

我国离子吸附型稀土矿产科学研究和调查评价新进展

王登红¹⁾, 赵芝¹⁾, 于扬¹⁾, 王成辉¹⁾, 代晶晶¹⁾, 孙艳¹⁾, 赵汀¹⁾,
李建康¹⁾, 黄凡¹⁾, 陈振宇¹⁾, 曾载淋²⁾, 邓茂春²⁾, 邹新勇²⁾, 黄华谷³⁾,
周辉⁴⁾, 冯文杰⁵⁾

1)中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;
2)江西省地质矿产勘查开发局赣南地质调查大队, 江西赣州 341000; 3)广东省地质调查院, 广东广州 510080;
4)广西地质调查院, 广西南宁 530023; 5)云南省地质调查局, 云南昆明 650011

摘要: 自2011年以来, 我国稀土产业跟其他矿种产业类似也经历了大起大落的变化, 但离子吸附型稀土矿无论是调查评价还是科学研究都取得了显著进展, 理论创新和调查评价方面提出了“8多2高1深”的新认识, 即: 多类型、多岩性、多时代、多层位、多模式、多标志、多因继承、多相复合、高纬度、高海拔、深勘探; 技术上, 推广采用了赣南钻, 加大了风化壳的勘查深度从而成倍增加了资源潜力, 全方位采用了遥感方法, 进一步提高了矿政管理的公信力并提供了新的找矿方法, 持续采用水化学方法跟踪调查、综合评价了稀土矿山开采的环境效应并为环境治理提供了新的技术手段; 实践中, 发现了多处稀土靶区和远景区, 查证多处大中型矿产地, 并在浙江、福建、云南、江西等地实现了“高海拔、高纬度、大深度”的找矿新突破。

关键词: 离子吸附型稀土; 矿产调查; 综合研究; 进展综述

中图分类号: P618.7; P62 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2017.03.02

A Review of the Achievements in the Survey and Study of Ion-absorption Type REE Deposits in China

WANG Deng-hong¹⁾, ZHAO Zhi¹⁾, YU Yang¹⁾, WANG Cheng-hui¹⁾, DAI Jing-jing¹⁾, SUN Yan¹⁾,
ZHAO Ting¹⁾, LI Jian-kang¹⁾, HUANG Fan¹⁾, CHEN Zhen-yu¹⁾, ZENG Zai-lin²⁾, DENG Mao-chun²⁾,
ZOU Xin-yong²⁾, HUANG Hua-gu³⁾, ZHOU Hui⁴⁾, FENG Wen-jie⁵⁾

1) *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*
2) *Gannan Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Jiangxi Province, Ganzhou, Jiangxi 341000;*
3) *Geological Survey of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510080;*
4) *Geological Survey of Guangxi, Nanning, Guangxi 530023;* 5) *Yunnan Geological Survey Bureau, Kunming, Yunnan 650051*

Abstract: Ion-adsorption REE deposits, which are widely distributed in southern China, are important because they supply valuable heavy REEs for global consumption. Like most other minerals, China's rare earth industry has experienced its ups and downs since 2011. However, a remarkable progress has been achieved in the survey and study of ion-adsorption REE deposits. Firstly, in the aspect of metallogenic theories, Chinese researchers have recognized that the deposits have multi-subtypes (e.g., ion-adsorption La deposit, ion-adsorption Eu deposit, ion-adsorption Dy deposit), metallogenic parent rocks (e.g., granitic rocks, pyroclastic rocks, and metamorphic rock), geological age of metallogenic parent rocks, stratigraphic horizon, metallogenic model, prospecting marks (e.g.,

本文由中国地质调查局地质大调查项目“大宗急缺矿产和战略性新兴产业矿产调查”工程“华南重点矿集区稀有稀散和稀土矿产调查”(编号: DD20160056)、“川西甲基卡大型锂矿资源基地综合调查评价”(编号: DD20160055)、“中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务”(矿产地质志)项目(编号: DD20160346)、国家自然科学基金项目“江西某地离子吸附型稀土矿床元素地球化学行为及成矿机理”(编号: 41303035)和基本业务费项目“赣南变质岩离子吸附型稀土矿成矿规律与找矿方向研究”(编号: YYWF201527)联合资助。获中国地质调查局、中国地质科学院2016年度地质科技十大进展第三名。

收稿日期: 2017-03-20; 改回日期: 2017-04-13。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 王登红, 男, 1967年生。研究员, 博士生导师。主要从事矿产资源研究。E-mail: wangdenghong@sina.com。

chemical index of alteration, loss on ignition), mineralization mechanism (e.g., magmatic crystallization, hydrothermal alteration), intrusive body, geological occurrence (intrusive or extrusive rocks). The deposits can also be discovered in high latitude or high altitude areas. Secondly, the exploration depths of weathering crust have greatly increased by using the Gannan drill, and REEs potential resources will be doubled. Remote sensing technique has been used for quick, accurate, dynamic investigation and prospecting of ion-absorbed REE deposits. The environmental effects of REEs mining have been comprehensively evaluated based on the continuous hydrochemical survey, and a new technology of controlling environmental pollution is provided. Finally, a number of prospecting targets and prospecting areas were delineated, and a number of medium and large-sized mineral areas were verified, and a breakthrough of prospecting in the Zhejiang, Fujian, Yunnan and Jiangxi provinces was achieved.

Key words: Ion-absorption type REE deposits; mineral resources survey; comprehensive research; progress review

离子吸附型稀土矿产(简称为 iRee)是三稀矿产资源中最具有战略意义的矿种之一, 可以作为一个亚矿种(组)对待, 是我国独具特色的优势矿产, 也是国内外高度敏感的关键金属矿产。由于稀土是新一代尖端武器、信息技术、节能环保、医药和医疗设备、高端装备制造、新材料、新能源汽车等所需要的功能材料、结构材料和关键性原料的代表, 而离子吸附型稀土又是重稀土的主要来源, 满足了全世界新兴产业发展对于 Gd、Tb、Dy 等中、重金属的几乎全部的需求, 因而也是人类共同的珍贵稀缺资源(杨岳清等, 1981; 白鸽等, 1989; Bao and Zhao, 2008; 丁嘉榆, 2012; 王登红等, 2013a, b, 2016; 王瑞江等, 2015; USGS, 2016)。在国土资源部和中国地质调查局的统一领导和部署下, 中国地质科学院矿产资源研究所自 2011 年组织开展了我国三稀金属资源战略调查工作, 其中对 iRee 的调查研究取得了显著成果, 体现在: 重新建立了 iRee 调查研究的专业队伍, 研究分析了国内外 iRee 的时空分布、产出特征及其开发现状、选冶技术与市场供需状况, 编制了 iRee 矿产地、价格等多项数据库(涵盖全球); 在 iRee 矿山开采、开发监管、储量动态估算和建设用地压覆资源调查等多方面为矿政管理提供了技术支撑和专业服务; 在江西赣南、福建武夷山、广西、广东、云南乃至浙江等地都取得了重要的找矿突破。指导 iRee 取得找矿突破和矿政管理取得重要进展的是成矿理论的新进展, 本次在 iRee 成矿规律和赋存状态研究尤其是成矿规律和勘查技术等方面取得了重要的理论创新和方法创新, 概括起来可以称为 8“多”新认识: 多类型、多岩性、多时代、多层位、多模式、多标志、多因继承、多相复合。这 8 个方面的新认识, 提升了我国 iRee 矿产资源的理论研究水平, 奠定了 iRee 找矿向相对高海拔、相对高纬度和相对大深度发展的理论基础, 为赣南钽等技术发明提供了理论指导, 也对充分利用我国珍贵的稀土资源、促进稀土行业的健康发展具有重要的

理论和现实意义(中国地质科学院, 2017)。

1 成矿理论研究的新进展

稀土是我国的优势矿产资源, 白云鄂博是世界上最大的轻稀土矿床, 但对国内外稀土产业发展来说更具吸引力和独特性的可能是华南的离子吸附型稀土矿, 不但是因为其中赋存有珍贵、稀缺的重稀土(满足了全世界的需求), 而且可以用原地浸出的新方法、新工艺来回收, 完全不同于传统的矿产资源开采方式, 何况国外费尽九牛二虎之力也没有取得明显的找矿进展, 以至于提出了“为什么偏好产于华南”这样的疑问(Sanematsu and Watanabe, 2016; Bern et al., 2017)。的确, 离子吸附型稀土矿床尤其是重稀土矿床, 作为我国保护性开发的少数几个矿种之一的独特资源, 由于全世界的“急缺”而被大量开采, 资源消耗过快, 难以保障新兴产业快速发展之需。那么, 如何拓展找矿领域、开拓找矿思路, 就需要加强成矿理论的研究, 以理论创新带动地质找矿的新突破。2011 年以来, 本文作者(课题组)在老一辈专家指导下, 敢于实践, 勇于探索, 提出较前人工作有明显进展的新认识, 即“8 多 2 高 1 深”新认识: 多类型、多岩性、多时代、多层位、多模式、多标志、多因继承、多相复合、高纬度、高海拔、深勘探。

多类型。多类型具有多方面的含义, 一方面是矿种本身由“离子吸附型稀土”变成“离子吸附型镧矿”、“离子吸附型铈矿”、“离子吸附型钇矿”……, 即将以往笼统的“稀土”按照 16 个稀土元素分别设立矿种, 因为不是每个矿种都能形成离子吸附型稀土矿, 至少是“程度”不同, 其中最独特的是铈(难以形成离子吸附型铈矿)(白鸽等, 1989; Sanematsu and Kon, 2013); 另一方面是工业类型也是多种多样的, 鉴于采矿方式的不同、风化壳剖面类型的不同、风化程度的不同、稀土元素配分型式的不等等原因, 可以分出不同的工业类型, 除了以往熟悉

的“抛物线”型之外,还有复杂的“波浪式”和简单的“直线式”等,此方面的工作尚待积累(王等红等, 2013b);再一方面,成因类型也是多种多样的,除了“内生外成”(即稀土元素本身是岩浆岩结晶成岩过程中富集了的之外,要形成风化壳、要使得稀土元素处于离子吸附状态,而不是形成砂矿)主导成因机制之外,具体的岩石类型、具体的风化壳类型、具体的物理化学条件、具体的保持条件等方面的差异,决定了最终形成的是离子吸附型镧矿还是离子吸附型钇矿,也将影响到找矿方向的明确,如珍贵的铈矿到哪里去找。

近年来的研究,不但考虑到稀土元素的富集种类,也考虑区域风化成矿条件和区域地质条件以及助力找矿的各种物化遥资料的采用,提出了“矿产预测类型”的概念,其中针对 iRee 的除了足洞式、河岭式之外还新增了清湖式、小董式、姑婆山式等。

多岩性。形成离子吸附型稀土矿的母岩,以往先是集中在花岗岩(20世纪70年代)、后来注意到了火山岩(20世纪80年代),近年来发现变质岩也可以形成离子吸附型稀土矿,赣南的葛藤嘴就是一个实例,王登红等在井冈山附近的某个基性超基性小岩体的风化壳中也发现了稀土元素的异常富集。贵州早在20世纪80年代即在威宁县峨眉山玄武岩分布区的红土风化壳中发现含有离子吸附型稀土矿,稀土的浸取率随风化程度加大而可达30%,浸出效果显然不如花岗岩风化壳,但贵州省地质矿产勘查开发局106地质队张海等人在乌蒙山地区再次发现玄武岩风化壳中有稀土元素的富集并可浸出。在碳酸盐岩分布区的蚀变岩(如云英岩化灰岩)风化之后也可以成矿(黄华谷等, 2014)。理论上说,各种类型的岩石都可以形成风化壳,但是不是存在离子吸附型的稀土矿产资源,则还取决于众多其他条件,比如适合于离子相稀土元素“暂时栖身”的矿物(尤其是高岭土、伊利石类矿物)以及适合于原地浸出工艺的地形、水文、气候等条件(杨主明, 1987; 吴澄宇, 1988),否则,不能工业利用也就不是矿产资源。但无论如何,当前在寻找离子吸附型稀土矿的过程中,不局限于花岗岩的风化壳,显然有助于扩展找矿思路。闪长岩以往不太重视,但湖南的益将、广西的清湖都跟闪长岩(石英闪长岩和花岗闪长岩)有关,其特点是往往原岩富含钛铁矿、风化壳则形成稀土与钛铁矿共伴生。

多时代。近年来通过深入研究尤其是重点厘定了南岭东段离子吸附型稀土矿密集区各类成矿母岩的锆石年代,认为各个时代的花岗岩、火山岩及变质岩都可能成矿,不局限于燕山期的花岗岩。比如,赵芝等(2014a, b)研究认为,南岭东段 iRee 成矿母

岩的锆石年龄集中分布在三个年龄区间: 461~384 Ma、228~242 Ma 和 189~94 Ma, HREE 型和 LREE 型母岩在成岩时代上并无特定的专属性。实际上,到了华南西部地区,云南的临沧岩体也已经找到了上允等离子吸附型稀土矿,而临沧岩体(区域上南北延伸 200 km,东西展布超 40 km,属于超大型复式岩基)同样出现了多时代尤其是印支期锆石的同位素年龄记录(何显川等, 2016),而印支期岩体以往不被认为是具有良好找矿前景的。

多层位。火山岩和变质岩都是有层位的,但以往只对白垩系的火山岩进行过初步的调查研究,鲜有成果公布。近年来我们通过对赣南、赣东北、粤北、粤东南、桂西南、桂东南、滇中、滇西南、浙南、黔西等地火山岩区和变质岩区疑似含 iRee 风化壳的调查,认为只要外部条件(即风化成矿过程和保存条件)具备,原岩的层位和时代可以是多种多样的。比如,赣南葛藤嘴的成矿母岩是新元古代的(图 1),黔西乌蒙山的玄武岩属于二叠纪末期峨眉山玄武岩的组成部分,赣南河岭火山岩风化壳 iRee 的母岩属于晚侏罗世(王京彬和阮道源, 1989)。

多模式。成矿模式是矿床成矿特征与成因机制高度概括的表达形式,既是成矿理论认识的体现,也是地质找矿的工具。与 iRee 有关的成矿模式,以往主要是足洞式(重稀土)和河岭式(轻稀土)(杨岳清等, 1981; 黄典豪等, 1988; 袁忠信等, 2012),本次研究新建立了木子山式-花岗岩型 iRee 矿床成矿模式、柯树塘式-火山岩型 iRee 矿床成矿模式和葛藤嘴式-变质岩型 iRee 矿床成矿模式。其中,产于江西省定南县的木子山花岗岩风化壳 iRee 矿床属于轻稀土和重稀土均富集的矿床,成矿母岩相带变化明显(内部相主要有粗粒-中粗粒角闪黑云石英二长岩,过渡相主要是中粗粒黑云母碱长花岗岩,边缘相主要是细粒似斑状黑云母花岗岩),风化壳富含氟碳钇铈矿、富钇钍石、新奇钇钍矿等富 Y 矿物,全风化层上部(3~6 m)轻稀土相对富集,下部(10~11 m)则重稀土相对富集,呈现出“上轻下重”的特点。位于江西省寻乌县的柯树塘火山岩风化壳 iRee 矿床,是稀土品位最高的轻稀土矿床之一,除了存在独居石、氟碳钙铈矿、硅铈铈矿等含 Ce 矿物之外,硅铈石的出现(也是上甲岩体中首次发现的)具有重要意义,因为可导致稀土总量的增加但 Ce 并不是可以“浸出”的(即非离子吸附型)。与华南轻稀土矿区花岗岩风化壳相比,火山岩风化壳矿体可能更加富集 La、Pr、Nd、Sm 等轻稀土元素,重稀土亏损,表土层中富集 Ce。位于江西省宁都县的葛藤嘴浅变质岩风化壳型 iRee 矿床,成矿母岩为千枚岩、变质砂岩及变质凝灰岩(多岩性),其地表中低丘

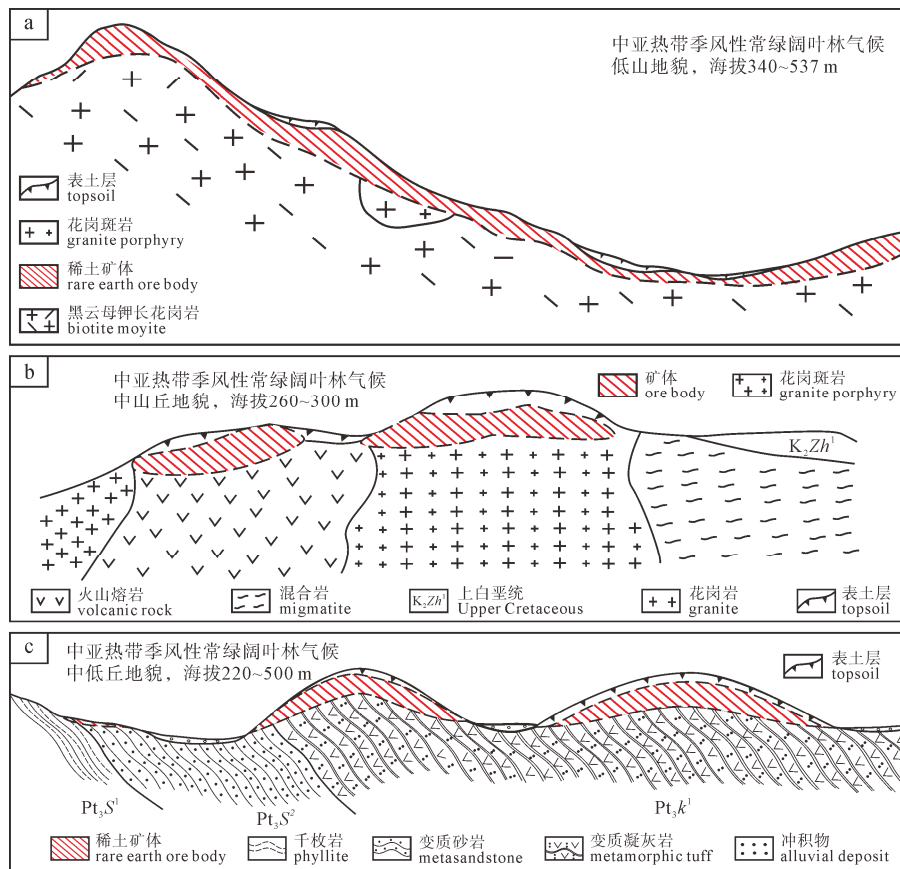


图1 赣南木子山式(a)、柯树塘式(b)、葛藤嘴式(c) iRee 矿床成矿模式示意图

Fig. 1 Metallogenic model schematic diagram of the Muzisan (a), Keshutang (b) and Getengzui (c) ion-adsorption deposits

陵呈馒头状地貌, 风化壳以全覆盖式为主, 局部出现裸脚式和残留式, 风化壳厚度变化大(0.95~18.4 m, 平均达 8.4 m), 单工程矿体厚度变化也大(1.48~16.4 m, 平均为 5.4 m); 母岩富集 Nd、Eu, 显著亏损 Ce, 风化壳中强烈亏损 Ce、弱富集 Eu, HREE 偏低; 由于成矿母岩呈层产出, 母岩的岩石类型、厚度及层位是重要的找矿要素, 而变质岩地层的产状(陡还是缓)直接影响到风化壳的发育程度(包括形态、厚度、垂向分带等), 这是与火山岩和岩浆岩风化壳不同的。

多标志。对于 iRee 矿床成矿标志和找矿标志的研究, 早在 20 世纪 70 年代就开展了, 但总体上局限于花岗岩的成矿专属性。近年来随着分析测试技术手段的更新换代, 地球化学和矿物学、年代学方面的资料越来越多, 弥补了以往单一地质标志之不足。如, 本次通过对华南 52 个 iRee 矿区 350 件风化壳样品的稀土元素分析, 发现部分轻稀土矿床中、重稀土元素相对富集, 而垂向上 LREE 和 HREE 可以分层富集, 也可以同层富集(赵芝等, 2015)。结合对风化壳剖面中离子相稀土元素分布规律及影响因素的研究, 通过母岩和风化壳中的风化蚀变指数的“大数据处理”, 并与稀土含量进行相关性分析, 认为风化强度影响着稀土元素次生富集的程度, 当

风化蚀变指数 $CIA < 85\%$ 时, 风化程度与稀土含量呈正相关性; 当 $85\% < CIA < 100\%$ 时, 风化程度与稀土含量则呈反相关。

多因继承。近年来通过对华南 102 个稀土矿权区的调查, 并有重点地系统分析了赣南、桂北等地 10 个典型成矿岩体的稀土矿物组成, 发现成矿母岩中稀土矿化是岩浆后期及岩浆期后热液流体交代的综合结果, 这是造成花岗岩风化壳稀土配分类型多样、含量不均一的重要内因。也就是说, 含 iRee 的花岗岩风化壳不是简单风化作用就可成矿的, 而岩相分带不明显、结构构造简单、矿物组合单一的岩体不如岩性复杂、岩相分带复杂、矿物类型和组合复杂的岩体, 尤其是被后期各种各样的流体交代过了的岩体可能更容易成矿, 即 iRee 的成矿经历了岩浆阶段-岩浆期后热液阶段-独立流体交代阶段-风化富集阶段。其中的独立流体阶段是新提出来的, 可以跟母岩体没有直接的成因联系, 来源也可不一样(包括幔源流体和地下热卤水), 表现方式也不同。比如, 作为岩浆岩副矿物的褐帘石是岩浆演化过程中结晶形成的, 但它被后期热液交代可呈氟碳铈矿、氟碳钇铈矿等方式浸染状散布或脉状集中产出, 氟碳铈矿、氟碳钇铈矿又可在风化过程解体、释放出离子相的稀土元素, 再被高岭土等矿物吸附, 从

而形成 iRee 矿床。此时 F 的化探异常、萤石的重砂异常和矿化也是一个重要的找矿标志。

多相复合。多相复合不同于多因继承, 多因继承指的是稀土元素在不同的成矿历史过程中具有继承性, 主要是赋存状态在发生明显的变化(如从岩浆成因副矿物到热液交代矿物再到风化壳中的离子相), 多相复合指的是不同岩相的复合, 具有叠加特点, 并且以不同的相态呈现出来, 在风化阶段稀土元素得以转化为离子相。比如, 寨背岩体是 iRee 的矿集区, 既有轻稀土又有重稀土的风化富集, 但重稀土和轻稀土在原岩中就是分别富集的, 以至于风化之后可以分别圈定不同类型的矿体。赣南河岭矿区(最大的 iRee 矿床之一)也类似, 晚侏罗世的葛蒲群中酸性火山岩和次火山岩属于两种岩相, 二者可以分别形成风化壳 iRee 矿床, 由于次火山的风化壳与喷发岩的风化壳往往难以区分, 勘查过程中实际上没有把二者单独圈定矿体, 但两种岩相(乃至更多种)的存在对于成矿、找矿来说都是有利的, 而且次火山岩(包括酸性、中酸性的花岗斑岩、英安斑岩和基性、中基性的辉绿玢岩、闪长玢岩等)中稀土元素的基础含量可以远高于火山岩, 如河岭凝灰熔岩和花岗斑岩的稀土元素含量分别是 487×10^{-6} 和 992×10^{-6} (袁忠信等, 2012)。浙江荷地稀土矿区存在花岗斑岩与安山岩两种岩相的复合。需要特别注意的是, 华南地区可能存在富集稀土的来自于地幔的地质流体, 并且可以在多个超大型矿床中有所表现, 如广西大厂的超大型锡多金属矿床存在 Ree 含量高达 940.42×10^{-6} (平均 799.2×10^{-6})的热液成因方解石(王登红等, 2005), 与幔源成因煌斑岩中的方解石接近, 而大厂矿区的煌绿玢岩 Ree 含量达 223.94×10^{-6} 、杏仁状辉绿玢岩 310.92×10^{-6} , 远高于龙箱盖岩体的黑云母花岗岩(57.15×10^{-6} ; 陈毓川等, 1993)。在幔源富稀土流体交代过程中, 花岗岩、变质岩、火山岩乃至沉积岩都可以成为矿化围岩, 此时的找矿领域更为广阔。

高纬度。离子吸附型稀土矿床的形成, 与风化条件和保存条件密切相关, 并不是越靠近赤道(低纬度)、气温越高、风化越彻底, iRee 矿床就越发育。第一作者曾经多次到柬埔寨开展 iRee 的地质找矿工作, 但未取得成效, 主要是由于风化太彻底, 导致稀土难以在风化壳中保留下来。另一方面, 近年来在赣东北、闽北、浙南乃至皖南地区开展的 iRee 找矿勘查成果表明, 前人认为的离子吸附型稀土矿床不越过北纬 29° 线的经验成为过去时(张祖海, 1990)。皖南的刘村岩体已经过了北纬 30° (达 $30^\circ 42' 03'' N$)。我国 iRee 最南端的矿床已经到了海南南部的坝王岭, 再向南已经缺乏拓展空间, 而纬度

的向北扩展, 则将明显地带动 iRee 地质找矿空间的拓展。

高海拔。浙江庆元荷地的 iRee 稀土矿床不但是高纬度的实例, 也是高海拔的实例。前人经验认为, iRee 成矿的海拔高度一般不超过 500 m, 最适合于 200~400 m。如, 广西北部贺州靠近龟石水库的富川 iRee 矿区海拔仅 230 m 左右, 但姑婆山主峰到了 1 400 m 以上。浙江荷地 iRee 矿区的海拔高度主体处于 900~1 200 m。类似的高海拔地区还有黔西的乌蒙山地区、滇中南的临沧岩体分布区及滇西南等地(德宏州陇川县的龙安 iRee 矿区的主体海拔高程为 1 010~1 050 m)。

2 地质找矿的新进展

在中国地质调查局三稀项目的支持下, 中国地质科学院矿产资源研究所会同华南相关省区地调院组成三稀项目组, 在离子吸附型稀土矿床成矿理论的指导下, 近年来取得了一系列的找矿新进展。如在广东, 新发现离子吸附型稀土矿产地 11 处(重稀土 1 处, 轻稀土 10 处); 新增稀土氧化物资源量超过 10 万 t (333+334 级别), 其中, 重稀土氧化物 n 万 t (大埔高陂), 轻稀土氧化物为 n 万 t (乐昌禾尚田和龙门永汉)。在广西, 圈出 20 处可供进一步勘查的稀土矿靶区, 其中 7 处靶区估算预测资源量达大型规模、10 处靶区估算预测资源量为中型规模、3 处靶区估算预测资源量为小型规模, 并初步估算获得稀土氧化物资源量(334)约数百万吨; 以遥感异常为主, 结合成矿地质条件, 在钦州—防城港工作区圈定了 17 处稀土找矿预测区, 凭祥—龙州工作区圈定了 9 处稀土找矿预测区。在云南, 除了圈定出滇西南、滇中等地多处 iRee 靶区之外, 提交了 3 处离子吸附型稀土矿产地, 其中 1 个达大型规模。在赣南, 提交离子吸附型重稀土矿产地 1 处, 离子吸附型轻稀土矿产地 3 处(大、中、小各一处), 离子吸附型稀土矿化点 10 处及找矿靶区 27 处。以赣南清溪岩体为重点, 圈定了白石、黄屋和上堡 3 个可以进一步工作的靶区, 估算资源量达 n 万 t, 预测清溪岩体稀土远景资源量 n 万 t。

3 新技术研发应用的新进展

在 20 世纪七八十年代, 对于风化壳中稀土元素的分析测试是光度测定法, 只能给出矿石中离子吸附型稀土的总量和轻、重稀土的分量(李先春和李思群, 1982)。随着 ICP-MS 测试技术的推广, 给出单个稀土元素的绝对含量已经是非常容易的事情, 成本也不是很高, 因此, 单元素圈定稀土矿体也成为可能。在稀土单元素圈矿的同时, 通过对稀土全相

和稀土浸取量等不同圈矿方法的对比,认为离子吸附型稀土矿的评价对象应该是浸取相的稀土而不是稀土总量;并创新性地将克里格法应用于资源储量的动态计算,取得了良好的效果(邓茂春等, 2013; 赵汀等, 2014, 2016)。

除了分析测试技术方法的改进与创新外,本次工作重点针对稀土尤其是离子吸附型稀土的管理与找矿问题还尝试了高分辨率遥感技术和水化学调查技术,比如,在赣南,通过遥感调查新方法的研究,圈定离子吸附型稀土矿找矿远景区 6 个,并经实地采样,43 个样点中 31%达到边界品位以上(刘新星等, 2016)。

方法的创新,不但体现在快速调查取样方法的改进(如同时采集离子吸附型稀土矿山的地质样品、加工车间的成品半成品以及尾矿库中的尾砂样品),也体现在勘查技术方法的创新(如利用水系水化学调查方法同时解决离子吸附型稀土开采过程的污染问题和找矿方向问题),而且形成了一系列新的方法,如利用稀土精矿粉的某些理化指标可以推测原矿的来源,有助于海关缉私等管理部门追踪稀土的“来龙去脉”,利用花岗岩的风化指数(CIA)及含水量等指标判断含矿性。其中,最显著的方法创新是利用赣南钻代替浅井、小圆井和浅钻来开展风化壳型矿床的勘查工作,可以显著提高工效(赣南钻日进尺可达 30~50 m,而浅井只能挖 5~8 m),降低成本(赣南钻百米成本 0.91 万元,小圆井则达 3.47 万元),加大探测深度(赣南钻可大于 40 m,小圆井则 <12 m)。

4 环境监测与治理措施方面的新进展

离子吸附型稀土矿山的环境污染曾经触目惊心,政府和人民群众都极为关注(高志强和周启星, 2011; 何晗等, 2015)。尽管方方面面竭尽全力,但矿区生态修复毕竟是一个长期任务,要想解决稀土矿山开采中的资源和环境保护问题迫切需要进一步完善稀土资源开采及环境保护技术,并在各级部门协同管理上下大力气。本次工作以赣南典型稀土矿区为重点调查研究对象,以地球化学理论为指导,以岩(矿)石-风化壳-尾矿-水为系统,采用多学科多方法协同、野外调查(S)—实验测试(M)—特征分析(A)—指标体系构建(I)—模型研究(M)—综合评价(A)一体化的方法,对离子吸附型稀土矿区淋滤废水、矿区山泉水、生活用井水、近矿支流、矿区下游、矿区上游等地表水及地下水的地球化学特征、成矿岩体—地表水的相互转化关系,以及离子吸附型稀土资源开采的水资源-环境效应进行了系统研究,认为矿区周边环境污染大多是人为作用(包括

矿山开采)所致,进而提出了离子吸附型稀土矿山环境保护和恢复治理的对策建议,指出其治理应以植物方法为主、物理化学方法相结合,对污染源的治理要分区域、分类型采取不同的方案。对原地浸矿开采方式的矿区,应切实做好矿山注液孔和收液系统的工程规划、重点发展浸矿后期低浓度母液中稀土截留和回收技术、重点解决淋滤废水中铵氮处理技术,建议将矿区排放废水中稀土总量和铵氮的安全阈值定为 0.3 mg/L 和 20 mg/L;对池、堆浸与原地浸矿相结合的开采方式的矿区,应加强尾矿资源综合治理研究,主要采用植物治理方案,对植树复垦效果不好的尾矿库的治理要采取工程措施,不妨通过建设生态公园等方式,防止发生滑坡和泥石流等地质灾害,并需加紧制定和落实稀土资源绿色开采模式。离子吸附型稀土矿区水环境质量评价指标体系的建立,不但将矿产地质调查工作的成果直接延伸到了环境保护领域,而且为稀土矿区环境污染的调查、评价与治理提供了新思路、新途径与新方法。详见本刊本期于扬等(2017)。

5 矿政管理方面的新进展

服务于矿政管理是本项目立项的初衷。2011 年,由于市场火爆,稀土价格高涨,导致南方离子吸附型稀土矿区 40%以上存在越界开采、非法开采、环境污染等问题而被媒体曝光。为了“稀土管得住”,项目组对当时全国 106 个采矿证的 102 个矿区开展了野外调查取样、遥感成图取证、动态分析预警工作,为矿政管理部门高效执法提供了科学依据;积极配合矿政管理部门完成了稀土开采总量指标管理、稀土矿区开采开发情况实地专项调查、工程建设用地压覆稀土情况调查等工作。比如,受国土资源部开发司委托,通过对全南县玉坑、岗下、烂泥坑等多个稀土矿区稀土采矿证申请资料进行审阅、遥感调查、现场实地采样,发现了一系列问题,尤其是稀土元素的含量根据“配分”来计算而不采纳单元素实测数据、20 世纪八九十年代下采采矿证时不注意成矿规律导致将一个矿床分割为不同采矿权区等关键性问题,提出了解决办法,得到了产业部门和企业的肯定。再比如,当前我国处于经济建设的快速发展时期,高速公路、高速铁路以及各种工业园区等建设工程项目在全国展开,在东南沿海地区“交通网”密度更大。为了查明在建设工程施工过程中离子吸附型稀土矿产的被压覆情况,根据国土资源部开发司下达的任务,中国地质科学院矿产资源研究所三稀项目组会同相关单位,对广西、广东、福建三省区 12 个重点工程压覆稀土资源的情况进行了实地调研,采集了大量样品,获得了包括深

圳某地在内被压覆离子吸附型稀土资源的实测数据,总结了压覆资源“点多、面广、量大”的特点,建议主管部门一方面要对已实施的工程按照相关法规,扩大稀土资源回收试点,最大限度地回收利用施工过程中被压覆的稀土资源,另一方面通过试点工作总结经验,建立长效监管机制,保证离子吸附型稀土资源的可持续健康开发利用。还比如,传统的iRee矿床的勘查主要参考了2002国土资源部颁布的《稀土矿产地质勘查规范》,但该规范在许多方面已经脱离了当前的实际情况,也不符合今后的发展趋势,提出了对其进行修改的建议,包括单元素圈定矿体、利用赣南钴代替小圆井、边界品位根据市场变化动态确定、利用克里格法计算资源储量,等等。

6 结论

综上所述,近年来对离子吸附型稀土矿产的调查研究和科学研究又进行了卓有成效的工作,包括通过深入总结风化壳中稀土元素的分布规律,分别建立了花岗岩、火山岩及变质岩区离子吸附型稀土矿床的成矿模式,提出了“8多2高1深”的新认识(多类型、多岩性、多时代、多层位、多模式、多标志、多因继承、多相复合、高纬度、高海拔、深勘探),进一步丰富了前人对于iRee成矿机制和找矿方向的研究成果,也拓展了找矿方向,体现了理论指导找矿的新进展。

在技术方法创新方面也取得了诸多新成果并得到了推广应用,包括:建立了稀土矿山开采动态监测技术方法(获国家发明专利1项),划定了需要监测的预警区域;利用高分辨率遥感影像统计了荒漠化区域的面积,对稀土矿开采周边河流污染程度进行评估(获国家发明专利1项),为环境治理提供了依据。赣南钴获国家实用新型专利,极大地提高了勘查效果和找矿深度并降低了成本;提出了稀土单元素圈矿方法,创新了稀土资源储量动态评价的技术(获软件著作权1项),为合理开发利用稀土资源提供了工具和平台。为了更有效地对我国离子吸附型稀土的资源储量进行动态评价,项目组在赣南某离子吸附型稀土矿勘查过程中,研制开发了克里格法为基础的三维储量估算系统,动态设置边界品位,即根据当时的稀土价格灵活地圈定矿体边界,估算储量,作价格敏感性分析,帮助矿山选择合理的采矿工程布置,保证了矿产资源的合理利用,分析和估算过程形象直观,且计算速度快、精度高,更加符合实际,值得同类型矿床在勘查评价与开发利用时参考。

致谢:“三稀资源调查评价助推我国战略性新兴产业发展”被评为中国地质调查局、中国地质科学院2016年度地质科技十大进展第三名,既是成矿规律长期研究的结果,也是近年来艰苦实践的收获,更是各级领导正确立项和长期支持的结果。工作过程中得到了国土资源部地勘司、开发司、储量司及规划司刘连和司长、于海峰司长、许大纯司长、王昆司长、姚华军司长、车长波副司长、牛力处长、吴登定处长、吴峻处长等部门领导和中国地质调查局钟自然局长、李金发副局长、严光生总工程师、陈仁义主任、薛迎喜主任、徐学义主任、龙宝林副主任、邢树文副主任、张生辉副主任以及承担单位中国地质科学院矿产资源研究所傅秉锋所长、王宗起副所长、谢国刚副所长及陈毓川院士、裴荣富院士、郑绵平院士和邹天人、杨岳清、白鸽、袁忠信、徐珏、侯立玮、丁嘉榆、韩久竹、罗子声等老专家,以及江西、广西、广东、福建、云南等各子项目承担单位领导和项目组成员的大力支持,在此一并致谢。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. DD20160056, DD20160055 and DD20160346), National Natural Science Foundation of China (No. 41303035), and Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. YYWF201527).

参考文献:

- 白鸽, 吴澄宇, 丁孝石, 袁忠信, 黄典豪, 王佩华. 1989. 南岭地区离子型稀土矿床形成条件和分布规律[R]. 北京: 地质矿产部矿床地质研究所.
- 陈毓川, 黄民智, 徐珏, 胡云中, 唐绍华, 李荫清, 孟令库. 1993. 大厂锡矿地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 邓茂春, 王登红, 曾载淋, 张永忠, 赵芝, 邹新勇, 陈斌锋. 2013. 风化壳离子吸附型稀土矿圈矿方法评价[J]. 岩矿测试, 32(5): 803-809.
- 丁嘉榆. 2012. 离子型稀土矿开发的历史回顾[J]. 有色金属科学与工程, 3(4): 14-19.
- 高志强, 周启星. 2011. 稀土矿露天开采过程的污染及对资源和生态环境的影响[J]. 生态学杂志, 30(12): 2915-2922.
- 何晗晗, 于扬, 刘新星, 黄凡, 赵芝. 2015. 赣南富稀土背景区地表水的pH值和Eh值变化特征[J]. 岩矿测试, 34(4): 487-494.
- 何显川, 李杨, 张民. 2016. 云南上允花岗岩风化壳离子吸附型稀土矿成矿条件浅析[J]. 世界有色金属, (3): 116-122.
- 黄典豪, 吴澄宇, 韩久竹. 1988. 江西足洞和关西花岗岩的稀土元素地球化学及矿化特征[J]. 地质学报, 4: 311-328.
- 黄华谷, 胡启锋, 程亮开, 罗子声. 2014. 广东禾岗田矿区新类型风化壳离子吸附型稀土矿的发现及意义[J]. 地质与勘探, 50(5): 893-901.
- 李先春, 李思群. 1982. 矿石中离子吸附型稀土总量和轻重稀土分量的光度测定法[J]. 江西师范学院(自然科学版), (1): 1-6.
- 刘新星, 陈毓川, 王登红, 黄凡, 赵芝. 2016. 基于DEM的南岭东段风化壳离子吸附型稀土矿成矿地貌条件分析[J]. 地球

学报, 37(2): 174-184.

- 王登红, 李华芹, 陈毓川, 屈文俊, 梁婷, 应立娟, 韦可利, 刘孟宏. 2005. 桂西北南丹地区大厂超大型锡多金属矿床中发现高稀土元素方解石[J]. 地质通报, 24(2): 176-180.
- 王登红, 王瑞江, 李建康, 赵芝, 于扬, 代晶晶, 陈郑辉, 李德先, 屈文俊, 邓茂春, 付小方, 孙艳, 郑国栋. 2013a. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述[J]. 中国地质, 40(2): 361-370.
- 王登红, 王瑞江, 孙艳, 李建康, 赵芝, 赵汀, 屈文俊, 付小方, 江善元, 黄华谷, 冯文杰, 徐平, 李胜苗, 黄新鹏, 周辉, 朱永新, 涂其军, 李新仁, 方一平, 周园园. 2016. 我国三稀(稀有稀土稀散)矿产资源调查研究成果综述[J]. 地球学报, 37(5): 587-598.
- 王登红, 赵芝, 于扬, 赵汀, 李建康, 代晶晶, 刘新星, 何哈哈. 2013b. 离子吸附型稀土资源研究进展、存在问题及今后研究方向[J]. 岩矿测试, 32(5): 796-802.
- 王京彬, 阮道源. 1989. 河岭式酸性稀土火山岩系的演化特征与稀土富集[J]. 中国稀土学报, 7(2): 68-72.
- 王瑞江, 王登红, 李建康, 孙艳, 李德先, 郭春丽, 赵芝, 于扬, 黄凡, 王成辉, 刘家军, 何哈哈, 郑国栋, 黄文斌, 周园园, 李晓妹, 刘丽君, 蔡肖, 赵汀, 宋扬. 2015. 稀有稀土稀散矿产资源及其开发利用[M]. 北京: 地质出版社.
- 吴澄宇. 1988. 赣南粤北地区风化壳离子吸附型稀土矿床研究[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 杨岳清, 胡淙声, 罗展明. 1981. 离子吸附型稀土矿床成矿地质特征及找矿方向[J]. 中国地质科学院院报矿床地质研究所分刊: 102-118.
- 杨志明. 1987. 江西龙南花岗岩稀土风化壳中粘土矿物的研究[J]. 地质科学, 1: 70-80.
- 于扬, 王登红, 田兆雪, 黄凡, 赵芝, 孙艳, 李德先, 何哈哈, 邓茂春. 2017. 稀土矿区环境调查 SMAIMA 方法体系、评价模型及其应用——以赣南离子吸附型稀土矿山为例[J]. 地球学报, 38(3): 335-344.
- 袁忠信, 李建康, 王登红, 郑国栋, 娄德波, 陈郑辉, 赵芝, 于扬. 2012. 中国稀土矿床成矿规律[M]. 北京: 地质出版社.
- 张祖海. 1990. 华南风化壳离子吸附型稀土矿床[J]. 地质找矿论, 5(1): 57-71.
- 赵汀, 王登红, 黄文斌, 李晓妹, 郑国栋, 孙艳, 于扬. 2016. 三稀战略调查成果数据库建设与应用[J]. 桂林理工大学学报, 36(1): 36-41.
- 赵汀, 王登红, 王瑞江, 邓茂春, 陈为光. 2014. 克里格法在离子吸附型稀土矿勘查储量估算中的应用[J]. 岩矿测试, 33(1): 126-133.
- 赵芝, 王登红, 陈振宇, 陈郑辉, 郑国栋, 刘新星. 2014b. 江西龙南稀土花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、内生矿化特征及成因讨论[J]. 地球学报, 35(6): 719-725.
- 赵芝, 王登红, 陈振宇, 郭娜欣, 刘新星, 何哈哈. 2014a. 南岭东段与稀土矿有关岩浆岩的成矿专属性特征[J]. 大地构造与成矿学, 38(2): 255-263.
- 赵芝, 王登红, 刘新星, 张青伟, 姚明, 顾文鳌. 2015. 广西花山岩体不同风化阶段稀土元素特征及影响因素[J]. 稀土, 36(3): 14-20.
- 中国地质科学院. 2017. 中国地质调查局、中国地质科学院 2016 年度地质科技十大进展发布[J]. 地球学报, 38(3): 313-316.

References:

BAI Ge, WU Cheng-yu, DING Xiao-shi, YUAN Zhong-xin,

HUANG Dian-hao, WANG Pei-hua. 1989. The forming condition and distribution law of ionic type rare-earth ore deposit in Nanling region[R]. Beijing: Institute of Ore Deposit Geology(in Chinese).

- BAO Zhi-wei, ZHAO Zhen-hua. 2008. Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China[J]. Ore Geology Reviews, 33: 519-535.
- BERN C R, YESAVAGE T, FOLEY N K. 2017. Ion-adsorption REEs in regolith of the Liberty Hill pluton, South Carolina, USA: An effect of hydrothermal alteration[J]. Journal Geochemical Exploration, 172: 29-40.
- CHEN Yu-chuan, HUANG Ming-Zhi, XU Jue, HU Yun-zhong, TANG Shao-hua, LI Ying-qing, MENG Ling-ku. 1993. Tin Deposit of Dachang[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Chinese Academy of Geological Sciences. 2017. Top Ten Geological Sci-tech Progresses of China Geological Survey(CGS) and Chinese Academy of Geological Sciences(CAGS) in the Year 2016 Unveiled[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(3): 313-316(in Chinese).
- DENG Mao-chun, WANG Deng-hong, ZENG Zai-lin, ZHANG Yong-zhong, ZHAO Zhi, ZOU Xin-yong, CHEN Bin-feng. 2013. Evaluation on delineation methods for ion-adsorption type rare earth ore body[J]. Rock and Mineral Analysis, 32(5): 803-810(in Chinese with English abstract).
- DING Jia-yu. 2012. Historical review of the ionic rare earth mining: In honor of the 60 anniversary of GNMRI[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 3(4): 14-19(in Chinese with English abstract).
- GAO Zhi-qiang, ZHOU Qi-xing. 2011. Contamination from rare earth ore strip mining and its impacts on resources and eco-environment[J]. Chinese Journal of Ecology, 30(12): 2915-2922(in Chinese with English abstract).
- HE Han-han, YU Yang, LIU Xin-xing, HUANG Fan, ZHAO Zhi. 2015. The characteristics of pH values and Eh values in rare earth elements minging area in South Jiangxi Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 34(4): 487-494(in Chinese with English abstract).
- HE Xian-chuan, LI Yang, ZHANG Min. 2016. Analysis on the metallogenic conditions of the ion adsorption type rare earth deposit on the upper and the granite weathering crust in Yunnan[J]. World Nonferrous Metal, (3): 116-122(in Chinese with English abstract).
- HUANG Dian-hao, WU Cheng-yu, HAN Jiu-zhu. 1988. REE geochemistry and mineralization characteristics of the Zudong and Guanxi granites, Jiangxi Province[J]. Acta Geologica Sinica, (4): 311-328(in Chinese with English abstract).
- HUANG Hua-gu, HU Qi-feng, CHENG Liang-kai, LUO Zi-sheng. 2014. Discovery of a new type of weathering crust ion adsorption type rare-earth deposit in the Heshangtian ore district of Guangdong Province and its significance[J]. Geology and Exploration, 50(5): 893-901(in Chinese with English abstract).
- LI Xian-chun, LI Si-qun. 1982. Determination of leaching total rare earth element, total light rare earth element and total high rare earth element in ion-adsorption REE deposit by photometry[J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science Edition), (1): 1-6(in Chinese).

- LIU Xin-xing, CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, HUANG Fan, ZHAO Zhi. 2016. The metallogenic geomorphic condition analysis of the ion-absorbing type rare earths ore in the eastern Nanling Region based on DEM Data[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(2): 174-184(in Chinese with English abstract).
- SANEMATSU K, KON Y. 2013. Geochemical characteristics determined by multiple extraction from ion-adsorption type REE ores in Dingnan County of Jiangxi Province, South China[J]. *Bull Geology Survoy of Japan*, 64(11-12): 313-330.
- SANEMATSU K, WATANABE K. 2016. Characteristics and genesis of ion adsorption-type rare earth element deposits[C]// VERPLANCK P L, HITZMAN M W. *Reviews in Economic Geology Vol. 18. Society of Economic Geologists*: 55-79.
- USGS. 2016. *Mineral Commodity Summaries 2016*[R]. Reston: Mineral Commodities Summaries.
- WANG Deng-hong, LI Hua-qin, CHEN Yu-chuan, QU Wen-jun, LIANG Ting, YING Li-juan, WEI Ke-li, LIU Meng-hong. 2005. Discovery of high-REE calcites in the Dachang super-large tin-polymetallic ore deposit, Nandan, northwestern Guangxi[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(2): 176-180(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, WANG Rui-jiang, LI Jian-kang, ZHAO Zhi, YU Yang, DAI Jing-jing, CHEN Zheng-hui, LI De-xian, QU Wen-jun, DENG Mao-chun, FU Xiao-fang, SUN Yan, ZHENG Guo-dong. 2013a. The progress in the strategic research and survey of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources[J]. *Geology in China*, 40(2): 361-370(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, WANG Rui-jiang, SUN Yan, LI Jian-kang, ZHAO Zhi, ZHAO Ting, QU Wen-jun, FU Xiao-fang, JIANG Shan-yuan, HUANG Hua-gu, FENG Wen-jie, XU-Ping, LI Sheng-miao, HUANG Xin-peng, ZHOU Hui, ZHU Yong-xin, TU Qi-jun, LI Xin-ren, FANG Yi-ping, ZHOU Yuan-yuan. 2016. A Review of Achievements in the Three-type Rare Mineral Resources (Rare Resources, Rare Earth and Rarely Scattered Resources) Survey in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(5): 587-598(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, ZHAO Zhi, YU Yang, ZHAO Ting, LI Ji-ang-kang, DAI Jing-jing, LIU Xin-xing, HE Han-han. 2013b. Progress, problems and research orientation of ion-adsorption type rare earth resources[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 32(5): 796-802(in Chinese with English abstract).
- WANG Jing-bin, RUAN Dao-yuan. 1989. Evolution and REE concentration of Heling-type REE acidic volcanic rock series[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 7(2): 68-72(in Chinese with English abstract).
- WANG Rui-jiang, WANG Deng-hong, LI Jian-kang, SUN Yan, LI De-xian, GUO Chun-li, ZHAO Zhi, YU Yang, HUANG Fan, WANG Cheng-hui, LIU Jia-jun, HE Han-han, ZHENG Guo-dong, HUANG Wen-bin, ZHOU Yuan-yuan, LI Xiao-mei, LIU Li-jun, CAI Xiao, ZHAO Ting, SONG Yang. 2015. The exploitation and utilization of rare-metals, rare-earth and rare-scattered metals mineral resources[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WU Cheng-yu. 1988. The Study of ion-adsorbed type of rare earth deposits in weathering crust from South Jiangxi and North Guangdong Provinces[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- YANG Yue-qing, HU Cong-sheng, LUO Zhan-ming. 1981. Geological characteristic of mineralization of rare earth deposit of the ion-absorption type and their prospecting direction[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 2(1): 102-118(in Chinese with English abstract).
- YANG Zhu-ming. 1987. A Study on clay minerals from the REE-rich weathered crust developed on the Longnan granite in Jiangxi[J]. *Scientia Geologica Sinica*, (1): 70-80(in Chinese with English abstract).
- YU Yang, WANG Deng-hong, TIAN Zhao-xue, HUANG Fan, ZHAO Zhi, SUN Yan, LI De-xian, HE Han-han, DENG Mao-chun. 2017. Establishment and Application of SMAIMA Working Method System and Environment Evaluation Model for Rare Earth Elements Mine: A Case Study of Ion-absorption Type REE Mines in Southern Jiangxi Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(3): 335-344(in Chinese with English abstract).
- YUAN Zhong-xin, LI Jian-kang, WANG Deng-hong, ZHENG Guo-dong, LOU De-bo, CHEN Zheng-hui, ZHAO Zhi, YU Yang. 2012. Metallogenic regularity of REE ore deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHANG Zu-hai. 1990. A study on weathering crust ion adsorption type REE deposits, South China[J]. *Contribution to Geology and Mineral Resource Research*, 5(1): 57-71(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Ting, WANG Deng-hong, HUANG Wen-bin, LI Xiao-mei, ZHENG Guo-dong, SUN Yan, YU Yang. 2016. Construction and application of rare earth, rare metal and rare-scattered elements minerals resources database[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1): 36-41(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Ting, WANG Deng-hong, WANG Rui-jiang, DENG Mao-chun, CHEN Wei-guang. 2014. Application of the Kriging method in reserves estimation of the ion-adsorption type rare earth ore[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 33(1): 126-132(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zhi, WANG Deng-hong, CHEN Zhen-yu, CHEN Zheng-hui, ZHENG Guo-dong, LIU Xin-xing. 2014a. Zircon U-Pb Age, Endogenic Mineralization and Petrogenesis of Rare Earth Ore-bearing Granite in Longnan, Jiangxi Province[J]. *Acta-Geoscientia Sinica*, 35(6): 719-725(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zhi, WANG Deng-hong, CHEN Zhen-yu, GUO Na-xin, LIU Xin-xing, HE Han-han. 2014b. Metallogenic specialization of rare earth mineralized igneous rocks in the Eastern Nanling Region[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(2): 255-263(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zhi, WANG Deng-hong, LIU Xin-xing, ZHANG Qing-wei, YAO Ming, GU Wen-ao. 2015. Geochemical features of rare earth elements in different weathering stage of the Guangxi Huashan granite and its influence factors[J]. *Chinese Rare Earths*, 36(3): 14-20(in Chinese with English abstract).