矿 物 学 报
ACTA MINERALOGICA SINICA

DOI: 10.3724/j.1000-4734.2026.46.23 CSTR: 32252.14.j.1000-4734.2026.46.23

基于矿物自动定量分析的碳酸岩型铌-稀土矿床矿石特征精细表征

赵文慧[1]，宋文磊[1*]，陈倩[1]，徐扬[2]，乔乐[1]，何涛[1]，黄黎明[3]

(1. 西北大学 地质学系大陆演化与早期生命全国重点实验室，陕西 西安 710069；2. 中国地质调查局武汉地质调查中心，湖北 武汉 430205；3. 福建省龙岩市永定区自然资源局，福建 永定 364100)

摘要：本文以某典型碳酸岩型铌-稀土矿床为研究对象，采用基于扫描电镜-能谱技术的矿物自动定量分析系统（TIMA），对方解石碳酸岩型和铁白云石碳酸岩型矿石的矿物学特征进行了精细表征。结果表明：方解石碳酸岩的主要矿物组成为方解石（73.71%）和磷灰石（21.25%），铌、稀土矿物分别以铌铁矿（0.53%）和独居石（0.41%）为主；铁白云石碳酸岩则以铁白云石（46.31%）和方解石（23.22%）为主要矿物相，稀土矿物包括氟碳铈矿（1.96%）、独居石（1.55%）等。TIMA可有效识别低至0.02%的微量矿物（如闪锌矿），并通过伪彩图像直观呈现矿物空间分布特征。该系统还可通过矿物成分及比例计算有效全岩元素含量组成，快速获取矿石品位等信息。元素赋存分析显示，方解石碳酸岩中78.14%的铌赋存于铌铁矿，稀土元素（Ce、La等）主要富集于独居石；铁白云石碳酸岩中稀土则主要分配于氟碳铈矿（42.14%）和独居石（30.38%）。粒度统计表明，铌铁矿粒度较粗（56.33～166.02 μm），独居石粒度较细（11.1～42.68 μm）；铌铁矿主要与方解石、磷灰石、铌钙矿等连生，而稀土矿物与铁白云石、石英、铈硅石、云母等的共生关系更为复杂。上述结果表明，与传统方法相比，TIMA在微量矿物识别、元素赋存定量、多参数协同分析等方面具有显著优势，为碳酸岩型铌-稀土矿床的精细表征提供了高效、可靠的技术手段，对矿床成因研究与资源综合利用具有重要意义。

关键词：TIMA；铌-稀土矿床；矿物学表征；元素赋存状态

中图分类号：P611 **文献标志码：**A

第一作者：赵文慧，女，2001年生，硕士研究生，从事碳酸岩成岩成矿研究。E-mail: 736330618@qq.com。

Fine characterization of ore features in carbonatite-type Nb-REE deposits based on automated mineral quantitative analysis

ZHAO Wenhui[1], SONG Wenlei[1*], CHEN Qian[1], XU Yang[2], QIAO Le[1], HE Tao[1], HUANG Liming[3]

(1. State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Department of Geology, Northwest University, Xi'an Shaanxi 710069, China; 2. Wuhan Center of China Geological Survey (Central South Innovation Center for Geosciences), Wuhan Hubei 430205, China; 3. Yongding District Natural Resources Bureau, Longyan City, Fujian Province, Yongding Fujian 364100, China)

Abstract: This study focuses on the carbonatite-type Nb-REE deposit as a case study. Using the scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS)-based TESCAN Integrated Mineral Analyzer (TIMA) system, we conducted detailed mineralogical characterization of calcite carbonatite and ankerite carbonatite Nb ores. The results demonstrate that: Calcite carbonatite is predominantly composed of calcite (73.71%) and apatite (21.25%), with Nb-bearing minerals represented mainly by columbite (0.53%) and REE minerals by monazite (0.41%); Ankerite carbonatite

收稿日期：2026-04-02。

基金项目：国家自然科学基金项目（编号：42273070）；湖北省自然科学基金项目（编号：2025AFB977）；湖北省地质创新发展联合基金项目（编号：2025AFD445）。

*通信作者，E-mail: wlsong@nwu.edu.cn。

consists primarily of ankerite (46.31%) and calcite (23.22%), with REE minerals including bastnäsite (1.96%) and monazite (1.55%). The TIMA system effectively identified trace minerals with concentrations as low as 0.02% (e. g., sphalerite) and visualized their distribution through false color mapping. The system can also calculate the effective whole-rock elemental composition based on mineral constituents and their proportions, enabling rapid acquisition of critical ore quality parameters such as grade and elemental distribution patterns. Element occurrence analysis revealed that in calcite carbonatite, 78.14% of Nb is hosted in columbite, while REEs (Ce, La, etc.) are predominantly concentrated in monazite. In ankerite carbonatite, REEs are mainly distributed in bastnäsite (42.14%) and monazite (30.38%). Grain size statistics show that columbite exhibits relatively coarse grains (56.33-166.02 μm), whereas monazite displays finer grains (11.1-42.68 μm). Columbite mainly intergrows with calcite and apatite, while REE minerals show more complex paragenetic relationships with ankerite and quartz. These findings demonstrate that compared with conventional methods, TIMA shows significant advantages in trace mineral identification, quantitative analysis of element occurrence, and multi-parameter correlation analysis. This technique provides an efficient and reliable approach for the fine characterization of carbonatite-type Nb-REE deposits, offering important implications for both ore genesis studies and comprehensive resource utilization.

Keywords: TIMA; niobium-rare earth deposit; mineralogical characterization; element occurrence

铌、稀土等战略性关键金属矿床，因矿石矿物组成复杂、有用元素赋存状态多样，常面临“稀、伴、细”的研究难题：“稀”指目标矿物及元素含量极低，超出传统方法检测限；“伴”指矿物共生关系复杂，分离困难；“细”指有用矿物粒度细微至微米乃至亚微米级。传统矿物学方法研究这些矿石存在一些困难：光学显微镜对微量细粒矿物识别能力有限且主观性强；X射线衍射（XRD）可鉴定主要矿物相，但对低含量矿物（通常检测限>1%）不敏感，且无法提供产出结构和空间分布信息；普通扫描电镜结合能谱虽能进行微区成分分析，但手动操作效率低下，难以获得统计性定量数据[1-3]。因此，传统方法难以实现对矿石矿物组成、结构构造及元素赋存状态的快速、全面、精准且系统性的精细表征，制约了对矿床成因的深入理解及资源评价与高效利用。

近年来，随着扫描电子显微镜和能量色散X射线光谱仪（EDS）技术的进步及其与计算机图形和数据处理技术的深度融合，以QEMSCAN、MLA、MapsMineralogy、AMICS及本研究采用的TIMA为代表的矿物自动定量分析系统迅速发展[4-12]。这些系统凭借高度自动化的矿物识别与定量分析能力，能快速、精准地从复杂样品中获取海量多维度矿物学参数，如矿物种类、含量、颗粒形态与粒度分布、共生关系、解离度及元素赋存与分配规律等，已广泛应用于岩石学和矿床学研究[4-12]。例如，Xu等[13]利用TIMA研究内蒙古丰镇与河北怀安地区碳酸岩中的榴辉岩捕虏体，不仅精准揭示了细小矿物颗粒的成分与结构，其提供的矿物体积、质量分数及全岩化学组成数据，还为限定榴辉岩形成的温压条件提供了关键约束。Breiter等[14]运用TIMA获取了英国西南部Cornwall地区某花岗岩体不同层位的矿物组成相图，清晰指示了岩浆结晶分异方向，为花岗岩向伟晶岩的演化提供了有力证据。Slavík等[15]借助TIMA分析西班牙某富钍沉积地层，发现Th主要赋存于独居石中，并通过背散射电子（BSE）图像与Th、Al元素分布图对比，观察到独居石颗粒内部元素分布不均，Th含量从核部到边部先减后增，这对探讨沉积环境演变具有重要意义。

然而，以往研究多侧重于利用此类系统获取样品的少数矿物学参数（如生成矿物分布伪彩相图、测定主要矿物相对含量等），而在提取多维系统的定量矿物学参数信息方面仍相对较少[16-22]。为此，本研究以某碳酸岩型铌-稀土矿床为对象，采用TIMA系统对矿石样品进行多参数分析，展示其在矿石矿物组成、产出形态、元素含量与赋存状态、粒度分布及矿物共生关系等方面的应用。重点实现超微量矿物识别与矿物学多参数（含量、粒度、共生、赋存）同步定量表征，并结合矿石类型对比进行多维度分析；同时，拓展TIMA从定性展示到深度定量解析的应用，为该系统在复杂多金属矿床研究中的

深度应用提供参考。

1 样品及实验条件

1.1 实验样品及处理

本文研究的样品取自我国某碳酸岩型铌-稀土矿床的典型矿石。该矿床具有“岩体即矿体”的特征，主要由方解石碳酸岩和铁白云石碳酸岩构成。初步研究表明，铌与稀土矿物赋存于不同的碳酸岩类型中：铌矿物主要富集于方解石碳酸岩内，而稀土矿物则主要分布于铁白云石碳酸岩中，同时在方解石碳酸岩中亦有少量产出。方解石碳酸岩多呈块状构造，具自形-半自形结构，矿物组成以方解石、磷灰石为主，云母类及金属矿物次之；铁白云石碳酸岩则主要显示浸染状构造和他形粒状结构，以白云石为主要矿物，含少量金属矿物。由于天然样品导电性较差，在进行矿物自动定量分析前，需将样品表面抛光并作表层镀碳处理。本文将矿石样品加工为标准探针片，其制备流程如下：矿石样品先制成30 mm×25 mm×3 mm岩块切片，经清洁烘干后与载玻片涂环氧树脂粘合，随后依次进行粗磨（150号砂至3 mm）、细磨（400号砂）、精磨（5/14/20号砂至0.03 mm，含石英时磨至一级灰白干涉色），最后用标乐氧化铝悬浮液抛光至镜面（无凸起、划痕、麻点），冲洗擦干。值得指出的是，该矿物自动定量分析系统的制样要求与常规扫描电镜样品相同，无需特殊处理，这是其便捷性的体现，且可同时放置多个样品，具有前处理简便、测试样品通量较高的优势。

1.2 实验仪器与测试条件

样品的矿物自动定量分析由西北大学地质学系大陆演化与早期生命全国重点实验室的TIMA（TESCAN Integrated Mineral Analyzer，型号TIMA-X GHM）矿物分析系统完成。该系统硬件主体为一台TESCAN MIRA3场发射高分辨率扫描电子显微镜，配备背散射电子（BSE）探测器、二次电子（SE）探测器、阴极发光（CL）探测器以及4台X射线能谱（EDS）探测器。TIMA-X GHM的超大样品舱可一次性容纳9个尺寸约为47 mm×27 mm的薄片样品或22个直径为25 mm的环氧树脂样品[8]。此外，TIMA软件数据库中包含近5000种已知矿物的化学成分与能谱谱图信息，有助于快速识别未知矿物。

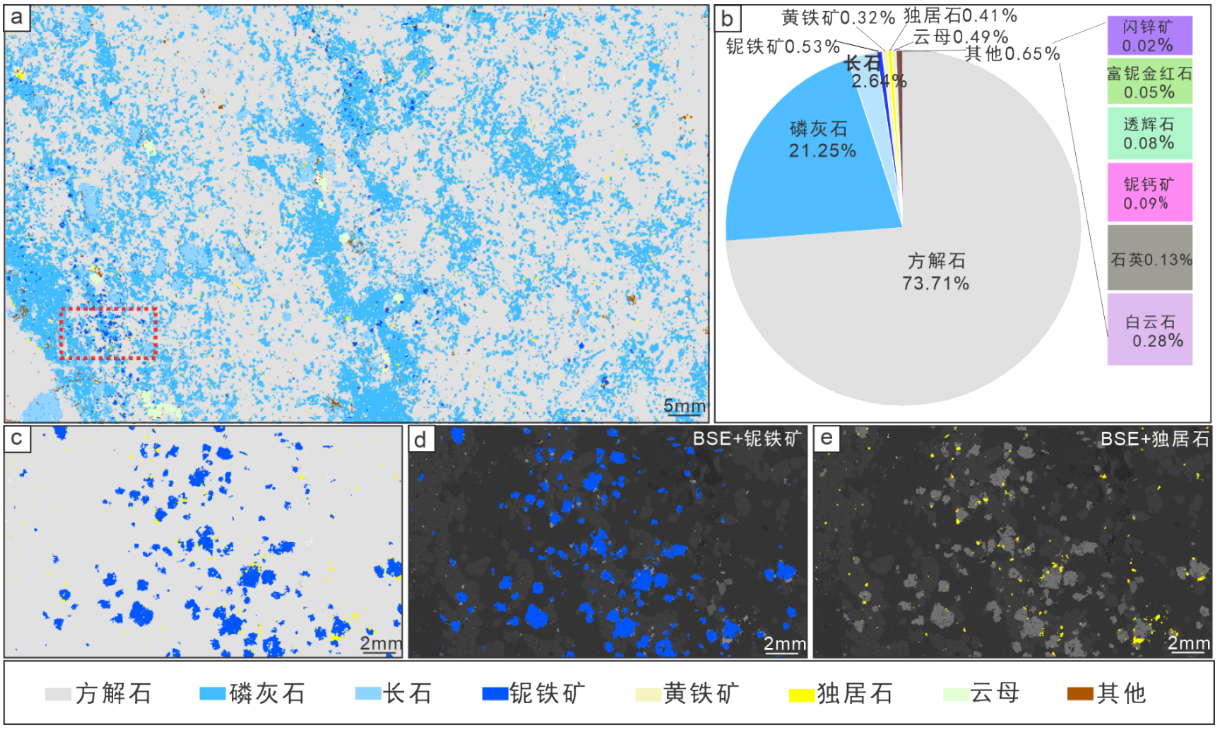
本次实验测试条件如下：TIMA电镜系统处于高真空模式下，BSE信号使用Pt法拉第杯校准，EDS信号使用固定的Mn标样校准。测试过程中加速电压为25 kV，工作距离为15 mm，电流约9 nA。数据采集采用点阵扫描模式，该模式在保证测试速率的同时，能够全面分析样品中所有物相[8]。基于已有分析经验，为识别样品中微米尺度的关键金属矿物，设定BSE步长为3 μm，能谱步长为9 μm，每个测试点X射线能谱信号的计数设置为1500。具体分析流程如下：首先，利用扫描电子显微镜获取BSE信号，再根据步长设定通过X射线能谱仪采集每个测试点的EDS信号；数据采集完成后，TIMA系统通过自动对比统计所有BSE和能谱信号，区分样品中不同矿物相的边界；随后，将采集到的测试点能谱谱线与数据库中的矿物谱线进行对比匹配，以确定矿物种类。实验结束后，使用TIMA离线软件对所分析样品进行数据处理，获取感兴趣区域的BSE图像、矿物相图以及矿物组成、含量、共生关系、粒度分布等多种矿物学参数[8,17]。需要指出的是，由于TIMA系统基于扫描电镜的电子束与样品表面相互作用，其中BSE和EDS信号激发深度有限（通常<3 μm），所获数据代表样品抛光表面浅层信息特征，不能提供样品的三维信息。

2 碳酸岩铌-稀土矿床TIMA多参数分析结果

2.1 方解石碳酸岩型矿石特征

2.1.1 矿物组成分析

矿物分析系统可将扫描薄片中识别出的不同矿物相以伪彩形式（用户自定义色彩，非矿物真实颜色）呈现（图1a）[8]。相较于BSE照片，伪彩图像能更清晰地展示不同矿物间的产出状态与结构关系。其次，TIMA系统可通过其配套软件的图形分析技术，统计各矿物相在薄片上的面积大小与分布，并以面积近似代表体积，从而统计出各矿物的体积分数，再乘以相应矿物密度即可换算为质量分数。后文将统一使用质量分数（%），主要因为其是工艺矿物学与资源评价的核心指标，可直接反映有用组分对矿石总质量的贡献；避免因矿物密度差异（如铌铁矿密度显著高于方解石）导致体积分数对重矿物价值的低估，也与国内外同类研究惯例一致。



a. TIMA伪彩相图，红框为c～e图区域； b. 矿物含量百分比；c. 局部富铌铁矿和独居石的TIMA相图（蓝色为铌铁矿，黄色为独居石）；d. BSE背景下的铌铁矿分布相图；e. BSE背景下的独居石分布相图。

图1 方解石碳酸岩型铌-稀土矿石TIMA岩相学和矿物学表征

Fig. 1. The TIMA petrological and mineralogical characterization images of the calcite carbonatite-type Nb-REE ore

TIMA分析结果显示，方解石碳酸岩的主要矿物组成为方解石（73.71%，质量分数，下同）和磷灰石（21.25%），其次为长石（2.64%）、铌铁矿（0.53%）、云母（0.49%）、独居石（0.41%）、黄铁矿（0.32%）等（图1a, b）。值得注意的是，TIMA系统依托高分辨率场发射扫描电镜，能够识别出样品中含量低至万分之一甚至更微量的矿物相，如白云石（0.28%）、石英（0.13%）、铌钙矿（0.09%）、透辉石（0.08%）、铌金红石（0.05%）、闪锌矿（0.02%）（图1b）。这些微量矿物（如闪锌矿、铌金红石和铌钙矿）成分辨识度高，识别精度高，不易被TIMA误识别（不同于某些成分相似的硅酸盐矿物），其结果已通过后续EPMA和LA-ICP-MS等实验验证。本研究采用点阵分析模式，除按固定间距采集EDS点外，还能依据BSE图像异常自动采集EDS数据，因此即使矿物含量极低（如仅含一两颗微米级颗粒）也可被识别[8]。

该碳酸岩矿石中的铌和稀土矿化在薄片样品中分布不均匀，局部可见强烈矿化（图1a红框区域）。TIMA系统能够将目标有用矿物在不同背景下突出显示，便于观察。例如，图1c展示了方解石背景下铌铁矿和独居石的分布特征。含铌矿物主要为自形程度较高的铌铁矿（图1d），偶见其边缘蚀变为铌钙矿（由于铌钙矿颗粒仅为几微米，且BSE灰度与铌铁矿接近，所以仅能通过自动定量分析系统进行化学成分上的区分）。稀土矿物则以细粒浸染状分布的独居石为主（图1e）。TIMA对精细矿物的识别也较为准确。TIMA研究表明样品中闪锌矿含量为0.02%，富铌金红石0.05%、透辉石为0.08%、铌钙矿0.09%、石英0.13%、白云石0.28%。

2.1.2 元素含量及赋存状态分析

查清矿石中有用元素的类型、含量及赋存状态，是评估矿石经济价值和探讨矿石成因的重要前提。TIMA系统可基于所获取的不同矿物高质量能谱数据及矿物含量，计算扫描样品中的元素组成与分布特征，并进一步统计特定元素在不同矿物相中的赋存比例。如图2a所示，TIMA分析结果显示样品中铌（Nb）元素的质量分数为0.41%。该元素主要赋存于铌铁矿中，占比高达78.14%（即样品中78.14%的Nb来源于铌铁矿），其次分布于铌钙矿（19.58%），仅有少量赋存于铌金红石（2.26%）中（图2b）。鉴于铌钙矿和铌金红石含量较低，铌铁矿可作为该类型矿石中主要的可利用矿物。其中，稀土元素均富集在稀土矿物独居石中，Ce元素的质量分数为0.22%，La元素为0.11%。

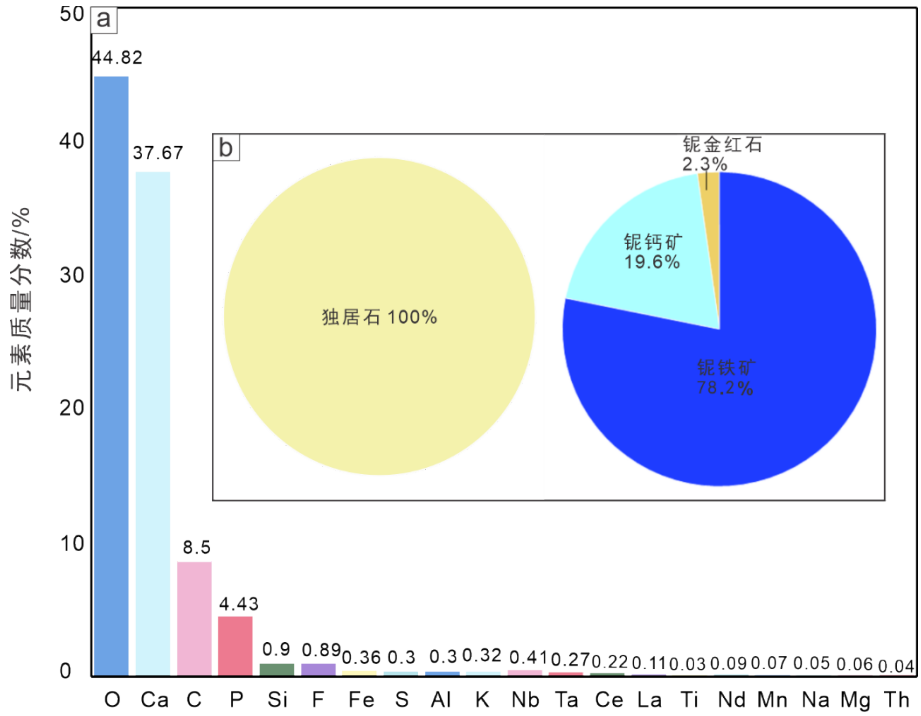


图2 方解石碳酸岩型铌-稀土矿石元素质量分布柱状图（a）和稀土、铌元素在不同矿物中的分布图（b）

Fig. 2. Histogram for the distribution of elemental mass fractions of the calcite carbonatite-type Nb-REE ore (a) and diagram for the distribution of rare earth elements and niobium in different mineral phases (b)

若需查看样品中特定铌或稀土矿物的产出特征，可在TIMA软件的矿物分布图（图1a, c, d）上直接点击目标矿物，同时还可调取相关元素分布图（如铌元素分布图，图3a）、矿物能谱图（如铌铁矿能谱，图3b）以及BSE灰度图像（图3c）和TIMA伪彩图像（图3d），通过多维度数据对比进一步验证物相识别结果。

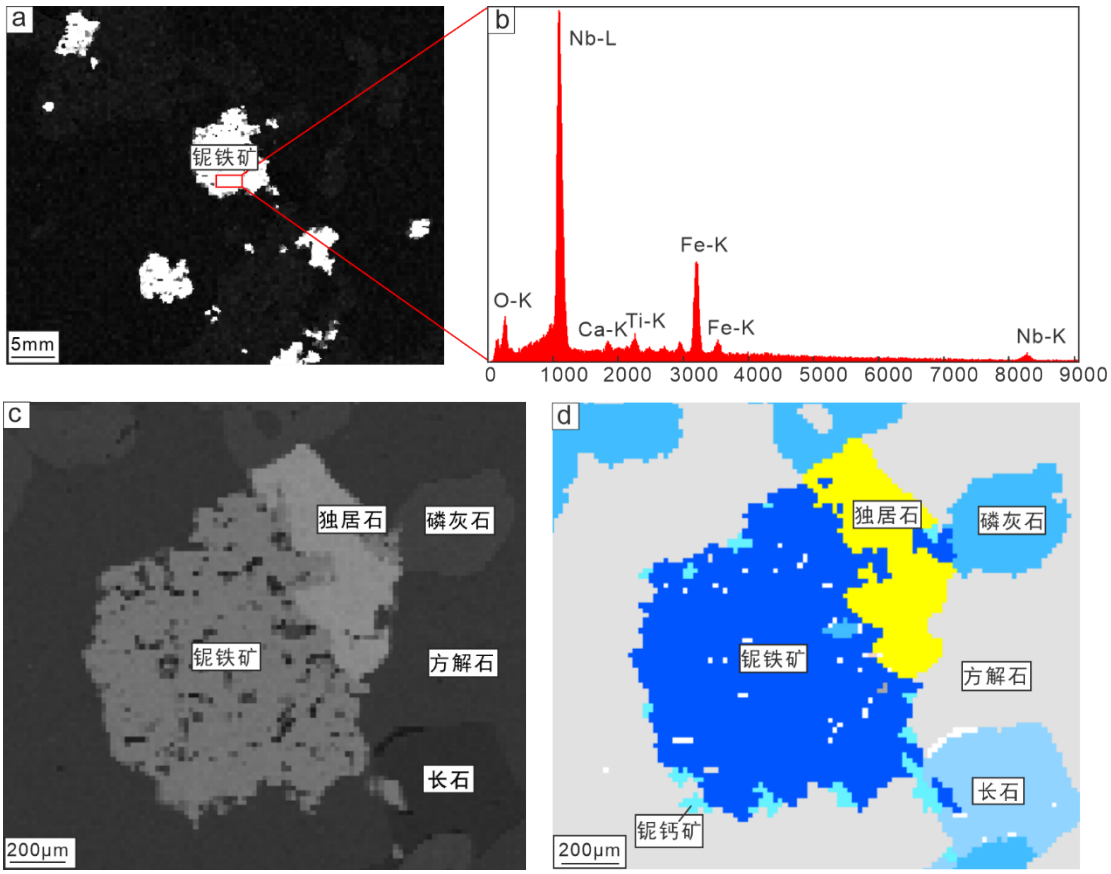


图3 方解石碳酸岩型铌-稀土矿石中局部铌元素分布图（a）、铌铁矿的能谱谱图特征（b）、铌铁矿产出状态BSE和TIMA伪彩照片（c, d）

Fig. 3. The distribution of local niobium element (a), energy-dispersive X-ray spectral characteristics of columbite (b), the BSE image and TIMA false-colored mineral phase image showing the occurrence state of columbite (c, d) of the calcite carbonatite-type Nb-REE ore

2.1.3 *矿物颗粒粒度统计分析*

在明确样品矿物组成及有用元素赋存状态的基础上，进一步分析主要有用矿物的形态和粒度分布特征，对研究其矿化特征和确定适宜的选矿工艺流程具有重要意义[12]。在TIMA系统中，矿物粒径定义为将矿物颗粒的实际面积换算为等面积圆形的直径。利用TIMA软件中的“颗粒查看”（Grain viewer）功能，可直观展示有用矿物的形态特征与粒度分布。结果显示（图4），铌铁矿多呈粒状，含量较高，粒度较粗；独居石则呈不规则粒状，含量较低且粒度较细。矿物粒度分析进一步表明，铌铁矿粒度分布不均匀，主要分布在56.33～166.02 μm之间，整体粒度较粗且分布范围较宽（图5a）；独居石粒度分布亦不均匀，主要集中于11.1～42.68 μm区间（图5b）。

2.1.4 *矿物共生关系分布*

用矿物与脉石矿物的共生结构关系，是判断成矿流体特征及评价矿石分选性的重要依据[5-16]。TIMA系统中，有用矿物与其他矿物的共生关系比例通常通过统计其与不同矿物接触边界的周长占比来实现。在方解石碳酸岩型矿石中，铌铁矿主要与方解石（32.3%，指与铌铁矿接触的所有矿物中方解石占比，下同）、磷灰石（23.94%）、铌钙矿（24.61%）等矿物连生（图6a）；独居石则主要与方解石（47.3%）、磷灰石（39.88%）等共生（图6b）。

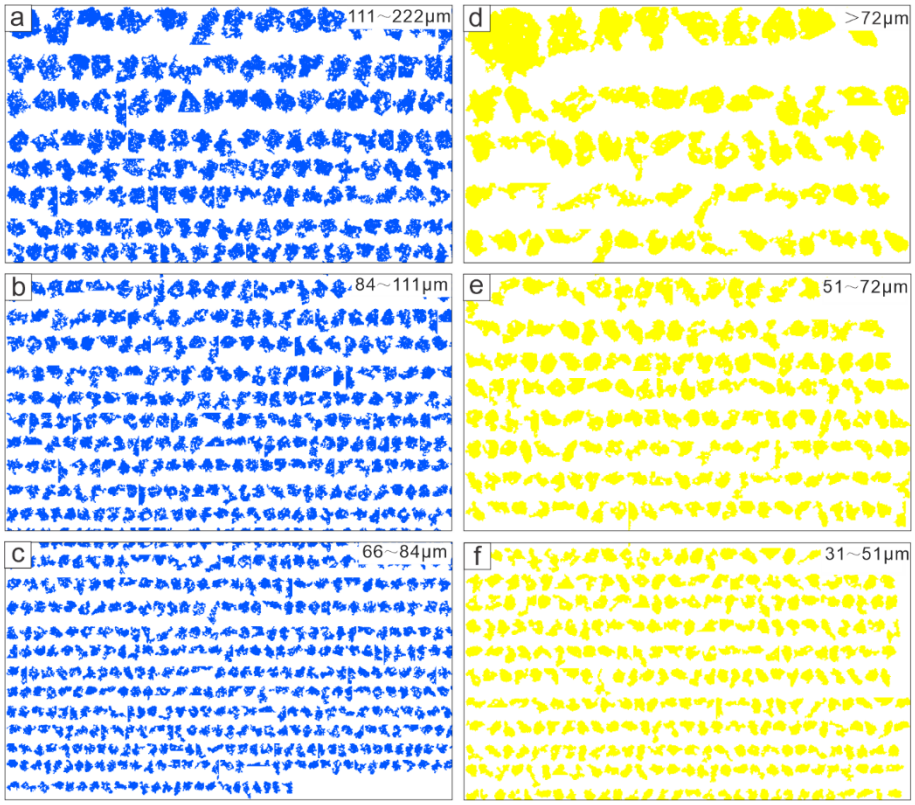


图4 方解石碳酸岩中的铌铁矿（a～c）和独居石（d～f）矿物颗粒形态和粒径特征

Fig. 4. The morphological and size characteristics for grains of columbite (a-c) and monazite (d-f) in the calcite carbonatite

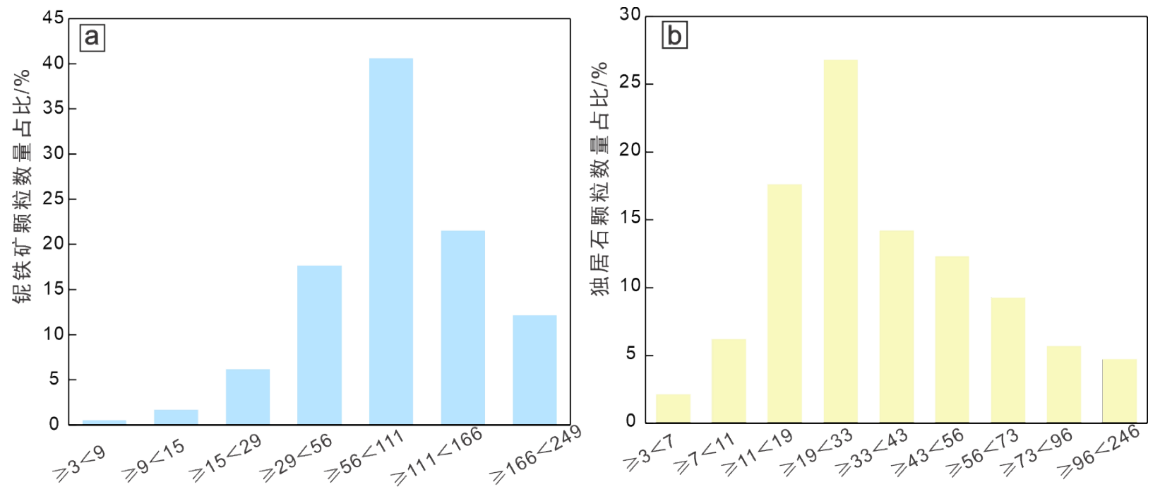


图5 方解石碳酸岩型矿石中铌铁矿和独居石颗粒粒度（横坐标μm）分布图

Fig. 5. Histograms for the size distribution of grains of columbite and monazite in the calcite carbonatite-type ore (abscissa: μm)

2.2 铁白云石碳酸岩型矿石特征

2.2.1 矿物组成分析

从TIMA软件的铁白云石碳酸岩型矿石相图可见，该类碳酸岩的主要矿物组成为：铁白云石（46.31%），其次为方解石（23.22%）、磷灰石（10.17%）、石英（8.18%）、云母（2.46%）、氟碳铈矿（1.96%）、独居石（1.55%）、铈硅石（0.46%）及氟碳钙铈矿（0.27%）等（图7a, b）。主要稀土矿物为氟碳铈矿、独居石、铈硅石和氟碳钙铈矿等，均呈细脉浸染状分布于铁白云石中（图7c～e）。此外研

究表明样品中精细矿物：闪锌矿含量为0.02%，富铌金红石为0.05%，透辉石为0.08%，铌钙矿为0.09%，石英为0.13%，白云石为0.28%。

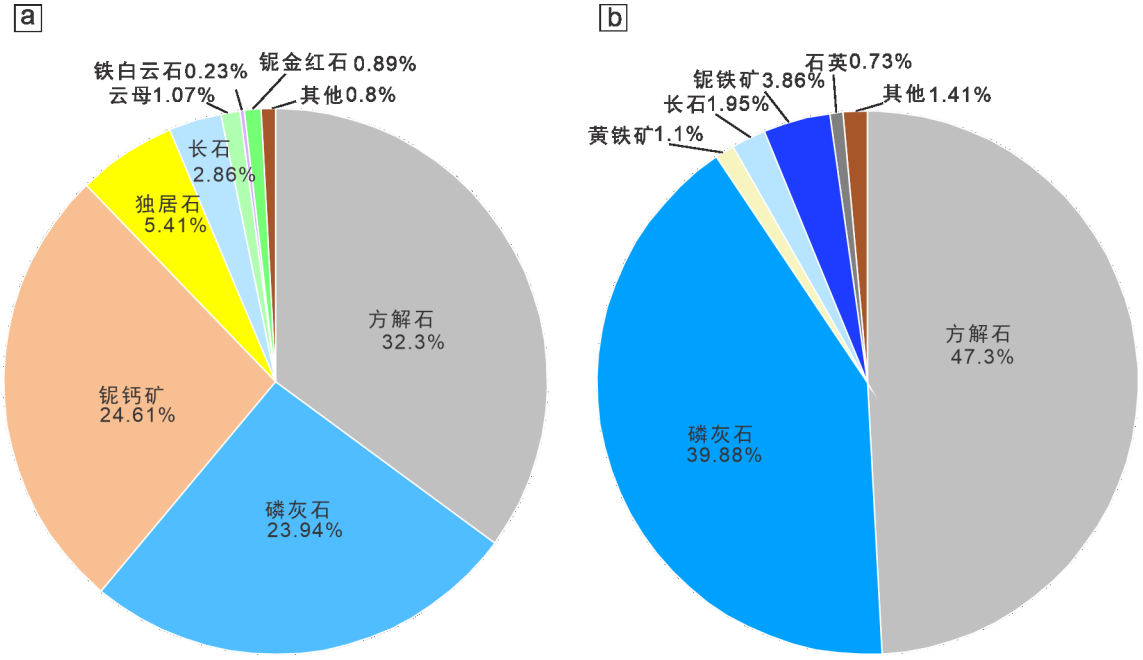


图6 方解石碳酸岩型矿石中铌铁矿（a）和独居石（b）与其他矿物共生关系统计图

Fig. 6. Statistics for the paragenetic relationships of columbite (a) and monazite (b) with other minerals in the calcite carbonatite-

2.2.2 元素组成以及赋存状态分析

利用TIMA对该样品中稀土矿物的质量分数及赋存状态研究表明：Ce元素质量分数为1.49%（图8a），且主要以独立矿物形式赋存于稀土矿物中，具体包括氟碳铈矿（42.14%）、独居石（30.38%）、铈硅石（19.37%）及氟碳钙铈矿（8.03%）（图8b）。

2.2.3 矿物颗粒粒度统计分析

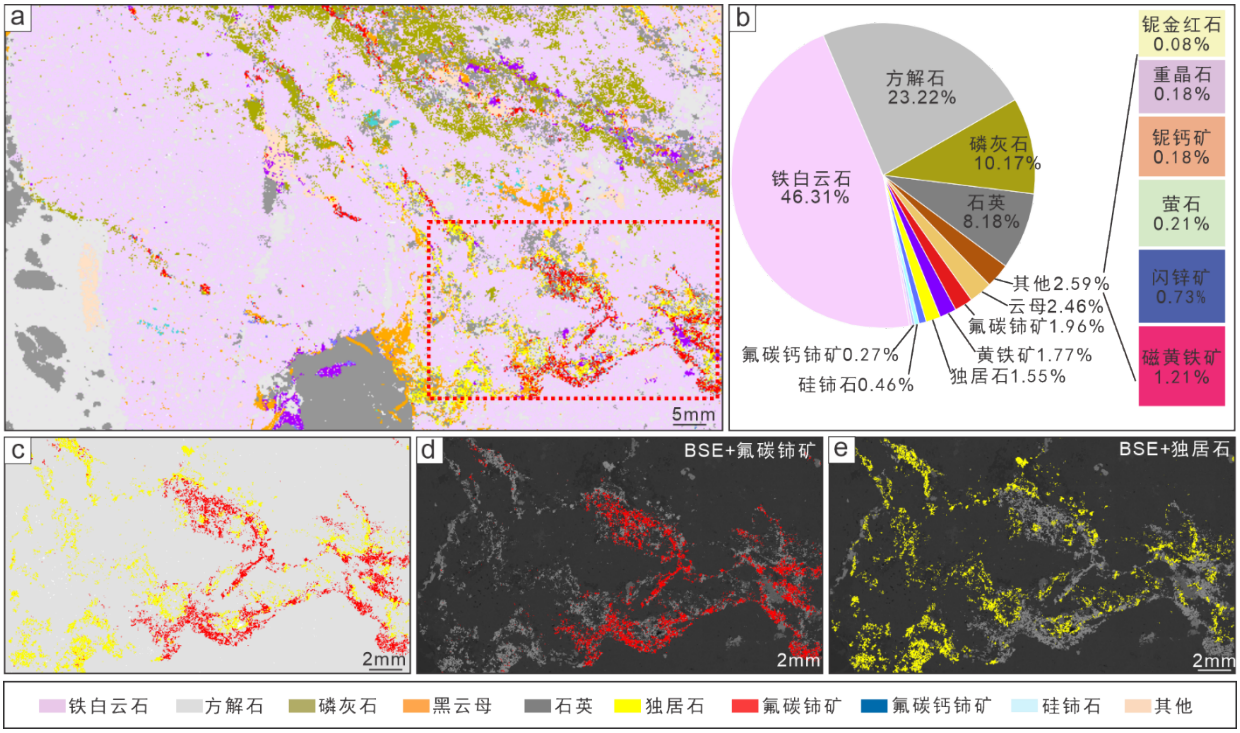
TIMA软件的颗粒查看功能显示，氟碳铈矿和独居石呈不规则粒状散布于白云石颗粒边界。对稀土矿物粒度分布的统计结果表明，氟碳铈矿与独居石的粒度分布不均且整体粒度偏大，主要集中在54.44～207.46 μm（图9、10）。

2.2.4 矿物共生关系分布

利用TIMA软件对铁白云石碳酸岩中稀土矿物的连生矿物统计显示：氟碳铈矿主要与铁白云石、石英、硅铈石及云母共生，独居石则主要与铁白云石、石英、方解石及云母共生（图11）。实验结果表明，稀土矿物的共生关系相对铌矿物较为复杂，可能对矿物分选造成不利影响。

3 讨论与结论

碳酸岩型铌-稀土矿床矿石矿物组成复杂、有用矿物粒度细微且分布不均，对传统矿物学分析方法的效率、精度、定量化、多参数整合及微区表征能力均构成挑战。本研究采用的TIMA矿物自动定量分析系统，在对此类矿石特征的精细表征中展现显著优势。该技术通过伪彩矿物分布图、元素面扫描、能谱谱图等多维度数据（图3），可直观验证矿物识别结果。例如，对于BSE灰度值接近的铌铁矿与铌钙矿，TIMA通过化学成分自动分类实现精准区分，而传统SEM-EDS需手动逐点分析，效率低下。这种可视化数据呈现提升了结果的可靠性与直观性。



a. TIMA 伪彩相图，红框为c～e图区域；b. 矿物含量百分比；c. 局部富氟碳铈矿和独居石的 TIMA 相图；d. BSE 背景下的氟碳铈矿分布相图；e. BSE 背景下的独居石分布相图。

图7 铁白云石碳酸岩型稀土矿石 TIMA 岩相学和矿物学表征

Fig. 7. The TIMA petrological and mineralogical characterization images of the ankerite carbonatite-type REE ore

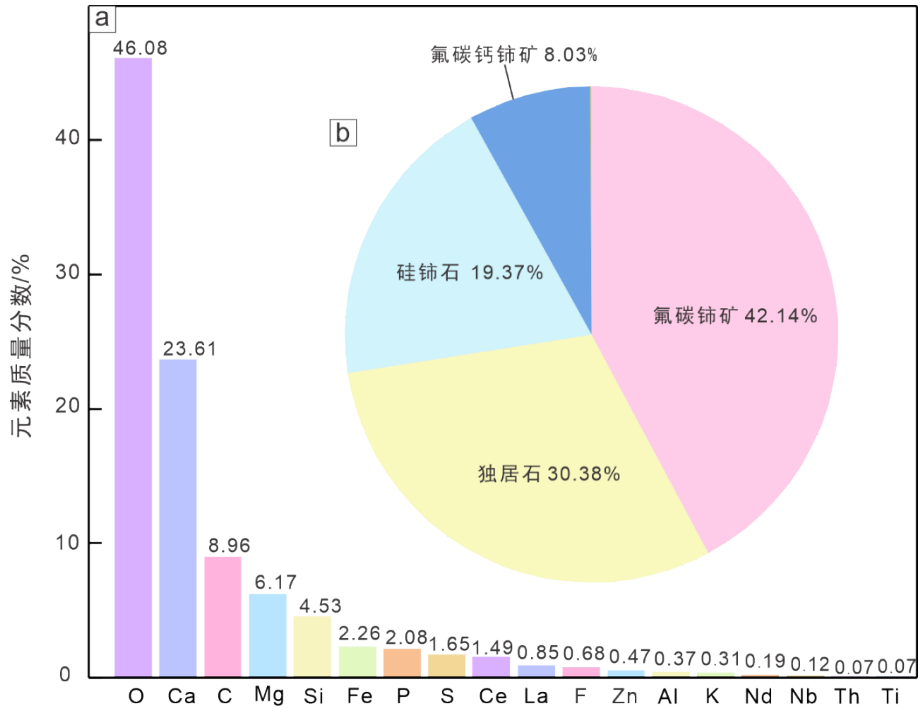


图8 铁白云石碳酸岩型铌-稀土矿石元素质量分布柱状图（a）和铈元素在不同稀土矿物中的分布图（b）

Fig. 8. Histogram for the distribution of elemental mass fractions (a) and diagram for the distribution of cerium in different REE mineral phases (b) of the ankerite carbonatite-type Nb-REE ore

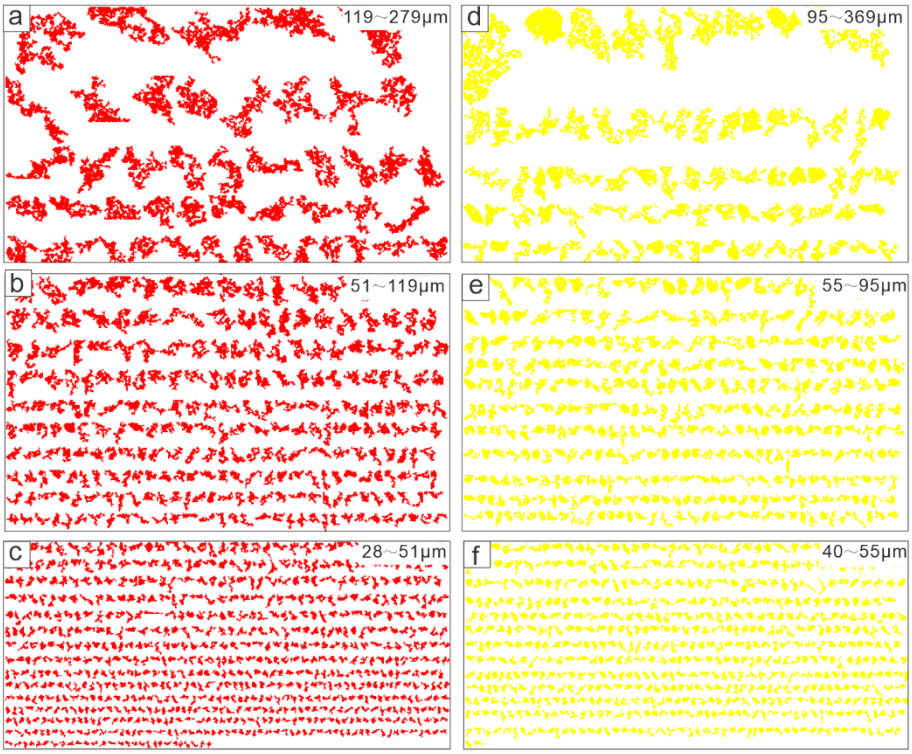


图9 白云石碳酸岩中氟碳铈矿（a～c）和独居石（d～f）的矿物颗粒粒径

Fig. 9. The size characteristics for grains of bastnäsite (a-c) and monazite (d-f) in the ankerite carbonatite

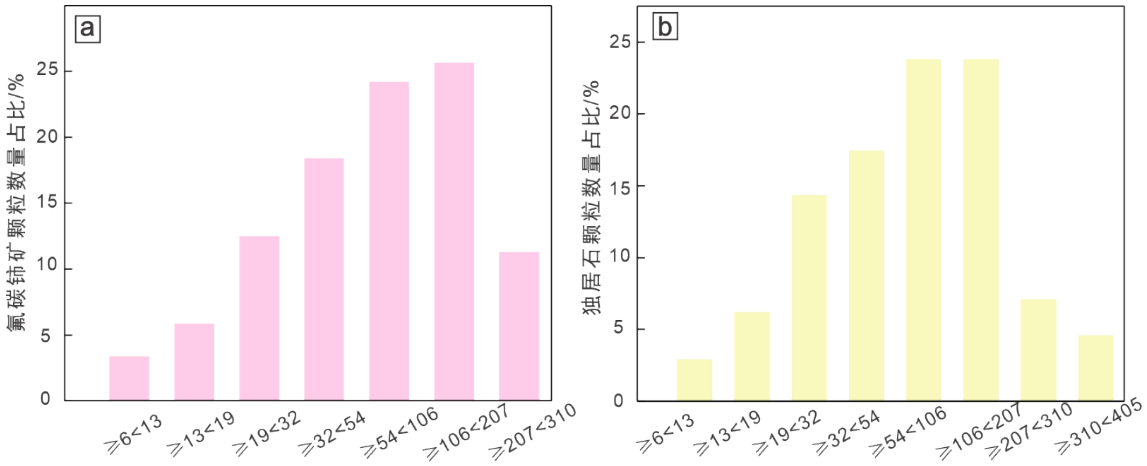


图10 铁白云石碳酸岩型矿石中氟碳铈矿和独居石颗粒粒度（横坐标μm）分布图

Fig. 10. Histograms for the size distribution of grains of bastnäsite and monazite in the ankerite carbonatite-type ore (abscissa: μm)

传统方法在微量、细粒矿物分析中存在局限：光学显微镜和常规SEM-EDS高度依赖人工经验，效率低，对含量低于0.1%的微量矿物及微米级细粒矿物的识别和定量易漏判或误判[22]；X射线衍射（XRD）则受检测限（通常>1%）和结构匹配限制，难以有效识别低含量矿物及非晶质相。TIMA依托高分辨率场发射扫描电镜与自动化能谱分析系统，实现了对微量和细粒矿物的高效精准识别[8,23]。本研究中，TIMA成功识别出含量低至0.02%的闪锌矿和0.05%的铌金红石（图1b、7b），其生成的伪彩矿物分布图（图1、7）能直观展示矿物空间关系，对理解矿石组构和矿物成因至关重要。此优势在嫦娥返回月壤样品分析中亦有体现，TIMA能高效识别月壤中主要矿物相乃至微量陨硫铁等特定物相并

精确定位，克服了传统方法处理复杂样品时耗时且仅能识别主要物相的局限[24,25]。

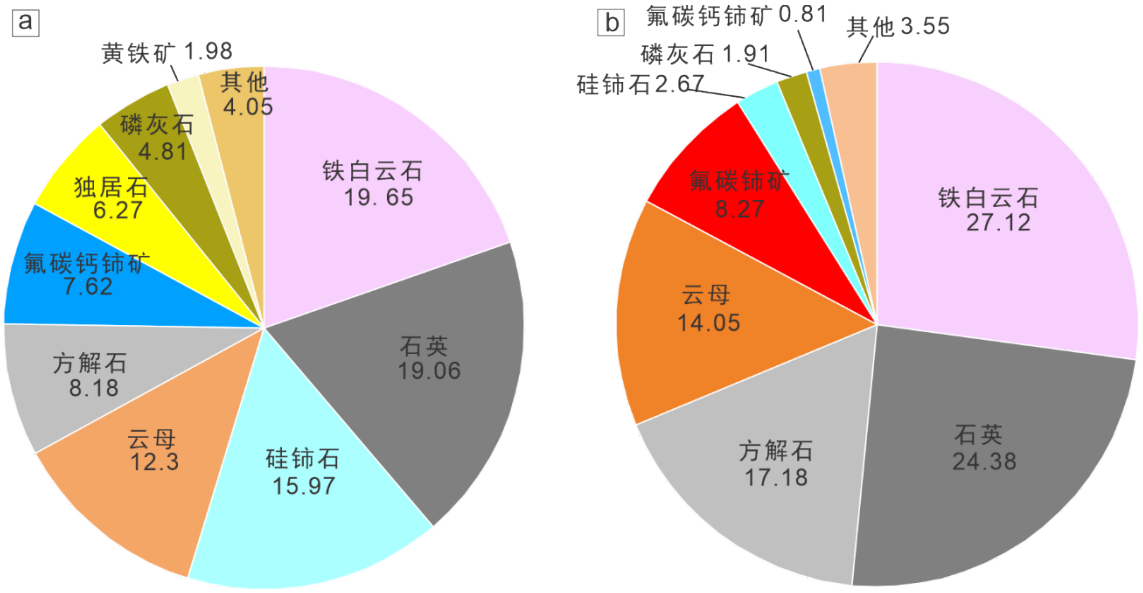


图 11 铁白云石碳酸岩型矿石中氟碳铈矿（a）和独居石（b）与其他矿物共生关系统计图

Fig. 11. Statistics for the paragenetic relationships of bastnäsite (a) and monazite (b) with other minerals in the ankerite carbonatite-type ore

电子探针（EPMA）和激光剥蚀电感耦合等离子体质谱（LA-ICP-MS）虽能提供高精度单矿物成分分析，但依赖人工挑选或仅原位分析部分颗粒，难以实现全岩尺度元素在不同矿物相中的赋存状态统计。X 射线荧光（XRF）和 ICP-MS 等全岩化学分析则仅提供元素总量，无法区分元素在不同矿物相的分配。TIMA 技术通过结合矿物定量数据与能谱分析结果，可直接计算元素在各矿物相中的赋存比例[17,23]。例如，本研究中方解石碳酸岩中 78.14% 的 Nb 赋存于铌铁矿（图 2b），铁白云石碳酸岩中 42.14% 的 Ce 赋存于氟碳铈矿（图 8b）。这些数据为评估有用矿物可利用性（如确定铌铁矿为主要铌载体）和揭示元素迁移富集规律提供了关键依据。

传统粒度分析方法（如筛析法）难以将粒度分布与具体矿物种类关联，而矿物共生关系研究依赖人工统计薄片中矿物接触关系，不仅耗时费力，主观性也较强。TIMA 技术能同步获取矿物多维度参数，包括形态特征（如独居石呈不规则粒状，图 4）、粒度分布（如铌铁矿主要分布于 56.33～166.02 μm，图 5a）及矿物间共生关系（如铌铁矿与方解石接触关系占比 32.3%，图 6a）。这些参数有助于研究成矿过程和流体性质，并直接反映有用矿物的解离难度与分选潜力（如稀土矿物复杂的共生关系可能增加选矿难度，图 11），为制定高效选矿流程提供定量支撑。

TIMA 等自动化矿物分析技术虽有优势，但也存在局限。例如，难以准确区分化学组成相近物相；稀有矿物仍需人工识别；元素检测限较高（EDS 通常＞0.1%），无法测定微量元素且精度有限；无法直接测定轻元素（H、He、Li、Be 等），仅能通过间接组成判断[8]。针对这些局限，可通过人工导入高精度定量成分数据（如 EPMA、LA-ICP-MS 结果）优化 TIMA 分类体系的成分计算[24]。因此，将 TIMA 与传统技术联用，能极大提升复杂矿物体系研究的效率与深度。此外，与国内自主研发的 BPMA 系统相比，TIMA 的同步 BSE+EDS 逐点扫描及低计数能谱叠加算法，在全薄片多参数定量表征方面具有优势；BPMA 则通常先利用 BSE 图像分相，再对不同相进行高精度 EDS 数据采集并匹配能谱数据库识别矿物，在粘连颗粒分割效率等工艺矿物学参数获取方面独具优势[26-29]。实际应用中可依据样品特征和测试目标灵活选用或联用。

综合上述研究可以看出，TIMA等矿物自动定量分析系统能快速获取大量可靠且具统计意义的矿物学数据，可为研究包括碳酸岩型铌稀土等“稀、散、细”关键金属矿床的矿化特征、矿床成因、资源评价与选矿开发利用提供有力支撑。其多维数据成果为后续高精度原位分析（如EPMA、LA-(MC)-ICP-MS、SIMS、FIB-TEM、AFM等）提供关键的目标矿物成分和结构信息。

参考文献：

[1] 吴立新, 陈方玉. 现代扫描电镜的发展及其在材料科学中的应用[J]. 武钢技术, 2005(6): 36-40.

[2] 焦汇胜. 扫描电镜能谱仪及波谱仪分析技术[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 2011: 1-388.

[3] 任小明. 扫描电镜/能谱原理及特殊分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.

[4] 孟晶, 杨洪英, 张忠辉, 等. 青海—阿斯哈矿区金矿工艺矿物学及金赋存状态研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(5): 1-7, 15.

[5] 杨波, 杨莉, 沈茂森, 等. TIMA测试技术在白云鄂博矿床铌工艺矿物学中的应用[J]. 矿冶工程, 2021, 41(6): 65-68.

[6] 叶小璐, 肖仪武. 工艺矿物学在选厂流程优化中的作用[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(4): 13-16+33.

[7] 温利刚, 贾木欣, 王清, 等. 基于扫描电子显微镜的自动矿物学新技术—BPMA及其应用前景[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(2): 12-23.

[8] 陈倩, 宋文磊, 杨金昆, 等. 矿物自动定量分析系统的基本原理及其在岩矿研究中的应用：以捷克泰思肯公司TIMA为例[J]. 矿床地质, 2021, 40(2): 345-368.

[9] 施明哲. 扫描电镜和能谱仪的原理与实用分析技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 1-400.

[10] 王俊萍, 武慧敏, 王玲. MLA在银的赋存状态研究中的应用[J]. 矿冶, 2015, 24(1): 77-80.

[11] 温利刚, 曾普胜, 詹秀春, 等. 矿物表征自动定量分析系统(AMICS)技术在稀土稀有矿物鉴定中的应用[J]. 岩矿测试, 2018, 37(2): 121-129.

[12] 肖仪武, 方明山, 付强, 等. 工艺矿物学研究的新技术与新理念[J]. 矿产保护与利用, 2018, 38(3): 49-54.

[13] Xu C, Kynický J, Song W L, et al. Cold deep subduction recorded by remnants of a Paleoproterozoic carbonated slab[J]. Nature Communications, 2018, 9: 2790.

[14] Breiter K, Ďurišová J, Hrstka T, et al. Assessment of magmatic vs. metasomatic processes in rare-metal granites: A case study of the Cínovec/Zinnwald Sn-W-Li deposit, Central Europe[J]. Lithos, 2017, 292: 198-217.

[15] Slavík L, Valenzuela-Ríos J I, Hladil J, et al. Warming or cooling in the Pragian? Sedimentary record and petrophysical logs across the Lochkovian-Pragian boundary in the Spanish Central Pyrenees[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2016, 449: 300-320.

[16] 张然, 叶丽娟, 党飞鹏, 等. 自动矿物分析技术在鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿矿物鉴定和赋存状态研究中的应用[J]. 岩矿测试, 2021, 40(1): 61-73.

[17] Liu T T, Song W L, Kynicky J, et al. Automated quantitative characterization REE ore mineralogy from the giant Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, China[J]. Minerals, 2022, 12(4): 426.

[18] Aylmore M G, Merigot K, Quadir Z, et al. Applications of advanced analytical and mass spectrometry techniques to the characterisation of micaceous lithium-bearing ores[J]. Minerals Engineering, 2018, 116: 182-195.

[19] Breiter K, Badanina E, Ďurišová J, et al. Chemistry of quartz – A new insight into the origin of the Orlovka Ta-Li deposit, Eastern Transbaikalia, Russia[J]. Lithos, 2019, 348: 105206.

[20] 高倩倩, 刘杨, 杨艳芳, 等. MLA与偏光显微镜在工艺矿物学研究中的应用对比[J]. 矿业工程, 2018, 16(4): 39-40.

[21] 刘榕鑫, 朱坤, 谢海云, 等. 云南斑岩型多金属金矿的嵌布特征及赋存状态研究[J]. 岩矿测试, 2018, 37(4): 404-410.

[22] 朱丹, 桂博艺, 王芳, 等. AMICS测试技术在铌矿中的应用—以竹溪铌矿为例[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(3): 1-7.

[23] Hrstka T, Gottlieb P, Skála R, et al. Automated mineralogy and petrology-applications of TESCAN integrated mineral analyzer (TIMA)[J]. Journal of Geosciences, 2018: 47-63.

[24] Xue S N, Song W L, Guo Z, et al. Mineralogy and provenance of the Chang'e-6 shoveled lunar samples[J]. Lithos, 2025, 516/517: 108265.

[25] Chen Q, Song W L, Wang Z C, et al. Automated fast and quantitative mineralogical characterization of Chang'e-5 lunar soils. Atomic Spectroscopy, 2024, 45(5): 381-390.

[26] 贾木欣, 周俊武, 应平, 等. 工艺矿物学自动测试系统BPMA的研制及应用[J]. 有色冶金设计与研究, 2017, 38(4): 1-12, 16.

[27] 付强, 王均, 贾木欣, 等. 一种新型钼矿床中钼的赋存状态及对选矿工艺的影响[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(1): 123-128.

[28] 赵玉卿, 应永朋, 熊艳, 等. BPMA在某低品位铌钽矿工艺矿物学研究中的应用[J]. 矿产综合利用, 2021, 42(5): 129-134.

[29] 王清, 贾木欣, 付强, 等. BPMA对含铁样品的分析应用[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(3): 80-84.