第 x 卷　第 x 期　　成都理工大学学报（自然科学版）　　Vol. x　No. x
xxxx 年 x 月　　JOURNAL OF CHENGDU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY（Science & Technology Edition）　　xxx. xxxx

DOI：10.12474/cdlgzrkx.2026012001　　**期刊主页**：https://xbzrkx.cdut.edu.cn/

基于萤石高光谱和地球化学特征的锡矿床勘查模型——以赣南枫树卜锡多金属矿床为例

王　艳[1,2]，郭　娜[1,2*]，赵经纬[1,2]，李　伟[3]，连敦梅[3]，李春昊[1,2]

1. 成都理工大学，四川 成都 610059；
2. 数学地质四川省重点实验室 成都理工大学，四川 成都 610059；
3. 江西省地质局第七地质大队，江西 赣州 341000

[**摘要**] 南岭—武夷山成矿带南段是中国重要的锡多金属成矿区，区内燕山期花岗岩广泛发育，含氟热液活动强烈，致使萤石矿化作用强烈。作为富含 Sn、F 热液作用的重要产物，萤石的可见光响应受类质同象替代及晶格缺陷控制，能够记录热液体系的温度、成分及成矿演化信息。然而，目前国内外关于萤石高光谱特征与锡成矿作用之间的定量关系、物理机制及找矿应用缺乏系统研究。本研究以江西会昌县枫树卜锡多金属矿床为例，采用光谱勘查技术，结合矿物学与矿物地球化学分析，系统研究不同世代萤石的矿物—化学组成及可见光吸收峰特征，重点关注了光谱特征吸收峰位于 400 nm 附近的电子跃迁行为。研究结果表明：(1)第二世代萤石重稀土元素（如 Dy、Er、Yb、Lu）富集，反映成矿流体中 Sn-F 络合物发生分解，这一过程直接驱动了锡石的沉淀；(2)萤石 400 nm 光谱吸收峰（Pos400）随微量元素的类质同象替代及晶格畸变发生系统性偏移，其中第二世代萤石表现出明显蓝移特征；(3)Pos400 异常低值区的空间分布与锡石矿体高度吻合，该参数可作为识别富含 Sn、F 热液活动强度及成矿有利部位的关键光谱标志。据此，本文构建了基于萤石高光谱的勘查模型，经钻孔与地表样品验证，该模型可有效识别成矿热液通道、圈定成矿潜力区。本研究明确了萤石 400 nm 光谱参数在锡多金属矿床成矿阶段判别与找矿预测中的重要指示意义，为揭示锡成矿体系中萤石所记录的物质演化及高光谱快速勘查，提供了新的理论与技术支撑。

[**关键词**] 萤石；锡矿床；高光谱；枫树卜；勘查模型

[**分类号**] P618.4　　[**文献标志码**] A

Tin deposit exploration model based on fluorite hyperspectral and geochemical characteristics: A case study of the Fengshupu tin polymetallic deposit, southern Jiangxi, China

WANG Yan[1,2]，GUO Na[1,2*]，ZHAO Jingwei[1,2]，LI Wei[3]，LIAN Dunmei[3]，LI Chunhao[1,2]

收稿日期：2026-01-20；**改回日期**：2026-03-31。　　**责任编辑**：。

基金项目：江西省地勘基金（AH2024-0143）和江西省地质局青年科技带头人培养计划（2024JXDZKJRC01）的联合资助。

第一作者：王艳（2000—），女，硕士研究生，研究方向：矿产普查与勘探。E-mail: wagy012@163.com。

***通信作者**：郭娜（1979—），女，教授，研究方向：高光谱地质勘查与建模研究。E-mail: cdut_guona@126.com。

引用格式：王艳，郭娜，赵经纬，等，2026. 基于萤石高光谱和地球化学特征的锡矿床勘查模型——以赣南枫树卜锡多金属矿床为例 [J]. 成都理工大学学报（自然科学版），54(0)：1—16.

Wang Y, Guo N, Zhao J W, et al., 2026. Tin deposit exploration model based on fluorite hyperspectral and geochemical characteristics: A case study of the Fengshupu tin polymetallic deposit, southern Jiangxi, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 54(0): 1—16.

1. *Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, 610059, China*;
2. *Geomathematics Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*;
3. *Seventh Geological Brigade of Jiangxi Provincial Geological Bureau, Ganzhou 341000, Jiangxi, China*

Abstract: The southern Nanling-Wuyi area, a significant tin polymetallic belt in China, is characterized by widespread Yanshanian granites and intense fluorine-rich hydrothermal activity that have resulted in extensive fluorite mineralization. The visible-light response of fluorite is governed by isomorphic substitution and lattice defects, and thus may serve as an indicator of the temperature-composition evolution and metallogenic history of Sn-F-rich hydrothermal systems. However, systematic studies are still lacking regarding the quantitative relationships between fluorite hyperspectral characteristics and tin mineralization, the associated physical mechanisms, and their exploration applications. Taking the Fengshupu tin polymetallic deposit in Huichang County, Jiangxi Province, as a case study, we integrated spectral prospecting with mineralogical observations and mineral geochemical analyses to investigate the mineral-chemical compositions and absorption features of fluorite from different generations, with particular emphasis on electronic transitions responsible for the diagnostic absorption feature near 400 nm. The results show that (1) ore-stage fluorite is enriched in heavy rare earth elements (e.g., Dy, Er, Yb, and Lu), reflecting the breakdown of Sn-F complexes in the mineralizing fluid, which directly promotes cassiterite precipitation; (2) the position of the 400 nm absorption feature (Pos400) shifts systematically with trace-element isomorphic substitution and lattice distortion, and ore-stage fluorite exhibits a pronounced blue shift; and (3) zones with anomalously low Pos400 values spatially coincide with cassiterite orebodies, indicating that Pos400 can be used as a key spectral marker to assess the intensity of Sn-F-rich hydrothermal activity and delineate favorable mineralization sites. On this basis, a fluorite hyperspectral exploration model was constructed and validated using drill-core and surface samples, demonstrating its effectiveness in tracing ore-forming hydrothermal pathways and delineating prospective targets. Overall, this study highlights the diagnostic value of fluorite spectral parameters near 400 nm for mineralization-stage discrimination and exploration targeting in tin polymetallic deposits, and provides new theoretical and technical support for understanding the material evolution recorded by fluorite in tin metallogenic systems and for rapid hyperspectral exploration.

Key words: fluorite; tin deposit; hyperspectral; Fengshupu; exploration model

萤石多以脉状、透镜状及浸染状等形态产出，主要成分为 CaF_2。其中 Ca^{2+}常被 Y、Mg、Sn 等元素替代，并可混入少量 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3 及有机质等杂质成分(刘宁，2021; Atta et al., 2024)。围绕萤石的标型特征(马媛，2018; Svetova et al., 2023)、颜色及致色机理(杨育富, 2019; Almohammed et al., 2024)、地球化学(Yuan et al., 2008; 曹华文等，2016; 方乙等，2024; Chen et al., 2025)、流体包裹体研究(邓小华等，2009; 李阳等，2020; 王启博等，2023; 刘道荣和商朋强，2024; You et al., 2025)及 H-O 同位素(刘天航等，2024; 张栋梁等，2024)和 Sm-Nd 测年(杨世文等，2019; Liu et al., 2025)等方面，国内外学者已开展了较为系统的研究，取得了重要认识。近年来，短波红外光谱技术已广泛应用于蚀变矿物识别与矿化研究(李兵院等，2024; 郭娜等，2025)。在锡矿床研究中，已有学者提出利用与锡石紧密共生且具有短波红外响应特征的萤石开展高光谱识别研究(Tuşa et al., 2020)。国内在萤石光谱特征表征及机理分析方面也已取得一定进展(Ge et al., 2022; Ye and Bai, 2022; 曲直等，2025; 邢志芬等，2025)。总体来看，萤石在示踪成矿流体来源、演化过程及成矿环境方面具有重要地质意义，但其光谱特征与锡成矿过程之间的定量耦合关系仍缺乏深入探讨。

南岭—武夷山南段是中国重要的锡多金属成矿区之一，区内燕山期花岗质岩浆活动强烈，广泛发育富 F 花岗岩，并伴随频繁且多期次的热液活动。已有研究表明，富 F 流体有利于锡的迁移与富集，并在岩体外接触带或构造通道附近形成以萤石化为代表的蚀变矿化组合，使萤石成为 Sn-F 热液体系演化过程的重要记录体与潜在找矿指示矿物(Di et al., 2025; Ma et al., 2025)。赣南地区位于南岭成矿带东段与武夷山成矿带交汇部位，其锡坑迳锡矿田已发现岩背锡矿、淘锡

坝锡矿、凤凰岽锡矿、苦竹岽锡矿、上湾矿点、荣荆坝矿点等多处锡矿床（点），主要围绕密坑山岩体分布，区域内锡多金属矿床的形成往往伴随显著的萤石化，这为深入探讨萤石作为锡矿床指示矿物的应用价值提供了重要依据。

枫树卜锡多金属矿床地处江西省赣州市会昌县，区内燕山期富氟花岗岩广泛发育，其外接触带萤石化、绢云母化和绿泥石化等蚀变作用强烈，是研究 Sn-F 热液体系演化与萤石光谱响应特征的理想区域。其中萤石具有显著的多期次性和分带性，矿物结构清晰，产状稳定，这为开展萤石光谱特征与成矿过程之间的关系研究提供了良好地质条件。

本研究围绕 Sn-F 热液体系演化过程中萤石微量元素组成、晶体结构缺陷与可见光吸收特征之间的关系展开，重点探讨不同世代萤石 Pos400 光谱参数的差异及其对锡矿化有利部位的指示作用。综合钻孔编录、矿物学分析、LA-ICP-MS 微量元素测试及实验室高光谱测量，构建了萤石光谱与锡成矿过程的耦合关系模型，并在枫树卜矿床开展了深边部找矿潜力预测与验证。研究成果可为揭示 Sn-F 热液体系的成矿机制及萤石主控型锡多金属矿床的光谱找矿方法提供新的认识和技术支撑。

1　地质概况

枫树卜锡多金属矿床位于江西省赣州市会昌县境内，其大地构造位置处于钦杭结合带东南侧的华夏板块，位于武夷山南段稀有金属-锡钨成矿带西缘（彭琳琳等，2020）（图 1-A），隶属于石城—寻乌北北东向断裂带与会昌环状构造的复合部位（彭琳琳，2019）（图 1-B）。区域内广泛出露震旦系—三叠系沉积地层，自晚中生代以来经历了强烈的构造-岩浆活动，为锡多金属成矿提供了有利的地质背景（郭志强等，2024）。燕山期早白垩世密坑山复式岩体的多期侵入，其中高分

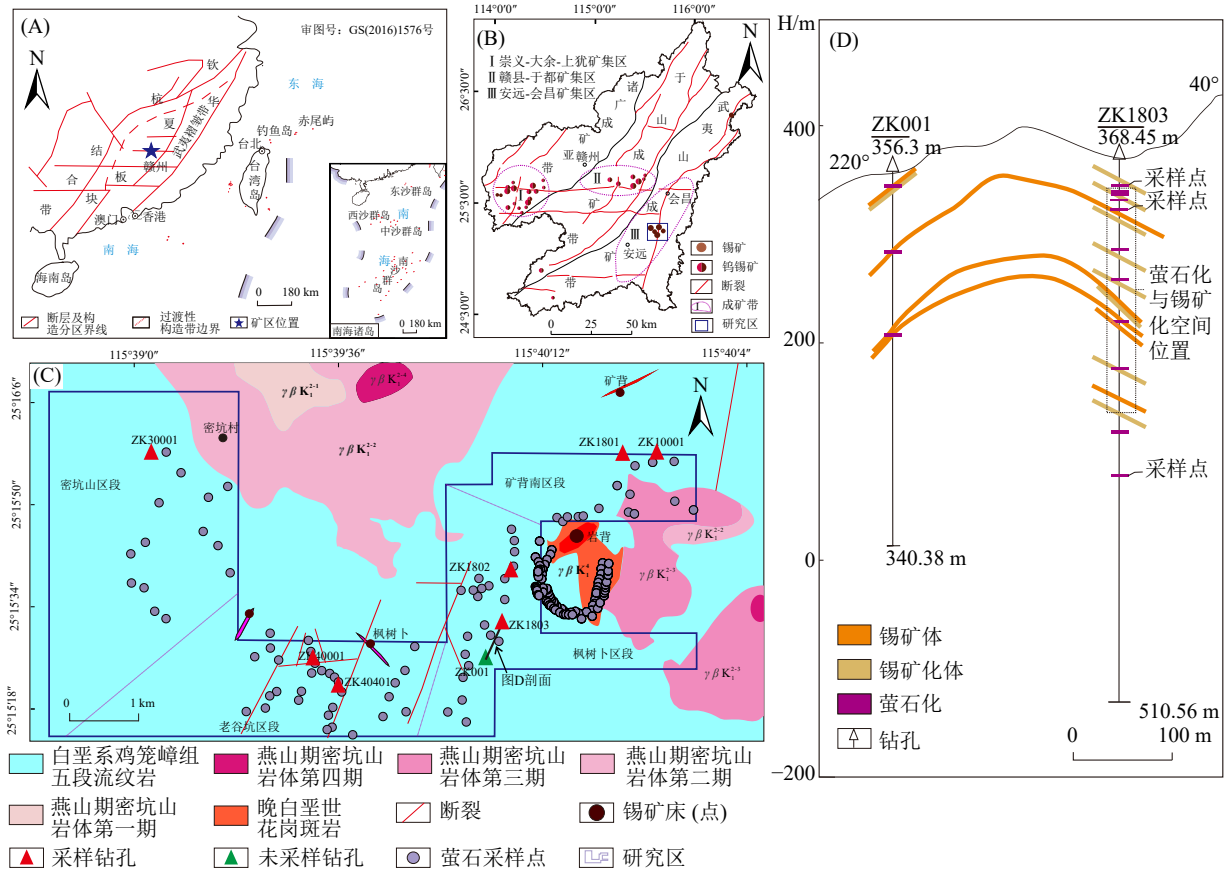


图 1　研究区地质背景与矿区剖面图

Fig. 1　Geological background and a cross-section of the Fengshupu mining area

（A）华南大地构造简图（据游超等，2022 修改）；（B）江西省锡多金属矿集区分布图（据秦锦华等，2024 修改）；（C）枫树卜多金属矿区区域地质简图（据江西省地质局第七地质大队，2022 修改）；（D）矿区典型 NE 向剖面图

异、富 F 的花岗质岩浆作用被认为是区内锡多金属成矿的主要物质来源和热动力来源(Liu et al., 2022; 倪培等, 2023)。

矿区出露地层以白垩系鸡笼嶂组酸性火山岩和河口组碎屑岩为主,其中鸡笼嶂组火山岩是锡矿化的主要赋矿围岩(邱检生等, 2005; 孙社良等, 2016)(图 1-C)。构造发育,以 NNE 向、EW 向及 NW 向断裂为主,多组断裂相互交织,构成复杂的构造网络体系,为 Sn-F 热液的运移、聚集与沉淀提供了有利通道(徐贻赣等, 2001)。区内岩浆岩以密坑山岩体为主体,表现出明显的多期侵入特征,其中第二期巨斑状中粗粒黑云母花岗岩与第四期细粒花岗岩、花岗斑岩的叠置部位对主要锡矿体的空间展布具有重要控制作用(熊明福, 2020)。

矿床可划分为枫树卜、老谷坑、矿背南及密坑村四个矿化段。锡矿体主要赋存于花岗岩体与鸡笼嶂组火山岩的内、外接触带内,呈脉状、细脉浸染状产出。矿石矿物以锡石和硫化物为主,主要包括锡石、黄铁矿、闪锌矿和方铅矿;脉石矿物以石英、萤石、黄玉、绿泥石和绢云母为主。矿区热液蚀变极为发育,其中萤石化、绢云母化及绿泥石化最为典型,且在空间上与锡矿化关系密切(图 1-D)。

萤石作为富 F 热液体系中最常见的结晶产物,在矿区内广泛发育,呈脉状、网脉状、浸染状及不规则脉网状,主要充填于构造破碎带及岩体边部裂隙中(邓迪等, 2024)。矿区萤石具有多期次形成、分带结构清晰及产状稳定等特征,是指示成矿流体演化过程的理想矿物载体。因此,萤石作为记录 Sn-F 热液体系演化过程的重要矿物载体,其光谱特征对成矿阶段判别及锡成矿有利区圈定具有重要指示意义(Bühn et al., 2003)。

2 样品采集与测量

2.1 样品采集

本研究基于枫树卜矿区典型钻孔及地表矿化露头,共采集岩石与岩心样品 1 800 余件,用于矿区—钻孔尺度的系统编录和蚀变矿化分带识别等。采样过程中综合考虑萤石的产状、颜色、透明度、包裹体组合特征及与锡石的共生关系,对萤石进行系统分选与对比,最终将其划分为三个世代(F_1 世代、F_2 世代、F_3 世代)。在此基础上,从不同世代中选取具有代表性的萤石样品用于薄片制备、LA-ICP-MS 微量元素分析及实验室高光谱测试,以保证不同世代萤石在矿物学特征、地球化学组成及光谱参数上的对比一致性与可靠性。

2.2 高光谱测量与数据预处理

萤石高光谱测试在室内条件下进行,短波红外(SWIR)光谱测试采用南京地质调查中心研制的 CSD350B 便携式地物光谱仪。仪器光谱覆盖范围为 350～2 500 nm,涵盖可见光-近红外光(VIS-NIR)波段,在 350～950 nm 波段的光谱分辨率为 3～4 nm,在 950～2 500 nm 波段的光谱分辨率为 7～10 nm,测试采用配套的接触式反射探头及内置卤素钨灯主动光源,以避免大气辐射和外界光照条件变化对测量结果的影响。热红外(TIR)光谱测试采用 Agilent Technologies 4300 手持式傅里叶变换红外光谱仪,覆盖 2 500～15 500 nm 波段。

测试前对样品进行清洗和自然晾干,测量时选取新鲜、平整的岩石接触面进行光谱采集,以减少表面污染和风化对光谱特征的干扰。每个样品在相同测试条件下进行多点测量并取平均值,以提高光谱数据的稳定性和代表性。光谱数据处理采用澳大利亚 CSIRO 开发的 The Spectral Geologist (TSG)V.8 软件进行自动化解译,并对解译结果进行人工校验,剔除低信噪比和低可信度的结果。通过光谱助手(The Spectral Assistant, TSA)运用马氏距离算法(针对纯矿物)和统计方法(针对混合矿物)进行光谱匹配,构建不超过三种矿物的对数线性混合模型以最佳拟合样品光谱(Ross et al., 2019)。对于混合光谱,若第二或第三种矿物的权重低于 15%,则判定该光谱为近似纯矿物光谱。通过计算标准化残差平方和(SRSS)值评估拟合质量,分值越低表明拟合效果越佳。在分析参数之前,还需评估混合矿物对参数的影响。参数采集设置遵循 Chang and Yang(2012)中的指导原则。

2.3 岩相学观察与光学显微镜鉴定

根据野外地质编录、手标本鉴定及高光谱测试结果,对萤石样品的具体取样位置进行标记,并制备尺寸为 35 mm×25 mm,厚度约 0.03 mm 的标准薄片。矿物学观察与岩相学鉴定工作在成都理工大学矿物学实验室完成。对萤石手标本

的生长分带、裂隙充填特征及与锡石等矿物的共生组合进行系统识别，为后续光谱特征解释和成矿阶段划分提供矿物学约束。薄片镜下鉴定采用徕卡 DM2500P 偏光显微镜系统，对萤石和锡石及其他共(伴)生矿物的颜色、粒径、结构、构造等进行综合鉴定，为萤石世代划分及其成矿分析提供岩相学证据。

2.4　萤石 LA-ICP-MS 原位微量元素测试

萤石原位微量元素分析在广州市拓岩检测技术有限公司完成，采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)系统。实验室使用凯来 GeneisGEO 飞秒激光剥蚀系统与赛默飞 TQ 四极杆 ICP-MS 联用，激光束斑直径为 50 μm，重复频率为 2 Hz，单点剥蚀时间为 40 s，能量密度约为 3.5 J/cm^2。剥蚀过程中以 He 为载气、Ar 为补偿气，以保证信号稳定性和分析灵敏度。

测试过程中采用 NIST SRM 610 和 BHVO-2G 玻璃标准物质进行多外标总量归一法校正(Liu et al., 2008)，并以 BCR-2G 作为监控标准样品(Jochum et al., 2011; Wu et al., 2019)。分析结果的相对误差为 1σ，准确度优于 10%，微量元素检测限(LOD)为 0.01～0.1 ppm。每个时间分辨分析数据包括约 45 s 空白信号和 40 s 样品信号。数据的离线处理(包括信号筛选、仪器漂移校正及元素含量计算)采用 ICPMSDATACal 软件完成。测试元素主要包括 Sn 及一系列稀土元素(La～Lu)，用于探讨萤石类质同象替代机制及不同成矿阶段之间的差异。

2.5　空间数据整理与矿体对比分析

萤石可见光高光谱数据分析采用 TSG 软件进行处理，通过导入文本格式光谱文件完成特征波段提取。利用 Origin 软件对典型光谱参数(Pos400)进行统计分析。在此基础上，利用 ArcGIS 和 Leapfrog 软件构建了矿区三维矿体模型，并将萤石样品光谱参数(Pos400)与锡矿体空间分布进行空间叠加分析，验证了光谱异常与矿体空间展布的一致性。

3　分析结果

3.1　萤石世代划分及矿物学特征

在研究区含矿岩体与无矿岩体中系统采集了萤石样品。手标本中萤石多呈无色、淡紫色和深紫色，粒状结构，玻璃光泽(图 2-A～C)。无矿岩体中萤石以自形-半自形晶粒为主，围岩蚀变较弱，仅局部发育绢云母化和绿泥石化；含矿岩体中萤石明显受热液改造，常沿裂隙或脉体产出与锡石、黄铜矿、黄铁矿和闪锌矿等硫化物伴生。

显微观察显示，萤石在单偏光下多为无色至紫色，负中-高突起，无明显干涉色，具低双折射的等轴晶系特征(图 2-D～F)。根据萤石与石英、绿泥石及锡石等硫化物的共生关系和切割-充填特征，可识别出三期萤石晶出世代(黄常立等，1997)：(1)第一世代(F_1)萤石：多呈无色-淡紫色，自形-半自形，条带状产出，主要与石英共生，发育于石英脉及花岗岩接触带中(图 2-A、D、G)，形成于岩浆热液阶段初期的弱富 F 热液环境，代表成矿前；(2)第二世代(F_2)萤石：成矿主阶段产物，多呈淡紫色，细脉状或浸染状产出，与锡石及黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿等硫化物密切共生(图 2-B、E、H)，在空间上与锡矿体分布高度一致；(3)第三世代(F_3)萤石：形成于中-低温热液阶段，呈深紫色，细粒或不规则斑块状，主要与绢云母和绿泥石等低温蚀变矿物共生，基本不含锡石等金属矿物(图 2-C、F、I)。总体上，无矿岩体以 F_1 和 F_3 世代萤石为主，含矿岩体中 F_2 世代萤石最为发育，反映了矿区热液活动的阶段性演化特征。

3.2　萤石空间分布及 Pos400 差异特征

对研究区 7 个钻孔(钻孔 ZK1801、ZK1802、ZK1803、ZK10001、ZK30001、ZK40001、ZK40401)开展高光谱测量。短波红外波段主要识别出绢(白)云母、绿泥石、黄玉、萤石及少量高岭石；热红外波段识别出石英、长石、蛇纹石及少量滑石。以钻孔 ZK1801 为例，自上而下穿透了花岗岩、辉绿玢岩和凝灰岩。结合光谱解译与钻孔编录，蚀变矿物组合自浅至深表现为(图 3)：绢(白)云母+高岭石→绢(白)云母+绿泥石+黄玉+萤石→绢(白)云母+石英+长石。锡矿体赋存于绢(白)云母+绿泥石+黄玉+萤石蚀变带内，位于距地表 170 m 的花岗岩中，萤石分布与锡矿体位置具有显著空间一致性。

萤石手标本光谱在 380 nm、400 nm、420 nm 附近均出现稳定吸收特征。不同岩体中萤石光谱整体形态相似，但 400 nm 附近吸收峰位置(Pos400)存在系统差异(图 4-A)。含矿岩体中萤石的 Pos400 整体向短波方向偏移(蓝移)，主要分

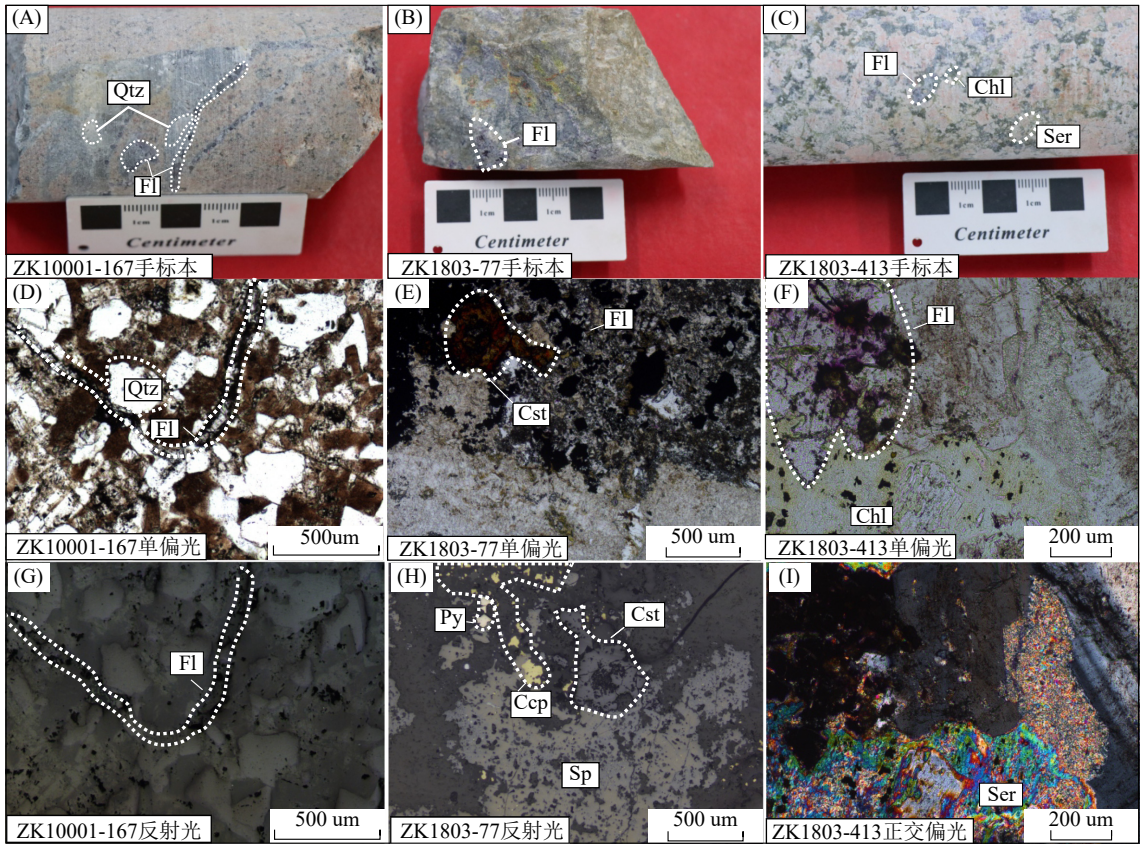


图 2 枫树卜研究区矿物典型照片

Fig. 2 Photographs of minerals from the Fengshupu deposit

(A)第一世代萤石手标本照片;(B)第二世代萤石手标本照片;(C)第三世代萤石手标本照片;(D)条带状萤石与他形石英单偏光照片;(E)红褐色玫瑰状锡石与浸染状萤石单偏光照片;(F)萤石与绿泥石单偏光照片;(G)条带状萤石反射光照片;(H)玫瑰状锡石+滴状黄铜矿+滴状黄铁矿+闪锌矿反射光照片;(I)绢云母正交偏光照片。Cst-锡石;Py-黄铁矿;Ccp-黄铜矿;Sp-闪锌矿;Ser-绢云母;Fl-萤石;Chl-绿泥石;Qtz-石英。

布于 395～402 nm; 无矿岩体中萤石的 Pos400 则向长波方向偏移(红移),集中于 403～407 nm(图 4-B)。

3.3 萤石微量元素分析

萤石 LA-ICP-MS 原位微量元素分析结果统计见表 1,原始数据见附件表 1。萤石 ΣREE 含量变化范围为 11.64×10^{-6}～$1\,782.27\times10^{-6}$,平均值为 479.35×10^{-6}; LREE 含量为 2.55×10^{-6}～$1\,726.54\times10^{-6}$, HREE 含量为 9.09×10^{-6}～436.06×10^{-6}, LREE/HREE 比值介于 0.08～30.98, $(La/Yb)_n$ 为 0.03～80.58,指示萤石在不同阶段形成过程中经历了显著的稀土分馏。

不同世代萤石稀土特征存在明显差异(图 5): F_1 世代萤石 ΣREE 为 131.76～555.66×10^{-6}, LREE/HREE 接近 1,稀土配分曲线平坦,具显著 Eu 负异常(δEu=0.019～0.05),无 Ce 异常,锡含量极低,代表成矿前热液阶段。F_2 世代萤石 ΣREE 变化幅度大(11.635～$1\,782.27\times10^{-6}$), LREE/HREE 平均值为 4.55, $(La/Yb)_n$ 显著升高,稀土配分曲线总体呈左倾型, Eu 负异常明显(δEu=0.02～0.32),锡含量高,反映主成矿阶段 Sn-F 热液体系具有较强的稀土分异能力。F_3 世代萤石 ΣREE 整体处于高值(1 771.89～$1\,774.28\times10^{-6}$), LREE 显著富集,配分曲线右倾, Eu 负异常最为明显(δEu=0.005～0.017),锡含量较低,指示低温流体演化阶段稀土元素在萤石中的再富集过程。球粒陨石标准化的 REE 配分模式(图 5-A、B)进一步表明,不同世代萤石在稀土富集程度和分馏方式上具有系统性差异。

4 讨论

4.1 萤石 REE 特征与 Sn-F 热液演化的协同响应

不同世代萤石稀土元素(REE)含量及配分型式具有显著差异,为系统解析 Sn-F 热液体系的演

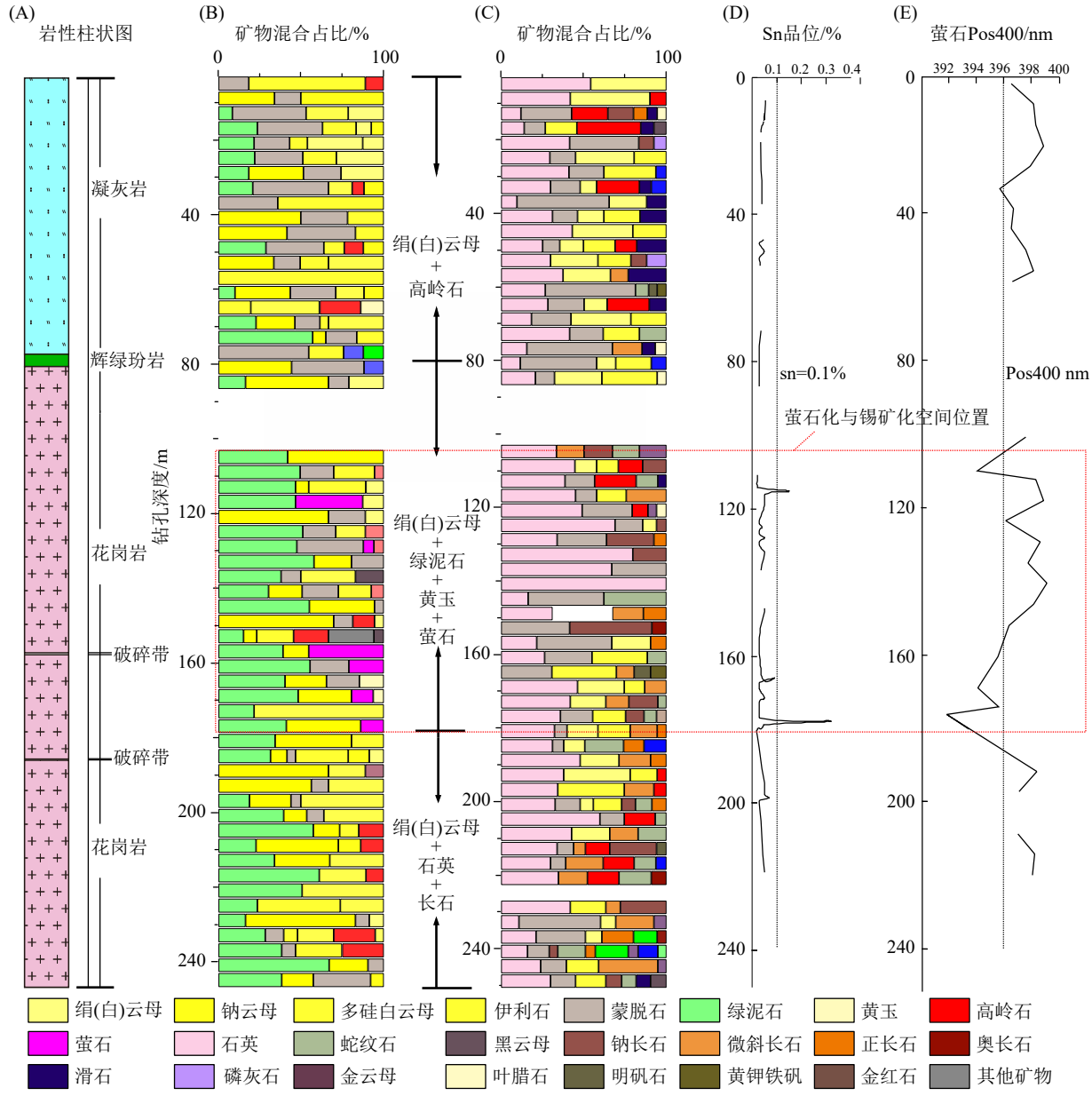


图 3　ZK1801 钻孔尺度蚀变—矿化—光谱参数综合剖面图

Fig. 3　Comprehensive profiles of alteration, mineralization, and spectral parameters for drill hole ZK1801

（A）钻孔 ZK1801 岩性柱状图；（B）短波红外蚀变矿物分布图；（C）热红外蚀变矿物分布图；（D）Sn 品位—深度关系变化折线图；（E）萤石 Pos400 特征吸收峰位置–深度关系变化折线图

化过程提供了重要地球化学约束（Ghaedi et al., 2023）。研究区表现出典型的岩浆后期富 Sn、F 高演化热液成矿特征，萤石中 REE 的配分行为实质上记录了 Sn-F 络合物稳定性变化及成矿体系由富集到衰减的演化过程（Staebler and Schnatterly, 1971; Schwinn and Markl, 2005）。

第一世代萤石 REE 配分曲线整体较为平坦，ΣREE 含量较低，表明其形成于 Sn-F 络合物相对稳定的成矿前期热液阶段（许若潮等，2022）。在该阶段，Sn 及 REE 主要以氟络合物形式滞留于流体中，仅有少量 REE 以类质同象方式进入萤石晶格，显示出弱分异、低富集 REE 的特征。

第二世代萤石表现出明显左倾型 REE 配分特征，并伴随 ΣREE 含量升高，反映出成矿期 Sn-F 热液体系的显著演化。随着流体温度降低及化学条件变化，Sn-F 络合物发生解体，锡以锡石（SnO_2）形式大量沉淀，而部分 REE 被释放并进入萤石晶格中。由于 LREE-F 络合物的稳定性普遍

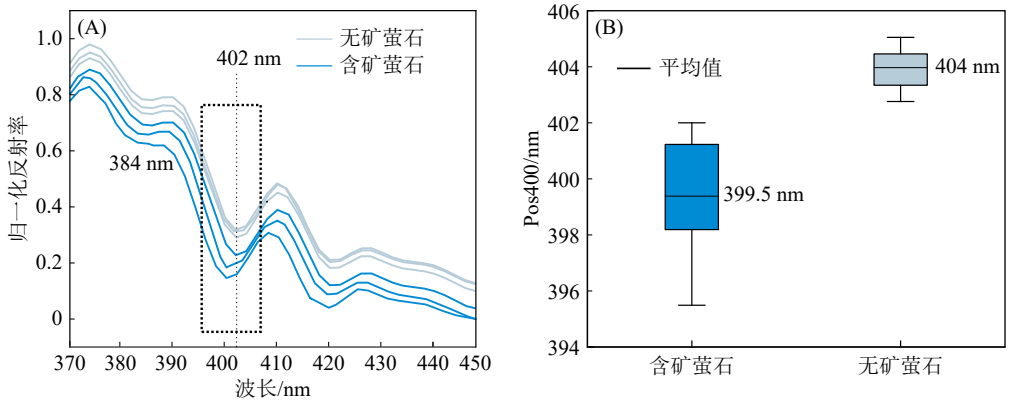


图 4 含矿岩体与无矿岩体中萤石可见光光谱特征及 Pos400 吸收位置对比

Fig. 4 Comparison of visible light spectral characteristics and Pos400 absorption wavelength of fluorite between ore-bearing and barren rock masses

(A)含矿岩体中萤石与无矿岩体中萤石可见光光谱曲线;(B)含矿岩体中萤石与无矿岩体中萤石 Pos400 吸收位置箱线图

表 1 枫树卜矿区不同世代萤石矿物微量元素判别参数统计特征

Table 1 Statistical characteristics of trace element discriminant parameters of fluorite minerals in different generations in Fengshubu mining area

萤石世代	F_1	F_2	F_3
n	5	8	2
ΣREE ($\times10^{-6}$)	131.76～555.66(269.45)	11.64～1 782.27(287.11)	1 771.89～1 774.28(1 773.09)
LREE/HREE	0.25～2.18(1.02)	0.08～30.98(4.55)	10.85～19.91(15.38)
$(La/Yb)_n$	0.10～1.75(0.70)	0.03～80.58(10.48)	4.19～39.87(22.03)
δEu($\times10^{-6}$)	0.019～0.050(0.030)	0.020～0.32(0.12)	0.005～0.017(0.01)
δCe($\times10^{-6}$)	0.89～1.17(1.03)	0.90～1.19(1.02)	0.68～1.96(1.32)
Sn($\times10^{-6}$)	极低	高	低
Pos400(nm)	403～407	395～402	404～406

注：括号内为平均值。

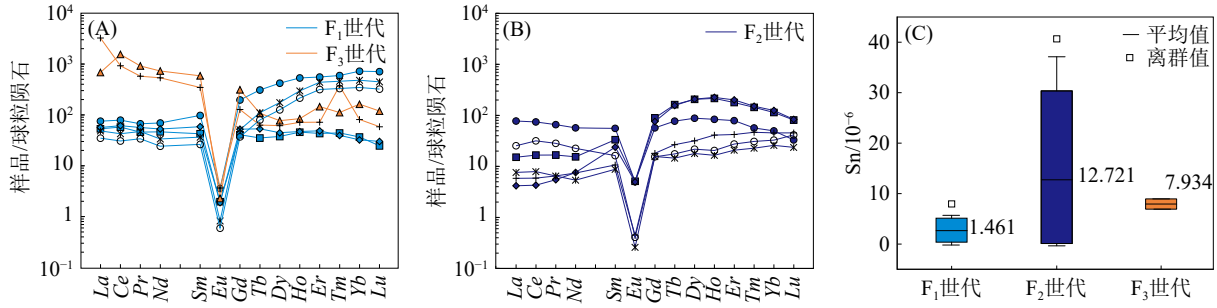


图 5 不同世代萤石稀土元素配分特征及 Sn 元素含量差异

Fig. 5 The distribution characteristics of rare earth elements and the difference of Sn content in fluorite from different generations

(A)F_1、F_3 世代萤石稀土元素配分模式图;(B)F_2 世代萤石稀土元素配分模式图;(C)F_1、F_2 及 F_3 世代萤石 Sn 元素特征箱状图

高于 HREE，在流体演化过程中 HREE 更易保持迁移状态，而 HREE 相对优先进入萤石晶格，从而形成 HREE 相对富集、LREE 相对亏损的左倾型配分模式(许成等，2001)。该阶段萤石的 REE 特征与锡矿化空间分布高度一致，指示其为锡成矿作用的关键阶段记录。

第三世代萤石 REE 配分型式由左倾转变为右倾，并伴随 ΣREE 含量的波动，反映出成矿体系进入晚期低温、低 F 活度的衰减阶段。在该阶段，Sn-F 络合物已基本解体，锡矿化作用显著减

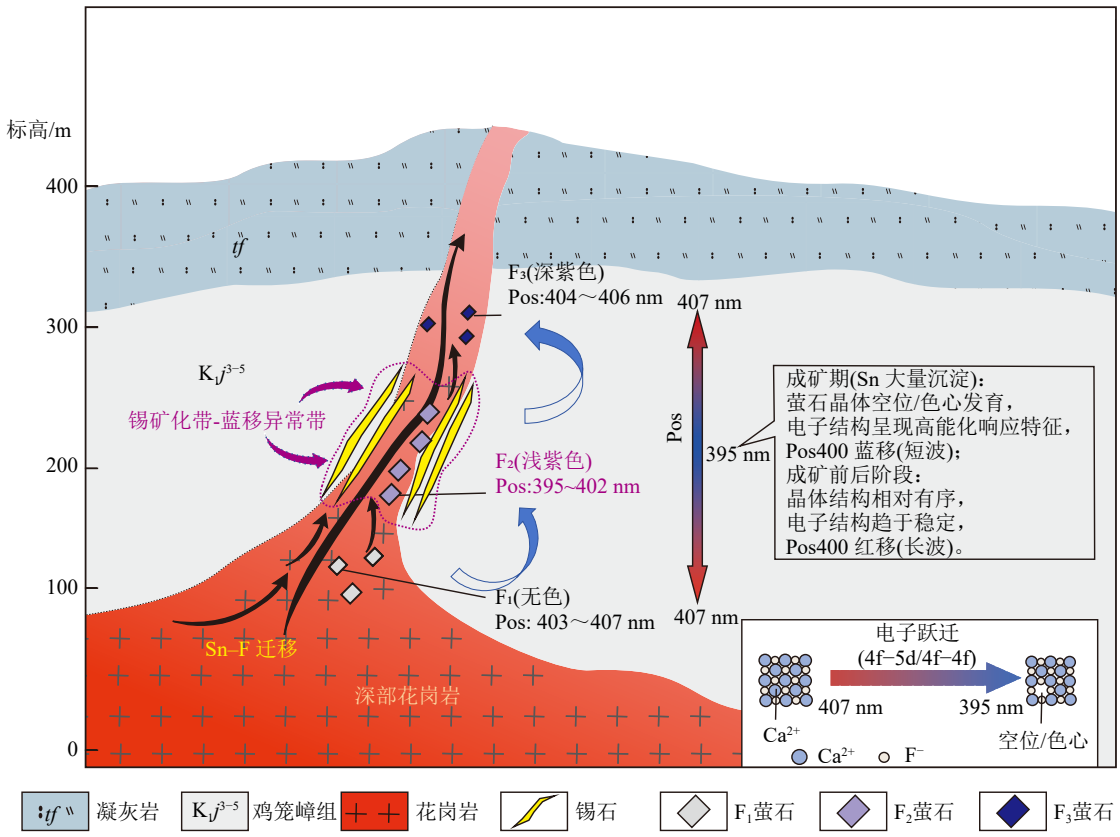


图 6　枫树卜锡多金属矿床勘查模型图

Fig. 6　Fengshupu tin polymetallic deposit exploration model diagram

弱，热液体系中 REE 发生重新分配与选择性富集。HREE 在前期成矿过程中已大量消耗，剩余流体中 LREE 相对富集，并在低温条件下优先进入萤石晶格，形成右倾型 REE 配分特征。该现象并非物源变化所致，而是 Sn-F 热液体系由主成矿阶段向衰减，再到平衡阶段演化的重要地球化学特征（邹灏等，2014）。

综合分析表明，萤石中 REE 配分特征与 Sn-F 热液演化过程具有显著的协同响应关系：REE 在萤石中的富集与分异滞后于 Sn 的沉淀过程，能够稳定记录成矿体系的演化轨迹（Heinrich, 1990；余雪戈等，2018）。不同世代萤石 REE 配分型式的系统变化，不仅为成矿阶段划分提供了可靠依据，也为判识锡矿化强弱及成矿有利部位提供了重要的地球化学指示（王国芝等，2003）。

4.2　高光谱勘查模型构建与勘查指示意义

4.2.1　不同萤石世代的光谱参数对成矿阶段的响应机制

本研究表明，不同成矿阶段萤石在 400 nm 附近表现出不同的吸收峰位差异，不仅反映出矿物晶体内部微量元素的变化特征，更实质性记录了 Sn-F 热液体系的演化状态。已有研究表明，在岩浆−热液体系中，F 具有富集于高分异阶段并进入流体相的倾向，在改变熔体/流体的物理化学性质及配位化学过程，显著影响锡等金属的迁移、富集与沉淀窗口（Ding et al., 2022；刘金宇等，2024；马星华等，2025）。萤石的大量发育指示研究区成矿作用发生于富氟热液环境中，而 F 在锡成矿过程中既是重要的络合剂，也是控制锡迁移、富集与沉淀的关键因素（林芳梅等，2015）。

理想氟化钙（CaF_2）晶体结构中 Ca^{2+} 与 F^- 规则占位，本身在可见光波段缺乏显著的选择性吸收。天然萤石出现的可见光吸收特征，主要与热液成矿过程中形成的晶格缺陷及微量元素有关（许丽丽，2024）。在 Sn-F 热液体系中，Sn^{2+}、REE^{3+} 及 Cu^{2+}、W^{6+} 等金属离子以络合形式在流体中迁移，其金属离子半径与 Ca^{2+}（1.06 Å）相近，且具有相似的结晶化学行为，易在萤石结晶过程中进入晶格发生类质同象替代。

随着 Sn-F 络合物在热液演化过程中逐渐趋

于不稳定,部分 Sn 以锡石形式沉淀,而残余 Sn 及伴生 REE 被萤石晶格俘获,破坏了原有萤石晶体场的局部电性平衡。为维持晶体电中性,晶格中形成离子空位并俘获电子,进而产生色心(F-center)(李久明等, 2006; 郑仁基, 2019)。这些色心不仅改变了局部电子结构,也显著增强了 REE^{3+}(如 Ce^{3+}、Pr^{3+}、Nd^{3+})及 Sn^{2+}等异位离子的晶场效应。

在色心与微量元素协同作用下,萤石晶格中发生 4f–5d 或 4f–4f 电子跃迁,在 400 nm 附近形成可识别的吸收峰,其峰位与强度受局部晶体场强度、配位环境及流体物理化学条件(如温度、氧逸度及 F 活度)的共同控制(何涌和王艳林, 1995; Trinkler et al., 2005; Kato et al., 2022)。因此,萤石 Pos400 吸收峰的蓝移或红移,实质上是 Sn-F 热液体系由稳定络合向失稳沉淀转变的重要指示(王焕鑫, 2022; 沈金祥等, 2024)。

成矿有利阶段,形成 Pos400 波长蓝移的吸收特征;成矿作用减弱或非成矿阶段,热液体系中 Sn 活度降低,萤石晶格中微量元素掺杂效应减弱,吸收峰向长波方向偏移。由此,萤石可见光吸收特征不仅是晶体结构变化的光谱响应,更是 Sn-F 成矿体系演化过程的综合记录,可为锡矿成矿阶段判别与找矿预测提供指示参数。基于萤石光谱特征与微量元素、稀土元素配分特征的综合分析,本研究明确揭示了不同世代萤石 Pos400 光谱参数对 Sn-F 热液成矿阶段的系统响应关系(图 6)。深部花岗质岩浆释放的富 Sn-F 热液在向上迁移与演化过程中,依次形成 F_1、F_2 及 F_3 三个萤石世代,其 Pos400 参数呈现出具有阶段指示意义的规律性变化。

F_1 世代萤石(无色)对应 Pos400 值 403～407 nm,表现为长波特征,指示 Sn-F 络合物在热液中处于相对稳定状态,Sn 尚未发生有效沉淀,因此未形成显著锡矿化(孙祥等, 2008)。随着热液系统进入成矿主期,F_2 世代萤石(浅紫色)中 Pos400 值发生显著蓝移,集中于 395～402 nm。这一变化与 Sn-F 络合物的不稳定化及锡石沉淀过程在时间上高度同步,反映了成矿体系中 Sn 富集与沉淀效率达到峰值的阶段(王丹等, 2025)。至 F_3 世代(深紫色),Pos400 值再次向长波方向回移(404～406 nm),指示热液活动减弱、成矿过程逐步终止。

这一 Pos400 的阶段性变化并非简单的光谱现象,而是受控于萤石晶体化学结构在成矿过程中的系统演变。成矿主期中,REE^{3+}/Sn^{2+}对 Ca^{2+}的类质同象替代增强(邹灏等, 2016),并伴随晶格空位与色心的形成,诱发电子结构调整与迁移(图 6 右侧),最终导致可见光吸收峰向短波方向偏移。因此,Pos400 的“蓝移区间(395～402 nm)”实质上记录了 Sn-F 热液体系由稳定络合向金属沉淀转化的关键过程,是锡成矿作用的直接矿物学响应。

4.2.2 萤石 Pos400 光谱参数的找矿指示意义与预测能力

上述机制使 Pos400 成为兼具成矿阶段判识与空间指示能力的关键光谱参数。三维空间分析结果表明(图 7),Pos400 值集中于 395～402 nm 的萤石在空间上与已探明锡矿体高度重合,并呈现良好的连续性,指示该区间对应成矿主期 F_2 世代萤石的发育范围。相比之下,当 Pos400 值偏离该区间(<395 nm 或>402 nm)时,萤石多分布于矿体外围或成矿体系边缘部位,锡矿化明显减弱,反映热液体系已处于弱成矿或非成矿阶段(Duan et al., 2020)。这一规律表明,Pos400 蓝移并非仅是矿体附近的伴生现象,而是成矿热液通道及其高效成矿区的直接示踪信号。通过对萤石 Pos400 参数的原位或高密度测定,可以快速区分不同成矿阶段的萤石分布,并有效约束富 Sn 成矿热液的空间展布,从而为锡多金属矿床的靶区优选提供直接、可量化的判据。

4.2.3 勘查模型构建、验证及其普适性

在上述认识基础上,本研究以萤石 Pos400 蓝移异常作为核心约束参数,结合岩体接触带、断裂构造交汇部位及萤石异常分布特征,在研究区构建了基于 Leapfrog 和 ArcGIS 平台的三维成矿预测模型(图 7、图 8-A)。模型预测结果圈定出两个 Pos400 值集中于 395～402 nm 的短波异常区,其空间位置与区域性构造带及密坑山岩体二期侵入体边部高度叠加,显示出显著的成矿潜力。

后续钻孔工程验证结果(图 8-B)进一步证实了该模型的有效性,这种预测结果与实际工程揭露之间的高度一致性,表明基于 Pos400 光谱参数的成矿预测具有良好的可靠性和可操作性。

从更广泛的角度看,该模型的核心在于“矿物晶体化学—光谱响应—成矿过程”的耦合关系,其适用性并不局限于单一矿床。对于以萤石

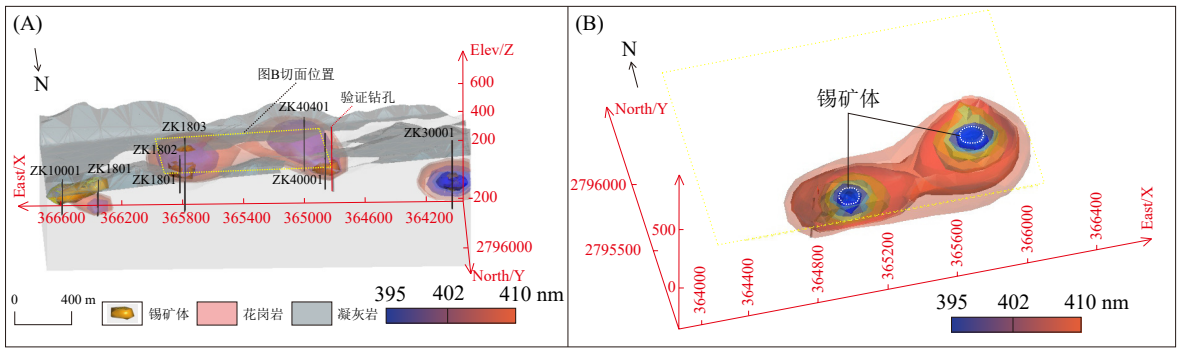


图 7　研究区萤石与锡矿体空间赋存关系三维模型

Fig. 7　Three-dimensional model of spatial occurrence relationship between fluorite and tin mineralization in the study area

（A）萤石与锡矿体空间赋存关系三维模型；（B）萤石与锡矿体三维变化切面示意图

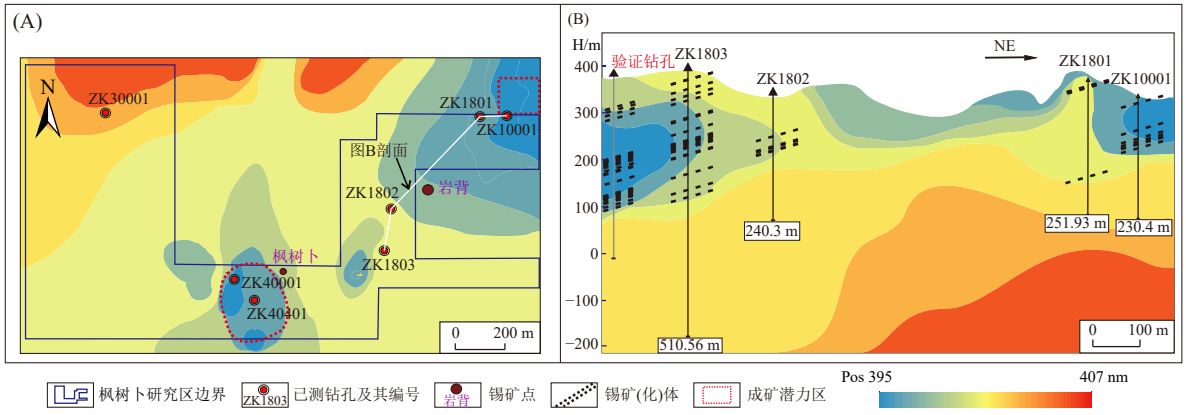


图 8　研究区萤石 Pos400 特征吸收峰位置的地表预测及深部验证结果

Fig. 8　Surface prediction and deep verification results of fluorite Pos400 characteristic absorption peak position in the study area

（A）地表萤石 Pos400 特征吸收峰位置预测图；（B）剖面钻孔深部萤石 Pos400 特征吸收峰位置图

为重要脉石矿物、受 Sn-F 热液控制的锡矿床类型，REE^{3+}/Sn^{2+}替代所引发的 Pos400 系统性变化具有相对统一的地球化学驱动机制。因此，该方法具备向同类矿床推广应用的潜力：通过便携式或遥感高光谱手段快速获取萤石 Pos400 参数，即可实现成矿阶段识别与找矿靶区的初步圈定，大幅提升勘查效率。总体而言，Pos400 光谱参数的引入不仅拓展了萤石在锡成矿研究中的示踪功能，也为富 Sn-F 热液型矿床的快速勘查与深部找矿提供了一条具有明确物理化学基础的新技术路径。

5　结论

（1）富 F 热液系统主导锡迁移与萤石沉淀机制。枫树卜矿床锡矿化受富 F 流体控制，Sn 以氟络合物（$[SnF_6]^{2-}$）形式在热液中迁移。当热液侵入围岩时，Sn 在适宜温度条件下失稳并沉淀为锡石（SnO_2）；同时，流体中的 F^-与 Ca^{2+}结合形成萤石（CaF_2）。该机理综合锡迁移、围岩反应及萤石共生沉淀三个环节，为解释锡矿与萤石空间关联及成因提供了地球化学依据。

（2）萤石世代演化揭示热液流体阶段性。枫树卜矿床萤石经历 F_1 世代条带状、F_2 世代浸染状及 F_3 世代细粒状三期晶出，系统记录了热液流体的演化轨迹。F_2 世代萤石 Pos400 光谱蓝移明确指示了成矿主阶段的热液活跃及 Sn-F 富集，是锡矿化的关键标志。

（3）Pos400 光谱参数与矿化空间耦合。F_2 世代萤石 400 nm 特征吸收峰集中在短波方向（395～402 nm），而 F_1、F_3 萤石峰位偏向长波（403～407 nm），显示短波萤石与锡矿体空间高度耦合。该结果表明，Pos400 光谱异常可直接反映热液成矿空间及矿化强度，为定量化找矿提供可操作的高光谱指标。

（4）萤石光谱在找矿中的应用价值。萤石 400 nm 附近特征吸收峰可作为锡矿潜力区的高

效指示参数。结合三维地质建模,Pos400 光谱异常区与已知矿化区高度重合,为下一步找矿部署、靶区优化及高光谱快速勘查提供了技术支撑,体现了高光谱勘查在深部 Sn-F 矿床找矿中的前沿应用潜力。

附加材料:附表由作者提供,数据真实性由作者负责。

利益冲突声明:本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

作者贡献声明:王艳负责文章的总体框架、论文撰写及关键问题的凝练与终稿统筹工作;郭娜负责特定领域文献的系统调研与文稿修改;赵经纬负责三维模型构建;李伟、连敦梅负责野外调查、样品采集与处理;李春昊负责样品测试分析。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

[参 考 文 献]

曹华文, 张伟, 裴秋明, 等, 2016. 滇西小龙河锡矿床、来利山锡矿床萤石、方解石微量元素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 35(5): 925—935.

Cao H W, Zhang W, Pei Q M, et al., 2016. Trace element geochemistry of fluorite and calcite from the Xiaolonghe tin deposits and Lailishan tin deposits in western Yunnan, China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 35(5): 925—935. (in Chinese)

邓迪, 赵正, 刘善宝, 等, 2024. 江西会昌锡坑迳斑岩型锡矿床成矿系统发育特征与找矿模型[J]. 矿床地质, 43(1): 144—158.

Deng D, Zhao Z, Liu S B, et al., 2024. Development characteristics and exploration model of Xikengjing porphyry-type tin metallogenic system in Huichang County, Jiangxi Province[J]. Mineral Deposits, 43(1): 144—158. (in Chinese)

邓小华, 糜梅, 姚军明, 2009. 河南土门萤石脉型钼矿床流体包裹体研究及成因探讨[J]. 岩石学报, 25(10): 2537—2549.

Deng X H, Mei M, Yao J M, 2009. Study of fluid inclusions and ore genesis of the Tumen Mo-fluorite vein deposit, Henan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(10): 2537—2549. (in Chinese)

方乙, 唐晓源, 王硕, 等, 2024. 萤石颜色与微量元素关系研究[J]. 地球化学, 53(2): 277—292.

Fang Y, Tang X Y, Wang S, et al., 2024. Research on the relationship between fluorite color and trace elements[J]. Geochimica, 53(2): 277—292. (in Chinese)

郭娜, 卓烨鑫, 周维瑞, 等, 2025. 西藏斑岩成矿系统蚀变矿物的高光谱响应及找矿指示[J]. 岩石学报, 41(5): 1490—1508.

Guo N, Zhuo Y X, Zhou W R, et al., 2025. Hyperspectral response characteristics of altered minerals in the Tibetan porphyry metallogenic system and implications for mineral exploration[J]. Acta Petrologica Sinica, 41(5): 1490—1508. (in Chinese)

郭志强, 秦锦华, 王登红, 等, 2024. 赣南淘锡坝矿床岩浆岩年代学、地球化学特征及其与成矿关系[J]. 矿床地质, 43(3): 655—687.

Guo Z Q, Qin J H, Wang D H, et al., 2024. Geochronology and geochemical characteristics of magmatic rocks and their relationship with mineralization in Taoxiba deposit, southern Jiangxi Province[J]. Mineral Deposits, 43(3): 655—687. (in Chinese)

何涌, 王艳林, 1995. 湘南某地紫色萤石呈色机理新认识[J]. 地质科技情报, 14(4): 33—36.

He Y L, Wang Y L, 1995. New understanding of color-forming mechanism in purple fluorites, South of Hunan Province[J]. Geological Science and Technology Information, 14(4): 33—36. (in Chinese)

黄常立, 唐维新, 桂永年, 等, 1997. 会昌岩背式斑岩锡矿[M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 1—132.

Huang C L, Tang W X, Gui Y N, et al., 1997. Huichang Yanbei-type porphyry Tin deposit[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 1—132. (in Chinese)

江西省地质局第七地质大队, 2022. 江西省会昌县枫树卜锡多金属矿普查设计书[R]. 赣州: 江西省地质局第七地质大队.

李兵院, 郭娜, 支立佳, 等, 2024. 基于红外光谱技术的内蒙古达斯矿区蚀变地质填图及其勘查指示意义[J]. 地质学报, 98(2): 623—635.

Li B Y, Guo N, Zhi L J, et al., 2024. Alteration mapping and exploration indications based on SWIR and TIR spectroscopy in Dasi, Inner Mongolia[J]. Acta Geologica Sinica, 98(2): 623—635. (in Chinese)

李久明, 巩恩普, 姚玉增, 2006. 河北省丰宁银矿萤石特征及找矿意义[J]. 地质与勘探, 42(6): 52—56.

Li J M, Gong E P, Yao Y Z, 2006. Fluorite characteristics and its ore prospecting significance in the Fengning silver deposit, Hebei Province[J]. Geology and Prospecting, 42(6): 52—56. (in Chinese)

李阳, 邹灏, 刘行, 等, 2020. SILLS 软件在单个萤石流体包裹体 LA-ICP-MS 微量元素分析数据处理中的应用[J]. 岩矿测试, 39(2): 300—310.

Li Y, Zou H, Liu H, et al., 2020. Application of SILLS software in data processing of single fluorite fluid inclusion LA-ICP-MS trace element analysis[J]. Rock and Mineral Analysis, 39(2): 300—310. (in Chinese)

林芳梅, 彭建堂, 胡阿香, 等, 2015. 锡矿山锑矿床萤石稀土元素

地球化学研究[J]. 矿物学报，35(2)：214—220.

Lin F M, Peng J T, Hu A X, et al., 2015. Geochemical Study of REE in fluorite from Xikuangshan antimony deposit, central Hunan Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 35(2): 214—220. (in Chinese)

刘道荣，商朋强，2024. 中国萤石矿床流体包裹体研究进展[J]. 地质科学，59(2)：510—521.

Liu D R, Shang P Q, 2024. Progress of fluid inclusion research in fluorite deposits in China[J]. Chinese Journal of Geology, 59(2): 510—521. (in Chinese)

刘金宇，舒启海，张为，等，2024. 岩浆热液系统氟的富集与成矿[J]. 岩石学报，40(6)：1943—1958.

Liu J Y, Shu Q H, Zhang W, et al., 2024. Fluorine enrichment and mineralization in magmatic-hydrothermal systems[J]. Acta Petrologica Sinica, 40(6): 1943—1958. (in Chinese)

刘宁，2021. 河南嵩县竹园沟萤石矿的宝石矿物学特征研究[D]. 北京：中国地质大学(北京)：1—76.

Liu N, 2021. The study on gemological and mineralogical characteristics of fluorite in the Zhuyuangou Deposit, song county, Henan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1—76. (in Chinese)

刘天航，唐卫东，高永宝，等，2024. 内蒙古北山花石头山萤石矿床成因：萤石微量、稀土和 H-O 同位素制约[J]. 西北地质，57(4)：66—79.

Liu T H, Tang W D, Gao Y B, et al., 2024. Genesis of the Huashitoushan fluorite deposit, Beishan, Inner Mongolia: constraints from trace elements, REE and H-O isotope geochemistry of fluorite[J]. Northwestern Geology, 57(4): 66—79. (in Chinese)

马星华，闫金禹，王宏晖，等，2025. 岩浆中的氟对钨锡成矿解耦的控制[J]. 中国科学：地球科学，55(8)：2583—2602.

Ma X H, Yan J Y, Wang H H, et al., 2025. Decoupling of tungsten and tin mineralization governed by magmatic fluorine[J]. Science China Earth Sciences, 68(8): 2474—2491.

马媛，2018. 萤石标型及其对不同成矿作用的标识[D]. 北京：中国地质大学(北京)：1—132.

Ma Y, 2018. Typomorphic characteristics of fluorite as indicators of different mineralizations[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1—132. (in Chinese)

倪培，潘君屹，韩亮，等，2023. 华南与花岗岩有关大规模钨锡成矿作用的时空分布、成矿模式及找矿方向[J]. 地质学报，97(11)：3497—3534.

Ni P, Pan J Y, Han L, et al., 2023. Large-scale granite-related tungsten and tin mineralization in South China: temporal and spatial distribution, metallogenic models and exploration implications[J]. Acta Geologica Sinica, 97(11): 3497—3534. (in Chinese)

彭琳琳，2019. 江西会昌锡坑迳矿田锡矿成矿规律与找矿预测[D]. 南京：南京大学：1—99.

Peng L L, 2019. Tin metallogenic regularity and exploration prospecting of the Xikengjing ore field in Huichang county, Jiangxi Province[D]. Nanjing: Nanjing University: 1—99. (in Chinese)

彭琳琳，李伟，刘翠辉，等，2020. 赣南锡矿类型、成矿规律及找矿远景分析[J]. 东华理工大学学报(自然科学版)，43(5)：463—471.

Peng L L, Li W, Liu C H, et al., 2020. Main types, metallogenic regularity and prospecting potential of tin Deposits in Southern Jiangxi Province[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 43(5): 463—471. (in Chinese)

秦锦华，刘善宝，郭志强，等，2024. 赣南斑岩锡矿田云英岩型锂矿中锂的赋存状态研究[J]. 岩矿测试，43(4)：546—557.

Qin J H, Liu S B, Guo Z Q, et al., 2024. Occurrence state of lithium of a greisen-type lithium deposit in the porphyry Sn-ore field, southern Jiangxi Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 43(4): 546—557. (in Chinese)

邱检生，McInnes B I A，蒋少涌，等，2005. 江西会昌密坑山岩体的地球化学及其成因类型的新认识[J]. 地球化学，34(1)：20—32.

Qiu J S, McInnes B I A, Jiang S Y, et al., 2005. Geochemistry of the Mikengshan pluton in Huichang County, Jiangxi Province and new recognition about Its genetic type[J]. Geochimica, 34(1): 20—32. (in Chinese)

曲直，李鹏，刘平，等，2025. 天然萤石及合成萤石的宝石学及谱学特征[J]. 宝石和宝石学杂志(中英文)，27(2)：52—61.

Qu Z, Li P, Liu P, et al., 2025. Gemmological and spectroscopic characteristics of natural and synthetic fluorites[J]. Journal of Gems & Gemmology, 27(2): 52—61. (in Chinese)

沈金祥，张建芳，曹华文，等，2024. 浙江缙云县吾山萤石矿床成因：来自稀土元素、流体包裹体、红外光谱的制约[J]. 西北地质，57(4)：37—49.

Shen J X, Zhang J F, Cao H W, et al., 2024. Genesis of Wushan fluorite deposit in Jinyun county, Zhejiang Province: constraints from fluorite rare earth elements, fluid inclusions and infrared spectroscopy[J]. Northwestern Geology, 57(4): 37—49. (in Chinese)

孙社良，朱昌杰，李永明，等，2016. 江西会昌曲水坑锡矿床地质特征及找矿前景分析[J]. 华东地质，37(4)：291—299.

Sun S L, Zhu C J, Li Y M, et al., 2016. Geological characteristics of the Qushuikeng Sn ore deposit in Huichang, Jiangxi Province and analysis for the prospect potential[J]. East China Geology, 37(4): 291—299. (in Chinese)

孙祥，杨子荣，刘敬党，等，2008. 义县萤石矿床稀土元素地球化学特征及其指示意义[J]. 矿床地质，27(5)：579—586.

Sun X, Yang Z R, Liu J D, et al., 2008. REE geochemistry of fluorite from Yixian fluorite deposit and its geological implications[J]. Mineral Deposits, 27(5): 579—586. (in Chinese)

王丹, 黄春艳, 洪路兵, 等, 2025. 浙江武义萤石的致色机理研究: 谱学与化学组成约束[J]. 超硬材料工程, 37(3): 71—77.

Wang D, Huang C Y, Hong L B, et al., 2025. Color origins of Wuyi fluorites, Zhejiang Province: spectroscopy and geochemistry constrains[J]. Superhard Material Engineering, 37(3): 71—77. (in Chinese)

王国芝, 胡瑞忠, 刘颖, 等, 2003. 黔西南晴隆锑矿区萤石的稀土元素地球化学特征[J]. 矿物岩石, 23(2): 62—65.

Wang G Z, Hu R Z, Liu Y, et al., 2003. REE geochemical characteristic from fluorite in Qinglong antimony deposit, southwestern Guizhou[J]. Journal Mineralogy and Petrology, 23(2): 62—65. (in Chinese)

王焕鑫, 2022. 青海东昆仑德里特萤石铅多金属矿床成因研究[D]. 长春: 吉林大学: 1—75.

Wang H X, 2022. Study on the genesis of delite fluorite lead polymetallic deposit in East Kunlun orogenic belt, Qinghai Province[D]. Changchun: Jilin University: 1—75. (in Chinese)

王启博, 张寿庭, 唐利, 等, 2023. 豫西杨山萤石矿床成因: 萤石稀土元素组成和流体包裹体热力学制约[J]. 现代地质, 37(6): 1524—1537.

Wang Q B, Zhang S T, Tang L, et al., 2023. Genesis of Yangshan fluorite deposit in western Henan province: fluorite REE composition and fluid inclusion thermomechanical constraints[J]. Geoscience, 37(6): 1524—1537. (in Chinese)

邢志芬, 申佳奇, 许博, 等, 2025. 西藏错那洞萤石的宝石矿物学特征[J]. 宝石和宝石学杂志(中英文), 27(1): 21—29.

Xing Z F, Shen J Q, Xu B, et al., 2025. Gemmological and mineralogical characteristics of fluorite from Cuonadong, Xizang, China[J]. Journal of Gems & Gemmology, 27(1): 21—29. (in Chinese)

熊明福, 2020. 华南晚燕山期斑岩锡矿成因研究——以岩背和洋滨锡矿为例[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所): 1—187.

Xiong M F, 2020. Metallogeny of the Late Mesozoic porphyry tin deposits in South China: a case study of the Yanbei and Yangbin deposits[D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences): 1—187. (in Chinese)

许成, 黄智龙, 漆亮, 等, 2001. 四川牦牛坪稀土矿床成矿流体来源与演化初探——萤石稀土地球化学的证据[J]. 地质与勘探, 37(5): 24—28.

Xu C, Huang Z L, Qi L, et al., 2001. Source and evolution of ore-forming fluids of Maoniuping rare-earth deposit-evidence from REE geochemistry of fluorites[J]. Geology and Prospecting, 37(5): 24—28. (in Chinese)

许丽丽, 2024. 粤北棉花坑铀矿床萤石矿物标型特征及其地质意义[J]. 世界核地质科学, 41(2): 287—298.

Xu L L, 2024. Typomorphic characteristics and geological significance of fluorite in Mianhuakeng uranium deposit, north Guangdong[J]. World Nuclear Geoscience, 41(2): 287—298. (in Chinese)

许若潮, 龙训荣, 刘飚, 等, 2022. 湘南界牌岭锡多金属矿床萤石 LA-ICP-MS 微量元素地球化学特征及意义[J]. 矿床地质, 41(1): 158—173.

Xu R C, Long X R, Liu B, et al., 2022. LA-ICP-MS trace element analysis of fluorite and implications in Jiepailing tinpolymetallic deposit from South of Hunan Province[J]. Mineral Deposits, 41(1): 158—173. (in Chinese)

徐贻赣, 许建祥, 刘孔隆, 2001. 会昌县淘锡坝锡矿地质特征、成因初探及找矿意义[J]. 江西地质, 15(2): 119—124.

Xu Y G, Xu J X, Liu K L, 2001. The Taoxiba tin deposit, Huichang, Jiangxi: its geological features, genesis and ore-searching significance[J]. Jiangxi Geology, 15(2): 119—124. (in Chinese)

杨世文, 丰成友, 楼法生, 等, 2019. 赣南隆坪萤石矿床成矿时代及成因初探: 来自萤石 Sm-Nd 测年及黑云母电子探针的证据[J]. 高校地质学报, 25(3): 341—351.

Yang S W, Feng C Y, Lou F S, et al., 2019. A preliminary study on metallogenic age and genesis of Longping fluorite deposit in southern Jiangxi province: evidence from Sm-Nd isochron dating of fluorite and electron probe of biotite[J]. Geological Journal of China Universities, 25(3): 341—351. (in Chinese)

杨育富, 2019. 湖南香花岭矽卡岩中不同颜色萤石的特征及成因[D]. 桂林: 桂林理工大学: 1—50.

Yang Y F, 2019. Characteristics and origin of the fluorites with different colors in Xiangkaling skarn, Hunan[D]. Guilin: Guilin University of Technology: 1—50. (in Chinese)

游超, 王春连, 刘殿鹤, 等, 2022. 江西宁都坎田萤石矿床稀土元素地球化学特征及其指示意义[J]. 地球学报, 43(3): 359—370.

You C, Wang C L, Liu D H, et al., 2022. REE geochemistry of fluorite from Kantian fluorite deposit and its geological implications in Ningdu Area, Jiangxi Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 43(3): 359—370. (in Chinese)

余雪戈, 饶灿, 王吴梦雨, 等, 2018. 湖南香花岭矽卡岩中锡的矿物学行为与成矿过程[J]. 高校地质学报, 24(5): 645—657.

Yu X G, Rao C, Wang W M Y, et al., 2018. Mineralogical behavior and metallogenic process of Sn in the Xianghualing skarn, Hunan Province[J]. Geological Journal of China

Universities, 24(5): 645—657. (in Chinese)

张栋梁, 吴德海, 潘家永, 等, 2024. 赣中新衡萤石矿床成矿流体特征研究: 来自流体包裹体及氢氧同位素的证据[J]. 地质论评, 70(增刊 1): 70—72.

Zhang D L, Wu D H, Pan J Y, et al., 2024. Study on ore-forming fluid characteristics of Xinheng fluorite deposit in central Ganzhong: evidence from fluid inclusions and hydrogen and oxygen isotopes[J]. Geological Review, 70(S1): 70—72. (in Chinese)

郑仁基, 2019. 不同缺陷类型萤石浮选行为与机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学: 1—184.

Zheng R J, 2019. Study on the flotation behavior and mechanism of the fluorites with different defect types[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology: 1—184. (in Chinese)

邹灏, 淡永, 张寿庭, 等, 2016. 重庆东南部彭水地区重晶石-萤石矿床的成矿物质来源探讨: 地球化学证据[J]. 大地构造与成矿学, 40(1): 71—85.

Zou H, Dan Y, Zhang S T, et al., 2016. Geochemical evidence for sources of ore-forming material of barite-fluorite deposits in Pengshui area, southeast Chongqing[J]. Geotectonica et Metallogenia, 40(1): 71—85. (in Chinese)

邹灏, 方乙, 陈合毛, 等, 2014. 浙江天台盆地下陈萤石矿稀土元素地球化学特征及成因[J]. 中国地质, 41(4): 1375—1386.

Zou H, Fang Y, Chen H M, et al., 2014. REE geochemistry and genesis of the Xiachen fluorite deposit in Tiantai basin, Zhejiang Province[J]. Geology in China, 41(4): 1375—1386. (in Chinese)

Almohammed A H, Bhui U K, Ray D, et al., 2024. Spectroscopic characterization of fluorite of Amba Dongar, Gujarat, India: linking chemical composition with color[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 318: 124464.

Atta D, Abdel-Halim T A, Mostafa D A, et al., 2024. Case study of fluorite mineralization using traditional and laser spectroscopic techniques, homret akarem area south eastern desert, Egypt[J]. Optical Materials: X, 22: 100306.

Bühn B, Schneider J, Dulski P, et al., 2003. Fluid-rock interaction during progressive migration of carbonatitic fluids, derived from small-scale trace element and Sr, Pb isotope distribution in hydrothermal fluorite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 67(23): 4577—4595.

Chang Z S, Yang Z M, 2012. Evaluation of inter-instrument variations among short wavelength infrared (SWIR) devices[J]. Economic Geology, 107(7): 1479—1488.

Chen K, Song W L, Wang Y W, et al., 2025. The source and evolution of ore-forming fluids in the Xiaobaihegou fluorite deposit, Altyn-Tagh Orogen, NW China: constraints from trace element, fluid inclusion, and isotope studies[J]. Minerals, 15(8): 840.

Di J, Ding X, Huang X L, et al., 2025. Hydrothermal mobility of In, Sn, Cu, Cd, Fe, Pb, Zn during interactions between HF- and HCl-bearing fluids and granitic melts: experimental constraints on In mineralization[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 291: 106706.

Ding X, Su K L, Yan H B, et al., 2022. Effect of F-rich fluids on the A-type magmatism and related metal mobilization: new insights from the Fogang-Nankunshan-Yajishan igneous rocks in southeast China[J]. Journal of Earth Science, 33(3): 591—608.

Duan Z P, Jiang S Y, Su H M, et al., 2020. Trace and rare earth elements, and Sr isotopic compositions of fluorite from the Shihuiyao rare metal deposit, Inner Mongolia: Implication for its origin[J]. Minerals, 10(10): 882.

Ge X, Guo Q F, Wang Q Q, et al., 2022. Mineralogical characteristics and luminescent properties of natural fluorite with three different colors[J]. Materials, 15(6): 1983.

Ghaedi F, Taghipour B, Somarin A K, et al., 2023. Fluid inclusions and REE geochemistry of white and purple fluorite: implications for physico-chemical conditions of mineralization; an example from the Pinavand F deposit, Central Iran[J]. Minerals, 13(7): 836.

Heinrich C A, 1990. The chemistry of hydrothermal tin (-tungsten) ore deposition[J]. Economic Geology, 85(3): 457—481.

Jochum K P, Weis U, Stoll B, et al., 2011. Determination of reference values for NIST SRM 610-617 glasses following ISO guidelines[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 35(4): 397—429.

Kato T, Nakauchi D, Kawaguchi N, et al., 2022. TSL and OSL properties of Cu-doped CaF_2 ceramics prepared by spark plasma sintering[J]. Sensors and Materials, 34(2): 653—660.

Liu S H, Wang C L, Sun J, et al., 2025. The genesis of giant fluorite resources in Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit, Inner Mongolia of China[J]. Ore Geology Reviews, 187: 106959.

Liu X, Liang H, Wang Q, et al., 2022. Early Cretaceous Sn-bearing granite porphyries, A-type granites, and rhyolites in the Mikengshan-Qingxixiang-Yanbei area, South China: Petrogenesis and implications for ore mineralization[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 235: 105274.

Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al., 2008. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 257(1/2): 34—43.

Ma X H, Yan J Y, Wang H H, et al., 2025. Decoupling of tungsten and tin mineralization governed by magmatic

fluorine[J]. Science China Earth Sciences, 68(8): 2474—2491.

Ross P S, Bourke A, Schnitzler N, et al., 2019. Exploration vectors from near infrared spectrometry near the McLeod volcanogenic massive sulfide deposit, Matagami District, Québec[J]. Economic Geology, 114(4): 613—638.

Schwinn G, Markl G, 2005. REE systematics in hydrothermal fluorite[J]. Chemical Geology, 216(3/4): 225—248.

Staebler D L, Schnatterly S E, 1971. Optical studies of a photochromic color center in rare-earth-doped CaF_2[J]. Physical Review B, 3(2): 516—526.

Svetova E N, Palyanova G A, Borovikov A A, et al., 2023. Mineralogy of agates with amethyst from the Tevinskoye deposit (Northern Kamchatka, Russia)[J]. Minerals, 13(8): 1051.

Trinkler M, Monecke T, Thomas R, 2005. Constraints on the genesis of yellow fluorite in hydrothermal barite-fluorite veins of the Erzgebirge, eastern Germany: evidence from optical absorption spectroscopy, rare-earth-element data, and fluid-inclusion investigations[J]. The Canadian Mineralogist, 43(3): 883—898.

Tuşa L, Kern M, Khodadadzadeh M, et al., 2020. Evaluating the performance of hyperspectral short-wave infrared sensors for the pre-sorting of complex ores using machine learning methods[J]. Minerals Engineering, 146: 106150.

Wu S T, Wörner G, Jochum K P, et al., 2019. The preparation and preliminary characterisation of three synthetic andesite reference glass materials (ARM-1, ARM-2, ARM-3) for *in situ* microanalysis[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 43(4): 567—584.

Ye X M, Bai F, 2022. Spectral characteristics, rare earth elements, and ore-forming fluid constrains on the origin of fluorite deposit in Nanlishu, Jilin Province, China[J]. Minerals, 12(10): 1195.

You C, Wang C L, Chen Y J, et al., 2025. Genesis of granite-related fluorite deposit from Shaowu area, South China: constraints from geochronology, fluid inclusions, and H-O-Sr isotopes[J]. Ore Geology Reviews, 187: 106999.

Yuan S D, Peng J T, Hu R Z, et al., 2008. Characteristics of rare-earth elements (REE), strontium and neodymium isotopes in hydrothermal fluorites from the Bailashui tin deposit in the Furong ore field, southern Hunan Province, China[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 27(4): 342—350.