

地质科技资料选编（八十九）

国外火成岩含矿性地球 化学评价标志研究

地质矿产部情报研究所

一九八四年八月

编 者 的 话

火成岩含矿性的研究在国内外已日益引起关注。各类火成岩含有种类繁多的矿产,但岩体的含矿性有明显的差别。因此,在寻找与之有关的矿产时,首先应当研究火成岩的含矿潜力,初步区分含矿岩体和不含矿岩体,以便把勘查力量有效地集中到含矿岩体上,避免勘查工作的盲目性,从而达到大量节省投资并获得较好的找矿效果。

国外对这一课题的研究已有很长的历史,积累了大量的资料,尤其是在近十多年来取得了较大的进展。火成岩含矿性评价所涉及的内容很广,包括岩石学、矿物学、地球化学、成岩作用和成矿作用,以及矿质来源等方面的问题。为反映国外的研究现状及进展,以配合国内火成岩的找矿和研究工作,我们着重对国外火成岩含矿性地球化学评价标志的研究现状及进展作了专题研究,总结了有关方面的成果,并选择了19篇论文,连同综述共20篇,编成专辑供参考。所选文章大体上能反映国外这一领域的研究现状和水平。

本专辑的内容主要涉及中酸性侵入岩(包括浅成斑岩)和喷出岩,以及与硫化铜镍矿有关的基性-超基性岩的含矿性评价。由于国外大部分工作是在中酸性侵入体和浅成斑岩体中进行的,因此有关这类岩体含矿性评价的文章在本专辑中占有相当的比重。这些文章主要反映含矿岩体与非含矿岩体,以及具有不同成矿系列的同一类侵入体在地球化学方面的鉴别标志,并介绍了火成岩体含矿性地球化学评价标志的研究方法,包括全岩地球化学、矿物-地球化学、建造分析的地球化学方法,以及数理统计方法等。此外,还收集有少量介绍应用微量指示元素探讨某些矿床成因的文章。

虽然国外火成岩含矿性地球化学评价标志的研究取得了某些进展,但在定量评价方面还不很成熟,有些参数是通过区域性研究提出来的,是否能普遍运用,尚待进一步研究。所以,应结合本地区具体的地质情况,采用与之相应的评价标志,并配合综合普查评价手段,才能对岩体的含矿性作出更为确切的评价。

在本专辑编辑过程中得到所内许多同志,包括绘图组同志的热情帮助,在此表示感谢。对于本专辑的缺点和错误,敬请读者指正。

一九八四年八月

目 录

1. 国外火成岩含矿性地球化学评价标志的研究现状及进展 (综述)	(1)
2. 含矿花岗岩类的地球化学分类	(18)
3. 智利安第斯山脉含矿和非含矿斑岩侵入体的鉴别	(27)
4. 西班牙中西部无矿花岗岩和含锡、钨矿化花岗岩的地球化学	(39)
5. 成矿岩浆系统的放射性地球化学标志	(46)
6. 预测硫化铜-镍矿床的地球化学准则及找矿方法	(49)
7. 卡尔巴含金和稀有金属花岗岩类黑云母的地球化学 特征是岩浆杂岩体成矿专属性的标志	(54)
8. 金-多金属建造中碳酸盐成分的特征是隐伏矿化的标志	(57)
6. 钾长石中稀有金属的成分是评价稀有金属伟晶岩专 属性和含矿性标志	(61)
10. 石英的矿物-地球化学特征可作为预测评价区域含 矿性的一种准则	(64)
11. 矿化和无矿侵入岩系中黑云母的地球化学	(69)
12. 鄂霍次克—楚科奇火山带流纹岩含矿性的矿物-地球化学标志	(79)
13. 花岗岩建造分析的地球化学方法和矿床与花岗岩关系的准则	(89)
14. 铷是智利斑岩铜矿床的找矿标志	(105)
15. 铷是稀有金属花岗岩含铷的标志	(121)
16. 铍和钼是火山-喷气、热液和岩浆成因镍硫化物矿化的鉴别标志	(124)
17. 瑞典前寒武纪铁矿石铁族元素的地球化学	(137)
18. 研究南新斯科舍地区锡专属性和铀专属性花岗岩地 球化学特征的多元统计方法	(152)
19. 基岩地球化学是潜在含矿花岗岩的评价标志——以尼日利亚 中部阿富年轻花岗岩杂岩体为例	(164)
20. 硫化镍矿化杂岩体的地球化学判别试验	(174)

国外火成岩含矿性地球化学评价标志 的研究现状及进展(综述)

古 方

一、火成岩含矿性地球化学评价标志研究的意义及现状

火成岩含矿性的研究在国内外已日益引起关注。随着地质工作的深入,在地表找到大矿的可能性已日趋减少。因此,把主要勘查目标转向寻找隐伏矿床是一种必然的发展趋势。各类火成岩含有种类繁多的矿产,但岩体的含矿性却千差万别。在寻找与火成岩有关的矿产时,首先应当研究火成岩的含矿潜力,初步区分含矿岩体 and 不含矿岩体,以便把勘查力量有效地集中到含矿岩体上,避免勘查工作的盲目性,从而达到大量节省勘探投资并获得较好的找矿效果。

广大地质人员在勘查和研究工作的实践中发现,矿物成分和外貌相似的火成岩岩体,有的含矿,有的则不含矿。因此,区分含矿岩体和不含矿岩体仍然是一个棘手的问题,然而又是必须探索和查明的问题。就花岗岩来说,其成因和含矿性问题一直是地质学中重要而又复杂的问题。Л. В. Таусон等人认为,这一问题之所以很难解决,是由于火成岩,尤其是花岗岩在地球上分布极广、岩体形成的长期性、对地球深处高温高压条件下发生的成岩和成矿作用的认识的局限性,以及矿物和化学成分相同的岩石和矿物的形成条件多种多样等原因。

多年来,地质和地球化学人员一直在寻求可用来鉴别含矿岩体和非含矿岩体的地球化学准则。大部分工作是在中酸性侵入体和浅成斑岩体中进行的,积累了大量资料。

苏联和西方国家对这一课题的研究都有很长的历史。在苏联,着重从研究火成岩稀有元素地球化学、查明岩浆杂岩潜在含矿性准则,以及侵入体与矿化的联系等方面来探讨这一问题。这些问题的研究是由В. И. Вернадский开始的。五十年代以来,И. Г. Магакьян, А. И. Семенов, В. И. Смирнов和В. Л. Барсуков等人相继从不同方面做了大量研究工作。尤其是近年来,Л. В. Таусон等人对花岗岩类的潜在含矿性准则及地球化学类型从理论和实际上进行了深入的探讨,发表了许多专著,已引起国际上同行们的关注。在苏联,参与这项工作的科研单位主要是苏联科学院地球化学与分析化学研究所,以及苏联科学院西伯利亚分院地球化学研究所等。

西方国家在开展这一课题的研究中,用于勘查目的具体方法主要是全岩地球化学、矿物-地球化学和数理统计方法等,这与苏联大体相似。但就目前的情况来看,西方国家趋向于发展数理统计方法,而苏联则从理论上肯定了矿物-地球化学方法在岩体含矿性评价中的作用优于全岩地球化学方法,并自七十年代以来进行了大量的试验研究,在某些领域取得了较

好的效果,明确了它是今后的一个发展方向。但这种方法仍有分选提纯矿物难,成本高等缺点,有待进一步改善。值得指出的是,目前西方国家的许多研究人员对矿物-地球化学的发展趋势也颇为关注,正如 G.J.S.Govett (1983) 指出的那样:“当遇到单个侵入体内金属元素含量变化极大以及含矿侵入体的成矿元素没有稳定的富集时,研究人员就可能转向单矿物中元素分布的研究了”。由此可见,他们已注意到了矿物-地球化学方法在某些情况能解决全岩地球化学方法不能解决的问题。但还有不少人持不同的看法,他们认为,要从岩石中分选出纯净的单矿物样品是很困难的,因而成本很高,与此相反,全岩地球化学方法则是一种简单、快速的方法。另一方面,从目前情况来看,苏联对火成岩含矿性评价这一领域的理论研究仍比西方国家高出一筹。苏联某些学者如 Л. В. Таусон、А. Л. Козлов 和 В. Л. Барсуков 等人在西方国家享有盛名,他们的研究成果在这些国家中被广泛引用。

火成岩含矿性地球化学评价标志研究的基本前提,是要取得大量精确的分析数据,选用比较合适的方法手段,才能得出较为可靠的结论。因此,提高分析精度甚为重要。六十年代以后,微量元素分析精度有了较大的提高,促进了微量元素地球化学研究的发展,研究成果不断涌现,水平也有显著的提高。然而,火成岩含矿性地球化学评价标志研究的发展却与此密切相关,在一定程度上可以说,微量元素地球化学研究是它的基础。特别是近十多年来,随着先进仪器设备的广泛应用和测试技术的提高,从而进一步提高了分析精度和速度,为开展这一课题的研究提供了大量比较精确的数据。电子计算机的广泛运用又为大量数据的存储和处理提供了方便,从而为开展这一课题研究中广泛应用数理统计方法开辟了途径。与此同时,国外对各类岩浆岩的成因及其岩浆演化过程,以及岩浆作用过程中元素的迁移与富集机制等方面的研究取得了大量成果,在理论上为探讨火成岩的含矿潜力提供了依据。所有这些都直接或间接地开展这一课题的研究奠定了基础。

从现有资料来看,国外火成岩含矿性地球化学评价标志的研究现状及其新取得的某些进展,主要表现如下:

1. 从总结单个含矿岩体的成矿地质特征开始,然后将含矿性不明的岩体与之类比,评价未知岩体的含矿性,逐渐发展为研究岩带(区)中含矿岩体和不含矿岩体的地球化学特征,主要是研究这两类岩体的鉴别标志。如尼日利亚卓斯高原花岗岩类岩带、智利斑岩铜矿带、北美西部和加勒比地区35个不同火成岩系,以及苏联远东地区花岗岩类岩带,所研究的岩体多达数十个至一百多个。

2. 从应用单指标评价发展为综合指标评价。最早提出的成矿专属性评价,主要是根据酸度(SiO_2 含量的多寡)大致评价各类岩体可能生成的矿产,而后来又提出碱度控制成矿的认识。如中酸性岩可产出有色金属、贵金属、稀有金属和放射性元素等多种矿产,基性-超基性岩则生出铬铁矿、硫化铜-镍矿、铂族金属和钽铌磁铁矿等矿产,认为主要受 SiO_2 含量的多寡或碱度控制,就超基性岩本身的矿产来说,还受镁铁比值的控制,这已为人们所熟知。在根据成矿元素进行评价时,早期的研究只根据个别元素的含量,以后逐步发展为多元素、多参数(元素或氧化物比值)等综合指标评价。目前西方国家一些学者通过研究认为,在全岩地球化学研究中需要考虑的一个重要问题,是认识和补偿岩性变化所引起的元素含量的差别,这意味着应测定较多的元素。

3. 矿物-地球化学方法在火成岩含矿性评价中的应用已引起相当的注意,并取得一些

较好的效果。

以往对火成岩含矿性的评价着重于火成岩中成矿元素的丰度，一般认为成矿元素的丰度高则岩石的含矿性好（也有人持不同看法）。但这不一定符合成矿实际情况，矿物成分复杂的岩石更是如此。因为成矿元素并不都是均匀地分布在岩石中的，而是大量地富集在某些矿物，特别是岩浆结晶晚期所形成的富含挥发性元素的矿物中，因此研究这些矿物中元素（包括成矿元素和微量元素在内）的地球化学特征更能反映成矿信息。但在实际工作中，目前在国内外特别是两方国家大多仍采用全岩地球化学方法，而苏联已普遍转向对矿物地球化学方法进行试验研究。六十年代以来，苏联已有许多人指出，传统使用的与全球克拉克值的对比存在很大的缺陷，而确定区域背景含量（克拉克值）对于实用具有非常重要的意义。

七十年代以来，国外对矿物-地球化学的研究进行了大量的工作，主要是研究火成岩中某些造岩矿物和副矿物的微量元素的地球化学特征，以评价岩体的含矿性。苏联目前在岩体含矿性评价及找矿标志的研究中广泛应用了矿物-地球化学方法，所研究的造岩矿物也较多（如黑云母、角闪石、白云母、钾长石和方解石等），同时对副矿物如锆石、榍石、独居石、磷灰石、磁铁矿等的矿物-地球化学特征也作了不同程度的研究。他们的许多研究成果表明，矿物-地球化学方法是一种值得重视的有发展前景的方法。苏联矿物-地球化学研究的发展，是与近年来在结晶学、固体物理学和物理化学迅速发展的基础上出现了一个系列新的矿物学研究方法，特别是找矿矿物学的发展有着密切的关系。但两者的研究内容不同，前者主要是通过研究矿物-地球化学特征来获得找矿信息，而后者则是从矿物和矿物组合提取重要信息，以制定矿床普查和评价准则，研究矿物学找矿方法的全部工作。实际上，在地质勘探工作中，地球化学研究和矿物学研究的关系极为密切。苏联地球化学奠基人 В. И. 维尔纳茨基和 А. Е. 费尔斯曼从未把地球化学和矿物学脱离开来，费尔斯曼经常强调地球化学找矿法和矿物学找矿法，尤其强调矿物-地球化学研究。美国、加拿大、英国和德国等一些国家在研究黑母云的地球化学特征及其与岩体含矿性的关系方面也作了许多工作，尤其是加拿大多伦多大学地质系 S. E. Kesler 等人对黑云母中卤素的富集量及其用作找矿标志的研究作了系统工作，发表了许多专著。虽然西方国家对矿物-地球化学的研究和应用不如苏联那样普遍，但目前已引起他们的重视。

现就目前研究得比较多的几种主要造岩矿物的地球化学特征及其用于岩体含矿性评价的某些情况简述如下：

(1) 黑母云

由于它是花岗岩类的主要造岩矿物之一，又是一些成矿微量元素的主要载体矿物，因此许多研究者都很重视对它的研究。

苏联学者 В. А. злобин 等人为查明岩浆杂岩体和含矿侵入体成矿专属性的标志，对卡尔巴花岗岩类的黑云母进行了全面的地球化学研究。无论在该地区的含金花岗岩类还是在稀有金属花岗岩类中，黑云母都是其主要的而在大多数情况下则是唯一的暗色矿物。对所获得的资料进行研究，证明含金花岗岩类和稀有金属花岗岩类的黑云母在地球化学特征上有重大差别，主要表现为：①前者比后者 MgO 含量高 0.5—2 倍，铁含量相应较低；②前者 Gr、Ni、Ba 含量高，在含矿的库努什岩体中金含量高。相反，在稀有金属花岗岩类的黑云母中，稀有金属、放射性元素和稀土元素的含量比含金花岗岩类黑云母中的高好几倍，Pb、

Zu、Ag的含量也偏高，Mn随铁含量增高而增高。通过研究查明了含金花岗岩类和稀有金属花岗岩类在矿物-地球化学特征上的鉴别标志，而某些侵入体（如库努什岩体和日德兰岩体）根据其矿物成分和岩石化学资料却看不出有什么差别。他们还得出这样一个结论，除上面所确定的一些金属元素外，黑云母富含稀土、稀有金属和放射性元素可作为花岗岩类侵入体潜在含矿性的标志。

Bradshaw (1967) 对英格兰西南部德文和康沃尔的5个矿化侵入体，以及英格兰和苏格兰其他地方的8个无矿侵入体的黑云母、白云母和长石进行了采样分析，其中矿化侵入体样品55个，无矿化侵入体样品94个。经统计分析表明，矿化侵入体中这三种矿物Sn和Pb的平均含量都比无矿侵入体要高得多。除此之外，矿化侵入体的长石和白云母中的Zn也比无矿侵入体要高。但在这两类侵入体的任何矿物中Cu的平均含量都没有重大差别。与无矿侵入体相比，矿化侵入体黑云母中的Rb和Sn含量高于前者，Sr含量低于前者；长石中Zn和Rb的平均含量高于前者，Ca和Sr的平均含量低于前者。这两类花岗岩之间元素的平均含量虽有明显的差别，但也有一部分重叠。矿化侵入体的另一特征是，其分异程度比无矿侵入体高。G.J.S. Govett (1983) 在他编辑出版的《地球化学手册》（第三卷）中指出，虽然Bradshaw的研究依据的样品较少，但他的数据表明，英格兰西南部的矿化花岗岩由于Pb、Zn和Sn的富集而使其与无矿侵入有明显的差别。他的研究还表明，适当的地质控制因素的重要性，因为花岗岩中元素含量的变化是与分异程度的变化有关的。

T.G. Lovering 等人 (1970) 研究了美国亚利桑那州南部锡里塔及圣丽塔山脉的一些花岗岩体黑云母中铜的分布量，其结果表明在成因上和空间上与矿化有关的侵入体的黑云母中Cu的含量最高。他还指出，矿化侵入体全岩样品中的铜含量也较高，但衬度不如黑云母中的大。因此，他认为黑云母中铜的高含量异常比岩石含铜量更灵敏，可用来发现与铜矿有成因关系的岩体。

关于能否应用黑云母中矿化剂元素（主要是卤素，如F和Cl等）的含量来鉴别含矿和无矿岩体的问题尚有争议。W.T. Parry 等人 (1975) 用电子探针分析了美国盆地和山脉型岩体黑云母中的氯和氟，发现其含量随各岩体而异，不能用于识别含矿和无矿岩体，而产于含辉石的岩体则不论其含矿与否，其黑云母中的氯含量均高。S.E. Kesler 等人 (1975) 研究了北美西部及加勒比地区不同火成岩系的92个黑云母样品，测定了其中Cl、F、H₂O、Cu、Zn、Fe和Mg的含量。含矿岩体主要产出斑岩型铜矿，其新鲜岩浆岩黑云母中氯和氟平均含量比无矿岩体的要高，而铜的平均含量则比其要低（置信度均为90%）。但是，他们认为卤素的富集量太小，不能作为常规的勘查手段。G.J.S. Govett 等人 (1983) 认为，全岩和单矿物中的卤素，以及长石和黑云母中的贱金属已引起相当的注意，但这些方法尚未获得肯定的结果。全岩中卤素总含量及水溶性卤素含量，似乎对每一个岩体都有特征值，但很少表明其与矿化的存在与否有稳定的关系。黑云母中卤素含量有明显变化，取决于原生岩浆成因、热液成因还是交代成因。这一结论至少有希望把热液黑云母作为一种找矿标志。单矿物中的一些元素（如铜、铅、锌、锡等）作为找矿标志似乎是比较成功的。但目前对黑云母中测得的异常铜含量，是实际存在于黑云母中还是存在于其蚀变矿物（绿泥石）中尚不清楚。

(2) 白云母

对白云母的研究不如黑云母多。苏联一些学者认为可采用白云母和钾长石中稀有碱金属

(锂、铷和铯)的平均含量资料,对花岗伟晶岩中的稀有金属矿化进行预测和评价。它不仅适用于单个矿脉,而且也适用于伟晶岩矿田和成矿省含矿性的预测。

①不含稀有金属矿化(锂—铯—钽—铌—铍)的云母—瓷土成矿省的标志是:伟晶岩中的白云母含 $\text{Li} < 0.001\%$, $\text{Rb} < 0.1\%$, $\text{Cs} < 0.005\%$;微斜长石 $\text{Cs} < 0.001\%$ 。

②属于不含矿的长石伟晶岩的白云母中,当上述元素(特别是锂)的平均含量偏高时,整个成矿省都可看作潜在的稀有金属区看待,其中可能发现含矿的伟晶岩。

伟晶岩本身又可划分为四类:

长石伟晶岩(不含矿):岩体中微斜长石含 $\text{Li} < 0.002\%$, $\text{Rb} < 0.2\%$;白云母和微斜长石间的锂铷比值分别大于10和2。

白云母—长石伟晶岩,含贫的Be-Nb-(Ta)矿化:岩体中微斜长石含 $\text{Li} 0.005-0.01\%$, $\text{Rb} 0.25-0.4\%$;白云母和微斜长石间锂铷比值分别为10和2。

锂辉石伟晶岩,含Li-Be-Ta(Nb-Sn)矿化:伟晶岩的微斜长石平均含 $\text{Li} 0.01\%$, $\text{Rb} 0.5-0.7\%$,但Cs不超过 $0.05-0.07\%$ 。

锂辉石—锂云母伟晶岩,含Li-Cs-Ta-(Be-Nb-Sn)矿化:矿体中白云母和微斜长石含 $\text{Cs} > 0.07-0.1\%$ 。

但是,伟晶岩中稀有金属矿化的预测评价不能只根据几个分析结果,而应当以相应矿物中浓集元素的平均值对为基础。样品个数可根据数理统计法求得。根据经验,单个矿脉一般有5—10对白云母和微斜长石样就够了。

Bradshaw(1967)对英格兰和苏格兰等地一些侵入体中的白云母进行了分析研究,查明含矿侵入体白云母中的Sn、pb和Cu的平均含量比无矿侵入体中的要高得多,认为可用作这两类岩体的鉴别标志。

(3) 钾长石

B. E. Загорский(1983)指出,评价伟晶岩专属性和含矿性的矿物—地球化学方法可能成为提高预测稀有金属矿化可靠性的有效方法。在伟晶岩区中对造岩矿物,首先是钾长石合理地进行地球化学测量就可以评价伟晶岩区、矿床外围、个别地段甚至某些脉体的远景。他认为,广泛分布于各类型伟晶岩中的钾长石很适于解决这类问题。

他对钾长石的研究成果以及对其他研究者的数据的综合分析得出,并非所有元素都可作为指示元素。对于稀有金属伟晶岩来说,信息量最大的元素仅仅是Li、Rb、Cs和Tl。在所有伟晶岩区中,从无矿伟晶岩到稀有金属矿化较复杂的伟晶岩,大多数情况下是从钾长石的早期世代到晚期世代, Li、Rb、Cs和Tl的含量有规律地增加,而K/Rb和K/CS比值则降低。从西伯利亚中生代最重要的三个地球化学类型(即锂型、钽—铌型和综合稀有金属型)的伟晶岩中钾长石的Li、Rb、CS和Tl的平均含量来看(表1),每一类型伟晶岩仅以其钾长石中上述两元素的含量水平就可与其他两类伟晶岩相区别,这就可以预测伟晶岩的地球化学专属性,因而也就可以预测其成矿专属性。锂型锂辉石伟晶岩的钾长石与综合型伟晶岩中的相比,大大地富含锂,而铷、铯和铌却要贫得多。锂型和钽—铌型伟晶岩铷和铯含量没有多大差别,但锂型伟晶岩钾长石中锂和铌的含量比钽—铌型中的高出一倍以上。综合型伟晶岩的特点是钾长石中铷、铯和铌的含量最高。值得注意的是,这些差异甚至还明显表现在各类无矿伟晶岩中。例如,锂型伟晶岩区中无矿伟晶岩的钾长石平均含锂50伽马/克,而钽—铌型

无矿伟晶岩和钾长石平均含锂24伽马/克, 综合型中的只有3伽马/克。

表1 (单位, 伽马/克)

伟晶岩的地球化学类型	Li	Rb	Cs	Ti
锂 型	460	3200	65	26
钽-铍 型	63	3300	180	14
综 合 型	24	5700	600	46
无矿伟晶岩(总体)	21	1500	42	3.5

矿物-地球化学研究一般需要从岩石中分离出单矿物, 因且会增添一些麻烦。但目前国外已有一些国家采用电子探针在岩石薄片上直接测试造岩矿物, 测定的元素可达10多个, 所测的数据已投入实际运用并获得一定的效果。因此, 随着电子探针等先进仪器的广泛应用及其测试技术的不断提高, 就不用挑选单矿物而大大节省人力, 降低成本, 从而可能进一步推动矿物-地球化学研究的发展。

4. 目前西方一些学者通过研究认为, 元素分布的高方差(标准差的平方)和强烈的正偏斜(不对称分布)是矿化侵入体的特征, 同时认为元素的频率分布形式对于鉴别含矿侵入体和无矿侵入体比元素的绝对丰度更为重要。矿化与岩浆作用的关系愈密切, 识别元素的异常分布就愈容易。总的来说, 具有含矿潜力的侵入体的主要特征是, 成矿元素含量一般较高, 且它们在岩体中的分布不均匀; 侵入体的分异程度高。这种侵入体的鉴别特征是, Li含量高, Rb/Sr比值也高, 而K/Rb比值和Ba/Rb比值均低, 通常富含U、Th、Cs、Be和Mo。因此, 他们认为测定这些元素有助于查明含矿潜力最大的侵入体; 以及有贯通地表的主断裂等。例如, 在加拿大科迪勒拉山脉作为斑岩型矿化母岩的一些侵入体中钨分布的斜率比与矽卡岩矿有关的侵入体中的要大。同样, 在英国作为同源岩浆铀矿化母岩的一些花岗岩中铀的富集量比产出岩浆期后矿化的花岗岩要高。

5. 研究如何鉴别具有不同成矿系列的同一类侵入体也是当前国外的重要研究课题之一。

岩性相同或相近的含矿岩体往往存在不同的成矿系列, 这在含矿花岗岩类岩体中表现得尤其明显。例如, 这类岩体中可能存在金、稀有金属: 铀、钨-锡、钨-钼、铅-锌-锑、钼-铋等成矿系列。目前国外已着手对这些具有不同成矿系列的花岗岩类侵入体进行对比研究, 探索它们的鉴别标志。虽然这项研究已引起普遍的关注, 但所做的工作相对较少。它是在划分出具有“成矿专属性”的侵入体的基础上进行的, 然后应用不同方法(包括全岩地球化学、矿物-地球化学及数理统计法等)求出不同成矿系列侵入体在地球化学特征上的鉴别标志。这种研究比单纯鉴别出含矿和非含矿侵入体的实际意义更大, 工作也更为细致和深化。前已述及的苏联卡尔巴含金与稀有金属花岗岩类鉴别标志的研究就是一例, 其方法是通过黑云母地球化学特征上的差异来鉴别。又如研究加拿大南新斯科舍地区锡专属性和铀专属性花岗岩的地球化学鉴别标志是采用多元统计法。新斯科舍南山岩基由一套早期岩体和一套较小的晚期深成岩体组成。根据晚期深成岩体所显示的一系列地球化学特征可确定它们为“专属性”花岗岩, 并能把他们与早期“非专属性”花岗岩区别开。进一步的研究可明确也将“专属性”

岗岩划分为含锡和含铀系列,即使在无Sn、U富集的情况下,也可确定其专属性系列。A. K. Chatterjee 等人(1983)通过研究指出,尽管应用若干元素(Li、P、Sn、F)的简单直方图就可成功地区分出两组花岗岩,但综合全部元素的判别分析就可以保证百分之百的成功。他们的研究得出,含锡系列花岗岩具有“亲石因子”(K₂O、P₂O₅、Rb、F、Li、W的因子得分很高)的特点,含铀系列则以“矿化因子”(Cu、Sn、Mn、Zn得分高)为特征。最重要的现象是在同成因和副侵入岩系的岩石中稀土—钍的减损与铀矿化有关,而钍富集的趋势与锡矿化有关。他们认为,锡成矿专属性花岗岩和铀成矿专属性花岗岩的U、Sn、Th、Li和F之间的系统变化型式截然不同,它们的数据组合是区别这两类成矿专属性的最有用标志。

6. 数理统计方法在岩体含矿性评价中的应用日益广泛。

由于岩体含矿性评价趋向于应用综合地球化学指标,并考虑构造、岩石等其他多种因素。这种多指标、多因素的评价显然需要应用统计方法来解决,电子计算机的应用也相应推动了这种方法的发展。目前世界上许多国家都开展了这方面的工作,尤其是西方国家已普遍重视采用这种方法,取得了较好的效果。从现有资料来看,主要采用如下几种方法:判别分析、因子分析、方差分析、点群分析和多元统计等。一些学者认为,这些方法对岩体含矿性评价的效果比仅靠几个成矿元素的全岩丰度所作的评价要好得多。例如,在尼日利亚中部阿富年轻花岗岩杂岩体,采用点群分析研究了变量间和样品间的关系,概括Q-型分析得出的分类,成功地将潜在矿化带及强烈钠长石化带与无矿带区分开来。矿化有利地区也显示为一个群,可与含矿潜力可能有限的地区分开。又如,法国地质调查局几年来从11个国家采集了712个基性-超基性岩样品,试图通过地球化学判别试验来揭示杂岩体富集硫化物的能力,并查明哪些岩相及其组成的元素对于判别含矿杂岩体和不含矿杂岩体能提供最好的结果。他们在进行数理统计时,做了多次试验。最后,仅在采用方差分析中显示出有指示意义的均值差的变量。根据这些变量得出的一个判别函数可以对每个岩相的含矿杂岩体组与不含矿杂岩体组作出最佳的区分,而且通过这一函数对样品进行成功划分的百分比很高。法国还建立了数据库,收集和存储了许多世界性的地质资料,为岩体含矿性评价提供了便利条件。

二、成矿元素在岩体含矿性评价中的作用

不同岩石类型的火成岩都具有本身特征的成矿元素组合,这些元素紧密共生,彼此间有一定的相关性。因此,研究这些成矿元素(包括主要成矿元素和次要成矿元素)在各类火成岩中的丰度及其共生规律,在岩体含矿性评价、综合找矿和矿产综合利用等方面具有重大意义。

加拿大学者R. W. Boyle (1969)写了《矿床中的元素组合和地球化学探矿中有意义的指示元素》一书,对各种元素组合作了较为详细的讨论。他认为,在伟晶岩和粗粒花岗岩中,与锂共生的最常见的元素组合是Rb、Cs、Be、Ta、B、P、F和Sn。云英岩中最特征的元素组合是Rb、Cs、Be、W、Sn、Mo、Bi、Ti、Ga、B和F。Rb既能富集于某些伟晶岩和粗粒花岗岩中,也富集于与Sn、W和Be矿床相伴的云英岩中。几乎在所有地质体中,Cs的最常见元素组合是K和Rb,二者为Cs的良好指示元素。产生斑岩铜矿床的岩体中Cu的最常见元素组合是Mo、Re和Fe;Zu、Pb、Au、Ag、As和Sb等常常局部出现;W少见。伟晶岩和粗粒花岗岩中,特征的富集元素是Sn、W、Ta、Nb、Bi、As、Be、B、F、Li、Rb、Cs和Mo。在伟晶岩中Sn和W几乎

经常伴生，Sn与Li的组合也很特征。

Л. В. Тейсон 等人(1983)对地球化学和形态类型不同的花岗岩及玄武岩类侵入体潜在含矿性的分析表明，潜在含矿性最大的是安粗岩和安山岩地球化学系列的玄武岩类及其酸性衍生物的浅成和次火山侵入体，稀有金属刚玉奥长浅色花岗岩、稀有金属钠质花岗岩，钙碱性系列的再生花岗岩类和稀有金属碱性花岗岩的浅成侵入体。在安粗岩地球化学系列的浅色侵入体中，成矿元素和稀有元素的范围很宽（铜、钼、铅、铋、锡、钨等），具有很高的潜在含矿性。另一类潜在含矿的花岗岩类是稀有金属刚玉奥长浅色花岗岩的浅成侵入体，锡、钨、铋、钼和其他稀有元素的大型矿床与其有关。这类侵入体广泛发育的地区有东南亚（马来西亚、印度尼西亚）、中欧（法国中央地块、厄尔士山脉）、蒙古-鄂霍次克火山带、美国西部各州和东澳大利亚等。

基性-超基性岩中的成矿元素组合为Cr、Fe、Ni、Cu、Co、V、Ti、Ru、Rh、Pd、Os、Ir、Pt等，同时还有Ag和Au。在镁质超基性岩（纯橄岩、斜辉辉橄岩、古铜辉岩）中一般产出铬铁矿，而在铁质基性-超基性岩镁质偏高的岩石（橄辉岩、斜方辉石岩、辉长-苏长岩等）中一般产出硫化物铜-镍矿，铁质偏高的岩石（单斜辉石岩、二辉辉石岩、辉长岩和斜长岩等）中一般产出钼-钛磁铁矿。

各类火成岩中成矿元素的含量与造岩元素相比是很低的。所以只有通过各种成矿作用，包括岩浆的结晶分异作用、流动分异作用、熔离作用和射气分异作用等，使这些元素浓集几倍、几十倍乃至几千倍以上，才能形成具有工业意义的矿床。

存在于各种岩石中的金属成矿元素都是它们在地球中长期迁移的结果。它们在岩石中的赋存形式是多种多样的，有的呈独立矿物存在，但是也有许多成矿元素，特别是稀有元素原来不是呈金属矿物或其他独立矿物存在，而往往是以各种形式（化合物、微矿物、类质同像、各种包裹体及吸附物等）分散在各种造岩矿物或副矿物中。对于富含某种或某些成矿元素的火成岩体来说，这些成矿元素往往明显富集，甚至有初步矿化。不同元素或同种元素在同一岩石中的分布量也有很大差别，即其含量的差别可达几倍、十几倍，甚至几个数量级。成矿元素在其载体矿物如黑云母、角闪石、斜长石等（这些矿物在岩石中占有一定数量）以及副矿物中的含量高。当发生强烈的气化-热液交代作用，特别是碱交代作用，以及变质作用时，许多成矿元素则可能发生活化转移，而转入成矿溶液，从而使溶液获得成矿物质，变成真正的含矿溶液。这种含矿溶液在其运移的途径上，在有利的条件下使成矿物质进一步富集并发生沉淀，可在该含矿岩体或围岩中形成具工业价值矿床。

在岩浆作用过程中，成矿元素的富集，在时间上与岩浆演化系列的中晚期和晚期阶段有关。例如，铜在岩浆作用早期呈液滴状硫化物分散在硅酸盐之中，在基性-超基性岩浆作用的晚期形成硫化物铜-镍矿床。斑岩铜矿化与安山-英安岩浆同源，斑岩的蚀变矿化与侵位时期难以截然分开，开始蚀变的温度为700—600℃，矿石形成温度约350—250℃，表明矿床的形成经历了岩浆作用末期高温自变质到中温热液阶段的长期演化过程。Sn的重要富集阶段是高温气液阶段，Sn在高温时可形成 SnCl_4 、 SnF_4 等气体迁移到岩体上部，遇水不稳定，水解形成锡石，与含F矿物共生，或有HCl液包体。Sb和Bi也倾向于在岩浆作用晚期略有富集，但在热液阶段才形成有工业价值的矿床。

三、主要造岩元素(或氧化物)在岩体含矿性评价中的作用

人们常常应用酸碱度和基性度来评价火成岩的成矿专属性,主要依据各类岩石中 SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 、 Al_2O_3 、 MgO 、 Fe_2O_3 和 FeO 等造岩氧化物的含量(或某些比值)来分析评价这些岩体所特有的矿产。

目前研究含矿岩体和不含矿岩体的鉴别标志方面取得了一些进展。与此同时,对含矿岩体内近矿标志的研究也日益引起人们的重视,尤其在研究近矿蚀变标志方面做了大量工作,而且在勘查实践中,应用有指示意义的蚀变标志进行找矿取得了较好的效果,但蚀变带的形成往往与主要造岩元素的交代或置换有密切的关系。

П. В. Камаров (1982) 认为,造岩指示元素不仅可有效地用于追索近矿蚀变岩,而且还可用于发现矿化带。例如,以铬铁矿和铬尖晶石形式出现的铬铁矿矿化地段,铝和铁的含量也应偏高,因为铝和铁在这两种矿物中是与铬伴生的。如果确定了铬、铝、铁之间的相关关系,矿带中铬含量的变化就很容易查明,即通过测定铝(或)铁的含量就可查明。实验研究表明, Si 、 Al 、 Ca 、 Mg 、 Fe 、 K 、 Na 在各种矿产的普查中作为指示元素使用,要比 Tj 和 Mn 常用得多。在发现和追索与矿化伴生的近矿蚀变岩时,用造岩元素作为指示元素是甚为有效的。例如,鉴别镁矽卡岩需测定镁和硅,鉴别钙矽卡岩需测定钙和硅,鉴别钾长石化和云母化带需测定铝、硅和钾等等。

数十年来,物理学所取得的巨大成就也促进了元素分析技术的发展。近年来,全苏核物理和地球化学研究所已应用核物理和其他物理分析仪器对岩粉样品作造岩元素等指示标志的分析,可在无岩心钻探或岩心钻探的同时获得地球化学数据,提供深部找矿信息,提高找矿效果。他们已针对矿区(远景区)的深部勘探工作,提出五种互相配合找矿的方法(参考文献[31]),这种找矿方法已被视为新的化探方向。

造岩氧化物 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和 MgO 是岩石的主要成分,受硅酸盐岩浆熔体分异作用制约的各种岩石成分的变化,主要表现为这些氧化物比值的变化。在多矿物硅酸盐岩石中这四种主要造岩氧化物的总量通常在60%以上。而在火成岩体中,对金属成矿元素的块状矿体和富浸染体来说,四种主要氧化物的总量小于60%。因此,根据岩粉样品,以及在孔壁测井时用快速物理方法(在井壁测量时一般采用中子活化测井方法)测定 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和 MgO 的含量。依据这些氧化物的含量、含量之和及(或)比值,可按岩石学化成分划分地质剖面,并可立即在所研究的钻孔中划分出块状矿体或富浸染带,避免漏掉矿体。П. В. Камаров (1982) 认为,除硅和铝以外,任何元素高度富集的块状矿体,都可通过上述四种主要氧化物总量的陡然降低(通常小于60%)显示出来。但他在1978年曾指出,测定主要造岩元素含量的普查方法尚不能发现弱蚀变岩中规模不大的浸染状矿化,为了消除这个缺点,推荐使用硫氧量测量方法,或直接测定有意义的元素。

根据主要造岩元素或氧化物的普查方法,不仅适用于火成岩而且适用于沉积岩的普查找矿,但应根据具体的地质条件,配合与之相适应的其他方法,从而获得更好的找矿效果。

四、微量元素在岩体含矿性评价中的作用

上面阐述了成矿元素在岩体含矿性评价中的作用。实际上,许多成矿元素在火成岩中也是呈微量元素存在的,但这些元素和矿化剂元素可充当成矿作用的直接标志,而其他非参与成矿的微量元素则可作为间接标志。然而,这两类元素在成矿作用中的关系却十分密切。在这里着重分析后一类微量元素在岩体含矿性评价中的作用。

В.А.Алексенко (1979) 指出,成矿元素的富集过程还与其他元素的含量变化(不论其增加还是减少)有关。作为间接指示标志的这些元素既可呈类质同象形式,也可呈机械混入物形式参加矿物成分,又可形成自身矿物。因此,间接指示元素在岩石或单矿物中的含量变化都可证明岩体的含矿性。

关于微量元素作为岩体含矿性评价标志的实例较多,斑岩铜矿尤其突出,其他类型的含矿火成岩体也不乏其例。

J. A. Baldwin 等人 (1982) 以智利斑岩铜矿带大约100个新鲜花岗类岩石的侵入体为基础,对比分析了含矿侵入体(与矿化有关的侵入体)和非含矿侵入体(与矿化无关的侵入体)地球化学方面的不同特征。研究表明,含矿侵入体最主要的特征是,其Y、Mn、Th及稀土元素具大的负异常。他们认为,含矿侵入体中Y和Mn含量低,在一定程度上可能是由于富Y和富Mn的含水相(如角闪石)的早期结晶作用和岩浆中富Mn流体的损耗造成的。在其他的斑岩铜矿区,这些元素也可作为有用的鉴别标志,不过从岛弧、大陆边缘到大陆环境这种鉴别界线的具体位置有些变化。

智利中部和北部安第斯山脉有许多中性、钙碱性侵入体,但其中只有很少一部分产出斑岩铜矿床。J. A. Baldwin 等人研究了在没有明显热液蚀变或明显矿化的情况下,利用全岩地球化学方法来评价侵入体或侵入杂岩体含矿潜力的可能性。在其他一些斑岩带也作过这种试验,同样取得了一些成效。D. R. Mason 和 J. A. McDonald (1978) 在巴布亚—新几内亚—新罗门群岛地区,应其它元素进行了最广泛的研究,对比了岛弧、大陆边缘和大陆环境的含矿与非含矿侵入体的成分。他们的发现,单独一种元素是不能鉴别这种岩体的,但他们还指出,当一个地区出现不同岩石类型时斑岩铜矿床是与晚期低钾侵入体伴生的。D. R. Mason 和 P. G. Feiss (1979) 继续了这项研究后指出,某些主要元素和微量元素(主要是Sb、Sr和过渡金属)已成为在矿区范围内圈定矿体的有用工具。

上述学者的研究得出如下结论:

1. 全岩样品微量元素资料可用来鉴别含斑岩铜矿的岩套。单独一种元素不能作为良好的鉴别标志,但Y和MnO的协变图则能明显地区分含矿和非含矿侵入体的样品,因为在含矿岩体的样品中这两种元素的含量均较低。当限于一个地区(如埃尔萨尔瓦多—科皮亚波地区)或一个构造带(如太平洋岛弧地区)时,鉴别效果更好,因为不同地区Y的丰度是不同的。

2. Y值低可能反映了形成斑岩铜矿所需的特定岩浆作用,MnO值低可能反映了热液系统发育的规模和强度。用Y和MnO进行鉴别的方法,在踏勘阶段可能是有用的,它能提供一定的依据,表明哪些侵入岩组合是从能产生斑岩铜矿化的岩浆中结晶出来的。

Л. Ф. Сырицо 等人 (1981) 论证了铼是稀有金属花岗岩含钽的标志。他们研究了东西伯利亚的一个研究程度很高的变花岗岩体。根据对地球化资料进行统计分析的结果,确定了Ta和碱性稀有元素(Li、Rb)和氟有直接而密切的相关关系($R_{Ta-Li} = +0.88$; $R_{Ta-Rb} = +0.91$; $R_{Ta-F} = +0.86$)。因而,可以把这些元素的富集水平看成是该建造类型花岗岩类岩石含钽的标志。而且证明,具有最小标准离差的最牢固和最可靠的关系,是Ta—Rb关系。对于变花岗岩来说,这种关系的相关系数实际上等于1($R_{Ta-Rb} = +0.98$),也就是说,铼含量是最可靠的含钽标志。根据不同成分和不同空位置的岩石中这些元素的相互富集水平还可以肯定地划分出许多区,这些区在图上的排列顺序恰好与所研究的侵入体的分带性

完全一致。综合有关苏联(后贝加尔, 苏联东北部, 北天山和南天山, 哈萨克斯坦)、捷克斯洛代克和蒙古已知变花岗岩岩体的现有资料, 证明所确定的关系具有普遍意义。

Reid R Keays等人(1982)论证了铱和钌是火山-喷山、热液和岩浆成因镍硫化物矿化的鉴别标志。西澳大利亚所有具经济价值的镍硫化物矿床相对于其他地壳岩石, 明显地富含贵金属, 但二者Pd/Ni和Ir/Ni比值却差不多。不管镍硫化物产在超镁质火山岩系的底部(如卡姆巴尔达)还是呈填隙硫化物产在侵入的纯橄岩体中, 这两种比值都是稳定的。相反, 纳拉金热液和(或)交代镍硫化物矿化的Pd/Ni和Ir/Ni比值与主要硫化物矿床明显不同。纳拉金硫化镍矿的Au含量高, Pd含量中等, 但变化不定, Ir含量特别低。同样, 卡姆巴尔达和谢尔洛克湾火山-喷气硫化物的Pd和Ir含量微乎其微。西澳大利亚的资料以及其他热液铜-镍硫化物矿的贵金属分析结果表明, 尽管Ni、Au和Pd可能是由水溶液搬运的, 但Ir却不可能。因此, Ir的相对丰度可以作为岩浆硫化物的鉴别标志。

由于岩石中的稀土分布型式能保持其原来的形成条件, 不为后来的变质作用改变, 因此能用于探讨岩石成因, 如物质来源、岩浆分异程度等。近来国外又有人提出, 稀土元素(如钬、钇和铽等镧系元素)的丰度和分布型式可分矿化和无矿化的火山岩带, 因此对矿产勘查可能有意义。但这一问题尚未通过大量的研究所证实。为此, 澳大利亚能源和地球资源研究所矿物研究室目前正对这项建议进行评价。

五、挥发性元素在岩体含矿性评价中的作用

在岩浆作用和内生成矿作用过程中, 岩浆中的挥发组份 H_2O 、 CO_2 、 H_2S 、Cl、B、F等大量地从正在结晶的熔体中分离出来, 起着成矿元素的搬运剂和矿化剂的作用。对许多铁、锡、钨、多金属、硼(硼酸盐)、氟(萤石)以及稀有金属矿床的矿物成分特征的研究表明, 在形成这些矿床的过程中, 常常以某种矿化剂(如氯、硼或氟)占多数。人们普遍认为, 在矿床形成过程中, 氯化物对金属元素的运移可能起着主要作用。与花岗岩类有关的矿床的金属元素, 至少可以说铀、钍、钽或其他元素, 以氯化物形式进行运移、富集是最有利的。

随着人们对热液性质的认识的提高, 提出了在铜、铅、锌等矿床的勘查上能否使用Cl、F等阴离子的问题。为此, 许多学者, 尤其是普林斯顿大学、犹他大学、多伦多大学的学者做了大量试验, 但许多想用氯作为探矿指示元素的尝试尚未取得良好的效果, 其主要原因是氯的富集量太小。

然而, 另一些学者在不同地区所作的试验取得了不同的结果和不同的认识。

石原舜三等人(1977)从日本250个花岗岩类岩石的分析资料得出这样的认识: F含量是按磁铁矿花岗岩类(磁铁矿系列)、区域变质带钛铁矿系列花岗岩类和非变质带钛铁矿系列岩石的次序增加。

除上述两个系列(磁铁矿系列和钛铁矿系列)外, 在镁铁质岩石中Cl的含量一般很高。磁铁矿系列花岗岩类中即使主要成分有变化, F含量也是稳定的。在钛铁矿系列的岩石中, 长英质岩石中F含量高。对岛新第三纪花岗岩中Cl含量异常高(平均790ppm)。该地区有著名的对州铅、锌矿床, 在赤金、釜石矿山附近也发现Cl异常。因此, 有人认为新鲜花岗岩类的Cl含量可用作探矿指示元素。

与锡和云英岩伴生的黑钨矿矿床一般产在F/Cl比值较高的花岗岩区, 可以查明有关花

岗岩类的F含量和矿化作用的程度，二者之间是有联系的。因此，认为在研究这种矿床时最好同时测定Sn的含量。

П.В.Камаров (1982) 认为，氧和硫在含矿溶液中广泛存在，在各种地质条件下都具有稳定性，因而它们是矿体和近矿交代岩中常有的组份，而且浓度往往很大。因此，在各种矿床的普查中，氟和硫是最常用而又最有效的指示元素。他还认为，在测定主要造岩元素之后，为了查明有用元素达百分之几或千分之几的带，可使用测硫法（或）测氟法。他指出，根据氟的异常含量可以划分出绝大部分稀有金属和少数金属矿床，以及萤石、磷灰石、磷块岩矿床，根据硫异常可发现有色金属以及其他金属和非金属矿床。

Л.В.Таусон 等人 (1983) 从理论和实践上阐明了某些挥发组份如水和氟在成岩和成矿作用中的意义。他们认为，水和氟是硅酸盐熔体有效的变形剂，可从根本上改变熔体的结构和物理性质。业已查明，水和氟对硅酸盐熔体结构的变形作用具有很大的成岩和成矿意义，表现为硅氧键沿桥氧键断开，并形成成分较简单的缩聚产物（поликонденсат）。水和氟变影响的重要成岩结果是在一定条件下可能形成“低温熔体”，这种熔体在550—600℃结晶，比相似的无水硅酸盐熔体的结晶温度还低200—250℃。另一方面，大量的水和氟溶解在这样的熔体中极大地降低了熔体的粘度，因而使其非常活动。

关于有可能存在低温熔体的推断，已由一种岩石新类型——翁岗岩的发现得到了进一步的证实。翁岗岩是低温花岗岩熔体的喷发相，最初发现于蒙古（翁岗—海尔汉岩体），之后在苏联贝加尔、东萨彦和其他地区也有发现。翁岗岩的发现具有很大的科学价值，这已为人们所熟知。

六、某些地球化学参数在岩体含矿性评价中的作用

国外岩体含矿性评价的研究虽然取得了某些进展，但目前在很大程度上仍然处于定性评价阶段，即主要是鉴别含矿岩体和不含矿岩体。近十多年来，由于这项研究工作的深入，已有许多学者开展了对岩体含矿性定量评价的研究。在总结各地研究成果的基础上，逐步提出了一些用于岩体含矿性评价的地球化学参数。这些参数不一定都能适用，因为不同地区的各类火成岩体都具有各自的特点，但岩性相同的岩体毕竟会有其固有的共同特性。因此，介绍国外有关岩体含矿性评价所应用的某些地球化学参数，对于我国开展这方面的工作仍然是有益的。

1. 花岗岩的稀有金属指数 $F\left(\frac{Li+Rb}{Sr+Ba}\right)$

该指数可表示花岗岩类岩石中Li、Rb、Sr和Ba的相互关系。П.В.Таусон 等人 (1983) 指出，花岗岩类稀有元素的定量研究表明，在花岗岩类的这些成因大类中，稀有元素含量、形成条件和潜在含矿性等方面可以有很大的差别。在对比岩性相似的花岗岩类时，这种差别显得极为明显，最好的实例是浅色花岗岩。根据他们的研究，该指数可从斜长花岗岩的2.5变为刚玉奥长花岗岩的3460。这就为制定花岗岩类岩石的地球化学分类原则提供了依据，还可用于花岗岩类的分类，并分析它们的潜在含矿性。

2. 玄武岩类的稀有金属指数 $\frac{K}{Ti}\left(\frac{Ba+Sr}{Ni+Cr}\right)$

该指数也是由Л.В.Таусон 等人提出的。他们把玄武岩类划分出四个主要地球化学系

列,即拉斑玄武岩系列、碱性玄武岩系列、安山岩系列和安粗岩系列。这些岩石的稀有金属组份的衬度特别明显地反映在该指数数值的变化上,即从大洋拉斑玄武岩的0.1到安粗岩的900。由此可见,安粗岩的潜在含矿性最好。

3. TiO_2/Ta 比值

M. Boissavy-Vinau 等人(1980)论证了 TiO_2/Ta 比值是含锡花岗岩分异程度的标志。他们对法国中央地块马尔什地区和葡萄牙维塞岛北部地区的含锡花岗岩基进行了对比研究,共分析了97个岩石样品,结果查明这两个含锡地区的岩石和地球化学演化的一般情况非常相似:(1)存在着两种连续分离的岩套,有8—10个花岗岩类岩相,代表了他们的不同演化阶段;(2)发生分离结晶作用的花岗岩浆的演化程度很高;(3)在岩浆演化的最后阶段,锡比钨更为富集。

通过研究他们还认为,在残余熔体中连续结晶作用使下列元素富集:Sn、W、Ta、Rb、Cs、F和Li,另一方面又使下列元素贫化:Ti、U、Th、Hf、Ba、Sr、Zr、Ni、Co、Sc和稀土。铀和钼这两种元素很好地显示了两种双重趋势。因此,它们的比值是花岗岩浆分异演化程度的良好标志,因为所研究的锡矿床与分异最好的花岗岩类有关,故 TiO_2/Ta 比值可以看作是选择适合进行详查地区的区域性标志。但他们尚未能肯定上述结果是否适用于其它含锡花岗岩类杂岩。

4. $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值

岩浆岩的碱度可根据这一比值确定。岩石中稀有元素的含量随花岗碱度的增高而增高。Д.С. Коржинский (1980)在《岩浆岩中稀有元素含量与其碱度的关系》一文中写到:《地球化学手册》(K.H. Wedepohl, 1978年)等的资料表明,与二氧化硅含量相近的正常碱度的岩石相比,碱性岩浆岩富含下列惰性组份: ZrO_2 、 P_2O_5 、TR、 Nb_2O_5 、 Ta_2O_5 、 Y_2O_3 和 UO_2 。这些组份的活动性很弱(惰性),表现为岩浆结晶时它们呈副矿物析出。这些元素的氧化物为3至5价,呈中性,容易形成络阴离子。因此,这些元素的相对溶解度应随岩浆碱度的增高而增高,从而促使岩浆熔融并与围岩发生互相作用时加入岩浆的成分中。与二氧化硅含量相近的正常碱度的岩石相比,碱金属含量偏高的岩浆岩也富含下列氧化物: Li_2O 、BaO、SrO、ZnO、MnO和BeO,具有独特的意义。

5. Rb—(K/Rb) 参数

О.Д. Ставров (1981)指出,地球化学参数Rb—(K/Rb)是不同建造花岗岩的分类参数,这与花岗岩类岩浆产生区的原始物质中Rb含量和K/Rb比值不同有关。根据这些参数,可划分出深熔建造的花岗岩、侵入分异杂岩建造的花岗岩和安山岩-英安岩-流纹岩建造这三个类型。他还认为,深熔建造的花岗岩和侵入分异建造的花岗岩之间参数的差异具有全球性质。

由于不同建造花岗岩类岩石具有不同的成矿专属性,因此,在利用这一参数对花岗岩类作出分类的基础上,可以对不同建造的花岗岩类岩体的含矿性作出初步评价。О.Д. Ставров (1981)证实,深熔花岗岩的铌、钽含量确实很高。在超变质带和深熔带的伟晶岩矿物中见有副矿物褐帘石、电气石和绿柱石。由黑云母携带和富集的元素如铯、钼、锌等在深熔花岗岩中的含量很少。尚未发现与深熔花岗岩有直接关系的这些元素的矿床。在残余深熔岩石带中可能发现上述元素略为偏高的富集体,但不一定会有实际意义。他认为,深熔花岗岩没有

分异作用也可作为其含矿性的一个否定因素。Л. В. Таусон 通过研究得出, 斜长花岗岩和超变质花岗岩的含矿潜力很差。再生花岗岩对金、铜、钼有含矿潜力, 对锡和钨的含矿潜力很差; 刚玉奥长浅色花岗岩对 Pb、Zn、W、Nb、Ta, 特别是对锡有含矿潜力。

О. Д. Ставров 等人对苏联乌拉尔和远东地区的各类花岗岩进行的大量研究表明, 这一地球化学参数及其应用方法, 已成功地用于对远东地区的花岗岩类岩浆作用产物进行分类, 并可用来确定锡矿点和锡矿床与花岗岩类岩浆作用的关系。而他们以前对乌拉尔晚古生代花岗岩的研究, 采用过 A. H. 查瓦里茨基图解, 标准成分图解以及 $\text{SiO}_2 - \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 图解都未能取得上述成效。例如, 在 A. H. 查瓦里茨基图解上, 在碱度相当的侵入分异杂岩花岗岩建造和深熔花岗岩建造的各种花岗岩类之间, 并未发现典型的区别标志。

关于地球化学参数用于岩体含矿性评价的研究, 已有许多学者先后提出了各种有实际意义的评价参数, 因篇幅关系不再一一列举。由于西方许多学者的研究证实, 锡在世界许多国家与锡矿化有关的侵入体中似乎都具有稳定的富集, 所以对锡矿床及其母岩花岗岩进行了广泛的研究, 获得了大量的资料。因此, 除上面列举的参数外, 现补充介绍 M. Boissavy—Vinay 等人 (1980) 收集和归纳的用作含锡花岗岩类含矿性标志的一些比值 (见表 2)。

表 2 作为含锡花岗岩类标志的几种比值

作 者	比 值	岩 石 或 矿 物	比值范围
蒂申道夫等 (1972)	Mg/Ti	正常花岗岩 具成矿专属性花岗岩	40 10—0.3
别乌斯和西 特宁(1968)	Mg/Li	无矿花岗岩 含矿花岗岩	270 ± 80 75 ± 30
别乌斯和西 特宁(1968)	Zr/Sn	无矿花岗岩 含矿花岗岩	76 ± 20 30 ± 10
蒂申道夫	K/Rb	正常花岗岩	>100 (最大300)
	K/Pb	具成矿专属性花岗岩	<100 (最小20)
别乌斯和格 里戈良(1975)		正常花岗岩 与矿化有关的花岗岩	170 130
泰勒等(1956)	K/Rb	分异的花岗岩和伟晶岩	<144
		眼球状片麻岩中的长石	20.6
		伟晶岩中的长石	6.06
泰勒和海尔 (1960)	Ba/Rb	有经济意义的矿化伟晶岩 中的长石	1.29