地球物理方法在沉积和变质铀矿深部结构勘查中的应用

[摘要] 阐述了应用地震勘探、重力测量、磁法和电法勘探等地球物理方法进行构造区划和成矿区划，并根据其某些标志划分铀矿省、铀矿田和铀矿床。

[关键词] 铀矿；深部结构；地球物理方法
[中图分类号] P631 [文献标识码] A [文章编号] 1672-0636(2004)03-0168-04

地球物理方法广泛应用于沉积和变质铀矿床勘查，在构造区划、构造和成矿体系，以及根据间接找矿标志确定铀矿省、铀矿田和铀矿床等方面，其应用是必不可少的。根据所要解决的任务选用深部地震测深、反射波法、折射波法或转换地震波法等地震勘探、重力测量、磁法和电法勘探。

铀矿省和铀矿区的划分依据是构造区划和成矿区划，以及存在有利于形成铀矿化的构造-地质环境。变质矿床的成矿区分布于钾质花岗岩、混合岩、区域断裂带和下元古代向斜发育区。沉积矿床最重要的成矿因素是各种类型的地壳沉降带、古地台地盾上的坳陷、地槽带的山间盆地、古地台活化边缘带和中间地块上的坳陷和盆地，构造-岩浆活化区等。通常，这就是基底具有混合块段结构及蚀源区和盆地基底具有原始含铀建造的地区。

研究地壳整个厚度上的深部结构变化对划分潜在含铀省和含铀区阶段具有重要意义。这时主要的研究方法是深部地震测深、转换地震波法和重力勘探。在研究深部结构时，区域地震研究成果成为大区域构造区划的主要原始资料。

深部地震测深能给出关于地壳中水平和倾斜地层分界特征的信息；重力测量能进行详细(根据不同地质结构的块段)区划和划分陡倾断裂及花岗岩化、变质作用、岩石密度的后生变化区。小比例尺磁法测量资料在解决这些问题时也发挥了较大作用。

变质岩地区深部地震测深资料的解释结果表明，地壳厚度变化为35～60 km，平均为43～45 m。地壳沉降带的特征是厚度相对较小——28～45 km。因为地盾内的矿区通常分布在地壳较厚(50～55 km)的块段内或其边界上，因此，划分块段就成为首要任务。

对比深部地震测深、重力和磁法测量资料后表明，某些地壳增厚地段与较强的带状重力异常和磁异常相吻合。这些地段对应于下元古界向斜褶皱带，其内充填着密度相对较大的铁矿建造。利用“地壳厚度”准则划分可能与铁-铀矿床有关的含铁矿建造的地槽体系，铁矿建造岩层在区域上因侵蚀而消失具有特殊意义，因此，没有高强度重力异常和磁力异常的区域具有特殊意义。

在变质岩区地壳厚度增大的其他地段对应于开阔的强度较弱的负重力场和磁力场。面积为几万平方公里的负异常被形状和强度不同的局部正异常和负异常复杂化。地壳厚度增大的地段在平面上呈椭圆形；其中发现最大的超变质岩体和钾质花岗岩地块。由于钾质花岗岩密度(2.6×10^3～2.64×10^3 kg/m³)与其周围的混合岩和片麻岩(分别为2.65×10^3～2.68×10^3和2.70×10^3～2.76×10^3 kg/m³)比较相对较低，可用沿深大断裂延伸的宽10～15 km的带状低重力场确定。在这些地区可能发现碱交代矿床。

构造区划和成矿区划的重要任务是查明深

[收稿日期] 2003-02-06

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大断裂。划分它们的准则是确定地震界面的破坏，其中包括根据深部地震测深资料划分的莫霍面，具有延伸较长的重力场和磁场梯度，断裂两侧存在不同性质的场和局部线状重力异常与磁异常。

为了提高建立地壳密度模型的可靠性，使用反映地壳所有地层弹性波速度分布的地震剖面作为标准剖面，以进一步确定重力场与由深部地震测深资料建立的地质模型之间的相关关系。所得关系用于在没有进行深部地震测深的地区根据重力资料建立地质模型。变质岩地区的构造区划和成矿区划可利用小比例尺(1∶200 000 ～ 1∶500 000)的重力图和磁力图进行。

沉积矿床所在地区通常具有两层结构。在研究基底深部结构特征、物质成分、构造、古地形的同时，具有重要意义的是研究上部构造层，研究内容包括：岩石组分及厚度、褶皱和断裂以及其他特征。研究基底和盖层的综合地球物理方法有：地震勘探、重力勘探、垂直电测深，以及填图钻探。划分盆地周围蚀源区和内部基底凸起的原始含铀建造是利用航空、汽车或步行等 γ 能谱测量。

在寻找矿区和矿结，特别是在覆盖和半覆盖地区的含铀变质岩地质填图时，地球物理方法得到了广泛应用。划分和研究控矿地质结构因素可以大大缩小找矿范围。在该阶段广泛应用中大比例尺的地质、重力和磁法测量。

物理场中已知变质矿床的统计分析表明，占其总数 80% 以上矿床的 ΔT 变化范围为 -100 ～ +100 nT。铁-铀建造矿床例外，该建造异常值特征为 $n\times10^3$ ～ $n\times10^4$ nT。在重力场中，可用“花岗岩型” Δg 异常外部区的强度为 2×10^{-6} ～ 4×10^{-6} N/s² 的水平梯度带圈定该类型矿体。

根据 1∶100 000 ～ 1∶200 000 的地球物理图能划分变质岩中的钾质花岗岩地块。它们对应于重力场和磁力场的最低值，通常局部异常形态为椭圆状或等轴状。深部断裂带中存在钾质花岗岩可作为查明含矿带而开展更详细工作的地质前提条件。进一步的地球物理工作（比例尺为 1∶25 000 ～ 1∶50 000）也用于解决地质填图任务，特别是用来划分和对比控制铀矿化(断裂带、变质蚀变岩石等)分布的地质结构因素。详细地球物理测量在整个矿田内以面积测量的方式进行，在该阶段重力勘探起主导作用。

矿区内的重力勘探具有某些特殊性，它是由被研究对象的地质结构及其特征引起的。这里的沉积-火山岩通常被复杂断裂系改变和破坏。基岩埋藏深度不大，倾角较大。这就导致了重力场特征复杂化并产生较大干扰。为了在大干扰背景中提取有益信号，必须使用专门的野外工作和资料处理方法，并综合重力和磁法勘探。在大比例尺地质填图时应用详细观察和高精度测量。矿带通常位于具有复杂和较复杂地球物理场的地段之间，看来，这与构造-地球化学障的形成特征有关。

磁场强度不仅取决于建造中铁磁性矿物的分布，而且还取决于其埋深。因此，必须研究磁扰物质的空间分布，根据磁异常的定量解释进行此项研究。同时还要确定各种地质目标参数，其中包括磁扰物质上部界面的埋藏深度、物理性质和倾角。获得的全部资料用来编制地质设计剖面，这些剖面是预测有利构造-地质环境和与其有关的铀矿床的基础。

在详细预测或普查阶段划分矿田和矿床。研究对象是构造-交代带或一系列这种相近的带。构造-交代带是沿断裂侵入到不同深度的整个岩浆岩体，以及成矿前和成矿阶段在交代过程中形成的蚀变岩石。后一种岩石的特征是具有一定的物理性质和相应的物理场。比如，花岗岩类岩石的特征是所谓的“花岗岩型”物理异常场。在重力场中与其对应的是近等轴状的负剩余异常和强度较小的正负值交替的磁异常。用线状延伸的正磁异常场(200 ～ 2 000 nT)和视电阻率高值(1 000 ～ $n\times1$ 000 Ω·m)带划分中基性岩墙。根据在具有不同物理场特征的块段之间存在的明显边界查明断裂。交代蚀变地段的特征是存在相对较低或微弱增高的磁异常场、高或低异常钾的质量分数（据 γ 能谱测量）和较低电阻率区。在寻找钠交代型铀矿床时证实了高精度(±1 ～ 2 nT)的详细（比例尺为 1∶5 000 ～ 1∶10 000）磁测具有一定效果。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

根据一连串正磁异常的外部轮廓确定构造-交代带的边界。其宽度为几百米，而长度达 1 km。钠交代岩体的规模达几百米。在构造-交代带内的钠长岩体及其周围岩体中磁化地段的零星分布决定磁场特征。总的来说，花岗岩类岩石上方的磁场相对平静，其平均强度约为 100 nT。在这种背景下划分出一系列形态和强度不同的局部正异常。局部异常面积很少超过 0.5 km²。这些异常的垂直梯度较高，当向上延拓 200 m 时减弱，证明基底磁源接近地表。对于变质蚀变区明显具有形成构造结和分支等方向不同的断裂。形成钠长岩体最强的交代蚀变主要发生在最大的构造错动部位。同时，还不能把异常视为钠交代岩体(矿体)。如果钠交代岩体可以被连续追踪，那么磁化岩体的分布范围便是零星的，它们常常超出交代岩体的范围，并且包含变质蚀变的范围(图 1)。根据磁法勘探资料，有近 90% 的把握可以大体划分构造-交代带。根据带的倾向和走向可以看出岩石磁化强度的不均匀性，它反映了磁化段累加厚度与带的总厚度之比，其变化为 0.2 ~ 0.4。构造-交代带内钠交代岩的平均磁化率为 200×10^{-7} SI。利用钻孔 γ 测井和岩心放射性取样分析研究带内放射性元素分布。

寻找沉积铀矿床时的研究对象是继承性深大断裂交汇处的堆积盆地或者局部凹陷。通常这些盆地属于非对称的地堑状构造，并且矿化既有产于盆地陡峭边缘，又有产于盆地平缓边缘。盆地被横向凸起和凹陷复杂化，它们与沉积盖层厚度变化和剖面非均匀性一起，使盆地具有复杂的块段结构，即盆地基底为镶嵌或块段结构。对整个阶段和构造层中的每一块段来说，其特征是长期向单一方向发育，即抬升或下降。

铀矿床本身位于发育方向不同的块段边界部位，主要位于相对稍微抬升的块段上方。物理场的形态和强度与矿田和矿床的地质结构相对应。于是，在大型山间坳陷的局部陆源盆地中赋存的矿田对应于线状的负重力异常场和强度为 200 nT 或更大的正磁场，在重力场与磁场之间发现有意义的相关关系。在盆地中部等值线变窄处对应于横向长

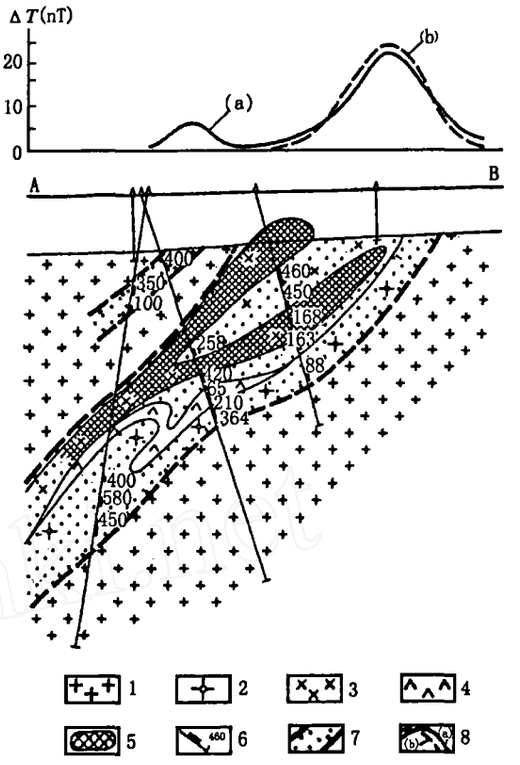


图 1 构造-交代带中磁段的分布

Fig. 1 Distribution of the magnetized level in structural-metasomatic zone

1——斑状黑云母花岗岩；2——强碎裂花岗岩；3——钠长岩；4——正长岩；5——矿带；6——磁化率较高地段及其平均值，$n\times10^{-7}$SI；7——构造-交代带轮廓；8——ΔT 场曲线：(a)——观察的，(b)——计算的

垣状构造，这里赋存有多成因的铀矿床和一系列矿点。很明显，含矿块段内 ΔT 场和 Δg 场之间已不存在相关关系。对赋存于沉积盖层中的该种及一系列其他铀矿床来说，正向构造对矿化的控制表现得相当明显，其构造的一般特征如下：

(1)盖层对基底成分及结构具有继承性。不同幅度（60 m ~ 2 km）的地垒状凸起形成于较长的地质时期，并且不仅常常出现在沉积盖层中，而且还经常出现在现代地形中。这些构造可用重力场明显确定。

(2)在剖面同沉积结构中，反映的地垒隆起形成时间长。

(3)岩相横向分布形成块段结构。通常在块段边界处，岩相、地球化学环境，个别层位的厚度，岩石的渗透性发生变化，个别层位亦

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可能尖灭等，相应可引起磁场及视电阻率值变化。

(4)在盖层岩石中存在不同时期的断裂，包括同沉积的，有时还有不具有独立工业意义的微细脉及细脉矿化。通过线状重力场和磁场的最小值及视电阻率的降低来定位这些断裂构造。

(5)正向构造的顶部地区常常存在多层矿化。矿层最富的地段集中于构造略微抬升部位。赋存于正向构造中的矿化在重力剖面上具有明显的标示。

在研究含铀矿省、铀矿田和铀矿床(其中包括多成因和多类型)时必须强调利用物探资料的可能性。除了地质和岩性、地球化学资料外，可根据某些地球物理标志划分铀矿田和铀矿床。这些标志如下：(1)存在被局部异常复杂化的重力最小值；(2)该局部异常使含矿块段具有复杂的镶嵌结构；(3)具有局部正异常和负异常的磁场面 ΔT 和 ΔZ 值下降 30 ~ 50 nT；(4)具有线状钍异常、交错岩性边界及含矿层中钾异常的富集；(5)含矿层最小电阻率值与矿层上部高电阻率值存在差异。

郝金龙编译自 Методы изучения урановых месторождений в осадочных и метаморфических толщах(Белова Л Н 等)

Application of geophysical methods in the survey of deep structure for sedimentary and metamorphic uranium deposits

Abstract: Geophysical methods, such as seismic exploration, gravity measurement, magnetic and electric exploration are used mainly to identify structural region and metallographic region. These methods and the indicating criterion to divide uranium province, uranium field and uranium deposit are introduced.

Key words: uranium deposits; deep structure; geophysical method

偏提取技术和金属活动态测量是两种迥异的地球化学方法

偏提取技术，也称部分提取技术或选择性提取技术，我国从 20 世纪 50 年代就开始研究和应用。该技术是对土壤等地球化学样品实施偏提取分析(partial extraction analysis)，即在实验室里用弱的溶剂溶出样品中某种元素的一部分，然后对这部分进行测定。一个地区偏提取方法的选用要通过试验来决定。偏提取方法所提取的物质形式并不是单一的，各种形式的物质不能靠偏提取得到完全的分离。例如，用柠檬酸盐冷提取可以提取一部分吸附于颗粒表面的金属，也可以提取少部分沉淀物；稀酸可以提取吸附的金属及某些沉淀物，也可以提取少部分在硅酸盐晶格中的金属等。通常用于偏提取的弱溶剂有水、醋酸盐溶液、柠檬酸盐溶液、稀盐酸或硝酸等。

金属活动态测量(mobile forms of metals in overburdens)的相关研发工作始于 20 世纪 90 年代的金矿勘查。该方法是对土壤等地化样品实施循序渐进的两步提取流程。在实验室，第 1 步是用各种弱溶剂使活动态金属与其依附之载体分离；第 2 步再用强溶剂($HNO_3 + HF + HClO_4$)破坏胶体，使活动态金属摆脱胶体的吸附而进入溶液。

需要指出的是，所有找矿方法都不具有广泛的适用性。不同矿种、不同地表景观、不同勘查阶段都有其一定的适用范围。例如，偏提取技术在实验室里提取的是地化样品中离子态性状的金属元素，故对那些易呈离子形式的金属元素(贱金属和多金属)的勘查工作较有效；而金属活动态测量在实验室里提取的是地化样品中呈离子态形式的金属，也包括超微细金属，因此，对不易形成离子形式的金矿的找矿效果较突出。

从找矿效果和找矿成本综合考虑，正如中国科学院院士谢学锦指出的那样，“测定元素的总量是最优先考虑的事，因为它们是最能够再现的数据，且与从矿产勘查到地质调查再到基础地质的研究目标相一致。”因此，只有在那些元素总量测量效果欠佳的地区，才会适当采用偏提取或金属活动态测量方法。

谈成龙　供稿

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net