

doi: 10.11720/wtyht.2022.1381

刘东盛, 陈圆圆. 矿物自动分析系统在碳酸岩型稀土地球化学勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(3): 637-644. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1381>

Liu D S, Chen Y Y. Application of automated mineral analysis systems in geochemical exploration of carbonatite-related REE deposits[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3): 637-644. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1381>

# 矿物自动分析系统在碳酸岩型稀土地球化学勘查中的应用

刘东盛<sup>1,2,3</sup>, 陈圆圆<sup>4</sup>

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所自然资源部地球化学探测重点实验室, 河北廊坊 065000; 2. 联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研究中心, 河北廊坊 065000; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 河北省区域地质调查院, 河北廊坊 065000)

**摘要:** 为稳固中国稀土资源大国地位, 近年来我国不断加强稀土资源勘查力度。地球化学勘探是矿产勘查重要手段, 本文通过总结以往稀土化探工作, 查明其中存在的问题并提出解决方案。总结前人工作发现, 碳酸岩型稀土矿致异常具有衬度低、规模小的特点, 其原因主要是: ①相对地壳丰度, 稀土矿工业品位富集程度较低, 容易被花岗岩等引起的非矿致异常稀释; ②稀土成矿指示性矿物粒度小、分选难, 对其表生迁移富集规律认识不深, 难以制定有针对性的采样方法。基于扫描电镜和能谱的自动矿物分析系统, 可实现微米级稀土矿物的化学成分和形貌参数的定量统计, 为稀土矿物表生迁移规律研究提供基础。近年来在化探领域, 前人利用矿物自动分析系统开展矿体—水系沉积物系统中微细粒矿物含量变化规律研究, 显示出该方法的良好应用前景。未来可利用矿物自动分析系统开展: ①风化过程中稀土矿物粒度变化规律研究; ②矿体—水系沉积物系统中稀土矿物迁移富集规律研究。通过厘清矿体—土壤—水系沉积物系统中稀土成矿指示性矿物的分布特征和迁移富集规律, 为稀土化探工作提供理论支撑。

**关键词:** 矿物自动分析系统; QEMSCAN; 碳酸岩型稀土矿; 地球化学勘查

**中图分类号:** P632+.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2022)03-0637-08

## 0 引言

稀土元素对国防、前沿科技等领域具有重要战略意义, 是中国可以对欧美国家“卡脖子”的杀手锏, 被视为关键战略资源<sup>[1-2]</sup>。中国稀土储量世界占比从 1996 年的 90% 下降到 2018 年的 37%, 稀土强国的地位受到巨大威胁<sup>[3]</sup>。因此必须加强稀土资源勘查, 巩固中国稀土强国的地位。

中国的地球化学勘查走在世界前列, 在传统金属矿的勘查中发挥了巨大的作用<sup>[4]</sup>。近年来随着国家找矿战略重心的转移, 区域尺度、国家尺度乃至

全球尺度稀土地球化学勘查逐渐受到重视<sup>[5-7]</sup>。碳酸岩型稀土矿是最重要的稀土矿类型, 其找矿效果决定着中国稀土找矿能否取得重大突破。本文对地球化学勘查在碳酸岩型稀土矿找矿过程中存在的问题进行深入剖析, 找到制约化探在稀土找矿中的关键环节并提出解决方案。

## 1 碳酸岩型稀土矿地质特征

稀土矿床可分为内生、外生和变质矿床<sup>[8]</sup>。与碳酸岩相关的内生稀土矿床是轻稀土的主要来

收稿日期: 2021-07-09; 修回日期: 2021-08-26

基金项目: 行业基金项目“深部地壳探测”(SinoProbe-04; 201011053); 中国地质调查局地质调查项目“化学地球基准与调查评价”(DD20190450)

第一作者: 刘东盛(1985-), 男, 从事关键资源地球化学填图研究工作。Email: dopsonliu@sina.com

源<sup>[9-10]</sup>。中国已探明的岩浆碳酸岩型稀土矿床(点)有 20 余个,包括白云鄂博和牦牛坪超大型稀土矿床,大陆槽和庙垭大型稀土矿床及一系列中、小型稀土矿床和矿化点,其储量之和占据国内稀土总储量的 80% 以上。

碳酸岩型稀土矿的形成机制复杂,主流观点认为,源于富稀土的地幔源区的母岩浆,在上升侵位过程中不断演化,进一步富集稀土元素,在岩浆演化晚期和流体阶段,一系列物理化学条件变化造成稀土元素的大规模沉淀<sup>[11]</sup>。稀土工业矿物氟碳铈矿从碳酸岩岩浆和流体中直接结晶出来,或与方解石、萤石、重晶石、石英等矿物共生,形成脉体穿插于碳酸岩杂岩体及围岩中<sup>[12]</sup>。碳酸岩流体演化过程非常迅速,不利于远程矿化的发生,因此稀土矿化或发生在碳酸岩体内或紧邻碳酸岩体的围岩中<sup>[11]</sup>。

碳酸岩型稀土矿具有高品位、大规模、易提取的特点,除富集轻稀土外,还常富集稀有元素,经过风化淋滤还可超常富集重稀土,具有很高的综合利用价值<sup>[8,13-14]</sup>。因此,碳酸岩型稀土矿是近年来稀土勘探和开发的重点方向,但找矿成果却不尽理想<sup>[2,15-16]</sup>。

## 2 碳酸岩型稀土化探找矿中存在的问题

### 2.1 中国碳酸岩型稀土化探找矿的困境

水系沉积物化探填图方法自创立以来已经历了

近 70 年的检验<sup>[17]</sup>,已成为被普遍接受的低成本、快速的适用于水系发育地区最主要的地球化学勘查方法。各大填图计划几乎无一例外都将水系沉积物作为主要采样介质<sup>[18-20]</sup>。以水系沉积物为主要介质的区域尺度地球化学填图(区域化探扫描计划)在中国的矿产勘查中发挥了重要的作用<sup>[21]</sup>。然而,从稀土找矿的历史来看,化探在碳酸岩型稀土矿的发现阶段贡献并不大。例如,中国已发现的白云鄂博、微山、庙垭等重要内生稀土矿床,大多是在其他矿种勘查或开采过程中意外发现的<sup>[4,22]</sup>,只有川西稀土成矿带中的部分矿床是通过化探方法发现<sup>[4]</sup>。

利用区域尺度地球化学图圈定成矿远景区或成矿靶区,可为稀土勘查的战略部署提供依据。将区域尺度 La 元素地球化学图与碳酸岩型稀土矿床的分布拟合(图 1),虽然矿床均落在 La 异常区内,但是矿致异常的衬度低且规模小。然而这几处矿床的稀土储量占据了我国南方总储量的大半。与稀土元素形成鲜明对比的是,Au 异常与金矿床有密切的空间对应关系(图 2)。1:20 万区域尺度 Au 异常在中国金化探勘查中发挥了重要的先导作用<sup>[4]</sup>。虽然稀土成矿过程常见伴生元素 F、Ba、U、Th、Nb、Ta、Ti、Fe 异常,但其极易受到其他地质过程干扰,成矿指示性意义远不如稀土元素本身<sup>[23]</sup>。综上,由于所圈定稀土异常衬度不够强,找矿指示性意义弱,导致稀土化探找矿效果不好,这正是当前稀土勘查的困境。

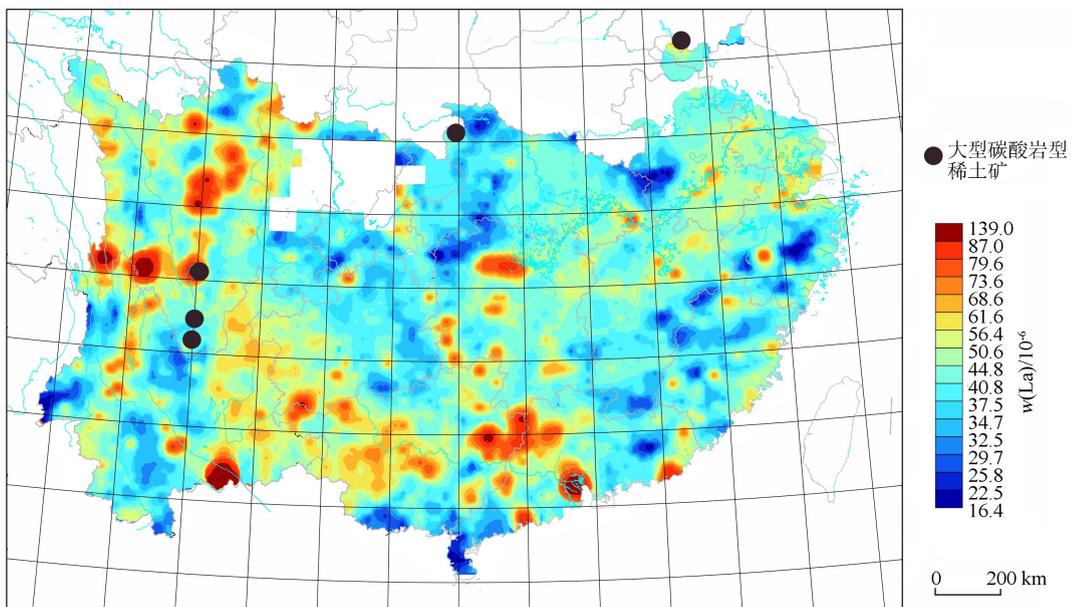


图 1 中国南方镧地球化学模式与碳酸岩型稀土矿分布<sup>[24]</sup>

Fig.1 Lanthanum geochemical patterns and carbonatite-type REE deposits in southern China

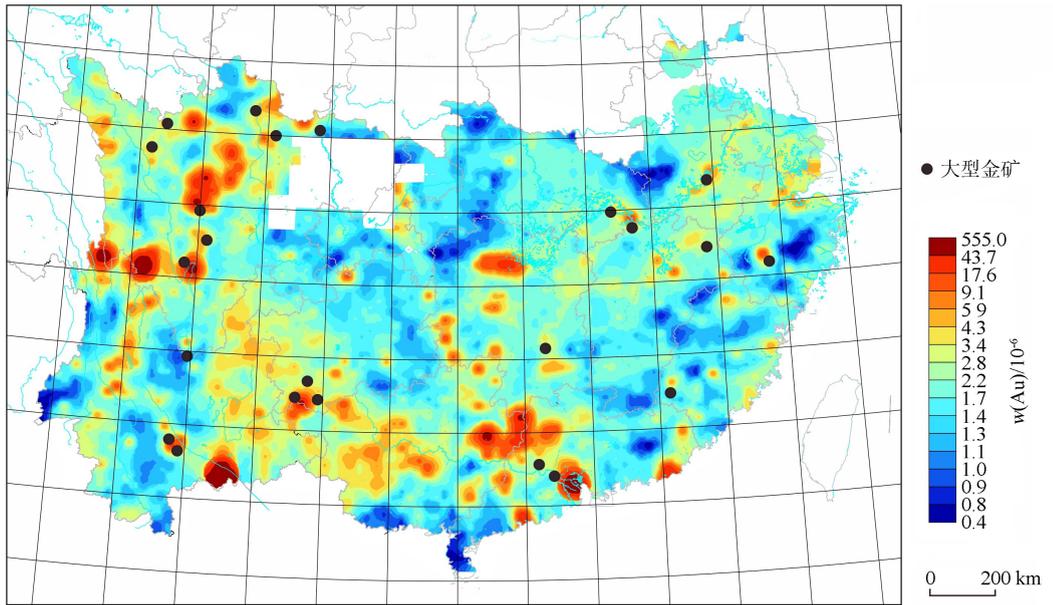


图 2 中国南方金地球化学模式与大型金矿床分布<sup>[24]</sup>

Fig.2 Gold geochemical patterns and carbonatite-type REE deposits in southern China

## 2.2 稀土化探困境之原因

### 2.2.1 稀土矿致异常易被稀释

常见金属元素(Au、Pt、Cu、Pb、Zn、Cr、Mn、W、Li、U)工业品位下限/上地壳丰度的比值范围为80(Cu)~1429(Cr),平均比值431,而碳酸岩型原生稀土矿工业品位下限/上地壳丰度比值仅为29<sup>[25-26]</sup>,还不到其他金属平均比值的1/10。此外,碳酸岩型稀土矿矿化范围小,统计世界26个碳酸岩体平均出露范围3 km<sup>2</sup>,外围的碱性岩体出露2 km<sup>2</sup>,最外围的蚀变岩体5 km<sup>2</sup>。即整个勘查目标仅10 km<sup>2</sup><sup>[27]</sup>。

稀土矿低富集且出露少的特性,导致水系沉积物中的矿致异常极易被削弱甚至掩盖。成矿元素从矿体运移并沉积在水系沉积物过程中,不可避免受到背景区物质稀释作用影响。成矿元素在矿体相对地壳丰度富集程度越高,越不易受稀释作用影响,所圈定的矿致异常越突出。

### 2.2.2 稀土矿物鉴定统计困难

碳酸岩型稀土矿中稀土主要赋存于微细粒的氟碳铈矿中。中国已发现的碳酸岩型稀土矿原生矿物粒度主要分布在10~100 μm<sup>[28-31]</sup>,土壤或沉积物中大部分稀土矿物直径小于65 μm<sup>[32-34]</sup>。在光学镜下,微细粒稀土矿物统计鉴定极难,严重阻碍了稀土矿物富集规律的研究<sup>[35]</sup>,特别是稀土矿物的粒度分布规律及其控制因素方面的研究。对稀土矿物的表生富集行为认识不清,是化探找矿陷入困境的根本原因。

## 2.3 解决困境的关键

中国区域化探扫面计划在金矿勘查取得了巨大成功,其中一个关键因素就是通过对矿体及下游水系沉积物中Au的分布粒度及其表生迁移富集规律开展了深入研究,认识到超微细金对成矿的指示意义。在采样时摒弃传统颗粒金形成的异常,捕捉超微细金形成的异常,不仅解决了粒金效应带来的采样难题,甚至还推动了金的分析测试的进步,改变金异常评价方式,创立新的Au地球化学勘查体系。从此我国Au化探走在世界前列,并取得了巨大的找矿突破<sup>[36-39]</sup>。

氟碳铈矿是碳酸岩型稀土矿最主要甚至是唯一的工业矿物<sup>[2]</sup>(图3),是矿体稀土元素的主要载体<sup>[40]</sup>,其密度4.9~5 g/cm<sup>3</sup>、莫氏硬度4~5,是典型的重矿物。花岗岩、碱性岩以及伟晶岩也常富集稀土元素,但不同的是,其稀土元素主要赋存于独居石、磷钇矿、褐帘石、硅钠铈镧矿、菱形绿柱石、铈磷灰石、烧绿石等副矿物中(图3)<sup>[23,41-43]</sup>。因此,氟碳铈矿被认为是碳酸岩型稀土矿的非常有效的指示性矿物<sup>[27,35]</sup>。但目前我们对这些关键的稀土矿物表生迁移规律认识非常有限,难以制定科学的化探工作方法,突出氟碳铈矿引起的矿致异常,削弱其他稀土矿物引起的非矿致异常。

稀土矿物的表生迁移富集规律是稀土化探工作的理论根基,能够对整个稀土化探的工作体系产生影响。对该规律认识不清,是使稀土化探勘查陷入困境的根本原因。因此,必须使用一种行之有效的



a—钠铁闪石;b—针状霓石;c—萤石;d—绿石;e—独居石;f—氟碳铈矿(白色);g—硅铈铈矿;h 褐帘石(暗色部分)  
a—sodium amphibole; b—acicular neonite; c—fluorite; d—chlorite; e—monazite; f—bastnasite (white); g—nastite; h—epidote (dark part)

图 3 部分常见富稀土矿物镜下照片<sup>[35]</sup>

Fig.3 Some common REE-rich minerals under a microscope

手段,精确分选、鉴定和定量统计各稀土矿物及其各项参数,攻克稀土矿物表生迁移富集规律这一亟待解决的难题,才能为稀土化探打牢理论根基,从根本上走出稀土化探找矿的困境。

### 3 QEMSCAN 等矿物自动分析系统的引入

#### 3.1 传统矿物鉴定方法的局限性

传统的光学镜下矿物统计鉴定技术(后文统称“传统方法”)往往需要先对矿物进行富集,利用矿

物自身的密度、磁性、电性及表面能等特性,从疏松沉积物中分选出粒度较大(>63 μm)的目标矿物,再通过人工光学镜进行鉴定和定量统计。

传统方法自身存在很大的局限性。传统方法鉴定极限通常为 65 μm 左右,矿体及其风化物中的稀土矿物多以细粒形式存在(<65 μm)<sup>[44]</sup>。加之稀土矿物化学成分复杂多变<sup>[45]</sup>,甚至常以非晶质形式存在<sup>[23]</sup>,传统方法难以对沉积物中的微细粒稀土矿物进行精准的鉴定和统计。从事传统方法鉴定的学者认为未来的研究应使用基于扫描电镜的 MLA 或 QEMSCAN 技术手段,开展细粒稀土指示性矿物研究<sup>[32,35,44]</sup>。

#### 3.2 矿物自动分析系统优势

MLA(mineral liberation analyzer)和 QEMSCAN(quantitative evaluation of minerals by scanning electron microscopy)技术分别由澳大利亚昆士兰大学和澳大利亚 CSIRO 发明<sup>[46-47]</sup>。二者的发明之初为满足采矿业需求,目前已逐渐广泛应用于矿床学、沉积学、石油地质等领域<sup>[48-50]</sup>。此外还有 Tescan 公司的 TIMA(tescan-integrated mineral analyser)和 Zeiss 公司的 ZMM(ZEISS mineralogic mining)技术。这些分析技术原理相近(图 4),都是结合了电子背散射图像、能(波)谱以及分析系统来获得并统计各项矿物参数,差别在于配备了不同型号的扫描电镜、能(波)谱仪、软件系统和分析流程。

得益于扫描电镜的超高分辨率能谱和先进的统计软件相结合,QEMSCAN 技术的优势是对微细粒矿物进行精准定量分析统计。QEMSCAN 的扫描栅格可小至 0.8~10 μm<sup>[51]</sup>,对 72 种化学元素进行能谱分析,可以胜任对微细粒稀土矿物的鉴定和统计工作<sup>[34]</sup>。QEMSCAN 另一大优势是具有灵活多样的分析模式,可针对某种特定微细粒矿物的数量和质量占比,以及每个颗粒的粒径、周长和面积分别进行分别统计<sup>[34,51]</sup>。前人利用 QEMSCAN 统计矿物周长与面积比值刻画矿物磨圆度,在区分磷灰石成因研究中取得良好效果<sup>[51]</sup>。此外还可通过配套的

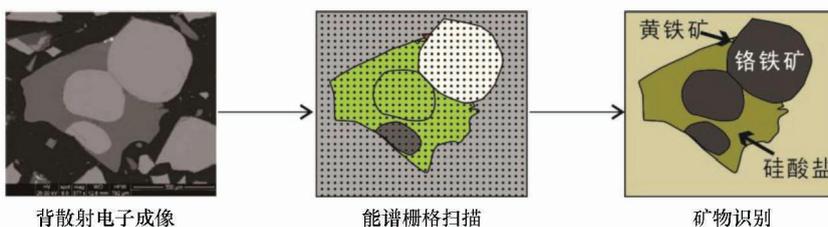


图 4 QEMSCAN 方法分析流程<sup>[44]</sup>

Fig.4 Analysis flow of QEMSCAN method

能谱仪对矿物表面进行元素面扫描来获得主要组成元素的分布模式。虽然其测试精度不如 LA-ICP-MS 等手段,但是在元素含量较高的情况下,能谱分析能够较精确反映元素相对含量差异,并将矿物的化学成分与粒径等其他属性之间建立关系。

### 3.3 矿物自动鉴定系统在稀土勘查研究中的应用实例

在研究稀土矿物表生风化、迁移规律中,需要了解汇水域系统中,沉积物样品的稀土矿物含量变化规律。但是,随着迁移距离增加,稀土矿物不断被稀释,传统方法难以分选出痕量目标稀土矿物,因此无法开展相关矿物迁移规律研究。利用矿物自动分析系统的高精度和先进统计方式,能够增加相关研究的精度和维度。这对研究稀土矿物远距离迁移规律研究具有重要意义。

加拿大著名指示性矿物找矿科学家在利用传统方法对稀土矿物的表生迁移规律研究的文章中指出,在未来相关研究中,应该引入 MLA、QEMSCAN 等矿物自动分析系统技术,以克服传统鉴定方法无法避免的局限性<sup>[35]</sup>。Lehtonen 等<sup>[33]</sup>利用 MLA 系

统对冰碛物中的指示性矿物含量进行定量统计,认为矿物含量可反映地质背景的变化。该研究解决了自动矿物分析系统的采样代表性问题,即使其采样重量远小于传统方法。Mackay 等<sup>[34]</sup>利用 QEMSCAN 方法,对加拿大大不列颠一处碳酸岩体及其下游水系沉积物系统中的稀有和稀土矿物开展了探索性研究,通过对岩体及下游沉积物连续采样直至 13 km 处(图 5a),发现了大量传统方法难以分选的 0~60 μm 微细粒稀土矿物,并给出了精确的矿物占比(图 5b),指出 QEMSCAN 方法特别适合用于矿物粒度细且成分复杂的稀土矿勘查。Grammatikopoulos 等<sup>[53]</sup>利用 QEMSCAN 对滨海砂矿中的磷灰石的磨圆度和矿物伴生关系进行了精确的定量统计,以此辨别磷灰石成因类型及其含量(图 6),从而更加精准评价独居石砂矿的成矿潜力。该研究展示了 QEMSCAN 对矿物粒度和磨圆度准确定量评价的能力。上述一系列研究表明,在稀土矿物表生迁移研究中,矿物自动分析系统可对样品中所有微细粒稀土矿物的各项参数进行全面而精准的定量统计,相对传统方法具有显著优势。

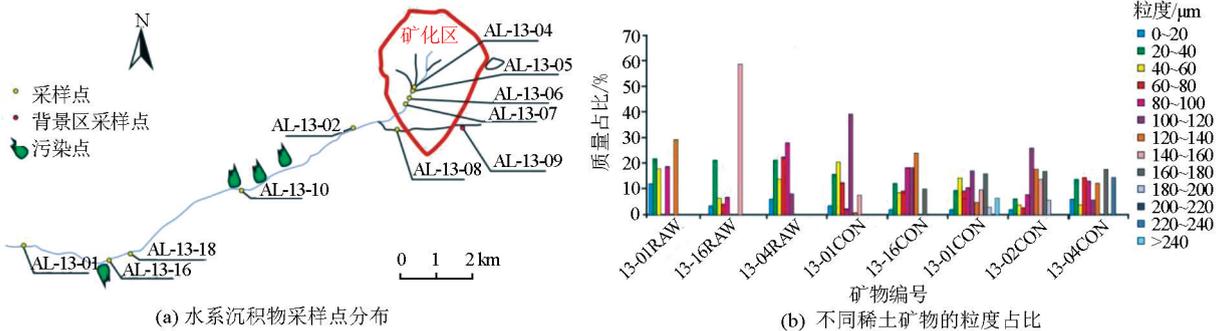


图 5 QEMSCAN 用于表生稀土矿物迁移规律研究实例<sup>[34]</sup>

Fig.5 An example of studying the surficial migration law of rare earth minerals with QEMSCAN

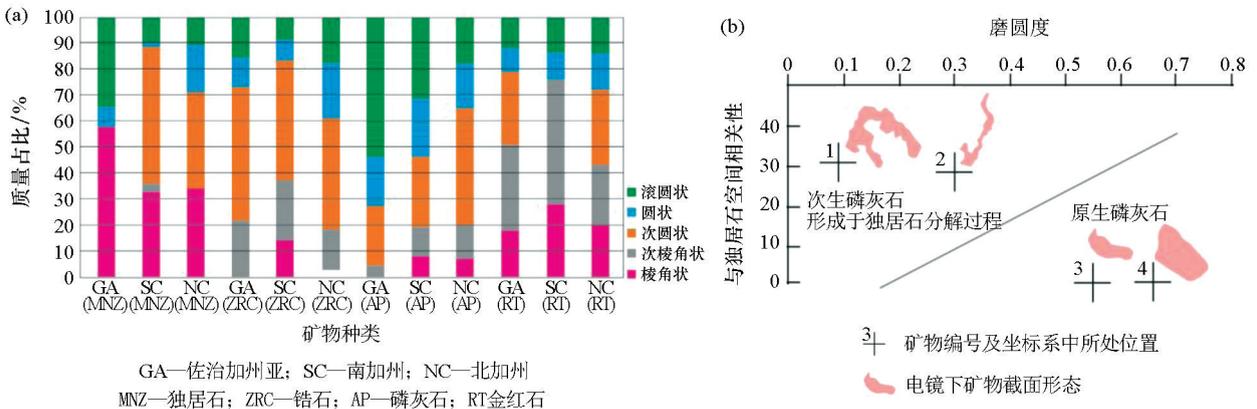


图 6 QEMSCAN 定量评价稀土矿物磨圆度 (a) 和矿物伴生关系 (b) 的实例<sup>[52]</sup>

Fig.6 An example of quantitative evaluation of roundness and mineral association of rare earth minerals with QEMSCAN

GA—佐治加利亚; SC—南加州; NC—北加州  
MNZ—独居石; ZRC—锆石; AP—磷灰石; RT—金红石

## 4 矿物自动分析系统在稀土勘查研究中的应用方向

目前我国对碳酸岩型稀土矿的地球化学勘查研究工作开展较少,特别是基础理论研究基本属于空白,国际上也处于起步阶段。这与稀土重要的战略地位极不相称。本文在深入分析稀土地球化学勘查中存在的问题基础上,提出利用矿物自动鉴定系统开展稀土矿物表生迁移富集规律的想法。相关研究可以从如下两个方面开展:①不同景观区风化过程中稀土矿物粒度变化规律研究。风化是矿物表生行为的第一步,而粒度对水系中矿物的迁移规律具有决定性的影响<sup>[53-55]</sup>。矿物自动分析系统能够准确鉴定稀土矿物,并精准定量计算出各稀土矿物的粒度分布,从而搞清楚不同景观区的风化作用对稀土矿物的改造规律。②水系沉积物中稀土矿物的分布规律研究。了解矿体—水系沉积物系统中,从上游至下游随迁移距离变长过程中,稀土矿物含量的变化,以及在相同迁移距离下,不同沉积部位的稀土矿物富集程度差异。通过上述研究,可为不同景观区碳酸岩型稀土化探工作方法提供理论依据,包括采样粒度、介质、密度以及异常解释,助力中国实现稀土找矿新突破。

## 5 结语

制约中国稀土化探找矿效果的关键因素是稀土矿致异常容易被稀释,但由于对稀土成矿指示性矿物的表生迁移规律认识不深,难以制定有针对性的采样方法。稀土矿物一般粒度较细,相比于传统矿物挑选统计方法,基于高分辨率扫描电镜和能谱分析的矿物自动分析系统(如 QEMSCAN 和 MLA)在矿物定量统计分析方面具有显著优势。通过将 QEMSCAN 等引入稀土化探理论研究中,有助于深入认识稀土矿物表生迁移富集规律,从而为稀土化探提供理论支撑。

## 参考文献 (References):

[1] U.S. Department of Defense. Strategic and critical materials 2013 report on stockpile requirements [R]. Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology and Logistics, 2013: 189.

[2] 王瑞江,王登红,李建康.稀有稀土稀散矿产资源及其利用开发[M].北京:地质出版社,2015.

Wang R J, Wang D H, Li J K. Utilization and development of rare, rare earth and scattered elements[M]. Beijing: Geological

Publishing House, 2015.

[3] 陈甲斌,霍文敏,李秀芬,等.中国与美国和欧盟稀土资源形势对比分析[J].中国国土资源经济,2020,33(8):8-12.

Chen J B, Huo W M, Li X F, et al. Comparative analysis of rare earth resources situation between China, the U. S. and EU[J]. Natural Resource Economics of China, 2020, 33(8): 8-12.

[4] 张洪涛,牟旭赞,孙文珂,等.中国找矿发现史:物化探卷[M].北京:地质出版社,2002:591-594.

Zhang H T, Mou X Z, Sun W K, et al. History of prospecting and discovery in China: Geophysical and geochemical exploration volume[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 591-594.

[5] 刘东盛,周建,严桃桃,等.腾冲地块稀土地球化学背景与泥岩中稀土超长富集特征[J].地球学报,2020,41(6):756-769.

Liu D S, Zhou J, Yan T T, et al. Geochemical background of REEs: Super-enrichment in argillaceous rocks in Tengchong block [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2020, 41(6): 756-769.

[6] 范宏瑞,牛贺才,李晓春,等.中国内生稀土矿床类型,成矿规律与资源展望[J].科学通报,2020,65(33):134-149.

Fan H R, Niu H C, Li X C, et al. The types, ore genesis and resource perspective of endogenic REE deposits in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 134-149.

[7] 王学求,周建,迟清华,等.中国稀土元素地球化学背景与远景区优选[J].地球学报,2020,41(6):747-758.

Wang X Q, Zhou J, Chi Q H, et al. Geochemical background and distribution of rare earth elements in China: Implications for potential prospects[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2020, 41(6): 747-758.

[8] 林传仙,刘义茂,王中刚,等.中国矿床[M].北京:地质出版社,1996.

Lin C X, Liu Y M, Wang Z G, et al. China's deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.

[9] 邹天人,李庆昌.中国新疆稀有及稀土金属矿床[M].北京:地质出版社,2006:187-188.

Zou T R, Li Q C. Rare and rare earth metallic deposits in Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 187-188.

[10] Verplank P, Mariano A, Mariano A. Rare earth element ore geology of carbonatites [J]. Society of Economic Geologists, Inc., 2016, 18: 5-18.

[11] 谢玉玲,夏加明,崔凯,等.中国碳酸岩型稀土矿床:时空分布与成矿过程[J].科学通报,2020,65(33):150-164.

Xie Y L, Xia J M, Cui K, et al. Rare earth elements deposits in China: Apatio-temporal distribution and ore-forming processes[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 150-164.

[12] 宋文磊,许成,王林均,等.与碳酸岩—碱性杂岩体相关的内生稀土矿床成矿作用研究进展[J].北京大学学报:自然科学版,2013,49(4):725-740.

Song W L, Xu C, Wang L J, et al. Review of the metallogeneses of the endogenetic rare earth elements deposits related to carbonatite-alkaline complex[J]. Journal of Peking University: Natural Science Edition, 2013, 49(4): 725-740.

[13] 施泽民,叶幼兰.四川牦牛坪稀土矿区的氟碳铈矿[J].矿物岩石,1993,13(3):42-47.

Shi Z M, Ye Y L. Bastnaesite from rare earth mining in Maoniuping, Sichuan province[J]. Petrology, 1993, 13(3): 42-47.

[14] Zajac I S. John Jambor's contributions to the mineralogy of the Strange Lake peralkaline complex, Quebec-Labrador, Canada [J]. The Canadian Mineralogist, 2015, 53: 885-894.

- [15] Orris G J, Grauch R I. Rare earth element mines, deposits, and occurrences [R]. Open-File Rep 02-189. Reston: US Geological Survey, 2002:28-57.
- [16] Kanazawa Y, Kamitani M. Rare earth minerals and resources in the world [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, 408-412: 1339-1343.
- [17] Hawkes H E, Webb J S. *Geochemistry in mineral exploration* [M]. New York: Harper & Row Publishers, 1962.
- [18] Salminen R, Batista M J, Bidovec M, et al. FOREGS geochemical atlas of Europe, Part 1: Background information, methodology and maps [M]. Espoo: Geological Survey of Finland, 2005.
- [19] 谢学锦,任天祥,孙焕振.中国地球化学图集 [M].北京:地质出版社,2012.  
Xie X J, Ren T X, Sun H Z. *Geochemical atlas of China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012.
- [20] Wang X Q, the CGB Sampling Team. China geochemical baselines: Sampling methodology [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, 148: 25-39.
- [21] 谢学锦,任天祥,奚小环,等.中国区域化探全国扫面计划卅年 [J].*地球学报*,2009;30(6):12-28.  
Xie X J, Ren T X, Xi X H, et al. The implementation of the regional geochemistry-national reconnaissance program (RGNR) in China in the past thirty years [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2009, 30(6):12-28.
- [22] 陆正敏,程正海.中国矿床发现史:内蒙古卷 [M].北京:地质出版社,1996.  
Lu Z M, Cheng Z H. *History of discovery of ore deposits in China: Inner Mongolia volume* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [23] 刘英俊,曹励明,李兆麟.元素地球化学 [M].北京:科学出版社,1984.  
Liu Y J, Cao L M, Li Z L. *Elements geochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [24] 程志中,谢学锦,冯济舟,等.中国南方地区地球化学图集 [M].北京:地质出版社,2014:3-61.  
Cheng Z Z, Xie X J, Feng J Z, et al. *Geochemical atlas of southern China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014: 3-61.
- [25] 孙传尧.矿产资源综合利用手册 [M].北京:科技出版社,2000.  
Sun C R. *Handbook of comprehensive utilization of mineral Resources* [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2000.
- [26] Taylor S R, McLennan S M. The chemical composition evolution of the continental crust [J]. *Review Geophysics*, 1995, 33: 241-265.
- [27] Simandl G J, Paradis S. Carbonatites: Related ore deposits, resources, footprint, and exploration methods [J]. *Applied Earth Science*, 2018, 127: 1-30.
- [28] 李桂明.牦牛坪稀土资源综合利用探讨 [J].*稀土*, 2019, 40(1): 147-152.  
Li G M. Discussion on comprehensive utilization of rare earth resources in Maoniuping [J]. *Chinese Rare Earths*, 2019, 40 (1): 147-52.
- [29] 冯婕,吕大伟.徽山稀土矿原生矿选矿试验研究 [J].*稀土*, 1999, 20(3):7-10.  
Feng J, Lyu D W. Beneficiation experiment on primary mineral s of Weishan rare earth mine [J]. *Chinese Rare Earths*, 1999, 20(3): 7-10.
- [30] 徐世权,曾海鹏,张宏.竹山庙垭稀土矿的选冶联合工艺技术 [J].*中国矿山工程*, 2017, 46(5):15-20.  
Xu S Q, Zeng H P, Zhang H. Beneficiation-metallurgy combination technology of Zhushan Miaoya rare earth mine [J]. *China Mine Engineering* 2017, 46(5): 15-20.
- [31] 马莹,李娜,王其伟,等.白云鄂博矿稀土资源的特点及研究开发现状 [J].*中国稀土学报*, 2016, 34(6):641-649.  
Ma Y, Li N, Wang Q W, et al. Characteristics and current research situation of rare earth resources in Bayan Obo ore [J]. *Journal of The Chinese Society of Rare Earths*, 2016, 34(6): 641-649.
- [32] Lehtonen M, Laukkanen J, Sarala P. Exploring for RE and REE mineralization using indicator minerals [C]//Rovaniemi: 25th International Applied Geochemistry Symposium, 2011:13-18.
- [33] Lehtonen M, Yann L, Hugh O, et al. Novel technologies for indicator mineral-based exploration [R]. Geological Survey of Finland, 2015:23-62.
- [34] Mackay D A R, Simandl G J, Ma W, et al. Indicator mineral-based exploration for carbonatites and related specialty metal deposits: A QEMSCAN orientation survey, British Columbia, Canada [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 165: 159-173.
- [35] Mcclenaghan B R, Paulen C, Kjarsgaard I M. Rare metal indicator minerals in bedrock and till at the Strange Lake peralkaline complex, Quebec and Labrador, Canada [J]. *Can. J. Earth Sci.*, 2019, 56: 857-869.
- [36] 谢学锦,侯智慧.金矿化探(一):金矿化探的现状与研究方向 [J].*长春地质学院学报*, 1987, 7(4):361-372.  
Xie X J, Hou Z H. Geochemical exploration of gold deposits (1): Present situation and research direction of geochemical exploration of gold deposits [J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1987, 7(4): 361-372.
- [37] 谢学锦.金矿化探(二)——采样与取子样的难关·为《国外地质勘探技术》创刊第100期而作 [J].*国外地质勘探技术*, 1988 (Z1):150-158.  
Xie X J. Geochemical exploration of gold deposits (2): Difficulties in sampling and sampling · for the 100<sup>th</sup> issue of *Foreign Geoexploration Technology* [J]. *Foreign Geoexploration Technology*, 1988 (Z1): 150-158.
- [38] 谢学锦,王学求.金矿化探(三)——金的颗粒分布与取子样误差关系的研究 [J].*物探与化探*, 1992, 16(6):23-34.  
Xie X J, Wang X Q. Geochemical exploration of gold deposit (3): Study on the relationship between gold particle distribution and sampling error [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1992, 16(6): 23-34.
- [39] 王学求,谢学锦.非传统金矿化探的理论与方法技术研究 [J].*地质学报*, 1996, 70(1):86-97.  
Wang X Q, Xie X J. Unconventional geochemical exploration for gold [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1996, 70(1): 86-97.
- [40] Chakhmouradian A R, Wall F. Rare earth elements: Minerals, mines, magnets (and more) [J]. *Elements*, 2012, 8(5): 333-340.
- [41] Sanematsu K, Kon Y, Imai A, et al. Geochemical and mineralogical characteristics of ion-adsorption type REE mineralization in Phuket, Thailand [J]. *Mineralium Deposita*, 2013, 48(4): 437-451.
- [42] Berger A, Janots E, Gnos E, et al. Rare earth element mineralogy and geochemistry in a laterite profile from Madagascar [J]. *Applied Geochemistry*, 2014, 41: 218-228.
- [43] 陆蕾,王登红,王成辉,等.云南临沧花岗岩中离子吸附型稀土

- 矿床的成矿规律[J].地质学报,2019,93(6):1466-1478.
- Lu L,Wang D H, Wang C H, et al. Mineralization regularity of ion-adsorption type REE deposits on Lincang granite in Yunnan Province[J].Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1466-1478.
- [44] Layton-Matthews C H, McCleghan M B. Mineral chemistry: Modern techniques and applications to exploration[C]//Application of Indicator Mineral Methods to Mineral Exploration,2014:9-18.
- [45] Zaitsev A N, Wall F, Lebas M J. REE-Sr-Ba minerals from the Khibina carbonatites, Kola Peninsula, Russia: Their mineralogy, paragenesis and evolution [J]. Miner. Mag., 1998, 62: 225-250.
- [46] Butcher A R, Helms T A, Gottlieb P, et al. Advances in the quantification of gold deportament by QemSCAN [C]//Proceedings of 7th Mill Operators Conference,2000:267-271.
- [47] Burrows D, Gu Y. JRMRC mineral liberation analyser — A modern tool for ore characterisation and plant optimisation [J]. Metallurgical Plant Design and Operating Strategies, 2006,9:125-139.
- [48] 尤源,牛小兵,冯胜斌,等.鄂尔多斯盆地延长组长7致密油储层微观孔隙特征研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(6):18-23.
- You Y, Niu X B, Feng S B, et al. Study of pore features in Chang7 tight oil reservoir, Yanchang layer, Ordos Basin[J]. Journal of China University of Petroleum, 2014, 38(6): 18-23.
- [49] Santoro L, Rollinson G K, Boni M, et al. Automated scanning electron microscopy (QEMSCAN)-based mineral identification and quantification of the Jabali Zn-Pb-Ag nonsulfide deposit (Yemen) [J]. Economic Geology, 2015, 110(4): 1083-1099.
- [50] Vermeesch P, Rittner M, Petrou E, et al. High throughput petrochronology and sedimentary provenance analysis by automated phase mapping and LA-ICP-MS [J]. Geochem. Geophys. Geosystems, 2017, 18: 4096-4109.
- [51] Sven S, Franz M. Automated quantitative rare earth elements mineralogy by scanning electron microscopy [J]. Physical Sciences Reviews, 2016, 1(9):63.
- [52] Grammatikopoulou T, Howardb S, Alexander C, et al. Investigation of low-grade REE offshore sands from North and South Carolina, and Georgia, USA, using automated mineralogy [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2020, 202: 1-14.
- [53] Garzanti E, Andò S, Vezzoli G. Grain-size dependence of sediment composition and environmental bias in provenance studies [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2009, 277: 422-432.
- [54] Stendal H, Theobald P K. Heavy-mineral concentrates in geochemical exploration [J]. Handbook of Exploration Geochemistry, 1994,6:185-225.
- [55] Fletcher W K, Loh C. Transport of cassiterite in a Malaysian stream: Implications geochemical exploration [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1996, 57: 9-20.

## Application of automated mineral analysis systems in geochemical exploration of carbonatite-related REE deposits

LIU Dong-Sheng<sup>1,2,3</sup>, CHEN Yuan-Yuan<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Geochemical Exploration, Ministry of Natural Resources, Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 2. International Centre on Global-Scale Geochemistry, United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, Langfang 065000, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Hebei Institute of Regional Geological Survey, Langfang 065000, China)

**Abstract:** In recent years, China has been strengthening the exploration of rare earth resources in order to secure the status of China as a large rare earth resource country. Geochemical exploration is an important means of mineral exploration, This paper summarizes the geochemical exploration of rare earth, finds out the existing problems and puts forward solutions. The carbonatite related rare earth anomalies are characterized by low contrast and small scale, the reasons are: ① the industrial grade of rare earth ore is enriched to a low degree relative to the abundance of the earth's crust, which is easily diluted by non-mineral anomalies caused by granite, etc.; ② the size of rare earth ore-forming indicator minerals are small and difficult to sort by traditional method, thus the epigenetic migration and enrichment pattern is not well understood, and it is difficult to develop a targeted sampling method. The automatic mineral analysis system based on scanning electron microscopy and energy spectrum can realize the quantitative statistics of chemical composition and morphological parameters of rare earth minerals at the micron level, which provides the basis for the study of epigenetic migration pattern of rare earth minerals. In recent years, in the field of geochemical exploration, previous research on the variation pattern of micro scale grain mineral content in the ore body-stream sediment system using the automatic mineral analysis system has shown the good application prospect of this method. In the future, the automatic mineral analysis system can be used to carry out: ① research on the change of rare earth mineral size during weathering process; ② research on the migration and enrichment of rare earth minerals in the ore body-aqueous sediment system. Thus, the distribution characteristics and migration and enrichment rules of rare earth indicative minerals in ore-body, soil-stream sediment system are clarified, providing theoretical support for geochemical exploration of rare earth.

**Key words:** automated mineral analysis system; QEMSCAN; carbonatite-related REE deposits; geochemical exploration