

# 卡林型金矿床地球化学晕特征及深部找矿方法研究

贾 凡

中国黄金集团 嵩县金牛有限责任公司 河南 洛阳 471400

**【摘要】**：卡林型金矿床作为一种重要金矿，因潜伏性强这一特征导致深部勘探难度增加。但该类型矿体中常伴随多金属元素，可以通过分析地球化学晕判断是否存在矿体或确定矿体位置与规模。基于此，研究重点分析了卡林型金矿床地球化学特征，并基于这些特征探讨了多元素地球化学晕识别、元素分带指示深部矿体、构造—地球化学耦合找矿等方法在勘探深层卡林型金矿床中的应用方法。希望研究能够为卡林型金矿床深部勘查提供参考。

**【关键词】**：卡林型金矿床；地球化学晕；深部找矿

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.035

世界上第一座林型金矿发现于20世纪60年代初期的美国内华达州，在后面的几十年当中，在我国云南、贵州、四川、甘肃、湖北、湖南、安徽以及陕西等地区发现了大量的卡林型金矿床<sup>[1]</sup>。卡林型金矿赋存状态隐蔽，主要产于沉积岩地层中，且矿中的金多以微细粒或亚显微粒存在，肉眼难以识别，这使传统的重砂找矿方法适用性较差。而且随着浅部矿产日益枯竭，找矿工作转向隐伏矿体，导致地表矿化露头追索方法越来越不适用，这无疑进一步增加了找矿难度。地球化学晕作为一种反映成矿作用物质迁移与富集过程的信息载体，能够有效揭示成矿元素及其伴生元素的发展规律，为寻找卡林型金矿床提供了新的手段。因此，进一步研究卡林型金矿床地球化学晕特征，并这些特征探索深部找矿方法具有重要的意义。

## 1 卡林型金矿床与地球化学晕介绍

### 1.1 卡林型金矿床介绍

卡林型金矿是一种主要产于碳酸盐岩建造中的微细浸染型金矿床，因其首次被发现于美国内华达州卡林镇而命名。该类型矿床以金颗粒极其细小、常以“不可见金”形式赋存于黄铁矿等载金矿物中为典型特征，其形成通常与深部热液活动密切相关。卡林型金矿矿体多受断层、裂隙等构造控制，常呈现层状、似层状或透镜状产出，围岩蚀变以硅化、粘土化、碳酸盐化和硫化等为主，并常伴有砷、锑、汞、铊等特征微量元素组合异常<sup>[2]</sup>。

### 1.2 地球化学晕介绍

地球化学晕是指成矿元素及其伴生元素在矿体周围岩体中形成的含量异常区，是成矿热液活动与围岩发生物质交换与能量传递的产物。其形态和规模受到构造、岩性及热液活动强度等因素控制，可依据空间位置进一步划分为原生晕、次生晕等类型<sup>[3]</sup>。原生晕对于寻找深部隐伏矿体具有特别重要的指示意义，通过分析晕中元素的组合特征、分带结构及浓度变化规律，能够推断深部矿体的位置、规模与剥蚀程度，从而成为深部矿产资源勘探的关键依据。

## 2 卡林型金矿床找矿难点

### 2.1 矿体潜伏性强，深部空间定位困难

卡林型金矿床中金主要以显微-次显微形式赋存，矿体与围岩缺乏明显的地表露头岩性、构造标志，传统的找矿标志识别方法效果有限。许多工业矿体赋存于地表以下数百米深度，例如部分典型矿床的主矿体集中分布在海拔-200m~800m的空间范围内，且矿体形态多呈不规则透镜状或脉状，产状变化较大，连续性常受后期构造改造影响。在深部勘探中，即使借助钻探工程，因矿化蚀变带与无矿围岩之间缺乏截然的物理性质差异，单一地球物理方法的异常响应多解性强，难以精确圈定矿体边界。

### 2.2 深部控矿构造复杂，成矿要素叠加

卡林型金矿床通常发育于区域深大断裂派生的次级断裂、褶皱虚脱部位及层间滑脱带等地质结构中，这些构造不仅控制着热液通道与矿体就位空间，而且多期活动会导致早期矿化被改造、晚期矿化叠加。例如，目前大部分卡林型金矿床主要控矿断裂带宽度可从数米变化至数十米，且在不同深度发生产状偏转，致使深部矿体定位预测不确定性大增。此外，部分卡林型金矿床成矿作用并非单一热液事件完成，可能经历了早期硅化与黄铁矿化、主成矿期金锑钾沉淀以及晚期碳酸盐化等多个阶段，不同阶段的地球化学元素组合相互叠加混杂，导致原生晕的分带结构模糊甚至出现反常序列。

### 2.3 深部化学信息衰减，识别难度加大

卡林型金矿床从矿体中心向外及向上，成矿与伴生元素的原生晕强度通常呈现指数式递减，例如部分矿床中砷、锑等前缘晕指示元素的异常强度，在垂直向上延伸200~300m后可能衰减至接近背景值，使来自更深部矿体的信号被掩蔽。与此同时，深部热液活动可能受到后期地质作用干扰，导致元素迁移路径变得复杂，原生晕结构变得不完整<sup>[4]</sup>。此外，在矿体头部和外围，后期蚀变、低温流体等叠加常使汞、钡等远程指示元素出现局部富集，形成与深部矿体无直接联系的“假异常”，进一步增加异常解译的多解性。

### 3 卡林型金矿床地球化学晕特征

#### 3.1 成矿元素组合明确，指示性元素特征显著

卡林型金矿床核心成矿元素为金，其多与砷、锑、汞、铊等低温元素构成特征显著的指示元素组合。砷是最重要的近矿指示元素，因其地球化学性质与金相似，常以类质同象形式进入黄铁矿等硫化物晶格之中，形成含砷黄铁矿或毒砂，成为金的主要载体矿物，因此砷异常与金矿化在空间上通常存在伴生关系。锑和汞具有较强的活动性，倾向于在矿体前缘或上部形成宽阔的分散晕，尤其汞的挥发性，使其能够迁移更远距离，对发现隐伏矿体具有早期预警意义。铊元素异常可指示特定的成矿环境与流体性质，其富集通常与低温、弱酸性、还原性成矿流体密切相关。银、铜、铅、锌等金属元素，则会在某些矿床中出现异常，但强度与规模通常远低于前述特征元素组合。

#### 3.2 地球化学晕分带性明显，垂向变化规律清晰

基于原生晕轴向分带理论，卡林型金矿床从矿体下部（尾晕）经过矿体中部（近矿晕）到矿体上部（前缘晕），指示元素组合呈现规律性的更替。通常，汞、锑、砷、钡等元素由于活动性强，倾向于在矿体上方或前缘富集，形成清晰的前缘晕。金、银、钨、铜等成矿主要元素则紧密环绕矿体本身分布，构成近矿晕。在矿体下方或尾部，则常见铋、钼、钴、镍等高温或相对惰性的元素异常，形成尾晕。这种垂向分带序列，使通过地表或浅部钻孔中采集的元素异常组合特征，能够反推深部隐伏矿体的相对位置和剥蚀水平。例如，当探测到强汞、砷、锑异常，而缺乏明显金异常时，可能指示深部存在未剥蚀的盲矿体。反之，若出现明显的铋、钼、钴异常，则可能意味着矿体已遭受较深程度的剥蚀。

#### 3.3 原生地球化学晕保存较好，异常稳定性较强

卡林型金矿床主要产于化学性质相对稳定的沉积岩系中，且成矿热液活动形成的元素赋存状态较为稳定，使原生晕在后期地质作用中不易遭受大规模的破坏。大量勘查实践表明，在未受强烈构造改造的区域，原生晕异常范围清晰，空间结构能够较完整地保存，晕的横向展布宽度可达数百米，而垂向延伸范围常能达到矿体本身高度的数倍。这种稳定性突出体现在砷、锑、汞等关键指示元素上，这些元素形成的异常模式与矿体空间关系对应性强，重现性好。因此，基于原生晕特征进行的深部矿体预测具有较高的可信度。

#### 3.4 地球化学晕与控矿构造耦合，空间一致性较强

卡林型金矿床地球化学晕与控矿构造在空间展布上具有高度的一致性，这一特征是进行勘查的重要依据。卡林型金矿床地成矿热液受断裂、裂隙带及层间破碎带等构造影响较大，故在发生元素异常时，也严格沿着这些构造通道分布。原生晕的形态、规模与强度，往往与断裂的产状、活动期次及渗透性

相关，例如在主干断裂与次级断裂交汇部位，常形成规模更大、强度更高的综合地球化学异常区。这种耦合关系在元素组合分带上具有明显的体现，构造上盘或构造引张部位更有利于前缘晕元素，如汞、砷的富集，而矿体核心相关元素组合则集中在构造面附近与转折部位，这在很大程度上可以提示存在卡林型金矿床。

### 4 卡林型金矿床深部找矿方法

#### 4.1 多元素地球化学晕识别

鉴于卡林型金矿床地球化学晕具有成矿元素组合明确的特征，故可以将多元素地球化学晕识别作为深部找矿的技术手段。勘探人员首先需要进行矿区地质结构分析，从而识别控矿因素，并评估深部矿体潜力，然后在有利区布置 100m×40m 的采样网格，采集断层泥、胶结物、角砾岩等样本，将采集样本按介质分离，并送实验室分析指示元素金、锑、汞、砷等的含量，接下来先计算背景值，此时可将异常阈值设定为背景值的 3 倍以上，如金异常大于  $10 \times 10^{-9}$ 、砷大于  $10 \times 10^{-6}$ ，使用正态分布检验筛选有效样品，并丢弃无异常样品，以放大信号差异，然后圈定内中外晕带，其中内带对应高值异常区，可以推断矿中心位置。结合主成分分析 PCA 可以识别元素相关性，例如金与砷-锑-汞呈正相关，而与氧化钾和氧化钠等围岩元素呈负相关，可以区分矿致异常和背景干扰，进一步整合地球物理测量确认深部构造薄弱带，最后根据异常模式，预测隐伏矿发生位置，并选择靶区进行钻探验证。例如黔西南者相二金矿就通过这种方法检测到弱砷异常，而无锑/汞异常，结合物探在 750~1100m 深度钻探证实矿体，并探明 28.39 吨金资源。

#### 4.2 元素分带指示深部矿体

基于卡林型金矿床地球化学晕具有清晰且规律的轴向分带特征，利用元素分带模型推断深部矿体的位置已成为一种成熟的深部找矿方法。采用这种方法找矿，需要基于典型矿床原生晕轴向分带序列建立标准模型，如黔西南地区常见序列为上部-汞-锑-铊、中部-金-砷-锑、下部-砷-金，西秦岭常见序列为前缘-砷-碲-锑-汞、近矿-银-金-铋-铅-锌-硒、尾晕-钨-钴-镍-钼-铜-镉-锰等，建立模型后在矿区开展钻孔岩心垂直采样，沿垂直方向间隔 10~50m 采集蚀变岩和矿化岩石，并分析金、砷、锑、汞、铊等关键元素含量，接下来计算元素比值和分带指数，使用乘积因子法进一步结合主成分分析 PCA，提取金-砷与汞-锑-铊两个主因子，并绘制垂直剖面异常图，以圈定分带界线，同时整合流体包裹体温度数据，验证分带，最后根据分带模式预测深部潜力。例如，若地表仅见强汞-锑弱砷异常，则深部 300m 以下存在金富集盲矿体，在黔西南水银洞金矿应用中，地表汞-锑高值区下部钻探揭示金矿体厚度大于 50m，储量超 100 吨，又如紫木函金矿浅部铊-汞异常，向下渐变为金-砷异常，指导扩展钻探新增资源 50 吨以上，这种方法相比单一

元素异常更可靠，可减少无效钻探 30%。

#### 4.3 构造—地球化学耦合找矿

鉴于卡林型金矿床地球化学晕与控矿构造在空间上具有高度耦合性，构造—地球化学耦合找矿方法可以揭示元素异常与构造格架的内在联系，从而定位深部矿体。在具体实施过程中，需要先在矿区开展地质调查，并构建包括识别背斜、断裂和层间滑动带等控矿要素的三维构造模型，以此评估深部延伸潜力，然后在构造有利区布置地球化学采样网格，优先沿断裂带和背斜轴部采集样品介质，以此捕捉弱异常信号。在样品处理过程中，除分析金、砷、锑、汞、铊等关键元素含量，还需要采用空间插值法生成元素异常等值线图，并叠加构造层，以识别耦合区。例如，断裂交汇处金-砷高值异常，对应深部矿化通道，此时可以运用主成分分析 PCA，提取构造相关因子量化耦合强度，进一步整合地球物理数据验证构造框架，并圈定耦合靶区，根据耦合模式预测深部矿体位置。例如，若背斜轴部

见金-砷异常，而翼部汞弱异常，则深部 500m 以下存在盲矿体，我国黔西南泥堡金矿就采用该方法在 800m 深度发现矿体厚度大于 30m 金矿 45 吨，妥金矿区也采用该方法在 200km<sup>2</sup> 范围内采集 1250 个样品，显示东部断层区锑-汞异常与金低值耦合，基于该方法将靶区缩小 50%，验证新增 28 吨金。

#### 5 结语

综上所述，卡林型金矿是一种有着极高开发利用价值的资源，我国的卡林型金矿床资源非常丰富。通过分析地球化学晕特征寻找卡林型金矿床已成为当前一种重要的手段。文章通过分析卡林型金矿床的地球化学晕特征，并基于相关特征提出的勘探方法，能够为勘探人员提供找矿思路，帮助其更好地缩小勘探范围。而想要提高勘探结果准确性，还需要根据特定区域的成矿原因以及特点建立高度匹配的预测模型，未来可以重点关注该方面的研究。

#### 参考文献:

- [1] 杨毓红,刘建中,刘燊,等.贵州西南部玄武岩容矿卡林型金矿床中绢云母矿物学特征、<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄及地质意义[J/OL].矿物学报,1-13[2026-01-09].
- [2] 谭代卫,谭亲平,吕晓伟,等.贵州水银洞卡林型金矿隐伏“断控型”矿体构造控矿模式及其找矿意义[J].矿物学报,2025,45(03):442-458.
- [3] 徐亮,鲜海洋,杨文淋,等.水银洞卡林型金矿载金黄铁矿含砷环带特征及砷赋存状态[J].矿物岩石,2025,45(01):55-64.
- [4] 王胜炬.卡林型金矿地质特征及找矿方向分析[J].世界有色金属,2024,(09):46-48.