

doi: 10.12029/gc20220207

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.

Wang Ying, Xiong Xianxiao, Dongye Maixing, Li Dairong, Qu Yunyan, Liu Qiuying, Huo Yan'an. 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).

中国磷矿资源预测模型及找矿远景分析

王莹^{1,2}, 熊先孝¹, 东野脉兴³, 李代荣¹, 屈云燕¹, 刘秋颖¹, 霍延安¹

(1. 中化地质矿山总局化工地质调查总院, 北京 100101; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101)

摘要:【研究目的】磷矿是具有战略意义的矿产资源, 2014 年至今, 中国地质调查局组织编写的中国矿产地质志, 全面描述了中国磷矿全貌及重要成矿规律, 加强了对全国磷矿矿情的掌握。本文依托中国矿产地质志项目, 系统总结了我国磷矿时空分布特征, 圈定了磷矿找矿远景区和磷矿重点勘查区, 对未来磷矿找矿工作有一定的参考价值。【研究方法】本文选取了具有代表性的矿床进行详细解剖工作, 分别总结研究了沉积型、岩浆岩型和变质型磷矿的成矿条件和成矿模式, 建立了典型矿床预测模型。根据预测模型及预测资源量规模(5000×10^4 t 以上)等条件, 把磷矿划分为 3 类成矿预测区。【研究结果】截至目前, 中国共有磷矿产地 1040 处, 查明资源储量 231.07×10^8 t, 分布在全国 30 个省(市、自治区)。根据中国磷矿成矿规律, 将其划分为 27 个Ⅲ级成矿区带、4 个成矿亚带和 21 个矿集区。确定了我国磷矿重要成矿预测区 12 个, 预测潜在资源总量可达 300.1×10^8 t。根据磷矿成矿预测成果, 圈定了 27 个磷矿找矿远景区。根据磷矿找矿远景, 结合成矿地质条件、矿床地质特征、资源量可靠程度, 圈定了 19 个磷矿重点勘查区, 预测资源量达 236.83×10^8 t, 可优先安排勘查工作。【结论】未来中国磷矿的找矿重点建议在云南东北、四川西南、贵州开阳、湖北神农架、河北承德、新疆库鲁克塔格等地区, 找矿远景较大。

关键词: 磷矿; 预测模型; 成矿规律; 找矿远景; 矿产调查工程

创新点: 分别总结研究了沉积型、岩浆岩型和变质型磷矿的成矿条件和成矿模式, 建立了典型矿床预测模型, 圈定了中国磷矿重要成矿预测区, 对未来中国磷矿找矿工作有一定的参考价值。

中图分类号: P619.213 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)02-0435-20

Prediction model and exploration prospect analysis of phosphate mineral resources in China

WANG Ying^{1,2}, XIONG Xianxiao¹, DONGYE Maixing³, LI Dairong¹,
QU Yunyan¹, LIU Qiuying¹, HUO Yan'an¹

(1. General Institute of Chemical Geology Survey of CCGMB, Beijing 100101, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Geology Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Beijing 100101, China)

收稿日期: 2021-09-10; 改回日期: 2022-03-11

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160346)资助。

作者简介: 王莹, 女, 1987 年生, 博士生, 高级工程师, 从事矿产地质、环境地质研究; E-mail: 496776694@qq.com。

通讯作者: 熊先孝, 男, 1961 年生, 教授级高级工程师, 从事矿产资源研究工作; E-mail: xxx@hgdy.com.cn。

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

[Objective] Phosphate deposit is a strategic mineral resource since 2014, the compilation of Annals of Geology of Mineral Resources of China has been organized by China Geological Survey, which is comprehensively described the overall picture of phosphate in China and important metallogenic regularities, and strengthened the grasp of phosphate situation in China. Based on the project of Annals of Geology of Mineral Resources of China, this paper systematically summarizes the spatial and temporal distribution characteristics of phosphate ore at the national level, and delineates the potential areas and key exploration areas of phosphate, which has certain reference value for phosphate ore exploration in China in the future. **[Methods]** The metallogenic conditions and metallogenic models of sedimentary, magmatic and metamorphic phosphate deposits are summarized and studied respectively, and the prediction models of typical deposits are established. According to the prediction model and the forecast resources scale (5000×10^4 t or more), the phosphate deposit is divided into three types of metallogenic prediction areas. **[Results]** Up to now, there are 1,040 phosphate production areas in China (the identified resource reserves are 231.07×10^8 t) and distributed in 30 provinces (municipalities, autonomous regions). According to the ore-forming rules of phosphate in China, phosphate in China can be divided into 27 Grade III metallogenic belts, 4 ore-forming sub-zones and 21 ore-concentrated areas. 12 important metallogenic prediction areas of phosphate deposit in China are determined, with the total predicted potential resources up to 300.1×10^8 t. According to the prediction results of phosphate ore mineralization, 27 potential areas for phosphate exploration have been delineated in China. According to the exploration prospect of phosphate, combined with metallogenic geological conditions, deposit geological characteristics, ore dressing and smelting performance, and reliable degree of resources, 19 key exploration areas of phosphate ore were delineated, with the predicted resources of 236.83×10^8 t, and the exploration work can be arranged in priority. **[Conclusions]** In the future, the exploration of phosphate ore in China should be focused on northeast Yunnan Province, southwest Sichuan Province, Kaiyang of Guizhou Province, Shennongjia of Hubei Province, Chengde of Hebei Province, Kuruktag and other areas in Xinjiang, with a great prospect of exploration.

Key words: phosphate deposit; prediction model; metallogenic regularity; exploration prospect; mineral exploration engineering

Highlights: The metallogenic conditions and metallogenic models of sedimentary type, magmatic type and metamorphic phosphate ore are summarized and studied respectively, the typical deposit prediction model is established, and the important metallogenic prediction area of phosphate deposit in China is determined, which has certain reference value for phosphate exploration in China in the future.

About the first author: WANG Ying, female, born in 1987, doctor candidate, senior engineer, engaged in mineral geology and environmental geology research; E-mail: 496776694@qq.com.

About the corresponding author: XIONG Xianxiao, male, born in 1961, professor, engaged in mineral resources research; E-mail: xxx@hgdyy.com.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20160346).

1 引言

磷矿是具有战略意义的矿产资源,主要用于生产磷肥,也用来制造黄磷、赤磷、磷酸、磷化合物及其他磷酸盐类产品,在农业、化工、医药、食品、轻工、建材、国防等工业部门有着广泛的应用。作为一种不可再生的矿产资源,磷矿的可持续开发与利用直接关系到粮食安全及人类的生存发展(宋天锐, 2007; 张汉泉等, 2020)。

世界磷矿资源较多,分布比较集中。据美国地质调查局统计,2015年全球磷矿石基础储量 687.05×10^8 t, 主要分布在非洲、亚洲、北美洲等地

区,其中92%集中分布在摩洛哥和西撒哈拉、中国、阿尔及利亚、叙利亚、南非、约旦、美国、俄罗斯等8个国家(地区)。摩洛哥和西撒哈拉磷矿石基础储量 500×10^8 t, 位居全球第一, 占全球总量的73%;中国虽然位居第二,但基础储量仅有 33.08×10^8 t, 占全球总量的5%(鲍荣华, 2015; 李维等, 2015; 张亮等, 2017)。目前世界可供经济开采的磷矿资源可使用300年左右。

中国磷矿类型有沉积型、变质型、岩浆岩型、鸟粪型和风化型,其中前3种为主要类型,占总量的99.6%。沉积型磷矿占全国总量的85%,矿床规模大,矿床品位相对较高,是目前开发利用的主要对

象。变质型和岩浆岩型磷矿占14.6%(熊先孝等, 2019),这两类磷矿床一般规模较小,品位低,但矿石易选,岩浆岩型磷矿还共伴生铁矿、蛭石、石墨等矿产,在目前经济条件下,绝大多数在综合开采利用(陈其英等,2000;王海平和吕凤翔,2002;陈毓川等,2006;薛珂和张润宇,2019;陈瑞红和赵锴,2021)。鸟粪型及风化型(都属于表生型)的磷矿只占0.4%。截至2016年,中国磷矿共有581个矿区,查明资源储量 231.07×10^8 t。伴生磷矿共有19个矿区,查明资源储量(P_2O_5) 1637.80×10^8 t。

中国磷矿地质工作开展较早。1949年前中国地质学家就对江苏锦屏磷矿、云南昆阳、海口磷矿、澄江东山磷矿、安徽凤台磷矿和南沙、西沙鸟粪磷矿进行过地质调查(曾允孚和杨卫东,1987;赵玉海,2011;杨道堃等,2013;陈启良等,2017;李小燕等,2018;严清高等,2018;肖喆等,2019)。20世纪50年代先后发现了著名的“三阳开泰”中的贵州开阳、湖北荆襄(襄阳)两大磷矿和“五阳争艳”中的湖南浏阳、四川金河绵阳两大磷矿(黎永才,1980;熊先孝等,2010;戴玉皇和余大龙,2012;肖蛟龙等,2015)。1979—2000年,中国新发现磷矿125处,其中大型以上矿床4处,主要分布在扬子地台西缘川滇成矿带和扬子地台东南缘成矿带鄂西聚磷区。2001—2015年,新发现磷矿产地77处,其中大中型磷矿9处。2000年以来,区域层面的磷矿研究工作开始实施,但对于磷矿成矿规律的研究,大多仅限于单个矿床或单种成矿类型,全国性的规律研究工作仍然缺乏,也未开展过磷矿全国性资源预测工作,资源“家底”不清,重要成矿远景区的找矿工作突破有限,已不能满足进一步勘查工作的需要(田升平,2000;熊先孝等,2007;邓小林等,2009;严炜等,2015;曹烨等,2018;王鼎等,2018)。2007—2013年,以成矿系列理论为基础,成矿规律研究和成矿区带为背景,中国地质调查局实施了全国化工矿产资源潜力评价项目,磷矿研究取得了阶段性的成果(唐尧,2014;孙小虹等,2015;东野脉兴等,2018)。2014年至今,中国地质调查局实施的中国矿产地质志,全面汇总了中国磷矿全貌及重要成矿规律,是在全国矿产资源潜力评价等项目的基础上,对中国磷矿床理论研究与勘查成果的总结和深化,提升了对全国磷矿矿情的掌握(薛天星等,

2011;徐志刚和朱明玉,2015;黄凡等,2020;吴发富等,2021)。本文依托中国矿产地质志项目,系统总结了全国层面磷矿时空分布特征,在《中国成矿区带划分方案》的基础上划分了磷矿的三级成矿区带,并以此圈出21个磷矿矿集区;通过对典型矿床的研究总结建立了典型矿床预测模型,圈定了全国磷矿重要成矿预测区和磷矿找矿远景区,并进一步圈出磷矿重点勘查区,对未来中国磷矿找矿工作有一定的参考价值。

2 成矿规律

2.1 时空分布特征

2.1.1 空间分布特征

截至2016年,查明资源储量(P_2O_5) 231.07×10^8 t,分布在全国30个省(市、自治区),排名前十位的省份依次为湖北省、云南省、贵州省、四川省、湖南省、山东省、陕西省、河北省、青海省、山西省。其中,沉积型磷矿主要分布在云南、贵州、四川、湖北、湖南等省,岩浆岩型磷矿主要分布在河北、新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区、山东、陕西等省区,变质型磷矿床主要分布在江苏、安徽、湖北、河北、辽宁、吉林等省。

截至目前,全国共汇总磷矿矿产地1040处,其中超大型25处,大型101处,中型205处,小型178处,矿点531处(图1)。根据徐志刚等(2010)中国成矿区带划分方案,全国1040个磷矿矿产地主要分布在:①III-77上扬子中东部成矿带(矿产地256处,占比24.62%);②III-73龙门山—大巴山成矿带(矿产地136处,占比13.08%);③III-67桐柏—大别—苏鲁成矿带(矿产地71处,占比6.83%);④III-63华北陆块南缘成矿带(矿产地59处,占比5.67%);⑤III-71武功山—杭州湾成矿带(矿产地50处,占比4.81%)(熊先孝等,2019)。

2.1.2 时间分布特征

中国磷矿从太古宙一直到新生代均有分布,但不同时代的磷矿各具明显特点。例如,岩浆岩型磷矿其形成具有比较集中的时代规律。超基性岩类、基性岩类及伟晶岩类磷矿多形成于前寒武纪,如桓仁吕家堡子超基性岩类磷矿,承德马营、黑山等基性岩类磷矿,怀安右所堡伟晶岩类磷矿等。而超基性—碱性杂岩磷矿、碱性岩类磷矿则形成于寒武纪



图1 全国磷矿产地和成矿类型分布图(据熊先孝等,2019)
Fig.1 Distribution map of phosphate deposits and metallogenic types in China (after Xiong Xianxiao et al.,2019)

之后(主要是印支期),如矾山磷矿、且干布拉克磷矿等。变质型磷矿成矿时代有太古宙早期、古元古代早期及古元古代晚期,其中古元古代晚期海州式磷矿具有较大工业价值。沉积型磷矿主要形成于震旦纪、寒武纪和泥盆纪(表1)。

2.2 成矿区带

中国磷矿成矿区带的划分是以磷矿区域成矿地质背景和成矿规律特点为依据,按照《中国成矿区带划分方案》I、II、III级成矿区带划分方案,提出磷矿的三级成矿区带(陈毓川,1999a,b;陈毓川和王登红,2010;徐志刚等,2010)。根据中国磷矿成矿规律,在综合研究并总结磷矿成矿规律基础之上,将中国磷矿划分了27个III级成矿区带,4个成矿亚带(表2,图2)。

2.3 磷矿矿集区

磷矿矿集区是在中国磷矿成矿区带划分方案的基础之上圈定的,相当于磷矿的IV、V成矿区带。综合成矿规律,构造背景、岩相古地理等因素划分圈定,总体表现了中国重要磷矿矿集区的基本特征,包括了中国的磷矿产地及潜力地区。

在此基础之上,将中国磷矿划分21个矿集区(表3,图3),其中备注重要者为最为重要的矿集区。

3 典型矿床预测模型

矿产预测类型是从预测角度对矿产资源的一种分类,矿产预测类型是开展预测工作的基本单元,凡是由同一地质作用下形成的,成矿要素与预测要素基本一致,可在同一预测底图上完成预测工

表 1 中国磷矿的含磷层位(据熊先孝等,2019)
Table 1 Phosphorus-bearing strata in China(after Xiong Xianxiao et al.,2019)

地层		矿化层位	含磷岩性及产状	矿化程度
新生界	第四系		洞穴残积及鸟粪磷块岩	矿化或小型矿床
	古近系—新近系	昆宁组	砂岩或页岩中的磷结核	磷酸盐矿化
中生界	白垩系	四方台组	砂岩或页岩中磷的薄层或结核	磷酸盐矿化
	侏罗系	鹅湖岭组	火山凝灰岩和页岩中磷酸盐化	磷酸盐矿化
	三叠系		含磷砂岩或页岩	磷酸盐矿化
	二叠系	孤峰组	页岩中的磷结核层	矿化或小型矿床
	石炭系	岩关组	砂岩、页岩或灰岩中磷结核或薄层	小型矿床
	泥盆系	什邡组	层状磷块岩,顶底板均为白云岩	工业矿床
	志留系	连滩群	砂页岩中的磷结核	磷酸盐矿化
古生界	奥陶系	红石崖组	磷酸盐岩层中磷质条带或结核	磷酸盐矿化
		老爷山组	白云岩中夹的含磷砂页岩	磷酸盐矿化
		大茅群(张夏组—徐庄组)	磷块岩薄层夹于钙质石英砂岩、硅质岩或灰岩中	小型矿床
		毛庄组	含磷砂页岩	磷酸盐矿化
	寒武系	昌平组(龙王庙)	含磷砂岩薄层夹于碎屑岩中	磷酸盐矿化
		辛集组(沧浪铺组)	砂质磷块岩层夹于细碎屑岩之中	小型矿床
		筇竹寺组	砂质磷块岩层夹于钙质细砂岩中	工业矿床
		梅树村组	厚层状磷块岩,顶底板均为白云岩层	工业矿床
		灯影组	层状磷块岩夹于白云岩中	工业矿床
	震旦系	陡山沱组	层状磷块岩,共生岩石主要为白云岩、页岩或硅质岩	工业矿床
		景儿峪组	磷块岩结核、透镜体,产于白云质灰岩中	磷酸盐矿化
元古宇	青白口系			
	蓟县系			
	长城系	串岭沟组	砂质白云岩和砂岩中磷结核或透镜体	磷酸盐矿化
		东焦群	碎屑岩及粉砂质千枚岩那个磷质结核或透镜体	磷酸盐矿化
		海州群锦屏组	磷灰石产于片岩、变粒岩或大理岩中	
		红安群黄麦岭组	产于透辉变粒岩层中	
	溱沱系	肥东群双山组		工业矿床
		宿松群柳坪组		
		辽河群大石桥组		
		白云鄂博群尖山组		
		宽甸组		
				磷酸盐矿化

作的矿床、矿点和矿化点归为同一矿产预测类型(陈毓川和王登红,2010)。同一矿种存在多种矿产预测类型,不同矿种组合可能为同一类型,同一成因类型可能有多种类型,不同成因类型组合也可能为同一矿产预测类型(叶天竺等,2007)。

在划分矿产预测类型的基础上,选择具有代表性的矿床进行详细解剖工作,作为典型矿床研究,其目的是为了科学确定该预测类型的成矿要素和预测要素(Zartman and Doe,1981;肖克炎等,2013;朱裕生等,2013;Yanget al.,2015;Yuet al.,2015;Li et al.,2016;Ma et al.,2016;Zhang et al.,2016;Xiao et al.,2017;Zhang et al.,2017;Lyu and Gong, 2019;Agterberg,2021)。下文对沉积型、变质型和岩浆岩型磷矿分别进行详细解剖。

3.1 沉积型磷矿(以湖北省荆襄磷矿为例)

(1)成矿条件

荆襄磷矿为海相沉积型磷矿,矿体受震旦纪陡山沱组地层控制。

- ①成矿时代:新元古代早震旦世陡山沱期。
- ②大地构造位置:扬子陆块区(Ⅱ),上扬子古陆块(Ⅱ2),上扬子被动陆缘褶皱带(Ⅱ2-2),乐乡关断隆(K2)(Ⅱ2-2-7)。
- ③古地理:古扬子陆表海鄂中台地边缘及潮坪通道。
- ④沉积相:台地潮坪相,潮下—潮间坪亚相。
- ⑤沉积建造:含磷含硅质碳酸盐岩建造、含磷含炭硅质页岩建造。
- ⑥成矿环境:氧化环境为主。
- ⑦成矿作用:胶体化学作用为主,其次为生物化学作用。
- ⑧成矿物质来源:上升洋流补给富磷海水为主,次为陆源碎屑物及火山喷发物质。

表2 中国磷矿成矿区带划分(据熊先孝等,2019)

Table 2 Classification of phosphate metallogenic zones in China (after Xiong Xianxiao et al.,2019)

成矿域		成矿省		成矿带		成矿亚带		典型矿床	全国Ⅲ级
编号	名称	编号	名称	编号	名称	编号	名称		成矿区带编号
I-4	滨太平洋成矿域	II-14	吉黑成矿省	IIIP-1	佳木斯—兴凯成矿带			柳毛	III-53
I-1	古亚洲成矿域	II-3	伊犁成矿省	IIIP-2	伊犁成矿带			科古尔琴	III-9-②
		II-4	塔里木成矿省	IIIP-3	柯坪成矿区			苏盖特布拉克	III-13-①
				IIIP-4	库鲁克塔格成矿区			且干布拉克、木努库杜克	III-13-②
				IIIP-5	北山成矿带			方山口、平台山	III-14-①
I-4	滨太平洋成矿域	II-5	华北陆块成矿省	IIIP-6	龙首山成矿带			马房子沟、哈马胡头沟	III-18
				IIIP-7	贺兰山—六盘山成矿带			苏峪口、景福山	III-59
				IIIP-8	阴山成矿带			布龙土	III-58-①
				IIIP-9	张家口—承德成矿带			矾山、右所堡、罗锅子沟	III-57-① III-57-②
				IIIP-10	冀东—辽西成矿带			葛家、勿兰乌苏、簸箕山	III-57-③ III-57-④
				IIIP-11	辽东成矿带			甜水、罗屯、水洞、大顶子	III-56
				IIIP-12	五台山成矿带			平型关、朴子沟、白家山	III-61-①
				IIIP-13	华北陆块南缘成矿带			靖家山、石梯	III-63
I-4	滨太平洋成矿域	II-8	秦岭—大别成矿省	IIIP-14	南秦岭成矿带			天台山、阳平关、金家河、赵家峡	III-66-②
				IIIP-15	桐柏—大别成矿带			黄麦岭、宿松	III-67-①
				IIIP-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	II-15	扬子成矿省	IIIP-17	龙门山成矿带			马槽滩、岳家山、王家坪	III-73-①
				IIIP-18	大巴山—鄂西成矿带	IIIP-18-①	大巴山成矿亚带	朱家坝、杨家坝	III-73-①
						IIIP-18-②	鄂西成矿亚带	保康、荆襄、宜昌、兴一神	III-73-①
				IIIP-19	滇东—川西南成矿带			昆阳、晋宁、马边	III-77-② III-76-①
				IIIP-20	湘黔成矿带	IIIP-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
						IIIP-20-②	湘西成矿亚带	洗溪、张家滩、浦市	III-77-① III-78
				IIIP-21	桂北—湘中成矿带			浦市	III-78
				IIIP-22	湘东成矿带			永和、麻田、黄荆坪	III-70
				IIIP-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	IIIP-24	桂西成矿带			把荷	III-88
				IIIP-25	南岭西段成矿带			上草	III-83-③
				IIIP-26	云开成矿带			湖村、小竹	III-85-①
				IIIP-27	海南成矿带			大茅	III-90

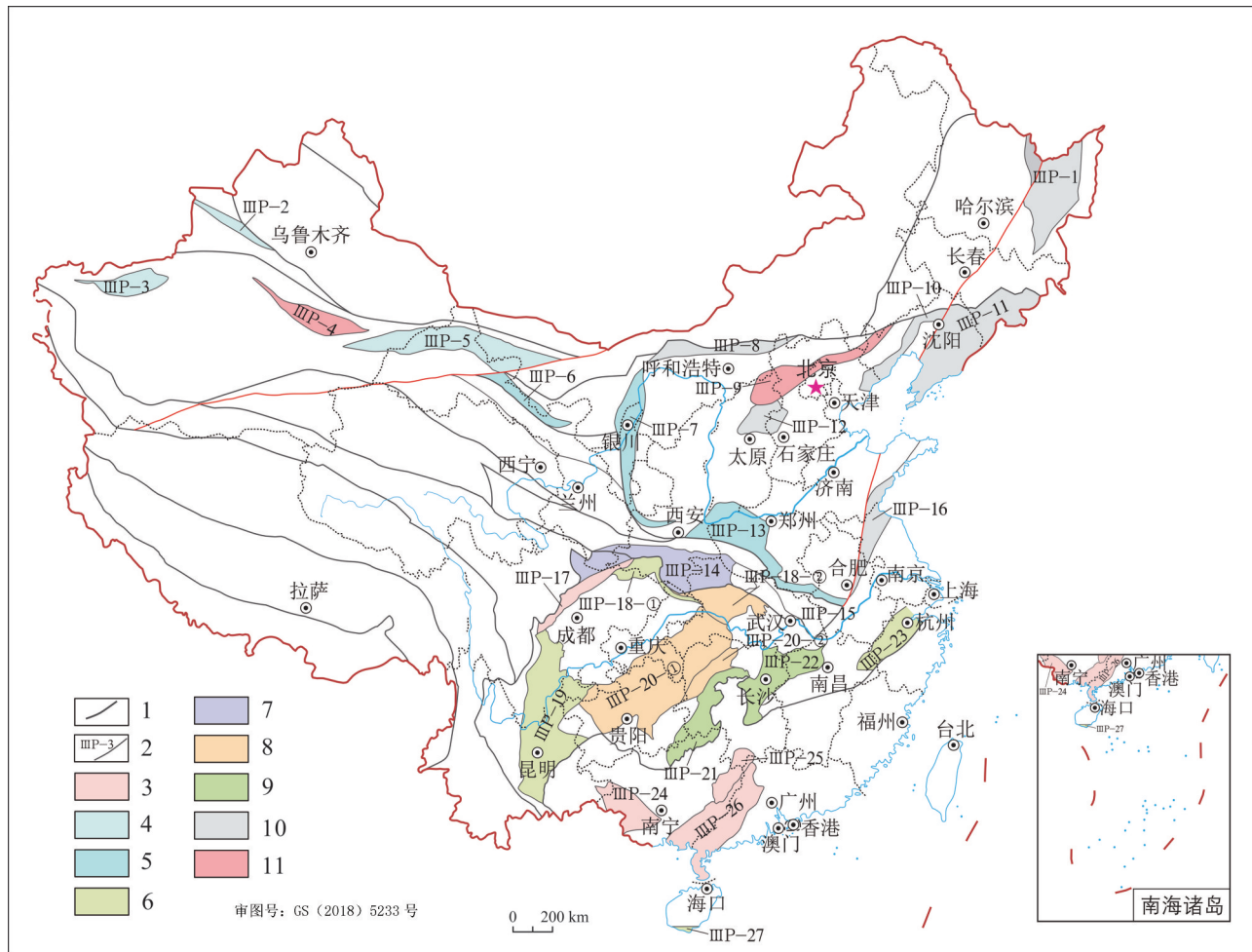


图2 中国磷矿Ⅲ级成矿区带划分图(据熊先孝等,2019)

1—二级成矿区带界线;2—Ⅲ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(平台山式);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.2 Division of Grade III metallogenic belts of phosphate deposit in China (after Xiong Xianxiao et al., 2019)

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 (platform mountain 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 (Tiantai Mountain type); 8—(Upper Yangtze) Cambrian phosphate deposit (Jingxiang, Kaiyang, Xinhua); 9—(Lower Yangtze) Sinian phosphate deposit (Dongxi type, Chaoyang type); 10—Sedimentary metamorphic phosphate deposit (Haizhou type, Belanwusu type); 11— Magmatic phosphate deposit (right Suopu type, Dry Bulak type, Fanshan type)

(2) 成矿模式

①震旦统陡山沱组磷块岩矿层,与含磷岩系沉积旋回相对应,呈明显的旋回性,即各磷块岩矿层皆位于各次级沉积旋回之始末。

旋回之始,主要为较动荡条件下盆内磷质碎屑沉积的颗粒结构磷块岩,仅其底部为漆膜状,薄层状凝胶结构磷块岩。其磷质颗粒多为原地胶体聚沉磷块岩的同生或准同生碎屑,因此多具塑性变

形;磷质颗粒间的填间物,视环境不同有泥质、白云质(部分被硅质交代),或无填间物的颗粒支撑,但以砂泥质居多。显示了旋回初期沉积环境的动荡不稳定。旋回之末,主要为较宁静环境中胶体聚沉的凝胶结构磷块岩与含磷质碎屑的泥晶白云岩(或白云质填间的颗粒结构磷块岩)韵律互层。反映了沉积旋回末期沉积环境稍稳定、平静。沉积旋回初期沉积的磷块岩不够稳定,沉积旋回末期沉积的磷

表 3 中国磷矿矿集区(据熊先孝等,2019)

Table 3 Phosphate ore concentration areas in China (after Xiong Xianxiao et al.,2019)

成矿省		磷成矿区带		磷矿集区		备注
编号	名称	编号	名称	编号	名称	
II-4	塔里木成矿省	IIIP-4	库鲁克塔格成矿区	IIIP-4-1	1.库鲁克塔格矿集区	重要
		IIIP-5	北山成矿带	IIIP-5-1	2.北山矿集区	
II-5	华北陆块成矿省	IIIP-6	龙首山成矿带	IIIP-6-1	3.龙首山矿集区	重要
		IIIP-7	贺兰山—六盘山成矿带	IIIP-7-1	4.贺兰山矿集区	
		IIIP-9	张家口—承德成矿带	IIIP-9-1	5.张家口—承德矿集区	
II-8	秦岭—大别成矿省	IIIP-14	南秦岭成矿带	IIIP-14-1	6.略阳矿集区	重要
		IIIP-15	桐柏—大别成矿带	IIIP-15-1	7.大悟矿集区	重要
				IIIP-15-2	8.宿松矿集区	重要
II-15	扬子成矿省	IIIP-16	苏鲁成矿带	IIIP-16-1	9.连云港—沭阳矿集区	重要
		IIIP-17	龙门山成矿带	IIIP-17-1	10.绵竹—什邡矿集区	重要
		IIIP-18	大巴山—鄂西成矿带	IIIP-18-1	11.神农架—宜昌矿集区	重要
				IIIP-18-2	12.荆门—襄樊矿集区	重要
		IIIP-19	滇东—川西南成矿带	IIIP-19-1	13.川西南—滇东矿集区	重要
				IIIP-19-2	14.昆明—玉溪矿集区	重要
		IIIP-20	湘黔成矿带	IIIP-20-1	15.东山峰矿集区	重要
				IIIP-20-2	16.金沙—务川矿集区	
				IIIP-20-3	17.黔东南—湘西矿集区	
				IIIP-20-4	18.辰溪—沅陵矿集区	
				IIIP-20-5	19.开阳—翁安矿集区	重要
				IIIP-20-6	20.清镇—织金矿集区	重要
		IIIP-23	浙西—赣东北成矿带	IIIP-23-1	21.浙西矿集区	

块岩比较稳定。这在整个陡山沱期都是如此,第一段的磷矿层只在部分地区具工业意义,第二段的磷块岩分布普遍。

②震旦纪陡山沱期磷块岩,纵、横方向皆处于碎屑岩至碳酸盐岩之间。

③震旦纪陡山沱期磷块岩,多沉积于扬子浅海内浅海台地和浅海盆地边缘,极个别的沉积于浅海边缘之海口、海峡处。

④震旦纪陡山沱期磷块岩的品位及杂质含量,取决于沉积环境及沉积期后的演化。

浅海台地相因较浅海盆地相成磷条件优越,海冰深度适中,温度压力适宜,生物繁盛,又有簸选作用等,所以其磷块岩的品位也较高,磷块岩中所含杂质以钙、镁为主;而浅海盆地相磷块岩品位较低,所含杂质以悬浮碎屑沉积的泥质组分为主。

磷块岩的形成与古构造、岩相古地理关系甚为密切,它明显受一定的沉积相带制约。具体反映了陡山沱期地史发展中所形成的滨岸相、浅海台地相、晚期浅海台地相和浅海盆地相四种沉积环境,

浅海台地台坪—磷块岩、泥页岩、白云岩亚相为陡山沱期磷块岩聚沉、富集的一个主要沉积相带。其成矿模式如图4。

(3)预测要素及模型

矿床为沉积型磷矿,矿体受含矿地层控制,预测要素主要有构造背景、古地理、沉积相、沉积建造和含矿岩系组合等,矿体在特定的岩相古地理环境下富集成矿,以荆襄磷矿为例建立典型矿床预测模型(表4)。

3.2 岩浆岩型磷矿(以河北省矾山磷矿为例)

(1)成矿条件

河北省矾山磷矿为偏碱性超基性岩浆岩型磷矿床,其形成条件:

①成矿时代:晚古生代华力西期。

②构造背景:华北陆块,迁西—阜平岩浆弧。

③控岩构造:含矿岩体位于上黄旗—乌龙沟深断裂西侧,EW向矾山—南口—密云—喜峰口深断裂与矾山背斜轴部之交汇部。

④控矿岩体:偏碱性超基性—碱性杂岩。



图3 中国磷矿矿集区及矿床类型分布图(据熊先孝等,2019)

1—沉积型;2—岩浆岩型;3—变质型;4—矿集区编号;5—矿床类型及矿床式

Fig.3 Distribution of phosphate ore concentration areas and deposit types in China (after Xiong Xianxiao et al.,2019)

1—Sedimentary type;2—Magmatic type;3—Metamorphic type;4—Ore concentration area Number;5—Deposit types

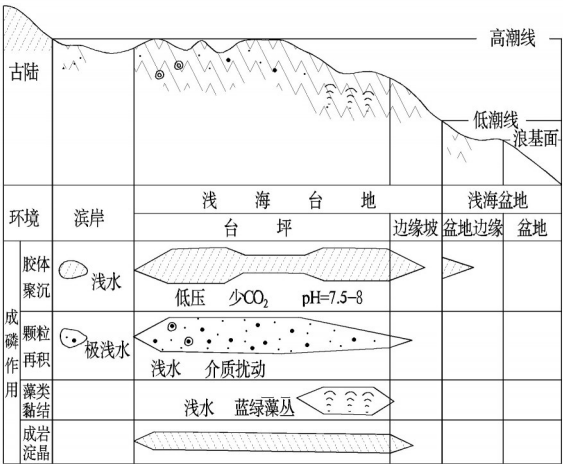


图4 湖北省荆襄磷矿床成矿模式图(据熊先孝等,2019)

Fig.4 Metallogenetic model of Jingxiang phosphate deposit in Hubei Province (after Xiong Xianxiao et al.,2019)

⑤岩石组合:辉石岩、黑云母辉石岩、正长辉石岩、含石榴辉石正长岩、正长岩。

⑥岩体相带:岩体由外向内为榴辉正长岩带、辉石岩及黑云母辉石岩带、磷灰石岩及磁铁磷灰石岩带、辉石正长岩带。

⑦控矿岩相:辉石岩、黑云母辉石岩、正长辉石岩。

(2)成矿模式

磷矿赋存于早期偏碱性超镁铁质岩—次透辉石型辉石岩中,它与第二期侵入的碱性岩—辉石正长岩,共同组成幔源中心式侵入的盆状杂岩体。磷矿体呈似层状产于中部辉石岩带的中上部,系该期辉石岩浆演化中、晚期至残浆阶段,在动力分异过程中形成。残浆组分黏度小,易于流动,形成薄而稳定的似层状富矿体(层)。第三期侵入的正长岩岩墙呈截

表 4 湖北省荆襄磷矿预测模型(据熊先孝等,2019)

评价要素		描述内容	要素分类
特征描述		荆襄沉积型磷矿床	
成矿地质环境及成矿作用	成矿时代	新元古代早震旦世陡山沱期	重要
	构造背景	扬子陆块区(Ⅱ),上扬子古陆块(Ⅱ ₂),上扬子被动陆缘褶皱带(Ⅱ ₂₋₂),乐乡关断隆(K ₂)(Ⅱ ₂₋₂₋₇)	必要
	古地理	古扬子陆表海鄂中台地边缘及潮坪通道	必要
	沉积相	台地潮坪相,潮下一潮间坪亚相	必要
	沉积建造	含磷含硅质碳酸盐岩建造、含磷含炭质硅质页岩建造	必要
	成矿作用	胶体化学作用为主,其次为生物化学作用	必要
	成矿物质来源	上升洋流补给富磷海水为主,次为陆源碎屑物及火山喷发供磷作用	重要
矿床地质特征	含矿岩系组合	赋矿层位为震旦系陡山沱组第一、二岩性段,从上至下为含磷结核状白云质泥灰岩—含磷白云质泥灰岩—磷块岩(PH ₃ 、主矿层)—含磷白云质泥灰岩—磷块岩(PH ₂)—含磷白云岩—磷块岩(PH ₁ 、主矿层)—页岩	必要
	矿体形态规模	层状、似层状,主矿层2层,长1600~3100 m,宽140~656.00 m,厚3.18~11.87 m,倾角24°~32°,埋深0~450 m	次要
	矿物组合	胶磷矿及少量细晶磷灰石;脉石矿物有白云石、石英、黏土矿物等	次要
	结构构造	胶状结构、颗粒结构、生物结构;水平层理、波状层理、斜层理构造、滑塌构造、波痕构造、鸟眼构造	次要
	矿石类型	砂屑状磷块岩、白云质条带磷块岩、条纹状磷块岩、泥质条带磷块岩	次要
	风化	矿石风化带延伸距地表约10~20 m,风化后地表P ₂ O ₅ 含量较深部高2%~3%,MgO含量降低1%~2%,Al ₂ O ₃ 和SiO ₂ 增高	次要
物化探异常特征	重力	区域上位于相对基底的缓倾区,重力异常仅反映了基底与盖层分界。与含磷地层关系不密切	次要
	磁法	矿区处于区域航磁背景区,区域磁异常总体走向近南北向。与含磷地层无对应关系	次要
	化探	水系沉积物测量,磷异常与含矿地层不吻合。异常可能反映了区域内存在含磷地层	次要

切状破坏了中部岩盆构造及含矿辉石岩带的延续分布,造成矿体仅存在于半个岩盆内。其成矿模式如图 5。

(3) 预测要素及模型

根据成矿时代、成矿构造背景、控矿岩体、含磷岩石组合、矿物组合、矿石结构构造和物、化、遥感等特征总结出该典型矿床预测模型(表 5)。

3.3 变质型磷矿(以辽宁省建平县勿兰乌苏磷矿为例)

(1) 成矿条件

辽宁省建平县勿兰乌苏磷矿为绿岩带型变质磷矿床,其形成条件:

①成矿时代:新太古代。

②构造背景:内蒙古自治区古陆的南缘,接近燕山准地槽。

③含矿地层:新太古界变质表壳岩和变质深成

岩组合。

④变质建造:黑云斜长变粒岩、斜长角闪岩、磁铁石英岩、黑云斜长片麻岩、黑云钾长片麻岩、花岗质片麻岩。

⑤成矿作用:变质作用、超变质作用。

(2) 成矿模式(图 6)

勿兰乌苏磷矿成矿作用主要包括两个阶段:第一阶段为新太古代火山喷发沉积阶段,第二阶段为区域变质阶段,后期转化为混合作用超变质作用阶段。具体成矿过程为:

①火山喷发沉积阶段,从 2800 Ma 起,在由中太古代形成的古陆核组成的卵形穹隆区边缘,形成了类似现代大陆边缘活动带或弧后盆地的裂谷环境,大量的火山喷发和沉积作用,在狭长的槽形盆地内,聚集了大量的火山—沉积物质,即绿岩建造。伴随强烈的海底火山活动,从地球深部带来的成矿物

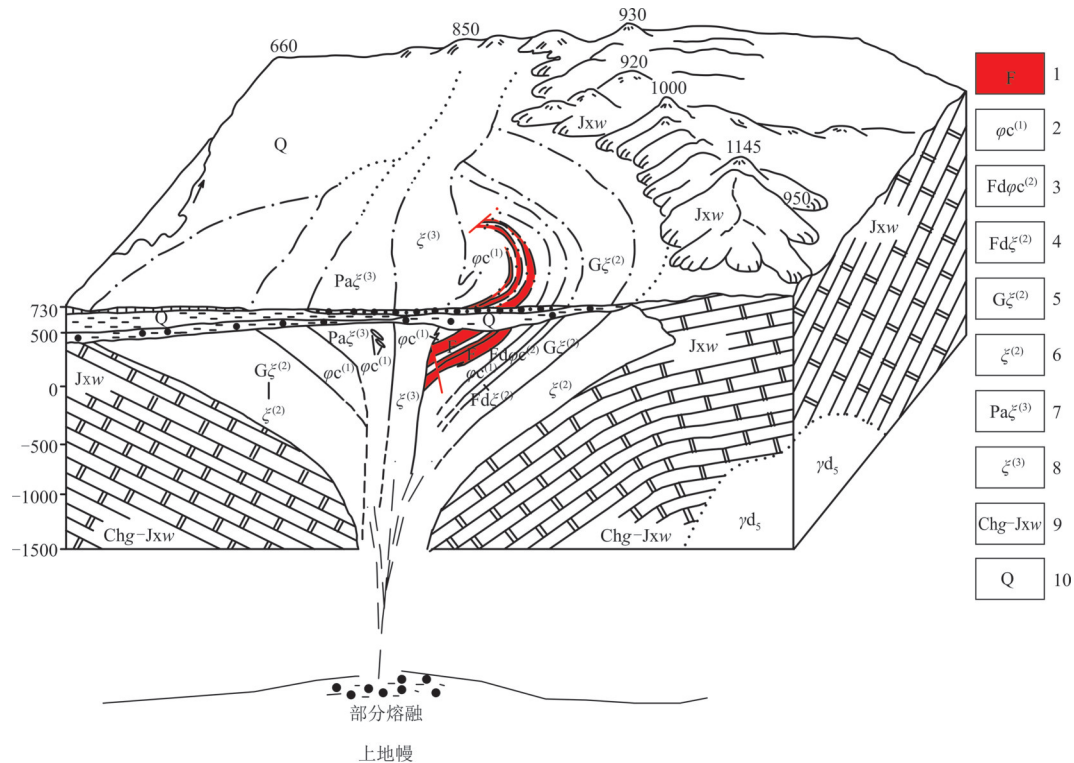


图5 河北省矾山磷矿床成矿模式图

(据河北省地矿局石家庄综合地质大队, 2011)

1—含铁(磷)矿层;2—第一期侵入岩辉石岩、黑云母辉石岩;3—第二期侵入岩正长辉石岩;4—第二期侵入岩辉石正长岩;5—第二期侵入岩辉石正长岩;6—第二期侵入岩正长岩;7—第三期侵入岩辉石正长岩;8—第三期侵入岩似粗面状正长岩—正长岩;9—第三期侵入岩长城系高峪庄组至蓟县系雾迷山组白云岩;10—第四系

Fig.5 Metallogenic model diagram of Fanshan phosphate deposit in Hebei Province

(after Shijiazhuang Comprehensive Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, 2011)

1— Iron (phosphorus) bearing layer;2— The first intrusive pyroxenite and biotite pyroxenite;3— The second intrusive syenophanite;4— The second intrusive pyroxene syenite;5— The second intrusive eclogite syenite;6— The second intrusive syenite;7— The third intrusive pyroxene syenite; 8— The third intrusive rocks resemble coarse-plane syenite and syenite;9— The third intrusive rocks from Changcheng System gaoyuzhuang Formation to Jixian System Wumishan Formation dolomite;10—Quaternary system

质,如:Fe、P等,与绿岩建造一同沉积形成最初的成矿矿源层。Fe、P的运移是以氢化物的形式随岩浆一同运移,且源自地核,形成以磁铁磷灰石为主要形式的矿石类型。与此同时,花岗质岩浆同构造侵入,形成绿岩带变质变形前的深成岩体。

②变质阶段,在2500 Ma左右,发生了第二次较为强烈的构造—岩浆热事件,太古宙地体基本克拉通化。在此期间,花岗—绿岩建造经历了广泛而强烈的区域变质作用,形成了现小塔子沟组表壳岩岩性组合,即黑云斜长变粒岩—斜长角闪岩—磁铁石英岩组合与深成片麻状花岗岩。伴随作为热源体的花岗岩浆的侵入,区域变质作用发展到以混合作用为主的超变质作用,形成混合岩化黑云斜长片麻

岩—混合岩化黑云钾长片麻岩—混合岩化花岗质片麻岩的岩性组合。成矿物质Fe、P得到进一步富集而成矿。其成矿模式如图6。

(3) 预测要素及模型

根据成矿时代、成矿环境、变质建造、含磷岩系组合、矿石类型及矿物组合、矿石结构构造和物、化探等特征总结出该典型矿床评价模型(表6)。

4 找矿远景

4.1 磷矿资源量预测方法

本次预测采用叶天竺等(2007)提出的矿床模型综合地质信息预测方法(叶天竺等,2007),根据全国化工矿产资源潜力评价项目成果,全国各省区

表5 河北省矾山磷矿预测模型(据熊先孝等,2019)

Table 5 Prediction model of Fanshan phosphate deposit in Hebei Province(after Xiong Xianxiao et al.,2019)

评价要素		特征描述内容	要素分类
		偏碱性超基性岩浆岩型磷矿	
成矿地质环境	成矿时代	晚古生代华力西期	必要
	构造背景	华北陆块,迁西—阜平岩浆弧	重要
	控岩构造	含矿岩体位于上黄旗—乌龙沟深断裂西侧,EW向矾山—南口—兴隆—喜峰口深断裂与矾山背斜轴部之交汇部	必要
	控矿岩体	偏碱性超基性-碱性杂岩	必要
	岩石组合	辉石岩、黑云母辉石岩、正长辉石岩、含石榴辉石正长岩、正长岩	必要
	岩体相带	岩体由外向内为榴辉正长岩带、辉石岩及黑云母辉石岩带、磷灰石岩及磁铁磷灰石岩带、辉石正长岩带	必要
	岩体围岩	长城—蓟县系巨厚层白云岩,形成平缓的褶曲,赋矿岩体侵入于次级小向斜中	重要
矿床地质特征	矿物组合	磷灰石、磁铁矿、钼钛磁铁矿、透辉石、黑云母、正长石、钛石榴石	重要
	矿石结构	自形一半自形粒状结构、镶嵌粒状结构和包含结构	次要
	矿石构造	块状、片状、间杂状、云斑状构造	次要
	矿体特征	矿体呈半圆弧形,似层状多层产出	次要
	控矿岩相	辉石岩、黑云母辉石岩、正长辉石岩	重要
	蚀变特征	黝帘石化、绢云母化、高岭石化、碳酸盐化	次要
物、化、遥特征	航磁	1:5万航磁呈北东—南西向延伸的椭圆形异常,最大值1700 nT	必要
	地磁	1:1万地磁呈半环状椭圆形,与矿体吻合好,最大值3600 nT	必要
	化探	矿被第四系覆盖较厚,化探应无异常,磷异常可能是开采造成	重要
	遥感	隐伏岩体的环状构造明显	次要

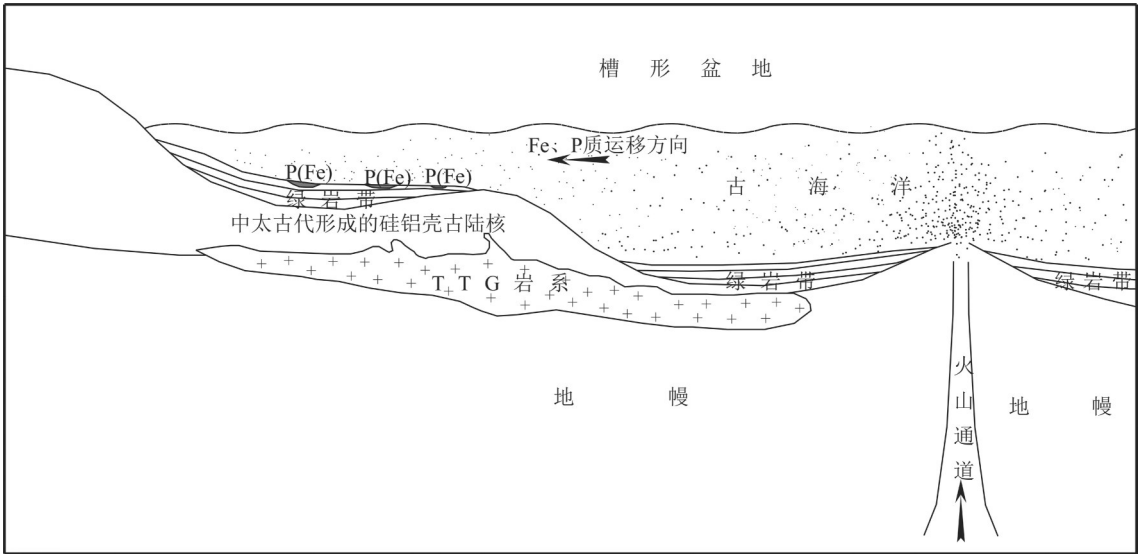


图6 辽宁省建平县勿兰乌苏磷矿床成矿模式图
(据辽宁省地质矿产调查院^①,2012)

Fig.6 Metallogenic model diagram of Belanwusu phosphate deposit, Jianping County, Liaoning Province
(After Liaoning Geological and Mineral Survey Institute,2012)

表6 辽宁省建平县勿兰乌苏磷矿预测模型(据熊先孝等,2019)

Table 6 Prediction model of Belanwusu phosphate Deposit in Jianping County, Liaoning Province(after Xiong Xianxiao et al.,2019)

评价要素		火山-沉积变质型受变质磷矿床	分类
地质环境	变质建造	黑云斜长变粒岩、斜长角闪岩、磁铁石英岩、黑云斜长片麻岩、黑云钾长片麻岩、花岗质片麻岩	必要
	岩石结构	中细粒结构、花岗变晶结构	重要
	岩石构造	块状构造、条带状构造	重要
	成矿时代	新太古代	必要
	成矿层位	新太古界混合作用形成的变质表壳岩和变质深成岩组合	必要
	构造背景	内蒙古自治区古陆的南缘,接近燕山准地槽	重要
矿床特征	矿石类型	钛磁铁磷灰石矿、片麻状斜长钛磁铁磷灰石矿、含钛磁铁磷灰石黑云斜长片麻岩	必要
	矿石矿物	钛磁铁矿、磷灰石	必要
	脉石矿物	角闪石、黑云母、斜长石	次要
	矿石结构	中细粒结构	次要
	矿石构造	块状构造	次要
综合物化探方法	磁法	矿石类型为钛磁铁磷灰石矿,其中的磁铁矿可引起较强磁异常,对于圈定矿体具有较好的指示作用	必要
	化探	Fe、P、Ti、V为化探异常组合元素,可以利用化探异常来圈定矿体的展布范围。但由于没有大比例尺的相关化探图件,因此无法叠加	必要

在建立了本省区不同预测类型典型矿床预测模型和区域预测模型基础上,圈定了最小预测区。各类型预测区资源量估算方法采用体积估计法,分500 m以浅、1000 m以浅、2000 m以浅分别估算资源量,采用此方法进行资源量估算的同时,还运用矿床地质经济模型法(品位-吨位模型法)估算资源量,以印证结果的合理性及可靠程度。

4.2 全国磷矿重要成矿预测区

根据预测模型及预测资源量规模(5000×10⁴ t以上)等条件,把磷矿划分为3类成矿预测区:

(1)潜在资源量大于10×10⁸ t的重要成矿预测区6个,包括:川西南—滇东北成矿预测区、滇池—抚仙湖成矿预测区、神农架—宜昌成矿预测区、东山峰成矿预测区、开阳—翁安成矿预测区、吉首—怀化成矿预测区;(2)潜在资源量在2×10⁸~10×10⁸ t的成矿预测区3个,包括:清镇—织金成矿预测区、海州成矿预测区、库鲁克塔格成矿预测区;(3)潜在资源量在0.5×10⁸~2×10⁸ t的成矿预测区3个,包括:张家口—承德成矿预测区、略阳成矿预测区、绵竹—什邡成矿预测区。

以此确定了中国磷矿重要成矿预测区12个(图7),预测潜在资源总量可达300.1×10⁸ t。

4.3 在中国磷矿找矿远景区划分

根据以上磷矿成矿预测成果,结合近几年地质大调查工作对扬子准地台地区、塔里木准地台北缘、中朝准地台北缘及海州—大悟地区等主要磷矿富集区资源调查评价资料,中国圈定了27个磷矿找矿远景区(表7)。

5 磷矿未来工作建议

5.1 勘查部署建议

根据磷矿找矿远景,结合成矿地质条件、矿床地质特征、资源量可靠程度,圈定磷矿勘查区,作为下一步磷矿找矿重点方向。

勘查区分为3级,1级为重点勘查区、2级为一般勘查区、3级为暂不宜部署工作区。重点勘查区一般是指成矿地质条件好、找矿潜力大、有一定的工作基础、已知矿床深边部等近期可优先安排勘查工作的区域,工作类别一般为普查—详查。远景好时可作为整装勘查基地。一般勘查区指成矿地质条件好、物化探异常发育,有一定的找矿潜力的区域,工作类别一般为预查—普查。

依照勘查工作部署原则,全国划分了19个重点勘查区(表8),21个一般勘查区,51个暂缓勘查区

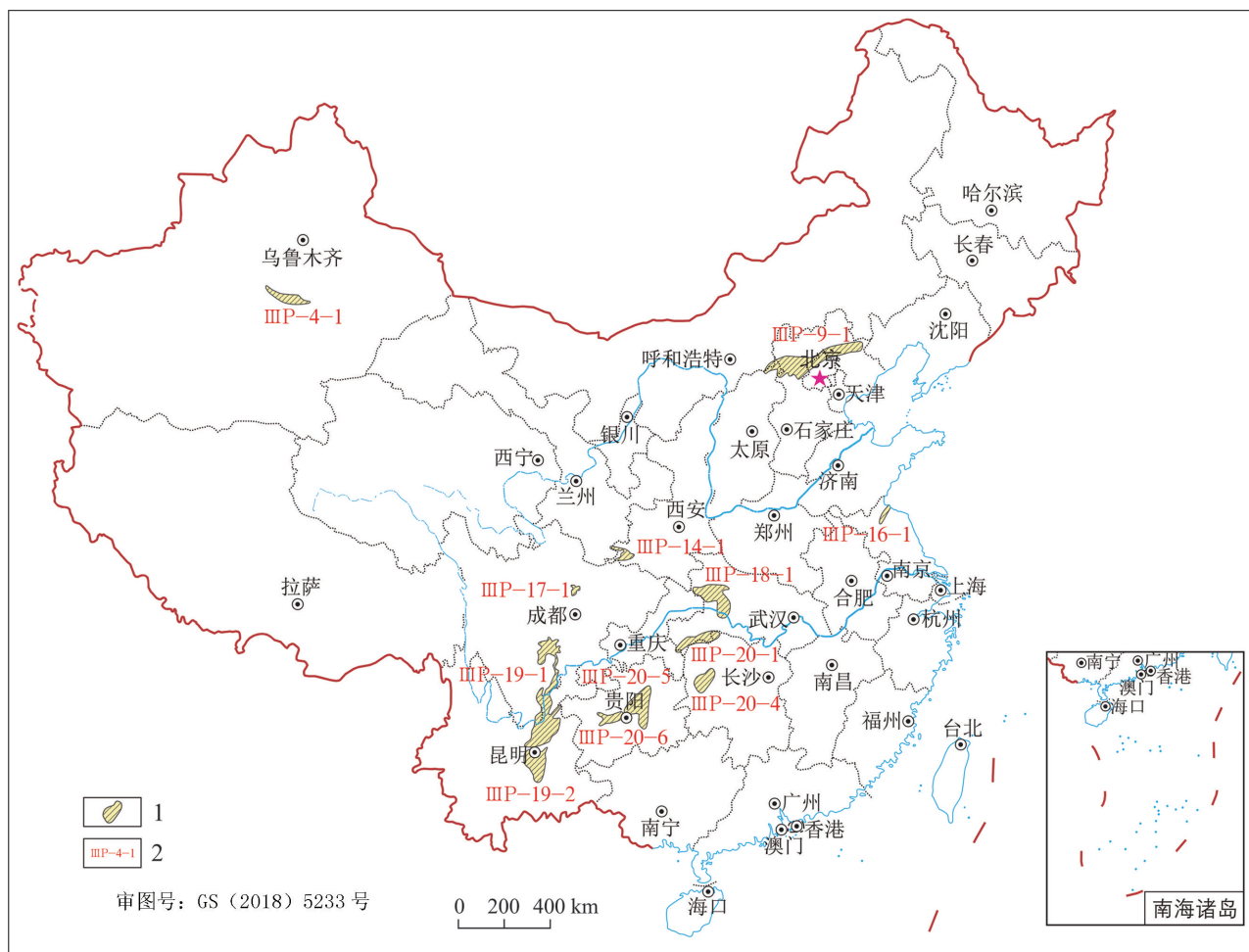


图7 中国磷矿重要成矿预测区分布图(据熊先孝等,2019)

1—磷矿重要成矿预测区;2—磷矿重要成矿预测区编号

Fig.7 Distribution of important phosphate deposits in China (after Xiong Xianxiao et al.,2019)

1— Important metallogenetic prediction area of phosphate deposit;2— Number of important metallogenetic prediction area of phosphate deposit

(图8)。

5.2 磷矿找矿方向

中国磷矿资源潜力较大,未来应该从以下几个方面加大勘查力度:

(1)滇池和抚仙湖周围地区探明的磷矿资源占云南省的72%,是云南磷矿资源开发的主要地区。而滇东北作为磷矿采选后备接替规划区,地质工作程度相对较低,建议开展磷资源潜力评价工作,随着地质勘查工作的深入及开发条件的改善,滇东北地区将成为云南省磷矿开采接替矿区。

(2)绵竹—什邡地区是四川省磷矿地质研究及勘探程度最高的地区,也是四川磷矿的主产区,经过数十年的开采,资源日趋枯竭。而川西南地区成

矿条件好,磷矿地质工作相对较低,建议开展川西南地区磷矿资源勘查工作,查明区内磷矿,特别是富磷矿的地质特征和资源潜力,为其成为四川省磷矿开发基地接替区提供支撑。

(3)在贵州开阳县的清水口—花黎—板坑—麻窝一带,含磷地层发育,建议对开阳县的龙水、马口和瓮安的小河口地区的磷资源进行资源潜力评价工作,开展深部找矿勘查工作。另外,对于资源储量规模较大的贵州织金新华矿区,建议制定综合开发方案,以合理利用资源为前提,开展深部普查找矿工作。

(4)近年来,宜昌磷矿北部的勘查成果表明,宜昌磷矿与兴神—保康磷矿可能连成一片,形成了鄂

表7 中国磷矿找矿远景区一览(据熊先孝等,2019)

Table 7 List of phosphate exploration potential areas in China (after Xiong Xianxiao et al.,2019)				
预测类型	找矿远景区名称	预测区名称	最小预测区名称	成矿区带
沉积型	川西南—滇东北区	马边区	陈子岩区 大院子区 分银沟区	滇东—川南成矿带
		雷波区	巴姑区 西谷溪区 岩脚区 金沙厂区 芦营寨子区	
			峨边岭区、黑竹洛区 大桥河南岸区 托托—老厂箐区	
		金阳区 宁南—会东区 东川—会泽区		
	滇池—抚仙湖区			
	神农架—宜昌区	荆襄区 宜昌区 新华区 神农架区 保康区	东蒿坪—白马沟区 九里川—唐家营区 蛇草坪—石人尖区 盐池河—桃坪河区	大巴山—鄂西成矿带
	东山峰区 吉首—怀化区 开阳—瓮安 清镇—织金区			湘黔成矿带
	绵竹—什邡区 略阳区 伊犁区 柯坪区 库鲁克塔格区			龙门山成矿带 南秦岭成矿带 伊犁成矿带 柯坪成矿带 库鲁克塔格成矿带
	北山区			北山成矿带
变质型	内蒙古台隆区		乌拉特前旗区	阴山成矿带
	燕山台褶带		崇礼区 丰宁区 建平—阜新区	张家口—承德成矿带
	浑江区 甜水区			辽东成矿带
	海州区 肥东区		沐阳滥洪—华冲区	苏鲁成矿带
	宿松区		霍山驼岭—金寨苏口区 广济牛头山—黄梅塔儿畈区	桐柏—大别成矿带
岩浆岩型	大悟区		应山—广水区	
	库鲁克塔格岩浆岩型磷矿区		卡乌留克塔格区 且干不拉克—大西沟区 奥尔塘区 团结村北山区	塔里木地台北缘成矿带
	瓦吉尔塔格区 皮羌区 克其克果勒区			
	张家口—承德区	凉城—怀安区 崇礼—丰宁区 承德—平泉区 阳原—怀来区 宽城区	卓资—怀安区 崇礼—丰宁区 承德—平泉区 阳原—怀来区 马仲桥—朱尔峪区 宽城—青龙区	中朝准地台北缘成矿带
	固阳—呼市区			

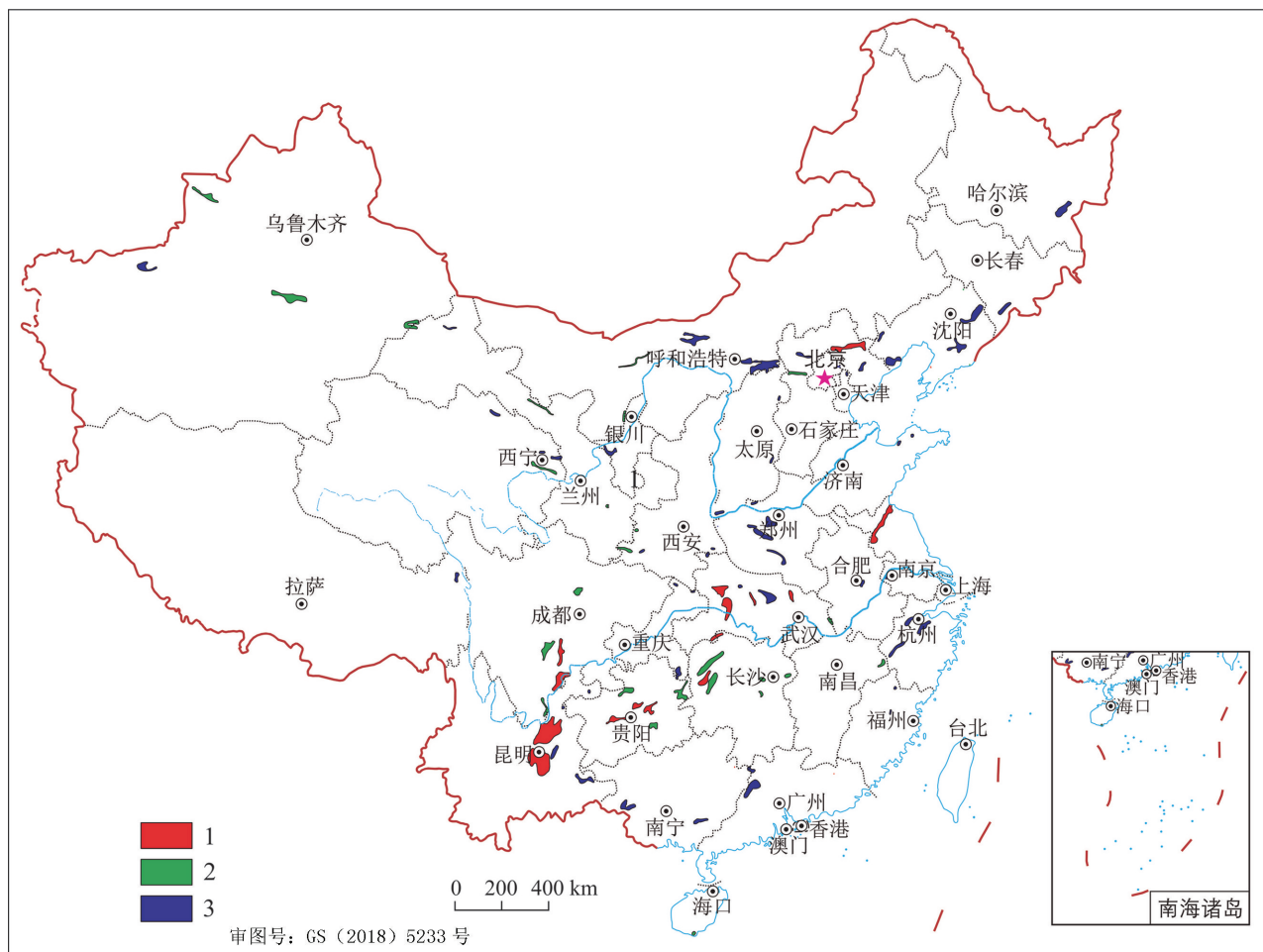


图8 全国磷矿勘查工作部署建议图(据熊先孝等,2019)

1—1级勘查区;2—2级勘查区;3—3级勘查区

Fig.8 Suggested plan for phosphate exploration in China (after Xiong Xianxiao et al.,2019)

1—Level 1 exploration area; 2—Level 2 exploration area;3—Level 3 exploration area

西兴山—宜昌磷矿成矿带,建议在神农架与黄陵两大背斜之间几百平方千米中间地带开展磷矿资源潜力评价与勘查工作。

(5)中国北方磷矿的找矿,建议在河北省承德市丰宁—平泉、新疆维吾尔自治区库尔勒市库鲁克塔格等地区,开展岩浆岩型磷灰石矿床的潜力评价和找矿勘查工作。

6 结 论

(1)中国磷矿类型有沉积型、变质型、岩浆岩型、鸟粪型和风化型,其中前3种为主要类型,占总量的99.6%。截至目前,全国共汇总磷矿产地1040处,其中超大型25处,大型101处,中型205处,

小型178处,矿点531处。截至2016年,查明资源储量(P_2O_5) $231.07 \times 10^8 t$ 。在成矿时代上,中国磷矿从太古宙一直到新生代均有分布,但不同时代的磷矿各具明显特点。中国北方变质磷矿成矿时代有太古宙早期、古元古代早期及古元古代晚期。其中古元古代晚期海州式磷矿具有较大工业价值。沉积型磷矿主要形成于震旦纪、寒武纪和泥盆纪。

(2)根据中国磷矿成矿规律,将中国磷矿划分为27个Ⅲ级成矿区带、4个成矿亚带和21个矿集区。在划分矿产预测类型的基础上,选取了具有代表性的矿床进行详细解剖工作,分别总结研究了沉积型、岩浆岩型和变质型磷矿的成矿条件和成矿模式,并建立了典型矿床预测模型。

表8 中国磷矿重点勘查区
Table 8 Key exploration areas of phosphate deposit in China

编号	重点勘查区名称	勘查面积/km ²	勘查深度/m	勘查目标	查明储量/万t	预测资源量/万t
1	云南省安宁—晋宁—江川	743.35	500	昆阳式沉积型磷块岩矿床	257572.79	109019.13
2	云南省宜良—禄丰村—华宁	1310.19	500	昆阳式沉积型磷块岩矿床	45218.01	204429.18
3	云南省九龙村—大湾—德泽—东川	1427.56	500	昆阳式沉积型磷块岩矿床	26631.00	612070.64
4	云南省会泽—东川—雨碌	715.59	500	昆阳式沉积型磷块岩矿床	72495.00	120185.68
5	四川省雷波—金阳	2730.8	500	昆阳式沉积型磷块岩矿床	132541.66	325844.92
6	四川省峨眉—马边	1612.32	500	昆阳式沉积型磷块岩矿床	8658.88	74884.68
7	四川省绵竹	875.25	500	什邡式沉积型磷矿、昆阳式沉积型磷块岩矿床	16034.79	18140.59
8	贵州省织金	1082.79	500	新华式沉积型磷(稀土)矿床	149189.60	25164.00
9	贵州省开阳	776.61	500	开阳式沉积型磷矿床	49779.64	43735.00
10	贵州省翁安—福泉	1168.04	500	开阳式沉积型磷矿床	90833.99	84629.11
11	湖北省神农架	1777.47	500	荆襄式海相沉积型磷矿床	41985.09	38568.16
12	湖北省宜昌	2375.03	1000	荆襄式海相沉积型磷矿床	153886.66	457555.85
13	湖北省钟祥	487.6	500	荆襄式海相沉积型磷矿床	106570.60	28923.43
14	湖北省黄麦岭	585.3	500	海洲式沉积变质型磷矿床	14561.30	20586.77
15	湖北省鹤峰	170.0	500	荆襄式沉积型磷矿床	5299.73	59523.40
16	湖南省石门	477	500	荆襄式沉积型磷矿床	143481.60	70925.74
17	湖南省泸溪—洗溪	1344.12	500	荆襄式沉积型磷矿床	25460.10	21991.33
18	江苏省新浦—华冲	932.09	500	海洲式沉积变质型磷矿床	10883.14	11573.67
19	河北省承德大庙	145.72	500	马营式岩浆岩型磷矿床	27842.20	40562.76

(3)根据预测模型及预测资源量规模(5000×10⁴t以上)等条件,把磷矿划分为3类成矿预测区,确定了全国磷矿重要成矿预测区12个,预测潜在资源总量可达300.1×10⁸t。在成矿预测区的基础上,全国圈定了27个重要磷矿找矿远景区。根据磷矿找矿远景,结合成矿地质条件、矿床地质特征、资源量可靠程度,圈定了19个磷矿重点勘查区,预测资源量达236.83×10⁸t,资源潜力较大,可优先安排勘查工作。

致谢:感谢“中国矿产地质志”项目组全体成员的辛勤劳动,感谢导师杨忠芳教授及各位专家、编辑在审稿过程中对本文提出的宝贵修改意见。

注释

- ①北省地矿局石家庄综合地质大队. 2011. 河北省磷矿资源潜力评价成果报告[R].
- ②辽宁省地质矿产调查院. 2012. 辽宁省磷矿资源潜力评价成果报告[R].

References

Agterberg F. 2021. Aspects of regional and worldwide mineral resource prediction[J]. Journal of Earth Science, 32(2): 279–287.

Bao Ronghua. 2015. Supply and demand structure of phosphate rock and its change[J]. Land and Resources Information,(5): 48–51(in Chinese with English abstract).

Cao Ye,Tang Yao,Yao Meijuan,Shang Pengqiang, Zou Zhendong, Qiu Guoyu,Xiong Xianxiao. 2018. Geological characteristics and resource potential of sulfur deposits in China[J]. Earth Science Frontiers, 25(3):179–195(in Chinese with English abstract).

Chen Qiliang,He Minfang,Guo Jian. 2017. Genetic type and metallogenic model for Bainishan phosphate deposit, Anning City, Yunnan Province[J]. Mineral Resources and Geology,31(6):1113–1120(in Chinese with English abstract).

Chen Qiying, Chen Meng ‘e, Li Juying .2000. Microbial– organic effects on formation of the sedimentary apatite[J].Scientia Geologica Sinica, 35(3): 316– 324(in Chinese with English abstract).

Chen Ruihong, Zhao Kai. 2021. Ore– forming material source and sedimentary environment of Kunyang phosphate deposit in east Yunnan[J]. Mineral Resources and Geology, 35(1):70– 75,89(in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan, Wang Denghong, Xu Zhigang, Zhu Mingyu. 2006. Preliminary study of Chinese mineralization system[J]. Mineral Deposits, 25(2):155–163(in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan, Wang Denghong. 2010. Classification Scheme of Important Mineral Prediction Types[M]. Beijing: Geological

- Publishing House, 1–222(in Chinese).
- Chen Yuchuan, Wang Denghong. 2010. Technical Requirements for the Study of Important Minerals and Regional Metallogenic Regularity[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–179(in Chinese).
- Chen Yuchuan. 1999a. Prospective Evaluation of Mineral Resources in Main Metallogenic Belts of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–536(in Chinese).
- Chen Yuchuan. 1999b. Metallogenic System and Regional Metallogenic Evaluation in China (Vol.1 and Vol.2) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–1005(in Chinese).
- Dai Yuhuang, Yu Dalong. 2012. Sedimentary characteristics and sedimentary model of Kaiyang phosphate deposit[J]. Ground Water, 34(5): 140–142(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 method of phosphate ore[J]. Geology of Chemical Minerals, 40(4) :198–203(in Chinese with English abstract).
- Huang Fan, Wang Denghong, Chen Yuchuan, Wang Yan, Xu Zhigang, Zhu Mingyu, Chen Zhenghui. 2020. An overview of over 100 years of research achievements and compilation of the first “Annals of Geology of Mineral Resources of China” [J]. Acta Geoscientica Sinica, 94(1):1–17, 340 (in Chinese with English abstract).
- Li Ruixi, Wang Gongwen, Emmanuel J M C. 2016. GeoCube: A 3D mineral resources quantitative prediction and assessment system[J]. Computers and Geosciences, 89: 161–173.
- 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 evaluation of Kunyang phosphate rock in Yunnan Province[J]. China Mining Magazine, 27(2):91–96, 100(in Chinese with English abstract).
- Li Yongcai. 1980. Geology and metallogenic geological conditions of Kaiyang phosphate ore[J]. Chemical Geology, (2):80–91(in Chinese with English abstract).
- Lyu X, Gong E. 2019. Intelligent clustering analysis model for mining area mineral resource prediction[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 37(39):1–8.
- Ma Yanying, Wang Xue, Fan Jizhang. 2016. Application research on quantitative prediction of mineral resources based on the grey relational analysis algorithm with dual hesitant fuzzy information[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 13(10):7333–7335.
- Song Tianrui. 2007. On the types of phosphate deposit in northern China and direction for ore finding[J]. Geology in China, 34(2):315–323(in Chinese with English abstract).
- 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).
- Tang Yao. 2014. Characteristics and development countermeasures of phosphate deposits in China[J]. Industrial Minerals and Processing, 43(4):51–55(in Chinese with English abstract).
- Tian Shengping. 2000. Basic characteristics and distribution of phosphate ore in China[J]. Geology of Chemical Minerals, 22(1):11–16(in Chinese with English abstract).
- Wang Ding, Ding Hongwei, Xiao Yingzu, Zhang Cong. 2018. Geological characteristics and exploration prospect of deep phosphorus deposit in Dayukou, Zhongxiang City, Hubei Province[J]. Resources Environment and Engineering, 32(1):1–7(in Chinese with English abstract).
- Wang Haiping, Lü Fengxiang. 2002. Main geological characteristics of phosphorus deposit types and resources strategy analyses in China[J]. Mineral Deposits, 21(3): 921–924(in Chinese with English abstract).
- 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).
- Xiao Jiaolong, Yang Gangzhong, Xiang Meng, He Qin, Tang Ying. 2015. Analysis of division of water abundance grade of surface groundwater in Hilly area[J]. Resources Environment and Engineering, 29(6): 800–804, 834(in Chinese with English abstract).
- Xiao Keyan, Xing Shuwen, Leon B, Sun Li, Li Nan, Yin Jiangning, Cui Ning, Cong Yuan. 2017. The China national mineral assessment initiative[J]. Ore Geology Reviews, 91:1084–1093.
- Xiao Keyan, Lou Debo, Sun Li, Yin Jiangning, Cong Yuan, Zhang Tingting. 2013. Collected model of potential evaluation for important national mineral resources in China[J]. Journal of Geology, 37(3): 341–348(in Chinese with English abstract).
- Xiao Zhe, Chen Guifang, Pang Jiantao, Yu Huiru. 2019. Analysis of occurrence state of Cr in phosphate rock of Kunyang phosphate mine[J]. Industrial Minerals and Processing, 48(7): 36–39(in Chinese with English abstract).
- Xiong Xianxiao, Dongye Maixing, Cao Ye, Wang Bingquan. 2019. Mineral Geology of China Phosphate Ore Volume[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Xiong Xianxiao, Li Boyun, Yao Chaomei, Dongye Maixing, Wu Yinghui, Wu Guangfeng. 2007. Types and metallogenic regularity of phosphate ore deposits in northern China[J]. Geology of Chemical Minerals, 29(3): 159–168(in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Xiong Xianxiao, Xue Tianxing, Chai Jiahong, Niu Guizhi. 2010. Geologic and resource perspectives 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, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Chen Zhenghui. 2010. Division Scheme of Metallogenic Zones in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–138(in Chinese).
- 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. 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).
- Xue Tianxing, Xiong Xianxiao, Tian Shengping. 2011. Discussion on the main phosphate ore concentration areas and their resource potential in China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 33(1): 9–20(in Chinese with English abstract).
- Yan Qinggao, Li Chao, Jiang Xiaojun, Wang Zhongqiang, Li Yunju, Li Wei. 2018. The age and sedimentary environment of the Kunyang phosphate deposit, central Yunnan: Constraints from Re–Os isotopes[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 37(4): 462–474(in Chinese with English abstract).
- Yan Wei, Fan Jianqiang, Chen Gecheng, Zhang Jun. 2015. The spatial concentration of phosphorous mineral resources and industrial layout in Hubei Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 30(1): 103–110(in Chinese with English abstract).
- Yang Daokun, Wu Libin, Sun Mingming, Gao Shuguang, Chen Jingjing, Zhao Xianchao. 2013. Characteristics and metallogenic regularity of Fengtaishan type sedimentary phosphate deposit in Anhui Province[J]. *Land and Resources Information*, (8): 34–37(in Chinese with English abstract).
- Yang Jie, Agterberg F P, Cheng Qiuming. 2015. A novel filtering technique for enhancing mineralization associated geochemical and geophysical anomalies[J]. *Computers and Geosciences*, 79: 94–104.
- Ye Tianzhu, Xiao Keyan, Yan Guangsheng. 2007. Methodology of deposit modeling and mineral resource potential assessment using integrated geological information[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 11–19(in Chinese with English abstract).
- Yu Pingping, Chen Jianping, Zheng Xiao, Yu Miao. 2015. 3D prospecting information mining and quantitative prediction of mineral resources based on geological models[J]. *Advanced Materials Research*, 3696: 269–274.
- Zartman R E, Doe B R. 1981. Plumbotectonics—the model[J]. *Tectonophysics*, 75: 135–162.
- Zeng Yunfu, Yang Weidong. 1987. Mechanism of enrichment of Kunyang and Haikou phospharite deposits, Yunnan China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 5(3): 19–27, 185(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 Shihong, Xiao Keyan, Zhu Yusheng, Cui Ning. 2017. A prediction model for important mineral resources in China[J]. *Ore Geology Reviews*, 91: 1094–1101.
- Zhang Zhaozhi, Jiang Guangyu, Wang Xianwei, Zhang Jianfeng. 2016. Development and utilization of the world's and China's bulk mineral resources and their supply and demand situation in the next twenty years[J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 90(4): 1370–1417.
- Zhao Yuhai. 2011. Practice and results of deep prospecting in Jinping phosphorus deposit, Jiangsu Province[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 33(4): 239–245(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yusheng, Xiao Keyan, Ma Yubo, Ding Jianhua. 2013. Review and status of mineralization belt study in China[J]. *Journal of Geology*, 37(3): 349–357(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 鲍荣华. 2015. 世界磷矿供需格局及其变化[J]. *国土资源情报*, (5): 48–51.
- 曹烨, 唐尧, 要梅娟, 商朋强, 邹振东, 邱国玉, 熊先孝. 2018. 中国磷矿资源预测模型及资源潜力分析[J]. *地学前缘*, 25(3): 179–195.
- 曾允孚, 杨卫东. 1987. 云南昆阳、海口磷矿的富集机理[J]. *沉积学报*, 5(3): 19–27, 185.
- 陈其英, 陈孟莪, 李菊英. 2000. 沉积磷灰石形成中的生物有机质因素[J]. *地质科学*, 35(3): 316–324.
- 陈启良, 何敏芳, 郭健. 2017. 云南安宁白泥山磷矿成因类型与成矿模式[J]. *矿产与地质*, 31(6): 1113–1120.
- 陈瑞红, 赵锴. 2021. 滇东昆阳磷矿成矿物质来源及其沉积环境[J]. *矿产与地质*, 35(1): 70–75, 89.
- 陈毓川, 王登红, 徐志刚, 朱明玉. 2006. 对中国成矿体系的初步探讨[J]. *矿床地质*, 25(2): 155–163.
- 陈毓川, 王登红. 2010. 重要矿产和区域成矿规律研究技术要求[M]. 北京: 地质出版社, 1–179.
- 陈毓川, 王登红. 2010. 重要矿产预测类型划分方案[M]. 北京: 地质出版社, 1–222.
- 陈毓川. 1999a. 中国主要成矿区带矿产资源远景评价[M]. 北京: 地质出版社, 1–536.
- 陈毓川. 1999b. 中国成矿体系与区域成矿评价(上、下册)[M]. 北京: 地质出版社, 1–1005.

- 戴玉皇, 余大龙. 2012. 开阳磷矿沉积特征与沉积模式研究[J]. 地下水, 34(5): 140-142.
- 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]. 化工矿产地志, 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]. 化工矿产地志, 40(4): 198-203.
- 黄凡, 王登红, 陈毓川, 王岩, 徐志刚, 朱明玉, 陈郑辉. 2020. 百年勘查成果与成矿规律之集大成——首部《中国矿产地志》研编阶段性进展概述[J]. 地质学报, 94(1): 1-17, 340.
- 黎永才. 1980. 开阳磷矿地质及其成矿地质条件[J]. 化工地质, (2): 80-91.
- 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.
- 李小燕, 谈树成, 马国胤, 李永平, 杨林, 赵志芳. 2018. 云南省昆阳磷矿矿区矿山地质环境评价[J]. 中国矿业, 27(2): 91-96, 100.
- 宋天锐. 2007. 中国北方磷矿成矿类型和找矿方向[J]. 中国地质, 34(2): 315-323.
- 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.
- 唐尧. 2014. 我国磷矿床特征及发展对策建议[J]. 化工矿物与加工, 43(4): 51-55.
- 田升平. 2000. 中国磷矿基本特征及分布规律[J]. 化工矿产地志, 22(1): 11-16.
- 王鼎, 丁宏伟, 肖应祖, 张聪. 2018. 湖北省钟祥市大峪口深部磷矿地质特征及找矿远景[J]. 资源环境与工程, 32(1): 1-7.
- 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(3): 921-924.
- 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.
- 肖蛟龙, 杨刚忠, 向萌, 何钦, 唐颖. 2015. 荆襄磷矿岩石学特征及成矿规律浅析[J]. 资源环境与工程, 29(6): 800-804, 834.
- 肖克炎, 娄德波, 孙莉, 阴江宁, 丛源, 张婷婷. 2013. 全国重要矿产资源潜力评价模型汇总[J]. 地质学报, 37(3): 341-348.
- 肖喆, 陈贵方, 庞建涛, 余慧茹. 2019. 昆阳磷矿磷块岩中铬元素的赋存状态分析[J]. 化工矿物与加工, 48(7): 36-39.
- 熊先孝, 东野脉兴, 曹烨, 王炳铨. 2019. 中国矿产地志·磷矿卷[M]. 北京: 地质出版社.
- 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]. 化工矿产地志, 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]. 化工矿产地志, 32(1): 1-10, 18.
- 徐志刚, 陈毓川, 王登红, 陈郑辉. 2010. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京: 地质出版社, 1-138.
- 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.
- 薛天星, 熊先孝, 田升平. 2011. 中国磷矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J]. 化工矿产地志, 33(1): 9-20.
- 严清高, 李超, 江小均, 王忠强, 李云驹, 李伟. 2018. 滇中昆阳磷矿成矿时代及沉积环境 Re-Os 同位素示踪研究[J]. 岩矿测试, 37(4): 462-474.
- 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.
- 杨道堃, 吴礼彬, 孙明明, 高曙光, 陈静静, 赵先超. 2013. 安徽省凤台山式沉积型磷矿特征及成矿规律探讨[J]. 国土资源情报, (8): 34-37.
- 叶天竺, 肖克炎, 严光生. 2007. 矿床模型综合地质信息预测技术研究[J]. 地学前缘, 14(5): 11-19.
- 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.
- 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.
- 赵玉海. 2011. 江苏省锦屏磷矿深部找矿实践及成果[J]. 化工矿产地志, 33(4): 239-245.
- 朱裕生, 肖克炎, 马玉波, 丁建华. 2013. 中国成矿区带划分的历史与现状[J]. 地质学报, 37(3): 349-357.