

沉积型矿床成矿机制及找矿标志研究

寇家宾 甘辉敏 杨青林
乌鲁木齐古生界地质勘查技术有限公司
DOI:10.32629/gmsm.v9i2.2446

[摘要] 沉积型矿床作为全球矿产资源的重要来源,涵盖了铁、锰、铜、铅、锌、铀、稀土及非金属矿产等多种关键战略资源。其形成过程受控于复杂的地质背景、古地理环境、古气候条件以及生物地球化学循环等多重因素的耦合作用。本文旨在系统综述沉积型矿床的成矿机制理论进展与找矿标志识别方法。文章首先深入剖析了沉积型矿床的三大主要成矿模式:机械沉积富集、化学沉淀富集及生物化学作用富集,并探讨了氧化还原界面、共生改造及后期叠加等关键动力学过程。

[关键词] 沉积型矿床; 成矿机制; 找矿标志; 古地理重建; 地球化学异常; 生物地球化学; 深部预测
中图分类号: F407.1 文献标识码: A

Research on the Mineralization Mechanism and Prospecting Indicators of Sedimentary Deposits

Jiabin Kou Huimin Gan Qinglin Yang
Urumqi Paleozoic Geological Exploration Technology Co., Ltd.

[Abstract] As a vital source of global mineral resources, sedimentary deposits encompass various critical strategic resources such as iron, manganese, copper, lead-zinc, uranium, rare earth elements, and non-metallic minerals. Their formation is governed by the synergistic interactions of complex geological backgrounds, paleogeographic environments, paleoclimatic conditions, and biogeochemical cycles. This article provides a systematic review of theoretical advancements in the metallogenetic mechanisms of sedimentary deposits and methodologies for identifying prospecting indicators. It first provides an in-depth analysis of the three primary metallogenetic modes: mechanical deposition enrichment, chemical precipitation enrichment, and biogeochemical enrichment, while examining key kinetic processes including redox interfaces, co-genetic alteration, and subsequent superposition.

[Key words] Sedimentary deposit; Mineralization mechanism; Prospecting indicator; Paleogeographic reconstruction; Geochemical anomaly; Biogeochemistry; deep prediction

引言

矿产资源是人类社会经济发展的物质基础,而沉积型矿床以其规模大、品位稳定、开采成本低等优势,在全球矿产资源供应体系中占据着举足轻重的地位。据统计,全球约40%的铁、80%以上的锰、50%以上的铜、铅、锌以及绝大部分的磷、钾盐、铝土矿和铀矿均属于沉积型或沉积变质型矿床。从远古时期的条带状铁建造(BIF)到近代形成的大型斑岩型矿床围岩蚀变带,再到现代盐湖中的锂、硼资源,沉积作用记录了地球演化历史中物质迁移与富集的宏大篇章。^[1]

1 沉积型矿床的主要成矿机制与动力学过程

沉积型矿床的成矿过程并非简单的物质堆积,而是一个涉及物质来源、运移、沉淀及后期改造的复杂动态系统。根据主导成矿作用的不同,可将其主要分为机械沉积、化学沉淀

和生物化学沉积三大类,各类机制下又包含多种具体的动力学过程。

1.1 机械沉积与重力分异富集机制

机械沉积型矿床主要依赖于水流、风或冰川等外营力的搬运与分选作用,使重矿物或特定粒级的矿物在特定沉积环境中富集。这类矿床的典型代表包括砂金、砂锡、钛铁矿及部分金刚石矿床。其核心机制在于重力分异与流体力学的耦合。当携带矿物的介质流速降低或流向改变时,密度较大或粒度较粗的矿物因沉降速度较快而优先沉积,形成富集层。^[2]例如,在河流三角洲或滨海砂坝环境中,高能水流将轻质脉石物质带走,而重矿物则残留下来形成砂矿。此外,波浪和潮汐的反复淘洗作用进一步提高了矿石品位。该机制的关键控制因素包括古水动力条件、沉积速率、物源区岩石性质及地形地貌。在低能静水环境

中, 细粒矿物虽易沉积但难以富集, 而在高能与低能交替的过渡带, 往往最容易形成具有经济价值的机械沉积矿床。

1.2 化学沉淀与氧化还原界面控制机制

化学沉积型矿床是沉积型矿床中最重要的一类, 包括蒸发岩矿床(如钾盐、石膏)、铁锰结核、部分铜矿及铀矿等。其成矿本质是溶解在水体中的金属离子在特定的物理化学条件下发生过饱和并沉淀析出。其中, 氧化还原电位(Eh)和pH值的变化是最关键的触发因素。许多金属元素(如Fe、Mn、U、V)在不同氧化还原状态下具有截然不同的溶解度。例如, 在还原环境下, 高价态的铁、锰、铀极易被还原为低价态并形成难溶的硫化物或氧化物沉淀。因此, 水体中的氧化还原界面(如海盆缺氧区与富氧区的交界面)往往是大规模金属富集的场所。此外, 硫酸盐还原菌活动产生的硫化氢与金属离子反应生成硫化物沉淀, 也是化学沉积的重要方式。该机制还受控于古气候(干旱/湿润)、古海水化学成分及海底热液活动的叠加影响。^[3]

1.3 生物化学作用与微生物诱导成矿机制

随着研究的深入, 生物化学作用在沉积型矿床形成中的地位日益凸显。微生物不仅是有机质的生产者, 更是重要的成矿催化剂。微生物通过代谢活动改变局部微环境的pH值、Eh值及配体浓度, 诱导金属离子的沉淀。例如, 蓝细菌的光合作用释放氧气, 促使铁、锰氧化沉淀形成条带状铁建造(BIF); 硫酸盐还原菌产生的硫化氢与金属离子结合形成黄铁矿、闪锌矿等硫化物矿床。此外, 微生物细胞表面的官能团具有吸附金属离子的能力, 形成生物矿化核, 促进矿物晶体的生长。这种“生物-化学”耦合机制不仅解释了某些低品位矿床的富集过程, 也为解释古代矿床的形成提供了新线索。生物化学成矿通常发生在浅海陆棚、潟湖及淡水湖泊等生物繁盛的环境中, 其产物常伴有独特的化石组合和有机质富集特征。

1.4 同生改造与后期叠加成矿机制

纯粹的沉积作用往往只能形成低品位的矿源层, 真正的经济价值往往来自于后期的改造与叠加。同生改造是指在沉积过程中或沉积后不久, 在埋藏深度较浅的条件下, 受地下水循环、压实作用及早期成岩作用影响, 导致元素重新分配与富集。例如, 层控铅锌矿床的形成往往经历了沉积期富集与成岩期改造的双重过程。后期叠加则是指在地壳运动、岩浆侵入或区域变质作用下, 原有沉积矿层遭受热液蚀变、褶皱变形及再结晶, 导致矿体品位大幅提升或形态发生显著变化。这种“沉积+改造”的多元成矿模式在许多大型矿床中普遍存在。热液流体沿断裂带运移, 淋滤围岩中的金属元素, 并在有利的构造部位或岩性界面再次沉淀, 形成叠加富集带。理解这一机制对于预测深部盲矿体至关重要。

2 沉积型矿床的多维度找矿标志体系构建

找矿标志是指导地质勘查工作的“路标”, 是推断隐伏矿体存在的重要依据。针对沉积型矿床的特点, 需要构建一个涵盖地层、构造、地球化学、古生物及地球物理等多学科的综合找矿标志体系。

2.1 地层岩性与沉积相标志

地层岩性是沉积型矿床的物质基础和首要找矿标志。不同类型的矿床往往赋存于特定的层位和岩性组合中。例如, 前寒武纪条带状铁建造(BIF)通常产于古老克拉通边缘的沉积盖层中, 伴生有硅质岩和碳酸盐岩; 蒸发岩型矿床则发育于干旱气候条件下的盆地中心, 标志性层位为厚层的石膏、硬石膏和岩盐; 而铜、铅、锌等层控矿床常与特定的黑色页岩、碳酸盐岩台地边缘相或深水浊积岩系有关。识别这些“矿源层”是找矿的第一步。此外, 沉积相标志同样重要, 如滨浅湖相、三角洲相、潟湖相等特定的古地理环境往往对应着特定的矿床类型。通过恢复古地理格局, 可以圈定潜在的成矿远景区。例如, 在碳酸盐岩台地边缘的斜坡相带, 由于水动力条件和化学梯度的变化, 常有利于铜、铀等元素的富集。^[4]

2.2 构造格架与容矿构造标志

构造控制了流体的运移通道和沉淀空间, 是沉积型矿床定位的关键因素。宏观上, 大型沉积盆地、裂谷带、被动大陆边缘及造山带前缘是沉积型矿床的集中分布区。微观上, 容矿构造主要包括不整合面、断层、裂隙带、滑脱面及同沉积断裂等。不整合面往往是古风化壳型矿床(如铝土矿、红土型镍矿)或层间氧化带型铀矿的赋存场所, 因为这里代表了长期的暴露和风化作用。同沉积断裂则控制了沉积速率的差异和古水流的汇聚, 常形成砂矿或化学沉积的有利场所。此外, 褶皱轴部、背斜顶部等构造应力集中区, 容易形成次生富集带或诱发热液叠加改造。识别这些构造标志, 特别是那些具有长期活动历史的“深大断裂”及其分支构造, 对于预测深部矿体位置具有重要意义。

2.3 地球化学异常与元素组合标志

地球化学异常是寻找隐伏矿床最直接、最有效的标志之一。沉积型矿床通常表现出明显的元素富集异常, 且具有一定的元素组合特征。例如, 铁锰矿床常伴生Co、Ni、Cu、Pb、Zn等元素的异常富集; 铀矿床则常与V、Mo、Se、As等元素呈正相关; 铜矿床往往与Mo、Ag、Au等伴生元素异常有关。通过土壤测量、水系沉积物测量及岩石地球化学测量, 可以圈定异常区。此外, 同位素地球化学(如S、C、O、Sr、Nd同位素)能够提供成矿物质来源和成矿流体性质的关键信息。例如, 硫同位素组成可以区分生物成因还是热液成因; 碳同位素可以指示有机质参与的程度。特定的微量元素比值(如V/Cr、Ni/Co、Th/U等)也可作为判别古氧化还原环境和成矿类型的有效指标。^[5]

2.4 古生物特征与有机质富集标志

生物标志物是沉积型矿床特有的找矿线索。矿化作用往往与生物繁盛期或生物死亡后的分解过程密切相关。因此, 特定的化石组合(如笔石、三叶虫、珊瑚、介形虫等)可以作为确定地层时代和沉积环境的依据, 进而推断成矿可能性。例如, 富含笔石的黑色页岩常与钒、铀矿化有关; 富含藻类的石灰岩可能与磷、油页岩有关。更重要的是, 有机质的丰度(TOC含量)和成熟度(Ro值)是判断生物化学成矿潜力的重要指标。高含量的有机质不仅意味着还原环境的形成, 还可能作为还原剂参与金属沉

淀。此外,特定的生物标志化合物(如卟啉、藿烷、甾烷等)的存在,可以指示特定的生物来源和成矿环境,为寻找油气伴生的金属矿床提供线索。

2.5 地球物理响应与遥感影像标志

地球物理和遥感技术为深部找矿提供了“透视眼”。沉积型矿床由于其特殊的物理性质(如密度、磁性、电性、放射性等),往往会在地球物理场中产生异常响应。例如,磁法勘探可用于识别含磁性矿物(如磁铁矿、赤铁矿)的矿体或相关的基性岩体;电法勘探(如CSAMT、IP法)对导电性好的硫化物矿床或石墨化围岩非常敏感;重力勘探有助于识别密度差异大的矿体或构造边界;放射性测量则是寻找铀、钍矿床的直接手段。在遥感方面,利用高分辨率卫星影像和多光谱数据,可以识别地表岩性分界、构造线性特征、蚀变矿物谱系(如铁染、羟基吸收特征)等,从而快速圈定找矿远景区。特别是近红外和短波红外波段,对于识别粘土矿物、碳酸盐矿物等蚀变标志具有独特优势。

3 典型案例分析与深部找矿展望

理论的生命力在于实践。通过对国内外典型沉积型矿床的案例分析,可以验证上述成矿机制与找矿标志的有效性,并为未来勘查工作指明方向。

3.1 典型矿床成矿规律解析

以中国长江中下游的铁铜矿床为例,该类矿床属于典型的沉积-热液叠加型矿床。其成矿机制涉及早古生代的海相沉积铁锰层位形成,随后在中生代燕山期受到强烈的岩浆热液活动改造。找矿标志表现为:特定的志留系-泥盆系地层序列、火山岩与沉积岩的接触带、北东向断裂构造系统,以及Fe-Cu-Mo-Ag多元素地球化学异常。另一个典型案例是非洲加蓬的奥克洛天然核反应堆铀矿,其成矿机制高度依赖特殊的古水文地质条件和富铀沉积层,找矿标志包括异常的铀品位、特定的锆石年龄及周围岩石的强烈蚀变特征。这些案例表明,沉积型矿床的找矿必须紧扣“层位+构造+流体”的组合模式。

3.2 深部找矿面临的挑战与技术展望

随着浅表资源的枯竭,沉积型矿床的勘查重心正逐渐向深部转移。深部找矿面临着探测难度大、信息获取难、成矿模型复杂化等挑战。未来,沉积型矿床的研究将呈现以下趋势:一是多学科深度融合,将沉积学、地球化学、构造地质学与数值模拟紧密结合,构建高精度的三维成矿预测模型;二是新技术应用,

利用无人机航磁、航空伽马能谱、广域电磁法等先进探测技术提高深部分辨率;三是人工智能赋能,利用机器学习算法处理海量地质、地球物理、地球化学数据,自动识别成矿靶区;四是微观机理研究深化,借助纳米级原位分析技术揭示成矿元素的微观赋存状态和迁移路径。

4 结语

沉积型矿床的成矿机制是一个涉及多圈层相互作用、多时间尺度演化的复杂系统。从机械分选到化学沉淀,再到生物地球化学作用,每一种机制都留下了独特的地质印记。构建科学的找矿标志体系,需要我们将地层、构造、地球化学、古生物及地球物理等多源信息进行有机整合,形成“天-空-地-深”一体化的勘查思路。

当前,沉积型矿床研究正处于从定性描述向定量预测、从浅部找矿向深部拓展的关键时期。未来的研究应更加注重成矿过程的动态模拟和微观机制的解析,同时加强跨学科合作,推动大数据、人工智能等前沿技术在找矿实践中的应用。只有不断深化对沉积型矿床成矿规律的认识,精准识别各类找矿标志,我们才能在广阔的地球深处发现更多的宝藏,为保障国家资源安全、支撑经济社会可持续发展作出更大贡献。沉积型矿床的奥秘依然深藏地下,等待着地质工作者去探索、去揭示,去书写人类认识自然、利用自然的崭新篇章。

[参考文献]

- [1]张杰志,李茜,朱光有,等.海泡石形成机制及其在地质领域的应用进展[J].沉积学报,1-31[2026-04-21].
- [2]李守奎.滇西北铜厂沟斑岩钼(铜)矿床岩浆-流体作用与成矿机制[D].昆明理工大学,2023.
- [3]彭惠娟.云南中甸红牛-红山斑岩-矽卡岩型铜矿床成矿过程及义敦岛弧斑岩-矽卡岩成矿系统研究[D].中国地质科学院,2014.
- [4]郭运康,杨东.磁铁矿结构和化学成分标型对铁多金属成矿作用制约的研究进展[J].岩石学报,2025,41(2):669-692.
- [5]张达,李芳,贺晓龙,等.华南重要成矿区带中生代构造变形及其控岩控矿机理[J].地质力学学报,2021,27(04):497-528.

作者简介:

寇家宾(1986--),男,汉族,河南人,大专,职称:地质矿产工程师,研究方向:地质矿产勘查。