

文章编号: 0254-5357(2013)05-0803-07

风化壳离子吸附型稀土矿圈矿方法评价

邓茂春¹, 王登红², 曾载淋¹, 张永忠¹, 赵芝², 邹新勇¹, 陈斌锋¹

(1. 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;

2. 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 离子吸附型稀土矿是我国特有的珍贵资源。稀土总量(TREO)与稀土浸取量(SREO)是评价这类矿产资源规模与可利用价值的重要指标,但是四十多年来勘查评价方法一直以总量圈矿、以配分定性,与其采矿工艺和当前稀土价值不符。本文在矿区勘查实践的基础上,通过分析大量系统的样品测试结果,结合近五年稀土价格推算的浸取量和单元素圈矿指标,开展了稀土总量、稀土浸取量和稀土单元素三种圈矿方法对比研究。结果表明,同一对比区内,用稀土总量 $\geq 0.05\%$ 圈出的矿体与稀土浸取量 $\geq 0.03\%$ 圈出的矿体,后者的矿体面积、矿体厚度及资源储量要明显大于前者,存在一些地段或部位总量圈定不是矿而浸取量圈定是矿,一些地段或部位总量圈定是矿而浸取量圈定不是矿的现象。稀土单元素圈矿能够直观地反映稀土的主要组分及分布状况,有利于体现单一稀土矿床的经济价值,较稀土总量圈矿和稀土浸取量圈矿更加精细、更加合理,是值得深入研究的一种科学评价方法;但也可能出现因一些元素含量偏低而难以单独圈矿的现象,从而造成资源流失。本文提出,在勘查评价风化壳离子吸附型稀土矿床时,为保障资源的充分利用,在稀土单元素圈矿的基础上,还应注重综合评价。

关键词: 离子吸附型稀土矿; 稀土总量; 稀土浸取量; 单元素; 圈矿方法

中图分类号: P618.7; O614.33 **文献标识码:** A

离子吸附型稀土矿是我国特有的优势资源,该类矿床以黏土矿物吸附稀土离子为特征,稀土元素含量在原岩风化壳中发生次生富集,通常高出原岩2倍至数倍,与稀土元素呈独立矿物的风化壳砂矿床有显著区别^[1]。该类型矿床自20世纪60年代在赣南被发现以来,便以稀土配分类型齐全、稀土回收工艺简便而明显优于碱性岩、碳酸岩型等内生稀土矿,成为我国极具优势的宝贵资源,具有十分重要的战略意义和巨大的经济价值,是近几十年来我国稀土资源开采的主要对象之一,也是我国重点保护的限制性开采矿种。

离子吸附型稀土矿床系指稀土元素主要呈交换性吸附态阳离子(占稀土总量的50%以上)赋存于风化壳中的稀土矿床^[2]。在该类稀土矿床勘查评价过程中,稀土总量(TREO)与稀土浸取量(SREO)是衡量矿床资源规模与可利用价值的两个重要指标,具有十分重要的经济意义。稀土总量,是指稀土原矿中稀土元素氧化物含量的总和;稀土浸取量是指稀土原矿在酸、碱、盐等电解质溶液中以平衡交换

的方法可直接淋洗出来的稀土氧化物含量,亦称稀土浸出品位。稀土浸取量与稀土总量的比值(%)称为稀土浸取率。该类矿床风化壳中稀土赋存类型包含独立矿物型、离子吸附型、胶体分散型和晶格杂质型^[3],而试验研究表明,离子吸附型稀土矿床是当前可供人类经济利用的、有开采价值的工业矿物,主要为交换性吸附态稀土^[4]。这从本质上决定了稀土总量圈定的矿体并不全是可用资源,加之不同矿区(甚至同一地段的不同部位)稀土浸取率高低不一,评价对象与利用对象的不统一导致稀土总量圈定的矿体难以准确指导矿山合理开采,进而也影响该类资源的有效管理。四十年来,该类矿床的勘查评价一直是以稀土总量为主要对象进行矿体圈定和储量计算,而稀土浸取量仅作为次要评价对象一并反映,通过稀土浸取率换算求得,同时利用组合样的配分测试结果确定不同稀土配分类型,并计算各稀土分量资源。这种由总量到分量的评价方法虽然能够反映不同稀土组分的占有量,但不能全面准确地反映各分量的分布状态,更不能有效地指导有价

收稿日期: 2013-07-25; 接受日期: 2013-08-02

基金项目: 中国地质大调查项目——我国离子吸附型稀土矿战略调查及研究项目(1212011220804)

作者简介: 邓茂春,工程师,主要从事地质矿产勘查工作。E-mail: d-m-c-music@163.com。

元素的合理开采,也难以准确反映出矿床资源的真实价值。

随着稀土元素应用领域的不断扩大,其资源价值也日益显现。为研究在现有技术条件下离子吸附型稀土矿床更加合理的圈矿方法,提高该类资源的综合利用水平,本文在赣南一些稀土矿区勘查实践的基础上,通过大量、系统的工程取样,同时利用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测试技术的分析结果,结合近五年稀土价格推算的浸取量和单元素圈矿指标,开展了稀土总量、稀土浸取量和稀土单元素三种圈矿方法对比,并对这三种圈矿方法的合理性进行了初步探讨。

1 离子吸附型稀土矿床地质特征

离子吸附型稀土矿主要分布在中酸性花岗岩的风化壳中,少数分布在火山岩和变质岩风化壳中,矿体形态及产状严格受风化壳的控制,随地形起伏而起伏。风化壳平面形态受含矿地质体的地形、地貌条件和母岩风化程度的制约。一般是沟谷愈复杂,风化壳平面形态愈复杂,相反则较简单、规整,而沟谷的复杂程度与含矿地质体较大不连续结构面及地形的相对切割深度直接相关,当含矿地质体相对切割较浅时,其风化壳形态较规整分散;随着相对切割深度的增大,其平面形态愈加复杂。发育完整的风化壳自上而下一般分为腐植层、黏土化层、全风化层、半风化层及微风化层^[3],其中以全风化层厚度最大(见图1)。

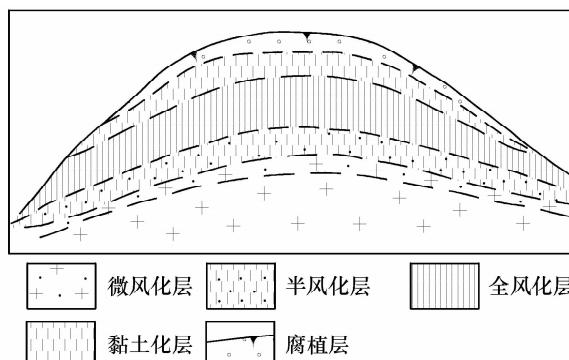


图1 花岗岩类风化壳分层示意图(据赣南地质调查队)

Fig.1 The layered diagram of granitic rock weathering crust

矿体主要分布在全风化层中上部,常随含矿地质体的不同地貌要素而变化。由山头、山腰、山脚组成完整规则的地貌单元,其剖面形态为向上凸起的弯月形或透镜状。矿体厚度一般是山头(顶、梁、脊)>山腰>山脚,在同一地貌类型和地貌单元中,地形平缓处的矿体大多厚于地形变陡的部位,山腰

处的矿体厚度常更接近矿床的平均矿体厚度,山头与山脚则往往相应偏厚与偏薄。据赣南数十个矿床统计,矿体厚度一般3~10 m,最厚可达30 m,矿体平均品位一般为稀土总量(TREO)0.07%~0.16%,稀土浸取量(SREO)0.05%~0.12%,浸取率一般介于55%~85%,平均浸取率约70%。矿体平面形态总体上除受含矿地质体沟谷网络特征的制约外,还受含矿层保存类型差异的影响,因而其平面形态一般较风化壳的平面形态更复杂,其规模、形态总是在风化壳平面轮廓之内变化。成矿母岩蚀变类型以硅化不发育为特征,主要蚀变交代作用有钾长石化、钠长石化、白云母化、黑云母化、高岭石化、萤石化等。其中与重稀土关系密切的蚀变主要有白云母化、钠长石化、萤石化和氟碳钇钙矿化,与轻稀土有关的蚀变主要有钾长石化、黑云母化。

2 离子吸附型稀土矿床评价指标的确定

2.1 稀土浸取量综合评价指标

现行稀土矿产地质勘查规范(DZ/T 0204—2002)仅对离子吸附型稀土矿床稀土总量的一般工业指标作了要求,而对稀土浸取量的一般评价指标没有明确。据赣南一些稀土矿山的调查情况,在现有提取工艺条件下,矿山处理一吨矿石所需成本为¥40~50,按照采选综合回收率75%,现阶段混合稀土产品(92%REO)平均价格为轻稀土约¥15万/吨,重稀土约¥20万/吨,依据一般临界品位的推算公式^[5],可获得轻、重稀土浸取量综合评价指标。

$$\text{临界品位} = \frac{\text{处理一吨矿石所需要成本}}{\text{综合回收率} \times \text{混合稀土价格}} \times 100\%$$

(1)轻稀土最低工业品位(SREO):

0.035%~0.045%

(2)重稀土最低工业品位(SREO):

0.025%~0.035%

轻、重稀土浸取量边界品位参照经验法,一般为最低工业品位的1/2左右,即轻稀土边界品位为SREO 0.02%~0.03%,重稀土边界品位为SREO 0.015%~0.02%。这与2003年江西省国土资源厅批复的赣南部分地区离子吸附型稀土浸出品位(轻稀土边界品位0.035%,最低工业品位0.050%;重稀土边界品位0.02%,最低工业品位0.035%)评价指标较为接近。

2.2 稀土单元素评价指标

按处理一吨矿石所需成本不变(不含分离成本),以近五年的稀土单元素氧化物(99%~99.9%)价格平均值为依据,采用2.1节临界品位的推算公式,各单元素氧化物评价指标详见表1。

表1 稀土矿床单元素组分评价指标

Table 1 The single element evaluation index for ion-adsorption type rare earth ore

组分	La ₂ O ₃	CeO ₂	Pr ₆ O ₁₁	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Eu ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Tb ₄ O ₇
质量分数/%	0.05	0.05	-	-	0.05	-	0.015	-
质量分数/10 ⁻⁶	-	-	50	50	-	5	-	5
组分	Dy ₂ O ₃	Ho ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	Tm ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Lu ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	Sc ₂ O ₃
质量分数/%	-	-	-	-	-	-	0.015	-
质量分数/10 ⁻⁶	10	30	50	10	50	5	-	10

3 离子吸附型稀土矿圈矿方法对比

在离子吸附型稀土矿床的勘查评价过程中,稀土总量圈矿是现行勘查规范要求的常用方法^[6],然而,由于该类矿床可利用资源的特殊性和稀土组分的多样性,为保证资源的有效利用和提高资源的综合利用率,稀土浸取量圈矿^[7-8]和稀土单元素圈矿^[9]越来越被人们所重视。为了解在现有技术条件下,稀土总量、稀土浸取量、稀土单元素三种圈矿方法对该类矿床所产生的不同影响,对赣南某稀土

矿区分别进行了三种方法的圈矿对比,以便为建立更加科学合理的勘查评价方法提供必要依据。

3.1 稀土总量圈矿与浸取量圈矿对比

对比矿区按照现行稀土矿产地质勘查规范中的轻稀土一般指标(即 TREO $\geq 0.05\%$, 最低可采厚度 1 m, 夹石剔除厚度 ≥ 4 m)和 2.1 节用价格法推算的轻稀土浸取量综合评价指标(即 SREO $\geq 0.03\%$, 最低可采厚度 1 m, 夹石剔除厚度 ≥ 4 m)分别进行了矿体圈定和资源量估算,二者之间浸取率换算为 60%。矿体圈定对比见图 2, 资源量估算结果对比见表 2。

从图 2 可见,在同一对比区内,稀土总量 $\geq 0.05\%$ 圈出的矿体与稀土浸取量 $\geq 0.03\%$ 圈出的矿体,无论在平面上还是在剖面上都存在明显的差异。平面上,稀土总量 $\geq 0.05\%$ 圈出的矿体分布范围要小于稀土浸取量 $\geq 0.03\%$ 圈出的矿体;剖面上,稀土总量 $\geq 0.05\%$ 圈出的矿体厚度较浸取量 $\geq 0.03\%$ 圈出的矿体明显要薄。表现在部分地段

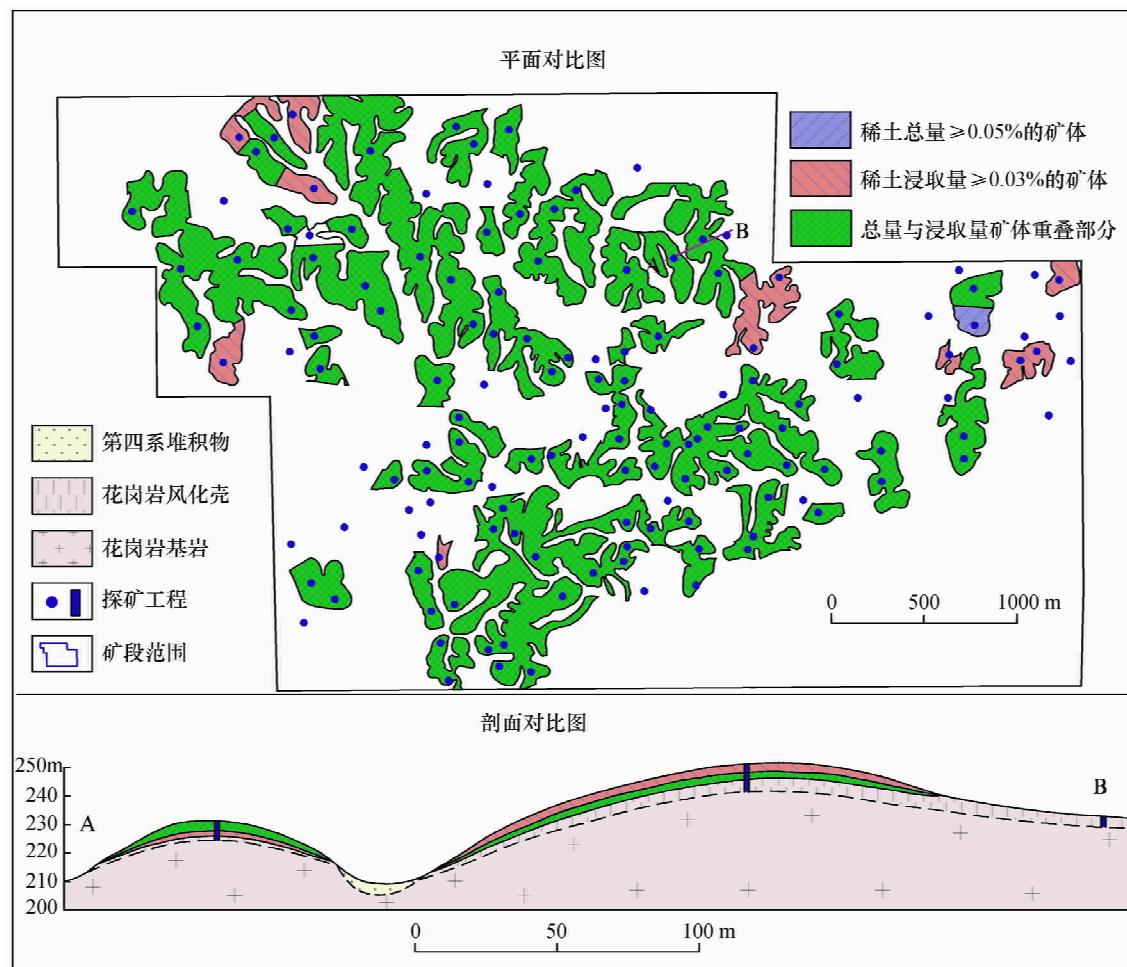


图2 赣南某稀土矿区稀土总量与浸取量矿体圈定对比图

Fig. 2 The contrast diagram of total rare earth and leaching quantity delineation of ore bodies in the mine area of Gannan

(或部位)用总量圈定不是矿而用浸取量圈定是矿,部分地段(或部位)用总量圈定是矿而用浸取量圈定不是矿,此现象前者相对较为突出。这种差异对介于工业品位与边界品位之间的矿体更为明显,究其原因主要是在不同地段或同一地段的不同部位稀土浸取率高低不同所致。

表 2 稀土总量与浸取量矿体圈定资源量估算结果对比

Table 2 Estimation results of total rare earth and leaching quantity delineation of ore bodies

圈矿指标	矿体面积 /m ²	矿体厚度 /m	矿石量 /kt	资源量/t		平均品位/%	
				TREO	SREO	TREO	SREO
稀土总量 ≥0.05%	3761160	3.39	21996.4	19386	13351	0.087	0.060
稀土浸取量 ≥0.03%	4005413	4.04	27692.4	22025	15206	0.078	0.054
相对误差/%	6.49	19.17	25.90	13.61	13.89	10.34	10.00

注:“kt”为千吨。

资源量估算结果(表 2)对比显示,稀土总量 $\geq 0.05\%$ 圈出的矿体与稀土浸取量 $\geq 0.03\%$ 圈出的矿体,后者的矿体面积、矿体厚度及资源储量要明显大于前者。矿体面积相对误差为 6.49%,矿体厚度差别更大,相对误差为 19.17%;资源量方面,二者之间矿石量相对误差为 25.90%,TREO 相对误差为 13.61%,SREO 相对误差为 13.89%;矿床平均品位前者略高于后者,TREO 相对误差为 10.34%,SREO 相对误差为 10%。

上述分析表明,在现有提取工艺条件下,离子吸附型稀土矿床以稀土总量为主要对象的评价方法是不科学的,明显存在当稀土浸取率高时将矿圈成非矿(即漏矿现象),而当浸取率较低时又将非矿圈成矿的不合理现象。以稀土浸取量为主要对象的评价方法不仅与其采矿工艺相符,而且圈定的矿体和计算的储量更有利于指导该类矿床的开采,明显较稀土总量圈矿更加合理。

3.2 稀土单元素原矿含量与浸出含量圈矿对比

稀土单元素圈矿是根据稀土单个元素的分析测试值,采用相应的稀土单元素评价指标,进行稀土单个元素的矿体圈定。依据上述稀土单元素组分评价指标,对赣南某稀土矿段分别用 15 种稀土单元素原矿含量与浸出含量进行单个矿种的重新圈定对比(图 3),单元素含量采用 ICP-MS 测试。图 3 显示,较稀土总量与稀土浸取量圈矿,采用单元素圈矿方法可以较直观地反映对比区稀土元素的主要组分

及其分布状况,有效控制主要元素的分布范围,不仅有利于资源的后续开采利用,而且有助于体现资源的经济价值。该圈矿方法既能有效地计算出资源的“量”,更能准确地控制资源的“质”,对资源的开发与保护有较好的监管作用,但也可能出现一些元素含量偏低而难以单独圈矿造成资源流失。因而,在勘查评价该类矿床时,为保障资源的充分利用,在稀土单元素圈矿的基础上,还应注重综合评价。

从稀土单元素原矿含量与稀土单元素浸出含量圈出的矿体分布形态来看,二者之间还是存在一定的差异。表现在部分稀土单元素含量在原矿中虽然较高,但通过提取液浸泡后其浸出含量较低,如 Ce、Eu、Lu 等元素,也有少数稀土单元素含量通过浸泡后其浸出含量有所提高,如 La、Er、Y 等元素。表明离子型稀土矿原矿中的稀土单元素含量在浸泡液的淋洗过程中,有些元素通过交换在浸泡液中得到富集,有些元素因交换甚少在浸泡液中含量降低,但无论如何交换,其浸泡液中的稀土含量较原矿中的稀土总量要小。在剖面上,稀土单元素原矿含量与稀土单元素浸出含量圈出的矿体形态也存在差异,但浸出含量圈出的矿体总体在原矿含量圈出的矿体范围内变化。

4 三种圈矿方法评价

4.1 稀土总量圈矿

稀土总量圈矿是现行稀土矿产地质勘查规范评价离子吸附型稀土矿床的主要方法。该方法以稀土总量为主要评价对象,样品基本分析为稀土总量,依据稀土配分的测试结果,采用稀土总量的一般工业指标进行矿体的圈定连接和储量计算,并通过稀土浸取率得到稀土浸取储量及其浸取品位。此方法的优点是对稀土总量储量及其品位等数据控制较为准确,但对稀土浸取储量的控制明显不足。由于该类矿床具有工业价值且能够被回收利用的只是稀土浸取储量(即可利用的稀土元素是用离子交换方式置换出来的),而不是所有稀土都可被回收利用,这从根本上决定了稀土总量圈矿的局限性。矿山多年的生产实践也表明,稀土总量达到工业指标,若其浸出品位很低,其利用价值也甚小,稀土总量不够工业指标,但其浸出品位满足生产要求,也同样具有经济价值。换言之,稀土总量是矿的不一定有价值,稀土总量不是矿的不一定没有价值。显然该圈矿方法圈出的矿体和计算的储量对指导矿山生产缺乏有效性和针对性,不能真实准确地反映稀土浸取储量这一真正可用资源。

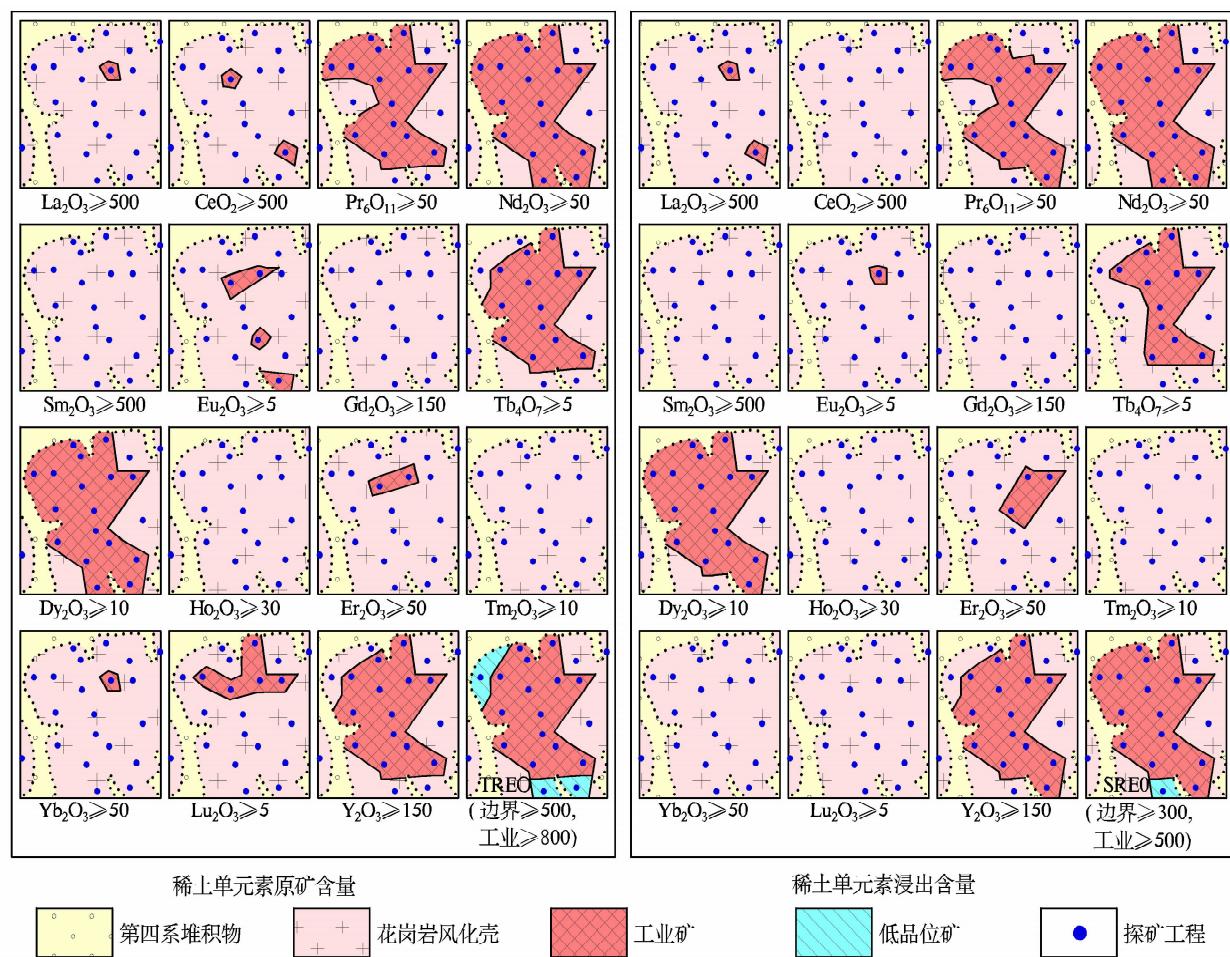
图3 赣南某稀土矿区15种稀土单元素矿体圈定平面对比图(各组分含量单位为 10^{-6})

Fig. 3 The diagrams of 15 kinds of rare earth elements delimitation of ore bodies in the mine area of Gannan

4.2 稀土浸取量圈矿

该方法与稀土总量圈矿不同,其评价的主要对象是稀土浸取储量,而不是稀土总量。样品基本分析为稀土浸取量,稀土总量作为次要评价对象用浸取率求得。此方法的最大优点是与现有采矿工艺相互衔接,较稀土总量圈矿更具针对性和有效性,圈出的矿体和计算的储量能最大限度地满足矿山生产需要,既保证了资源的充分利用,也有利于储量的动态管理和政府的宏观决策,找矿效果和勘查评价的可靠程度明显提高。且该方法方便快捷,在勘查成本和勘查进度等方面要明显优于传统的稀土总量圈矿^[8],是当前经济合理的一种圈矿方法。该方法不足之处在于仍是以配分定性为基础,计算的资源储量是先(浸取)总量后分量,单个稀土组分的资源难以准确反映,矿床资源价值难以得到准确体现,也无法满足有价元素的合理利用要求。

4.3 稀土单元素圈矿

稀土单元素圈矿是一种全新的评价思路,与传统评价方法有所不同。该方法的实质是通过稀土单元素含量的分析测试,并依据各个单元素的不同临界指标,以单元素为评价对象分别进行单独圈矿和单元素资源量计算,并汇总得到资源总量。此方法与稀土总量圈矿和稀土浸取量圈矿的最大区别在于,更为精细准确地反映出各个稀土单元素的资源分布状况,有利于进一步体现不同稀土矿床的经济价值,对稀土资源尤其是重要资源(如钇、钕、铕、铽、镝等)的合理开发和储量管理有很好的指导作用(图3)。不足之处是勘查成本有所提高。

但就稀土元素而言,由于各个元素密切共生,分离困难,在实际勘查过程中很难将其单独分开,因而在评价其主要组分时,为避免其他组分可能由于含量偏低而难以单独圈矿造成资源流失,还需结合矿

床综合指标进行整体评价。

就离子吸附型矿床而言,稀土单元素圈矿既能有效管控资源,也与采矿工艺相符,不仅符合“整体评价、查以致用、合理勘查”的矿产综合勘查综合评价的基本原则^[10],而且有利于指导矿山生产和储量动态管理,保障资源的充分利用,是现有技术条件下完全可行的科学评价方法,值得进一步深入研究。

5 结语

科学的圈矿方法是有效评价离子吸附型稀土矿床的基础,也是保障这一优势资源得到充分利用及保护的前提。在现有提取工艺条件下,稀土总量圈矿因不适合采矿要求具有明显的局限性;稀土浸取量圈矿虽能得到可靠的有用资源,但难以指导单个有价元素的合理利用;稀土单元素圈矿既能有效管控资源,又能准确地反映稀土矿床的经济价值,是现有技术条件下值得应用的科学评价方法。

稀土单元素圈矿不仅可以较为直观地反映稀土元素主要组分及其分布状况,而且有助于体现矿床资源的经济价值,较稀土总量和稀土浸取量圈矿更加精细、更加科学。该圈矿方法既能有效地计算出资源的“量”,更能准确地控制住资源的“质”,对资源的开发与保护有较好的监管作用,但也可能出现一些元素含量偏低而难以单独圈矿造成资源流失的问题。因而,在勘查评价离子吸附型稀土矿床时,为保障资源的充分利用,在稀土单元素圈矿的基础上,还应注重综合评价。

致谢:在本文编写过程中得到赣南地质调查大队苟月明教授级高级工程师的悉心指导,在此深表谢意;同时感谢国家地质实验测试中心的大力协助!

6 参考文献

- [1] 杨岳清,胡淙声,罗展明.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,1981,2(1): 102-118.
- [2] 江西省地质矿产局.南岭地区离子吸附型稀土资源远景调查研究报告[Z].1990.
- [3] 赣南地质调查大队.赣南离子吸附型稀土矿成矿规律研究[Z].1986.
- [4] 江西冶金研究所,江西九〇八地质大队.七〇一矿区花岗岩风化壳重稀土矿床稀土主要赋存性状研究[Z].1971.
- [5] 蒋志.矿床效益估计的理论和方法[M].北京:地质出版社,1995: 12-17.
- [6] 中华人民共和国国土资源部.DZ/T 0204—2002,稀土矿产地质勘查规范[M].2003.
- [7] 赣南地质调查大队.离子吸附型稀土矿勘查评价方法总结研究[Z].1988.
- [8] 张家菁,许建祥,龙永逐,陈小平.风化壳离子吸附型稀土矿稀土浸出工业指标的意义[J].福建地质,2003,23(1): 34-37.
- [9] 王登红,王瑞江,李健康,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.中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述[J].中国地质,2013,40(2): 361-370.
- [10] 国家矿产储量管理局.矿产综合勘查与评价[Z].1988.

Evaluation on Delineation Methods for Ion-adsorption Type Rare Earth Ore Body

DENG Mao-chun¹, WANG Deng-hong², ZENG Zai-lin¹, ZHANG Yong-zhong¹, ZHAO Zhi², ZOU Xin-yong¹, CHEN Bin-feng¹

(1. Geological Survey Team of Gannan, Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development of Jiangxi Province, Ganzhou 341000, China;

2. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Ion-adsorption type rare earth ore is unique and a valuable resource in China. Total rare earth oxides (SREO) and leaching quantities of rare earth oxides (SREO) are important indices of evaluation of the scope and value of rare earth resources. For forty years however, the exploration evaluation method for this kind of deposit has been delineated according to the total amount, and quantified by rare earth composition, at odds with the current mining technology and the current value of rare earth elements. In this paper, comparative studies in three methods for ore body delineation (TREO, SREO, and single element) are described, based on the practice of mineral exploration, results of systematic samples test and indices of ore body delineation by SREO and single element according to the rare earth prices of the last five years. The results showed that the areas and thickness of ore body and resources reserves delineated by SREO ($\geq 0.03\%$) are significantly greater than ore body delineated by TREO ($\geq 0.05\%$) in the same area. There are some areas or parts which are not mined by the total index, but by the leaching ore quantity index, while there are other areas or parts which are mined by the total index but not by the leaching quantity index. Ore body delineated by single rare earth element oxides, which can intuitively reflect the major component and distribution of a rare earth ore, is beneficial to embody the economic value of the single rare earth deposit. Compared to the methods of ore body delineation with TREO and SREO, the method for ore body delineated by single rare earth is more careful, reasonable, and worth further study. However, the misnomer that some element content is too low to separate from the ore body may also emerge, and lead to the loss of resources therefore, it is important to strengthen the comprehensive evaluation for ion-adsorption type rare earth ore body delineation.

Key words: ion-adsorption type rare earth ore; total rare earth; rare earth leaching quantity; single element; ore delineation method