

四川磷矿成矿地质特征与未来找矿方向研究

王玉¹ 朱华云^{1,2*} 陈星颖¹ 徐良¹

1. 四川省(非金属)盐业地质调查研究所, 中国·四川 自贡 643000

2. 四川省井矿盐开采工程技术研究中心, 中国·四川 自贡 643000

摘要: 四川是我国重要的磷矿资源富集区, 磷矿资源储量居全国前列, 已查明资源量超 30 亿吨。本文系统总结了四川磷矿的成矿地质背景, 矿床类型划分及各类典型矿床的地质特征, 深入分析了昆阳式, 什邡式, 汉源式等主要类型磷矿的成矿规律与成矿模式。在此基础上, 结合近年来雷波县马颈子东超 1.3 亿吨大型磷矿, 马边县黄家坪超 5 亿吨超大型磷矿等重大找矿突破的实践, 提出四川磷矿未来找矿的四大方向。研究认为, 四川磷矿仍有巨大找矿潜力, 川西南马边—雷波成矿带, 川西龙门山成矿带是未来增储的重点区域。

关键词: 四川磷矿; 成矿地质特征; 找矿方向; 深部找矿

Research on the Metallogenic Geological Characteristics and Future Prospecting Directions of Phosphorus Deposits in Sichuan Province

Wang Yu¹, Zhu Huayun^{1,2*}, Chen Xingying¹, Xu Liang¹

1. Sichuan (Non-metallic) Salt Industry Geological Survey Institute, China Sichuan Zigong 643000

2. Sichuan Engineering Technology Research Center for Shaft Mining of Rock Salt, China Sichuan Zigong 643000

Abstract: Sichuan Province is an important area rich in phosphorus ore resources in China, with its phosphorus ore reserves ranking among the top in the country. The proven resource volume exceeds 3 billion tons. This paper systematically summarizes the metallogenic geological background of phosphorus deposits in Sichuan, the classification of deposit types, and the geological characteristics of various typical deposits. It conducts in - depth analysis of the metallogenic regularities and models of major types of phosphorus deposits, such as the Kunyang - style, Shifang - style, and Hanyuan - style deposits. On this basis, combined with the practical experience of significant prospecting breakthroughs in recent years, including the discovery of a large - scale phosphorus deposit with over 130 million tons in the east of Majingzi, Leibo County, and a super - large - scale phosphorus deposit with over 500 million tons in Huangjiaping, Mabian County, four future prospecting directions for phosphorus deposits in Sichuan are proposed. The research suggests that there is still great prospecting potential for phosphorus deposits in Sichuan. The Mabian - Leibo metallogenic belt in southwestern Sichuan and the Longmenshan metallogenic belt in western Sichuan are the key areas for future reserve increase.

Keywords: Sichuan phosphorus deposits; Metallogenic geological characteristics; Prospecting directions; Deep - seated prospecting

0 引言

磷矿是战略性非金属矿产资源, 对保障国家粮食安全, 磷化工产业链安全具有不可替代的重要作用。四川地处扬子陆块西缘, 是我国重要的磷矿资源基地, 磷矿资源储量丰富, 类型多样, 分布集中。全省已建成马边六股水, 雷波小沟, 卡哈洛两个国家级磷矿能源资源基地。近年来, 在新一轮找矿突破战略行动推动下, 四川磷矿勘查取得了一系列重大突破, 不仅大幅增加了资源储量, 也在成矿理论和勘查技术方面积累了丰富的经验。

然而, 随着地表及浅部磷矿资源逐渐消耗, 找矿工作

正面临从浅部找矿向深部找矿, 从单一矿种向综合勘查的战略转型。四川磷矿的深部空间展布规律, 沉积微相精细刻画, 伴生有益组分赋存状态等关键科学问题尚待深入探索。因此, 系统总结四川磷矿的成矿地质特征, 深入分析成矿规律, 探讨未来找矿方向, 对于指导新一轮磷矿勘查工作, 实现找矿突破具有重要的理论意义和实践价值。

1 成矿地质背景

四川磷矿的成矿受大地构造, 古地理环境和沉积盆地演化的共同控制。从大地构造位置看, 四川磷矿普遍分布于扬子陆块边缘的陆棚, 海湾环境中的碳酸盐岩盆地或碎

屑岩盆地。依据成矿地质构造和矿床类型,四川磷矿可划分为昆阳式,汉源式,清平式,什邡式,荆襄式和宁强式六个矿床类型。

四川磷矿的成矿时代主要集中在两个重要时期。一是晚震旦世—早寒武世,以昆阳式磷矿为代表,赋存于下寒武统麦地坪组。二是晚泥盆世,以什邡式磷矿为代表,赋存于上泥盆统沙窝子组。其中,早寒武世梅树村期是我国乃至全球最重要的成磷期之一,在川中—滇东一带的凹陷盆地及周缘形成了大量海相沉积型磷块岩矿床,构成了著名的川滇磷矿带。

从古地理环境看,四川磷矿主要形成于浅海相碳酸盐岩台地及陆棚环境。昆阳式磷矿的成矿环境为海湾环境,具备从低能到高能的水动力条件,海湾内部的地貌分异形成了若干次一级小盆地,成为成磷和聚磷的良好场所。什邡式磷矿则产于泥盆纪的古岩溶侵蚀面之上,具有独特的“硫磷铝锶矿+磷块岩”共生组合。

2 矿床类型及地质特征

2.1 昆阳式磷矿

昆阳式磷矿是四川分布最广,资源储量规模最大的磷矿类型,属川滇早寒武世成磷带北段。磷矿赋存于下寒武统麦地坪组中下部,层状延伸,产状与含磷层一致,层位稳定,分布广泛。

典型矿床如金阳陈家湾磷矿,矿石构造可划分为致密块状,条纹条带状和蜂窝状,结构包括砂屑结构,砾屑结构和鲕状结构。矿石主量元素组分为 CaO , CO_2 , P_2O_5 , MgO , SiO_2 等,磷灰石类型以氟磷灰石为主体。地球化学研究表明,含磷岩系稀土元素总量 (ΣREE) 为 $107.28 \times 10^{-6} \sim 361.14 \times 10^{-6}$,轻稀土富集,重稀土亏损,Ce 负异常明显,指示沉积时为氧化—次氧化环境。碳氧同位素分析显示, $\delta^{13}\text{Cv-PDB}$ 值为 $-3.42\text{‰} \sim -1.14\text{‰}$, $\delta^{18}\text{Ov-PDB}$ 值为 $-10.56\text{‰} \sim -7.3\text{‰}$,表明磷块岩主要来源于正常海水沉积。高含量的 As, Ba 和 Sr 元素反映了成矿过程中有较强生物作用参与,而 Co/Ni 比值明显小于 1 则指示含磷岩系兼有热水成因特征^[1]。

雷波县巴姑磷矿亦属昆阳式,为浅海相层状碳酸盐岩磷块岩矿床,磷矿赋存于麦地坪组中段,II 号矿体平均品位 24.62%,高于 I 号矿体的 21.33%。

2.2 什邡式磷矿

什邡式磷矿是四川特有的磷矿类型,产于上泥盆统沙窝子组含磷段底部,层位稳定,呈层状—似层状产出。其显著特征是磷块岩常与硫磷铝锶矿或含磷粘土岩渐变过渡,

厚度受底板古岩溶侵蚀面起伏控制。什邡式磷矿以其泥盆系的层位,特殊的剖面结构和含有硫磷铝锶矿层等特点,构成中国磷矿中的一种独特类型。

什邡式磷矿的成矿过程经历了早期成矿阶段,大陆成矿作用和海进沉积再造成矿三个阶段,具有多期成矿,叠加成矿的特征。绵竹地区是什邡式磷矿的集中分布区,也是中国四大磷矿基地之一,区内磷矿分布集中, P_2O_5 品位为 18.29%~35.57%,品位高低变化与含磷层厚度呈正相关性^[2]。

2.3 汉源式及其他类型

汉源式磷矿分布于上扬子南部陆缘逆冲—褶皱带及攀西带陆内裂谷带,产于寒武系筇竹寺组下段含钾粉砂岩—磷质岩建造中。含磷段岩性为含磷粉砂岩,粉砂岩,长石石英粉砂岩和含钾磷块岩,矿体呈层状,薄层状和透镜状,厚度变化大,品位中至低,磷矿石工业类型属混合型磷块岩矿。四川省已发现汉源式大型矿床 2 处,中型 5 处,小型 2 处,矿点 10 处^[3]。

此外,四川还有清平式,荆襄式和宁强式等磷矿类型,但分布范围和资源规模相对较小。

3 成矿规律与成矿模式

3.1 成矿规律

四川磷矿的成矿规律主要体现在以下三个方面。

第一,成矿受古构造和古地理的双重控制。磷矿床主要富集于沿 SN 向古断裂形成的断陷盆地中次一级凹陷盆地内。昆阳式磷矿的分布与上扬子台拗峨眉山断拱和凉山陷褶束的构造格局密切相关。雷波—永善地区因其独特的沉积环境和巨大的成矿潜力成为磷矿研究的理想区域^[4]。

第二,成矿与特定的沉积环境和岩相组合密切相关。昆阳式磷矿的含矿建造为硅质岩—碳酸盐岩—磷块岩组合,形成于海湾潮下低能带到中—高能带的过渡环境。什邡式磷矿则与古岩溶侵蚀面和硫磷铝锶矿层紧密共生。

第三,生物作用在成矿过程中扮演了关键角色^[5]。生物聚磷作用是马边地区磷矿形成的最重要因素,潮下间歇高能带中的生物活动为磷的富集提供了重要条件。陈家湾磷矿的研究也证实,高含量的 As, Ba 和 Sr 元素反映出成矿过程中有较强的生物作用参与。

3.2 成矿模式

基于对四川主要磷矿类型成矿规律的系统总结,可以建立两类主要的成矿模式。

昆阳式磷矿的生物—化学沉积—再富集成矿模式。该模式认为,昆阳式磷矿的成矿作用主要是生物—化学沉积作用,属离子化合沉淀和胶体聚沉—盆内成屑再积成因的

海相磷块岩矿床。具体过程为。生物—化学作用初始富集磷酸盐沉积物,在强水动力相带中经簸选叠加而富集成矿。这一两阶段成矿模式进一步揭示了区内磷矿成矿机理,为川西南地区昆阳式磷矿深部找矿提供了理论依据。

什邡式磷矿的多期叠加成矿模式。什邡式磷矿成矿经历了早期成矿阶段,大陆成矿作用和海进沉积再造成矿三个阶段。早期成矿阶段形成了初始的磷质沉积。随后的大陆成矿作用使磷质在古岩溶侵蚀面上进一步富集。最后的海进沉积再造阶段则对已有矿层进行了改造和叠加。

4 找矿新进展与未来找矿方向

4.1 近年重大找矿突破

“十四五”以来,四川磷矿勘查取得了一系列重大突破。全省新发现大中型磷矿 8 处,新增磷资源量 17.5 亿吨。

四川省第七地质大队深耕川西南地区,先后探明马边县老河坝,雷波县卡哈洛等 6 处大型磷矿床,累计查明磷矿石资源量占全省总量的 43%。七大队在马边—雷波一带开展磷矿勘查工作 70 年,查明磷矿石资源量超 30 亿吨。

4.2 未来找矿方向

基于对四川磷矿成矿地质特征和近年找矿突破的系统分析,本文提出以下四个未来找矿方向。

深部隐伏矿体勘查,拓展第二找矿空间。马颈子东磷矿的成功发现证明,川西南地区深部(800~1500 米)仍赋存有巨大的磷矿资源。当前,川西南早寒武世含磷层位沉积微相尚不清晰,深部磷矿空间展布变化大,深部磷矿勘查技术尚未系统建立。未来应重点开展基于大数据的岩相古地理精细化重建,深部磷矿多源数据三维预测和深部磷矿空间精准定位等关键核心技术攻关。已有矿权的深部区域是攻深的重点方向。

伴生关键金属综合评价,提升资源综合价值。四川磷矿中富含多种关键金属元素。什邡式磷矿以富含稀土元素为特征,硫磷铝锶矿中 REE 和 Sr 等关键金属富集矿化,具有巨大的潜在经济价值。绵竹清平磷矿的研究表明,什邡式磷矿床中,重稀土元素具有明显的富集规律和资源潜力。此外,磷矿中还伴生有碘,氟等有益组分。未来应加强对磷矿伴生稀土,锶,碘,氟等关键金属的赋存状态,富集规律和综合利用技术研究,实现一矿多用。

多矿种共伴生综合勘查——实现空间立体找矿。马边地区的矿产勘查开发呈现出矿种单一,空间利用不充分的特征。该地区磷矿矿业权地块有 17 处,但只有 3 处采矿权地块附加开采铅锌矿,1 处附加开采萤石矿。事实上,四川磷矿成矿区带往往也是铅锌,萤石,铜等多金属的有利

成矿区。瓦岗地区的水系沉积物测量工作已证实,该区主攻矿种为沉积型磷矿,可兼顾铅锌矿和锑矿。未来应树立多矿种,多空间的综合勘查理念,在磷矿勘查中系统评价共伴生矿产的资源潜力。

大数据与人工智能找矿预测,推动勘查范式变革。当前,四川已启动川西南磷矿找矿预测关键技术攻关与增储示范,重大技术攻关项目,旨在构建磷矿层岩相古地理精细化模型,矿集区深部磷矿地层—构造—岩相古地理综合三维模型以及地质—物探—化探—遥感与大数据人工智能融合的找矿预测模型。同时,《四川扬子地台西缘磷矿成矿模式和大数据找矿预测地质模型》研究项目也已立项,将综合运用现代地质学理论,矿床学分析方法和先进的大数据技术,系统构建区域磷矿成矿模式并建立基于大数据的找矿预测地质模型。这些研究将为四川磷矿的精准找矿提供重要支撑。

5 结语

未来四川磷矿找矿应重点聚焦四个方向。深部隐伏矿体勘查拓展第二找矿空间,伴生关键金属综合评价提升资源价值,多矿种共伴生综合勘查实现空间立体利用,大数据与人工智能融合推动找矿预测范式变革。川西南马边—雷波成矿带,川西龙门山成矿带和峨边—汉源成矿带是重点找矿区域。

参考文献:

- [1] 贺天全,李斌斌,张春颖.四川省昆阳式磷矿地质特征及成矿模式[J].中国地质调查,2022,9(2):15-24.
- [2] 贺天全.四川省什邡式磷矿地质特征及其成矿模式[J].化工矿产地质,2021,43(3):222-229.
- [3] 陈超,程文琪,郑毅等.四川金阳陈家湾磷矿床地球化学特征及成因意义[J].矿物岩石,2025,45(2):96-114.
- [4] 马殿哲,刘坤,龙有根.四川雷波县巴姑磷矿矿床地质特征及成因探讨[J].中国非金属矿工业导刊,2025(5):49-54.
- [5] 刘俊男,胡明.四川马边老河坝磷矿区成矿地质条件分析[J].四川地质学报,2020,40(4):614-619.

作者简介:王玉(1984-),男,汉族,中国安徽巢湖人,本科,高级工程师,研究方向:从事矿产资源勘查开发研究。

* 通讯作者:朱华云(1981-),男,汉族,四川会理人,本科,高级工程师,研究方向:从事矿产资源勘查开发研究。