着广泛的应用，而固体磷矿石是目前人类开采利用的唯一磷资源，其最重要的用途是生产磷肥。据国际肥料发展中心（IFDC）最新统计，全球约 82% 的磷矿用于生产各种磷肥，如过磷酸钙、重过磷酸钙、磷酸铵等^[1]。磷矿是一种不可再生的重要矿产资源，其可持续开发与利用直接关系到全球粮食安全及人类社会的可持续发展。尽管当前全球磷矿资源非常丰富，截至 2017 年资源总量约 3.0×10^{14} kg，按目前消耗速度静态计算可满足未来 300 年的需求^[2]。但是，由于全球资源产量分布不均衡、地缘政治和优质磷矿日益减少等诸多原因，磷矿资源危机问题仍然存在，特别是对于东南亚、拉丁美洲和非洲的一些磷矿资源消耗大国而言。例如，以我国目前每年 1000×10^7 kg 左右的磷矿石生产速度，其资源保障年限仅为 37 年^[3]。因此，磷矿现已被我国自然资源部列入 24 种国家战略性矿产目录之一，其重要战略意义不言而喻。鉴于此，本文在总体概述全球及我国磷矿资源储量现状与区域差异性的基础上，重点总结了我国主要磷矿床的类型、成因及其矿物组成等方面的最新研究进展。

1 全球及中国磷矿资源储量现状

尽管全球磷矿资源非常丰富，但分布极不均衡，从国别分布来看，主要集中摩洛哥和西撒哈拉、中国、阿尔及利亚、叙利亚、南非、俄罗斯、约旦、埃及、美国和澳大利亚等 10 个国家，占全球总储量的 94.85%（表 1）。据美国地质调查局最新统计(https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/index.html#mcs)，2016 年全球磷矿石产量约为 26.1 亿 t，其中摩洛哥和西撒哈拉、中国与美国等 3 个国家共占全球总产量的 75%，可见产业集中度非常高。从总的趋势来看，目前全球磷矿资源供应中心正由北美、东亚等地区逐步向北非和中东等地区转移^[3]。

表 1 2016 年全球主要国家磷矿资源储量和产量分布情况^[3]

Table 1. The distribution of reserves and yielded productions of phosphate resources in major countries in 2016

国家	储量/ 10^6 kg	储量占比/%	产量/ 10^6 kg	产量占比/%
摩洛哥和西撒哈拉	5000000	73.53	30000	11.49
中国	3100000	4.56	138000	52.87
阿尔及利亚	2200000	3.24	1500	0.57
叙利亚	1800000	2.65		
南非	1500000	2.21	1700	0.65
俄罗斯	1300000	1.91	11600	4.44
约旦	1200000	1.76	8300	3.18
埃及	1200000	1.76	5500	2.11
美国	1100000	1.62	27800	10.65
澳大利亚	1100000	1.62	2500	0.96
其他国家	3500000	5.15	34100	13.07
全球总量	68000000	100	261000	100

在过去的一个世纪里，全球磷矿石产量总体呈波动上涨的趋势。特别是近 20 年来，随着磷矿开采技术和仪器设备的不断更新，全球磷矿石产量较之前翻了一番（图 1）。改革开放以来，我国大力增加磷肥生产能力，以改善化肥消费结构中氮磷比例失调的状况，农业生产得到了快速的发展。由表 1 可见，我国目前磷矿探明资源储量位居世界第二，仅次于摩洛哥，主要集中在中西部地区，云南、贵州、四川、湖北和湖南等 5 省的磷矿探明储量高达全国的 75% 以上。自 2006 年起，我国磷矿石产量已经跃居世界首位，从 1997 年的 2000×10^7 kg 迅猛攀升到 2016 年 1.38×10^{11} kg，全球占比也从 14.5% 剧增到 52.9%，成为维系世界磷矿石产量持续增长的最主要动力。

2 我国主要磷矿床成因类型、地质特征及其区域分布

按照地质成因, 全球磷矿床可分为原生磷矿床和次生磷矿床 2 大类。其中, 原生磷矿床按成矿作用又包括沉积型磷矿床、岩浆型磷矿床和变质型磷矿床等 3 种主要类型^[3-4]。目前全球工业开采的磷矿石, 大约 85% 是来自于沉积岩型磷矿, 其余为岩浆岩型和极少量的变质岩型磷矿。沉积型磷矿床主要由海相沉积富集而成, 绝大多数位于非洲北部、中国、中东和美国等地。岩浆型矿床分布于巴西、加拿大、芬兰、俄罗斯和南非等国^[5]。变质型磷矿床主要集中于我国华北陆核、辽宁吉林南部—朝鲜北部陆核、山东陆核等地区^[6]。次生型磷矿通常指原始含磷地质体经长期的风化淋滤作用后, 就地残积、异地迁移或再沉积等富集形成的磷矿床^[6-7]。这类矿床规模一般较小, 其探明储量中不足全球的 0.5%。

我国磷矿资源丰富, 但总体分布不均, 贫矿多富矿少, 难选矿多易选矿少, 适宜大规模开采的资源较少, 大多数都是较难开采的薄至中厚矿体, 多呈倾斜至缓倾斜产出。就矿体特征而言, 对于露天开采或地下开采都有一定的难度^[3]。发现的不同类型磷矿床兼有分布, 但主要以沉积型磷矿为主(图 2), 下面着重介绍我国 3 类主要原生磷矿床的地质特征及成因机制。

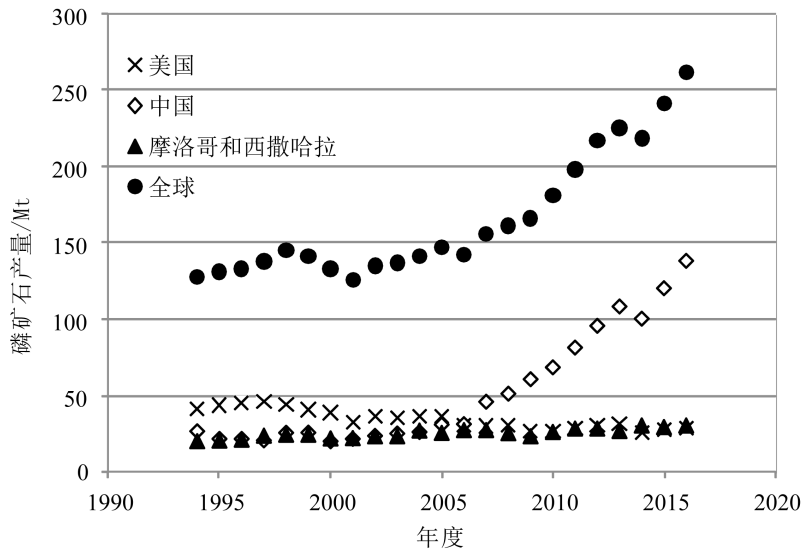


图 1 近 20 年来全球及主要国家磷矿石的产量变化

Fig. 1. Variation trend of phosphate ore productions of the major producing countries in recent 20 years.



图 2 我国主要类型磷矿分布图

Fig. 2. Distribution of the main types of phosphorous deposits in China.

2.1 沉积型磷矿床

我国沉积磷矿床出现在构造活动相对稳定的地台区域,特别是其边缘地带^[8]。根据成矿时代、含磷岩系、岩性组合与成矿作用等可将沉积磷矿床主要划分为3个亚类14式。关于沉积型磷矿床的成因,主要有3种假说:生物成因说^[9-11]、上升洋流说^[12]和交代成因说^[13]。俄国的凯兹尔林格早在1845年提出了生物成因说,认为磷块岩是海水中生物大量繁殖吸收了海水中的磷质,生物死亡后下沉后遗体分解,进而聚集形成矿床。例如,我国陡山沱期湘黔磷矿成矿带中发现的藻类化石和动物胚胎化石,均表明磷矿层的产出与微生物岩密切相关^[13]。上升洋流说主张大量海侵引发的上升洋流作用将深海的物质、富磷质等养分的底层水携带至浅-滨海地区成矿^[14]。刘宝珺等研究早寒武世风暴磷块岩时,发现风暴活动造成的上升洋流能够带来富磷海水,为磷质沉积提供物源^[15]。交代成因说包括化学、生物化学与机械成矿作用等,如早寒武世早期的全球性“成磷事件”促使了昆阳磷矿磷块岩的形成,昆阳磷矿的矿层在下寒武统渔户村组中谊村段中赋存^[16],该矿层为浅海相陆源碎屑、硅质和磷酸盐质磷块岩、灰岩、白云岩的组合,成因有化学成因和机械成因两种^[17]。化学成因说认为上升的洋流将深处的富磷冷水带到大陆浅水地带,使其中的磷酸盐以无机磷的形式沉积下来;而机械成因说认为成岩后期经过机械破坏通过物理沉积而形成。事实上,形成磷矿床的含磷物质可能会有多种来源,包括地面岩石的风化、海水中的磷酸盐、生物遗体的下沉和火山喷发等,导致含磷物质进入海水并最终沉淀(图3)。虽然目前学者们对沉积磷块岩的成因仍存在争议,但这些学说都为研究成磷作用提供了有益的借鉴。

海相沉积型磷矿床是我国最主要的磷矿床类型,其中以早震旦世—早寒武世磷块岩居多。研究表明,海相沉积型磷

矿床进一步按照矿床形成时代、大地构造、沉积环境等地质特征,可再分为震旦纪海相沉积型磷矿、寒武纪海相沉积型磷矿和泥盆纪海相沉积型磷矿等三种类别^[18-19]。我国震旦纪磷矿大多赋存于下震旦统陡山沱阶,震旦纪海相沉积型磷矿有开阳式、荆襄式、石门式和湘西式等。开阳式磷矿以量大质优为特征,主要分布在贵州开阳、瓮安、福泉与丹寨等地,在海平面不断升降的背景下,上升洋流携带大量富磷海水进入洋水矿区浅水环境中沉淀形成磷块岩^[20]。荆襄式磷矿集中在鄂西聚磷区,主要分布于神农架、房县、保康、兴山、秭归等地区;石门式磷矿主要分布于湘西北、东山峰背斜构造两翼;湘西式磷矿主要分布在湖南西部古丈、泸溪、辰溪等地。以湖北荆襄磷矿为例,矿床上部为含竹叶状磷块岩砾屑、卵形白云质砾屑及硅质、磷质核形石和硅质条带或团块泥质白云岩;而下部主要是含锰白云岩、白云质底砾岩,厚度相对稳定,沉积相变化小。寒武纪是我国另一个主要成磷期,其中以海相沉积型梅树村阶磷矿最为典型,以生物内碎屑磷块岩为显著特征。寒武纪海相沉积型磷矿有昆阳式、马边式、天台山式、新华式、辛集式和平台山式等。昆阳式磷矿主要分布在滇东地区,是沉积学、生物学等多种因素的综合作用导致的早寒武世磷酸盐矿床的形成;马边式磷矿主要分布在川西地区;天台山式磷矿主要分布于秦岭东西褶皱带南缘与扬子地块的过渡带上;新华式磷矿集中于贵州织金新华地区;辛集式磷矿主要分布于河南鲁山辛集、江苏铜山磨石塘、安徽凤台等地;平台山式磷矿主要分

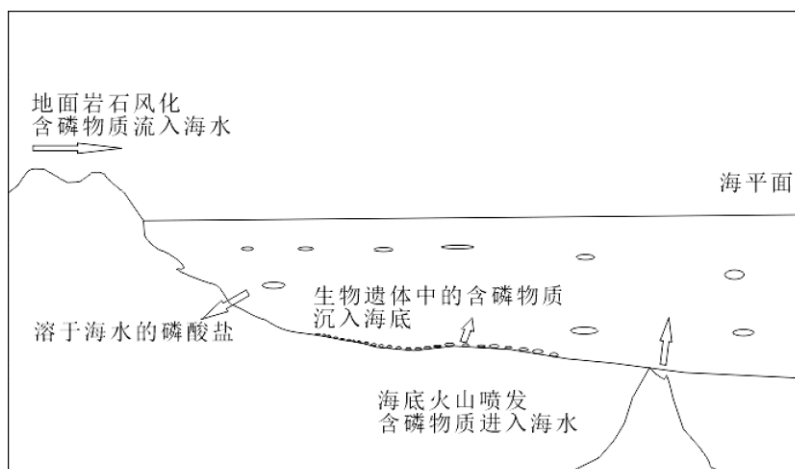


图3 沉积岩型磷矿床成因示意图

Fig. 3. Schematic diagram for metallogenesis of the sedimentary phosphorous deposit.

布在哈密平台山、敦煌方山口、柯坪、库鲁克塔格地区等地。泥盆纪海相沉积型磷矿以什那式含锶磷矿为代表, 规模大, 品位优, 矿石物质成分、矿石类型都别具一格^[21]。

2.2 岩浆型磷矿床

岩浆型磷矿床主要分布在古老地台区或地台与沉降带拗陷交界部位, 岩体受深大断裂控制, 一般产于2组构造的交汇部位^[6]。我国岩浆型磷矿床的分布较少, 对其研究也相对较少。目前, 我国华北地区已开采磷矿多为岩浆型磷矿床。岩浆型磷矿床主要形成于岩浆演化的过程中, 地壳深处的岩浆沿着构造断裂侵入岩体, 在侵入过程中, 经分异和结晶作用, 使分散在岩浆中的含磷物质聚集而形成矿床(图4)。由于成矿作用往往在岩浆中进行, 所以含磷物质基本上都是来源于岩浆内部物质。例如, 青海平安上庄磷矿属于岩浆晚期分异磷灰石矿床, 其矿床形成严格受构造因素和岩相因素的控制^[22]。

深部的岩浆沿断裂运移过程中不断分异、次侵入和结晶再分异, 致使磷、铁和稀土等有益组分富集成矿。岩浆岩型磷矿床通常产于古老地台及其与活动带的过渡区, 产出时代多为元古宙至古生代, 空间分布几乎都与深大断裂带有关^[23]。

岩浆矿床通常分为超基性-碱性岩、超基性-碳酸岩、碱性岩、碳酸岩、超基性岩、基性岩、伟晶岩等7个亚类。超基性-碱性岩是中国华北地块目前发现的规模最大的岩浆岩型磷矿床, 该类型磷矿床规模较大, $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 一般在3%~5%, 并伴生有钒、钛、铜、稀土等元素, 其含矿杂岩体分带现象较明显, 一般呈环带状^[6]。不同期次的岩石化学组分具有一定的规律性, 反映了岩浆演化的过程。磷灰石主要在早期的偏碱性超基性岩中富集, 岩浆中的磷在岩浆岩演化的后期明显减少。超基性-碳酸岩型磷矿床规模较大, 并伴生有铁、铌、钽、稀土等元素, 因此具有较高的经济价值。碱性岩型磷矿床具有很大的工业意义, 其储量大、品位高, 但我国并未发现具有较大工业价值的此类磷矿。迄今为止, 我国只在内蒙白云鄂博、新疆瓦吉尔塔格等地发现了两处小型的碳酸岩磷矿。超基性岩型磷矿床是超基性岩浆结晶分异作用的产物, 含磷品位一般不高, 现已发现有新疆卡乌留克塔格、河北赤城、内蒙固阳等磷矿产地。基性岩型磷矿床集中于塔里木地块和华北地块的北缘地带, 其工业利用价值较大。基性岩型磷矿成矿作用有2种: 一是矿源苏长岩浆直接冷凝成矿; 另一是含矿苏长岩浆熔离贯入成矿。伟晶岩型磷矿床主要位于内蒙、山西、河北三省区交界处, 呈东西向带状展布, 矿体脉状, 有分枝膨缩, 含矿岩性为透辉钾长岩, 矿石呈伟晶块状构造地质特征。

2.3 变质型磷矿床

变质型磷矿主要产出在华北地块东南缘, 因受区域变质作用影响使成矿物质富集而形成的矿床, 以及原有矿床经受强烈的区域变质, 成为具有另一种工艺性质的矿床。我国的变质型磷矿床主要是指产于前、早、中寒武纪变质岩中的磷矿床, 按成因类型可分为绿岩带型、变质混合岩型和沉积变质型等3大类^[6]。绿岩带型磷矿主要分布于华北地台北缘, 绿岩带长条状分布在同构造时期的花岗岩或者灰色片麻岩中^[24], 而磷矿则产于这些绿岩建造内。变质混合型磷矿产于变质岩系中, 由于混合岩化交代作用形成, 矿体一定程度上受层位控制。沉积变质型磷矿产于变质岩系中, 由海相沉积磷块岩经区域变质形成, 主要分布于古老地块边缘。如白庙湾地区“红安群”沉积变质型磷矿, 磷质来源具有多面性, 主要来自火山物质, 其次为古隆起经过风化剥蚀后的碎屑物与少量生物分解质^[25]。这些不同来源

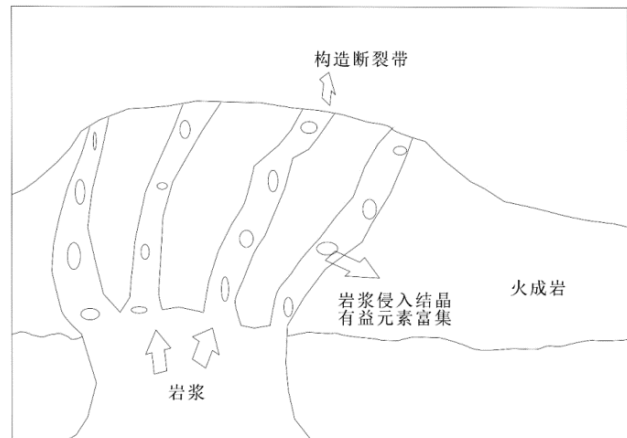


图4 岩浆岩型磷矿床成因示意图

Fig. 4. Schematic diagram for metallogenesis of the magmatic phosphorous deposit.

的磷质溶解于海水中，在物理化学条件的共同作用下，最终形成磷块岩。如图 5 所示，海底火山喷发、风化作用古隆起、海洋中的生物死亡后遗体分解等不同作用过程中的含磷物质进入海水中，进而沉积下来形成沉积变质型磷矿床。

绿岩带型磷矿床包括招兵沟式和勿兰乌苏式。招兵沟式磷矿主要分布华北地块北缘，在河北、山西、山东等省。勿兰乌苏式磷矿主要分布在辽宁建平一带，赋存于太古宇建平群小塔子沟组。麻山式磷矿为典型的变质混合岩型磷矿，位于吉黑褶皱系佳木斯地块内，产于古元古界早期麻山群变质岩系中。沉积变质型磷矿划分为 3 个式：海州式磷矿、布龙土式磷矿、罗屯式磷矿。海州式磷矿主要分布于江苏海州、安徽宿松、湖北大悟等地；布龙土式磷矿位于华北地块北缘西段；罗屯式磷矿集中于辽宁复县罗屯、矿洞山、仰山等地^[6]。限于篇幅，不再一一赘述。

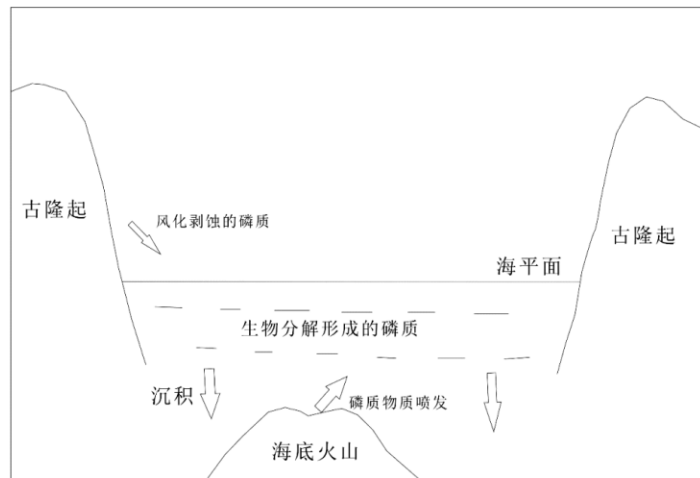


图 5 沉积变质型磷矿床成因示意图

Fig.5. Schematic diagram for metallogenesis of the sedimentary metamorphic phosphorous deposit.

3 磷矿床的矿物特征与化学组成

3.1 磷矿床的矿物组成

磷矿床的矿物结构可分为单矿物结构和多矿物碎屑结构 2 类^[26]，前者矿物组成包括磷灰石单矿物、白云石单矿物、褐铁矿单矿物、石英单矿物等；后者包括白云石-磷灰石多矿物、磷灰石-白云石-石英多矿物等^[26-27]。册亨板其磷矿床属于风化淋滤型磷矿床，矿石结构有胶状结构、砾状结构和砂质砾状结构等多种形态^[7]。

沉积型磷矿床的矿物组成主要为胶磷矿，常含有少量石英、白云石等；岩浆型磷矿床的矿物组成主要为火成磷灰石，常含正长石、辉石等；变质型磷矿床的矿物组成主要为磷灰石，常含角闪石、云母等。此外，天然磷矿中存在很多伴生矿物，主要有硅矿物和碳酸岩 2 类矿物，前者主要是石英、粘土矿等，后者主要是石灰石和白云石。磷主要以磷灰石的形式赋存，并有少量以铁氧化物、独居石、磷钇矿的形式存在^[28]。胶磷矿常与石膏、方解石、三斜磷钙石等伴生。

磷灰石是提取磷的主要矿物，自然界中的磷约 95% 富集在磷灰石中^[29]。其它可以利用的磷矿物还有硫磷铝锶石、鸟粪石和蓝铁石等^[3]。磷灰石又可细分为氟磷灰石、羟基磷灰石、碳磷灰石、氯磷灰石、锰磷灰石等亚种^[30]。多数的磷矿物是氟磷灰石，但纯的氟磷灰石很少见，其组分不同程度地被各种原子所取代。纯氟磷灰石的分子式为 $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$ ，其中，Ca 可被 Mg、Na 所取代，F 可被 Cl 所取代，P 可被 As、V 及 CO_3^{2-} 离子所置换。例如，贵州瓮福磷矿石和织金新华磷矿石主要为碳氟磷灰石^[27,30]。

3.2 化学成分

我国不同类型磷矿床中的化学组成有所差异，开采难易程度与利用价值各不相同。由表 2 可见，我国沉积岩型磷矿床中开阳式、荆襄式、昆阳式、马边式、天台式、新华式、什邡式等含磷矿层中 P_2O_5 含量均相对稳定，且矿石品位相对高，具有重要的工业利用价值。岩浆岩型磷矿床中的伟晶岩型磷矿石品位也较富，矿石为易选型，具有一定的经济开发价值。此外，因为稀土的离子半径与钙离子的很相近，稀土元素常以类质同象的形式赋存于磷矿岩中。在我国不少磷矿石中，常伴有钒、钛、铜等微量元素，普遍富集稀土元素，综合利用前景也较为广阔。

表 2 我国不同类型磷矿床的主要化学组成

Table 2. The main chemical composition of different types of phosphorous deposits in China

矿床类型	亚类	式	w(P ₂ O ₅)/%	w(SiO ₂)/%	w(Fe)/%	伴生有益元素	参考文献	
岩浆岩型 磷矿床	超基性碱性岩型	矾山式	一般为 3~15, 最高达 39	35~40	11	V、Ti、稀土	[6,24]	
	超基性碳酸岩型	且干不拉克式	2~10	37~45		铌、钽、稀土	[6]	
	碱性岩型		2~10	含量较低	富 Fe	稀土	[6]	
	碳酸岩型	白云鄂博式	4~10			Nb、Th、稀土	[6]	
	超基性岩型	卡乌留克塔格式	2~10	35~45	12~27	V、Ti、Co	[6]	
	基性岩型	马营式	2~10	42~54	14~24	V、Ti	[6]	
	伟晶岩型	右所堡式	11~29			稀土	[6]	
变质岩型 磷矿床	绿岩带型	招兵沟式	3~5	33~39		Ti	[6]	
		勿兰乌苏式磷矿	3~7	33~39		Ti	[6]	
	变质混合岩型	麻山式	2~5			C	[6]	
	沉积变质型	海州式	12~16			Mn、Ga	[6]	
		布龙土式	5~7			Fe、稀土	[6]	
		罗屯式	5~10			Fe	[6]	
沉积岩型 磷矿床	震旦纪海相沉积型	开阳式	31~35			I	[6,27,31]	
		荆襄式	8~22			Ti、Cu、Pb、Zn	[6,31-34]	
		石门式	8~22			C	[6]	
		湘西式	15~21			Ca、Mg	[6]	
	寒武纪海相沉积型 磷矿	昆阳式	26~30				Ca、Mg	[6,17,35]
		马边式	23~31				C、F	[36-38]
		天台山式	12~26				U、Mn	[6]
		新华式	16~23				稀土	[6,39]
		辛集式	6~20				Ca	[6]
		平台山式	3~25				V	[6]
		汉源式	11~23				K	[6]
		东溪式	5~23				Ni、Pt、V	[6]
		大茅式	12~19				Mn	[6]
		泥盆纪海相沉积型	什邡式	20~28				稀土

然而, 与国外相比我国的磷矿仍以低品位磷矿居多, P₂O₅ 品位平均为 19.4%, 略低于全球平均水平 19.6%。尽管入选磷矿 P₂O₅ 品位的较低, 但我国的开发利用水平相当高, 选矿回收率接近 90%, 远高于全球的 63%^[22], 这主要归因于国内磷矿采选所选用的不同流程。我国几家大型磷矿山的矿石回采率都达到了国际先进水平, 例如云南磷化集团、贵州瓮福磷矿、湖北黄麦岭磷矿等露天开采的回采率都在 95% 以上^[34]。同时, 这也加剧了我国磷矿资源的耗竭速度。目前, 全球磷矿资源开发正向着中低品质的磷矿资源方向发展。因此, 我国也应积极推进磷矿开采技术设备的转型升级, 提高对中低品位磷矿资源的开发利用程度, 以保障我国磷矿产业的可持续发展。

4 结论

1) 我国磷矿资源储量较为丰富, 但分布相对集中, 区域不均衡问题突出。磷矿资源储量的七成多和几乎全部富矿 (w(P₂O₅) ≥ 30%) 集中分布在云、贵、鄂、川、湘等 5 省。

2) 我国磷矿床类型多样, 种类齐全, 无论原生的岩浆岩型、变质岩型与沉积岩型磷矿床, 或者次生型如风化淋滤残积型和鸟粪堆积型磷矿床, 都有一定的分布。海相沉积型磷块岩是我国最主要的磷矿床类型, 早震旦世—早寒武世磷块岩约占磷矿总储量的 80% 以上。目前, 对于各种磷矿床的地质成因仍有一定争议, 需要进一步地深入研究其矿床地质、地球化学特征与成磷机制, 更好地服务于我国地质找矿工作。

3) 我国磷矿天然禀赋差, 中低品位居多, 且以胶磷矿为主, 开采难度大, 成本高, 采富弃贫现象普遍, 资源消耗严重, 亟待加大对中低品位磷矿资源的开发利用, 实现我国磷矿产业的可持续发展。

参 考 文 献:

- [1] Van Kauwenbergh S J. Global phosphate rock reserves and resources, the future of phosphate fertilizer[R]. Savannah: IFDC, 2014.
- [2] Koppelaar RHEM, Weikard HP. Assessing phosphate rock depletion and phosphorus recycling options[J]. *Global Environmental Change*, 2013, 23(6): 1454-1466.
- [3] 张亮, 杨卉卉, 冯安生, 等. 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*, 2017, (5): 105-112.
- [4] Gerald Steiner, Bernhard Geissler, Ingrid Watson, et al. Efficiency developments in phosphate rock mining over the last three decades[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2015, 105: 235-245.
- [5] 鲍荣华, 姜雅. 2015 年世界磷矿资源现状及开发利用[J]. *磷肥与复肥*, 2017, 32(4): 1-4.
- [6] 夏学惠, 郝尔宏. 中国磷矿床成因分类[J]. *化工矿产地质*, 2012, 34(1): 1-14.
- [7] 程国繁, 何英. 贵州册亨板其风化石型磷矿床特征及成因浅析[J]. *矿物学报*, 2015, 35(S1): 196-197.
- [8] 夏学惠, 袁俊宏, 杜家海, 等. 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*, 2011, 33(2): 6-11.
- [9] 东野脉兴. 海相磷块岩成因理论的沿革与发展趋势[J]. *化工地质*, 1992, 14(3): 3-7.
- [10] SHE Z, STROTHER P, MCMAHON G, et al. Terminal proterozoic cyanobacterial blooms and phosphogenesis documented by the doushantuo granular phosphorites: in situ micro-analysis of textures and composition[J]. *Precambrian Res*, 2013, 235: 20-35.
- [11] 叶琴, 童金南, 安志辉, 等. 湖北宜昌樟村坪埃迪卡拉纪陡山沱组磷酸盐化微体化石组合[J]. *古生物学报*, 2015, 54(1): 43-65.
- [12] 密文天, 林丽, 马叶情, 等. 贵州瓮安陡山沱组含磷岩系沉积序列及磷块岩的形成[J]. *沉积与特提斯地质*, 2010, 30(3): 46-52.
- [13] 杨海英, 肖加飞, 李艳桃, 等. 黔中地区陡山沱期开阳、瓮安磷矿区成矿作用研究现状探讨[J]. *地质找矿论丛*, 2017, 32(4): 551-561.
- [14] 王泽鹏, 张亚冠, 杜远生, 等. 黔中开阳磷矿沉积区震旦纪陡山沱期定量岩相古地理重建[J]. *古地理学报*, 2016, 18(3): 399-410.
- [15] 刘宝珺, 许效松, 罗安屏, 等. 中国扬子地台西缘寒武纪风暴事件与磷矿沉积[J]. *沉积学报*, 1987, 5(3): 28-39+186.
- [16] 罗惠麟, 蒋志文, 何廷贵. 川滇地区震旦系—寒武系界线[J]. *地质科学*, 1982(2): 215-219.
- [17] 周建平. 昆明晋宁王家湾磷矿矿石组份再研究[J]. *云南地质*, 2011, 30(1): 92-94+91.
- [18] 张苏江, 易锦俊, 孔令湖, 等. 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*, 2016, 48(2): 1-5+17.
- [19] 田升平. 中国磷矿基本特征及分布规律[J]. *化工矿产地质*, 2000, 22(1): 11-16.
- [20] 张朝举. 贵州开阳磷矿北西部磷矿床地质特征及沉积序列研究[J]. *化工矿产地质*, 2017, 39(3): 145-150.
- [21] 薛天星, 熊先孝, 田升平. 中国磷矿主要聚集区及其资源潜力探讨[J]. *化工矿产地质*, 2011, 33(1): 9-20.
- [22] 陈文林, 李连松, 周湘志. 青海平安上庄磷矿床地质特征及成因探讨[J]. *四川地质学报*, 2007(4): 269-273.
- [23] 东野脉兴, 郑文忠. 河北省阳原—怀来地区岩浆岩型磷矿成矿预测[J]. *化工地质*, 1991(4): 7-13+43.
- [24] 夏学惠. 华北地台北缘绿帘带型铁磷矿床地球化学特征[A]. 中国矿物岩石地球化学学会第 13 届学术年会论文集[C]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2011: 245-246.
- [25] 杨俊敏. 白庙湾地区“红安群”沉积变质型磷矿找矿研究[J]. *资源环境与工程*, 2015, 29(4): 391-395.
- [26] 黄芳, 刘世荣, 王华, 等. 高镁磷尾矿的矿石结构与矿物组成[J]. *矿物学报*, 2010, 30(1): 130-135.
- [27] 叶德书, 赵爽, 陈海, 等. 贵州省瓮福磷矿沉积环境及矿床成因探讨[J]. *矿产与地质*, 2014, 28(4): 422-430.
- [28] 金绍祥, 杨涛, 杨正良. 高镁磷尾矿中钙、镁、磷赋存状态研究[J]. *中国无机分析化学*, 2012, 2(1): 37-42+50.
- [29] 陈其英, 陈孟莪, 李菊英. 沉积磷灰石形成中的生物有机质因素[J]. *地质科学*, 2000, 35(3): 316-324.
- [30] 刘世荣, 胡瑞忠, 周国富, 等. 织金新华磷矿碎屑磷灰石的矿物成分研究[J]. *矿物学报*, 2008, 28(3): 244-250.
- [31] 解启来, 陈多福, 漆亮, 等. 贵州瓮安陡山沱组磷块岩的稀土元素地球化学特征与沉积古环境[J]. *矿物学报*, 2003, 23(4): 289-295.
- [32] 罗迪柯. 湖北荆襄磷矿地球化学特征及其矿床成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- [33] 魏鹏. 我国磷矿分布特点及主要开采技术[J]. *武汉工程大学学报*, 2011, 33(2): 108-110.
- [34] 韩岭, 罗雪, 龚智愚, 等. 鄂西北地区邓家崖矿区震旦系灯影组磷矿地质特征及矿床成因探讨[J]. *资源环境与工程*, 2013, 27(5): 625-630.
- [35] 高俊彩, 荣惠峰, 徐剑波, 等. 昆明市东川区绿茂乡麻栗坪磷矿地质特征及成因分析[J]. *昆明理工大学学报(理工版)*, 2008(4): 12-17+33.
- [36] 陈文林, 李连松, 周湘志. 青海平安上庄磷矿床地质特征及成因探讨[J]. *四川地质学报*, 2007(4): 269-273.
- [37] 江新华, 邓小林, 金涛, 等. 卡哈洛磷矿矿石特征及其成因分析[J]. *化工矿产地质*, 2009, 31(4): 201-206.
- [38] 王政. 马边磷矿资源及开发利用研究[J]. *化工矿产地质*, 2015, 37(1): 55-60.
- [39] 刘洁, 温汉捷, 刘世荣, 等. 贵州织金磷块岩结构及其沉积环境[J]. *矿物学报*, 2016, 36(2): 253-259.