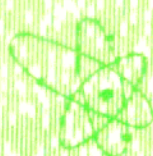
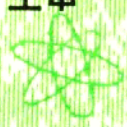


高等教育试用教材

铀 矿 化 探



王剑锋 主编
吴慧山 主审



原子能出版社

前 言

铀矿化探(即铀矿地球化学勘查)是根据1991年7月在北京怀柔召开的高等学校原子能类第三轮教材编审工作计划会议审定的《铀矿地球化学勘查》提纲编写而成的。本书系统地阐述铀矿化探的基本理论、基本知识、基本方法和技术以及国内外铀矿化探的新理论和新方法。为拓宽专业面,扩大学生的知识领域,本书除阐述各种地球化学方法在勘查铀矿产中的应用外,还适当地涉及到这些方法在部分其他矿产以及其他领域(如环境科学、农业地质等)的应用,以适应当前教学改革的需要。

本书是放射性元素及贵金属元素矿产地质勘查专业本科学生的必修课教材,授课50学时。

本书除前言和附录外共分十二章,第一、三、四、五、九、十、十一章由王剑峰编写,第二、七、八章由罗朝文编写,第六、十二章由刘峰编写。本书由王剑峰主编、吴慧山主审。书中插图由王剑峰清绘。

本书初稿完成后,1991年6月至10月,成都地质学院教授朱章森、国家黄金管理局高级工程师李普洲和核工业地质局高级工程师陈晓秦等分别对初稿进行了初审,1992年,吴慧山研究员对书稿进行了全面审校,提出了许多宝贵的修改意见。1993年2月,中国核工业总公司院校处在北京组织召开了审稿会,与会代表核工业北京地质研究院研究员吴慧山、南京大学教授章邦桐、华东地质学院副教授周鲁民和原子能出版社副编审金一一等对书稿进行了审查,提出了许多修改意见。根据主审、审稿人和审稿会提出的意见和建议,编者先后对书稿进行了多次修改。在书稿编辑加工过程中,金一一同志对书稿的文字做了大量修改工作,付出了辛勤劳动。在资料收集等方面,得到仇宝聚、游云飞、谈成龙、陈国樑等同

志的帮助。对以上同志的帮助,在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中难免存在缺点和不足之处,深切希望使用本教材的高等院校师生和各研究、生产单位的广大读者、专家学者批评指正。

编者

1993年4月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 铀矿化探中的若干基本概念	(2)
第二节 铀矿化探的任务及与其它学科的关系	(11)
第三节 铀矿化探发展简史及展望	(14)
第四节 铀矿化探方法分类	(21)
第二章 铀矿床的指示元素	(23)
第一节 岩浆铀矿床和伟晶铀矿床的指示元素	(25)
一、岩浆铀矿床的指示元素	(25)
二、伟晶岩型铀矿床的指示元素	(27)
第二节 水成铀矿床的指示元素	(28)
一、内生水成铀矿床的指示元素	(28)
二、外生水成铀矿床的指示元素	(34)
第三节 变质铀矿床的指示元素	(45)
一、受变质铀矿床的指示元素	(45)
二、变成铀矿床的指示元素	(46)
三、超变质铀矿床的指示元素	(47)
四、接触交代变质铀矿床的指示元素	(47)
第四节 复成因铀矿床的指示元素	(48)
第三章 岩石地球化学测量	(50)
第一节 元素在地壳和岩石中的分布及分配	(50)
一、元素在地壳中的正常分布	(50)
二、元素在岩石中的正常分配	(52)
三、元素含量的分布型式	(56)
第二节 铀矿床的原生晕	(59)
一、原生晕的概念及其成因	(59)

二、铀矿体周围原生晕的特征和影响因素	(63)
三、原生晕中元素的分布及其分带性	(73)
四、原生晕中铀和伴生元素的存在形式	(88)
第三节 原生晕与围岩蚀变的关系	(89)
第四节 岩石地球化学测量的应用	(92)
一、岩石地球化学测量的应用条件	(93)
二、岩石地球化学测量的应用	(93)
第四章 土壤地球化学测量	(102)
第一节 土壤地球化学测量的基本原理	(102)
一、成壤作用与元素的迁移演化	(102)
二、土壤中元素的正常分布和分配	(104)
三、土壤中铀的地球化学特征	(107)
第二节 铀矿床的次生分散晕	(111)
一、次生分散晕的概念及其分类	(111)
二、铀矿床次生分散晕的基本特征	(117)
三、次生分散晕与矿体及原生晕的关系	(122)
第三节 土壤地球化学测量的应用	(127)
一、土壤地球化学测量的适用条件和作用	(127)
二、土壤地球化学测量应用实例	(130)
第五章 水系沉积物地球化学测量	(137)
第一节 分散流的概念及其成因	(137)
第二节 分散流的特征及其与分散晕的关系	(139)
第三节 铀矿床的分散流	(141)
一、机械分散流	(142)
二、水成分散流	(147)
三、冲积层中铀的外生富集	(149)
第四节 水系沉积物地球化学测量的应用	(150)
一、水系沉积物测量适用的条件和作用	(150)
二、水系沉积物测量应用实例	(151)

第六章 水文地球化学测量	(157)
第一节 天然水的正常化学成分	(158)
第二节 铀矿床的水文地球化学分散晕	(160)
一、水文地球化学分散晕的形成条件	(162)
二、水文地球化学分散晕的特征	(165)
三、水文地球化学分散晕与铀矿体的关系	(172)
第三节 水文地球化学测量的应用	(184)
一、水文地球化学测量的适用条件	(184)
二、水文地球化学测量在找矿中的应用	(186)
三、水文地球化学测量找矿实例	(188)
第七章 气体地球化学测量	(197)
第一节 气体分散晕的形成及其特征	(198)
一、气体异常与气体分散晕的概念	(198)
二、气体异常的形成及影响因素	(199)
第二节 气体地球化学测量的适用条件及应用	(209)
一、气体地球化学测量适用的条件	(209)
二、气体地球化学测量的应用	(211)
第八章 生物地球化学测量	(224)
第一节 铀在生物中的含量及影响因素	(224)
第二节 生物地球化学晕的形成及其特征	(232)
第三节 生物地球化学测量的应用	(235)
一、地植物学(指示植物)测量	(235)
二、植物地球化学测量	(237)
第九章 铀矿化探的其他方法	(242)
第一节 同位素地球化学测量	(242)
一、铀矿的铅同位素地球化学测量	(243)
二、铀矿的放射性同位素地球化学测量	(247)
三、铀矿床的稳定同位素地球化学测量	(254)

四、铀矿床同位素分离-演化模型及其在铀矿勘查中的应用	··· (255)
第二节 包裹体地球化学测量	····· (258)
一、热晕及其应用	····· (258)
二、蒸发晕及其应用	····· (260)
三、气液包裹体的成分在化探中的应用	····· (261)
第三节 遥感地球化学测量	····· (263)
第四节 海洋地球化学测量	····· (265)
第五节 热释光地球化学测量	····· (265)
一、热释光法找矿的基本原理	····· (266)
二、热释光的类型与应用技术	····· (267)
三、热释光找铀矿实例	····· (268)
第六节 径迹蚀刻测量与其他找矿新方法	····· (270)
一、径迹蚀刻测量	····· (270)
二、活性炭测量与矿物热释氦找矿法	····· (271)
第七节 电化学法在寻找铀矿中的应用	····· (273)
第八节 地电化学法的原理及应用	····· (278)
一、地电化学法基本原理	····· (278)
二、地电化学法的应用	····· (279)
第九节 相量化探的原理及应用	····· (282)
一、相量化探的发展及其方法	····· (283)
二、相量化探在铀矿勘查中的应用	····· (285)
第十节 微生物(细菌)地球化学测量	····· (287)
一、细菌找矿法原理	····· (287)
二、细菌找矿的工作方法	····· (288)
第十章 铀矿化探的工作方法	····· (291)
第一节 铀矿化探工作的原则和程序	····· (291)
第二节 铀矿化探的野外工作方法	····· (293)
一、野外踏勘试验与工作设计	····· (293)
二、化探方法的选择与实施	····· (297)
三、铀矿化探采样点的布局与采样密度	····· (298)
四、化探样品的采样与要求	····· (302)

第三节 化探样品的加工处理	(310)
一、化探样品处理的基本要求	(310)
二、化探样品加工程序	(311)
第四节 化探样品的分析	(312)
一、化探样品的分析要求	(312)
二、铀矿化探常用的分析方法	(315)
三、分析方法的选择	(327)
四、化探样品分析质量的检验和评定	(329)
 第十一章 化探方法在综合找矿中的应用	(337)
第一节 地质测量中化探方法的应用	(338)
第二节 化探与物探方法的综合应用	(339)
第三节 各种找矿方法的合理组合及应用	(343)
第四节 化探方法在多矿种综合找矿工作中的应用	(352)
 第十二章 化探资料的整理与异常评价	(358)
第一节 化探资料整理的意义和内容	(358)
一、化探资料整理的意义	(358)
二、化探资料整理的内容	(358)
第二节 背景值和异常下限值的确定方法	(359)
一、图解法	(360)
二、计算法	(367)
第三节 化探数据处理常用的统计方法	(371)
一、多元逐步回归分析	(371)
二、多组逐步判别分析	(380)
三、多项式趋势面分析	(388)
四、聚类分析	(394)
第四节 化探成果图的编制	(400)
一、实际材料图	(400)
二、综合性图件	(403)
三、推测性图件	(403)

第五节 化探异常的解释和评价	(404)
一、异常解释的任务和要求	(404)
二、异常解释评价的依据	(405)
三、异常的筛选和评序	(407)
四、异常的检查 and 验证	(408)
附录一 化探分析主要元素在岩石、土壤、水中平均最低 含量与化探分析主要方法目前达到的灵敏度	(409)
附录二 区域化探对分析方法准确度和精密度的要求	(412)
附录三 化探常用含量单位	(413)
附录四 铀矿化探报告编写参考提纲	(413)
参考文献	(417)

第一章 绪 论

随着世界经济的发展,人类对矿产资源的需求量日益增多。由于原有矿产的储量不断消耗和减少,所以需要发现新的矿产,增加矿产品种,扩大矿产资源储备。由于出露地面的容易发现的矿产越来越少,因此找矿深度和找矿难度都越来越大,矿产勘查任务也愈加艰巨和复杂。在这种新形势下,大力开发和应用具有寻找隐伏矿作用的新方法具有十分重要的战略意义。国内外找矿实践说明,地球化学勘查方法(以下简称化探方法)是一种具有寻找隐伏矿性能的有效找矿方法,它在找矿工作中已经发挥出显著的作用,所以受到世界各国地质工作者的普遍重视,很多工科地质院校都开设了地球化学勘查(勘查地球化学)课。

我国铀矿地质事业已有 30 余年历史,但是,在铀矿勘查中化探方法应用并不普遍,它仅作为放射性测量的辅助方法而被应用。造成这种状态的主要原因是用放射性测量方法找矿效果显著,现在已开采的或正在勘探的铀矿床几乎都是应用这些方法确定的。我国目前已拥有从普查、勘探到储量计算的一系列方法和相应的放射性测量仪器。用这些仪器和方法可以迅速获得地表和近地表各测点上的 U, Th, K 的含量值。但是,在充分发挥物探方法的找矿作用时,还要根据具体的地质条件适当地开展化探工作。在找矿工作中,物探与化探方法的综合应用,不仅其测量结果可以互为补充、对比、验证,以提高测量资料的可信度和找矿效率,而且用化探方法还可以同时取得有用伴生元素的矿化信息,了解可以综合利用元素的成矿前景。用化探方法找矿的深度也比较大。随着找矿深度和难度的增大,用化探方法寻找隐伏铀矿床的效果将越来越显著。所以,开展铀矿地球化学勘查(简称铀矿化探)是铀矿普查与

勘探发展的必然趋势。因而,对于高等院校的放射性地质与勘查专业开设这门课程是非常必要的。

第一节 铀矿化探中的若干基本概念

从事铀矿化探工作,首先要理解地球化学背景、地球化学指标、地球化学异常等几个基本概念的含义。

一、地球化学背景

地球化学异常是相对于地球化学背景而言的。所谓地球化学背景,是指在无矿或未受成矿作用影响的地区内,地质体和其它天然物质中元素正常含量值的现象。正常含量也叫背景含量。元素呈正常含量的地区称为背景区或正常区。在背景区内,背景含量并不是一个固定的数值,而是有一定的变化范围;其算术平均值称为背景平均值,简称背景值,用公式表示为

$$C_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \quad (1-1)$$

式中 C_0 —— 背景值; C_i —— 各取样点样品中元素的含量值;
 n —— 参加计算的背景样品的数目。

此外,也可取背景区内出现几率最多的含量值(众值)作为背景值。背景含量的最高值称为背景上限值;背景含量的最低值称为背景下限值。超出背景上、下限值的含量称为异常含量,示于图 1-1。

实际工作中,往往还要求出用来表示元素分散程度的标准差 σ , 其计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_i - C_0)^2} \quad (1-2)$$

式中符号同上。一个地区的地球化学背景可以用背景值和标准差两个数值来表示。

此外,背景值也可以用背景样品中元素含量的对数(又称几何)平均值和相应的标准差来表示,此时计算公式如下:

$$\lg C_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg C_i \quad (1-3)$$

$$\lg \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg C_i - \lg C_0)^2} \quad (1-4)$$

式中符号同上。

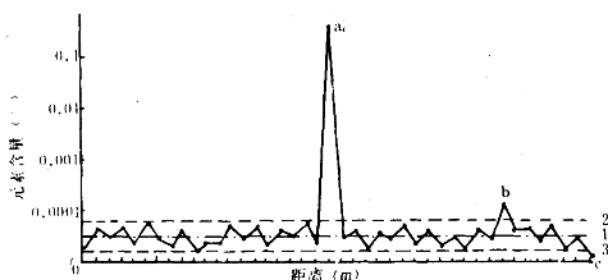


图 1-1 异常与背景的关系示意图

1——背景值;2——背景上限,3——背景下限。正异常:a——强异常;b——弱异常。负异常:c——弱异常

二、地球化学指标

地球化学指标一般是指天然物质中能够显示矿化的存在和作为找矿线索的地球化学特征。地球化学指标通常包括指示元素及相应的含量、元素比值、累加或累乘值、累加或累乘指数和同位素比值、气体含量、放射性活度,以及能反映成矿环境的物理化学参数和温度、压力、pH, Eh 等。

地球化学指标既是确定地球化学异常的比较标准,也是评价地球化学异常的重要依据。所以,在化探工作中,必须根据所探寻的矿种和矿床类型,并考虑工作区的地质-地球化学条件和自然地

理条件,正确合理的选择地球化学指标,以便采取有效的探矿方法。

地球化学勘查常用的地球化学指标主要有以下几种。

1. 指示元素

指示元素是指天然物质中某些能够反映矿体存在、并作为找矿线索的化学元素;它是化探工作中最常用的地球化学指标。指示元素按其与被找矿产的关系可分为下列四类。

(1)通用指示元素 是指能够指示多种矿床存在及其特征的化学元素。通用指示元素常以主要组分或非主要组分形式存在于多种矿床的矿石中,并在矿体周围形成清晰的异常,因而具有指示多种矿床存在并作为寻找多种矿种线索的作用。例如,在Hg,Sb,Au,Ag,U和多金属等矿床的矿石中都含有汞,其周围都有汞异常,可以利用汞来寻找这些金属矿床。因此汞是这些矿种的通用指示元素。

(2) 探途元素 是指在天然物质中,对寻找某种矿产能够起到独特的间接指示作用的伴生元素。现在已发现的探途元素有Hg,As,Mo,Ag等。它们所起的作用有:①多金属和铀矿床中Hg及Ag的原生晕比Pb,Zn,Cu,U等的异常大得多;②斑岩铜矿中的Mo在水中可形成比Cu异常大而且清晰的异常;③砷在许多金矿床的矿体周围具有大而且清晰的异常,同时砷的分析远比金为快速和低廉。所以,在普查这些矿种时可用Hg,Ag,Mo,As等为探途元素,其在找矿中合理有效的应用,可以迅速缩小详查地段。

(3)直接指示元素 是指以主要成矿元素作为指示元素,如寻找铀矿床时,以铀作为指示元素;寻找金矿床时,以金作指示元素等。

(4)间接指示元素 找矿时,若以伴生元素或其它元素作指示元素,则称其为间接指示元素。例如,在寻找铀矿床时,以Hg,Mo,Ag等作指示元素,即为间接指示元素;寻找金矿时以砷、铜等作为

指示元素、则 As, Cu 是找金矿的间接指示元素。探途元素是间接指示元素。

除上述指示元素外,按照指示元素距矿体的远近还可将指示元素划分为远程(远矿)、中程和近程(近矿)指示元素。指示元素距矿体的远近,主要取决于元素的活动性、在成矿溶液中的浓度和迁移形式以及地质构造、岩性和矿床类型等条件。一般说来,活动性大的元素,如 Hg, As, F, Cl 等为远程指示元素;U, Pb, Mo 等为近程指示元素。在铀矿体周围, Pb, Mo 的分散晕往往比 U 分散晕的分布范围更大,从矿体顶部向上延伸的距离更大,因此是寻找隐伏铀矿体的良好指示元素。

指示元素的含量一般都很低,多介于矿石边界品位与背景上限值之间。所以,化探工作采用的含量单位较小,过去常用 ppm 和 g/t(克每吨)表示,现在用 10^{-6} 或百分含量表示。各单位间的关系如下:

$$1\text{ppm} = 1\text{g/t} = 1\mu\text{g/g} = 1 \times 10^{-6} = 10^{-4}\%$$

选择指示元素时,要注意选那些对矿体具有指示作用,易形成清晰分散晕或具有一定规模异常,并且易于分析的元素,既要考虑元素对找矿的指示作用,也要考虑元素的分析灵敏度和经济效益。

2. 元素比值

元素比值是常用的地球化学指标之一,它是指同一样品中某些指示元素对之间的含量比,利用元素比值可以解决如下重要问题:①元素比值能反映元素对在不同环境中地球化学行为的不同,故可用于判断异常的性质和覆盖层下矿体的可能位置。例如,在我国 50 号和 34 号铀矿床外围,通过资料整理确定, Ra/U 比值在 1.5~3 为偏镭, >3 为强烈偏镭; Th/U 比值 <1 为偏钍, 1~3 为偏钍, >8 为强烈偏钍或者是钍矿化; Mo/U 比值 <0.08 说明钼矿化相当微弱,为找铀矿的不利因素, 0.08~8 是铀矿体的中、上部或前缘晕,或者是钼矿化, >8 为钼矿化标志。又如,在找铜矿时,利

用 Cu/Ni 比值可以辨认与基性岩有关的非矿异常,因为这种异常的 Cu/Ni 比值较低,而铜矿引起铜异常的 Cu/Ni 比值较高。②研究冷提取金属与金属全量的比值,可以分辨水成异常和碎屑异常,从而可以判断覆盖层下矿体的可能位置等。③利用元素比值可以预测隐伏矿体和判断矿体的剥蚀程度,并预测待揭露矿体的部位。这是因为元素比值随着与矿体的相对位置不同而发生规律性的变化;这种变化反映了元素对之间含量的相关性(互消长关系)。例如,在层状氧化带型后生淋积铀矿床中,矿体尾部 Se/U 比值高, Mo/U 比值低;而矿体前缘 Mo/U 比值高, Se/U 比值低。又如,在铜或多金属矿床的原生晕中, Ba , Ag , Hg 常发育在矿体前缘部分,而 Mo , Bi , Ni 等常发育在矿体尾部。因此,适当选择它们之间的比值可以判断地表岩石中的异常是属于已被侵蚀的矿体的尾部异常,还是属于深部隐伏矿体的前缘异常。④突出异常,提高异常的可信度。

3. 累加值和累乘值

在化探工作中,为提高异常的可靠性和强度,以及圈出更清楚的晕,可将样品中一组(一般 2~4 个)指示元素的含量以某种方式组合成为一个地球化学指标。被组合的指示元素含量应呈正相关(共消长)关系,而且这种指示元素的组合是按照元素的分带性加以选择的,一般是按矿体上部(前缘)元素或下部(尾部)元素分别组合的。

指示元素组合可以有各种表达方式,常用的有累加和累乘两种。在进行指示元素组合之前,要先将元素含量作适当变换处理,以便统一各指示元素含量所占比例。一般以衬度(又称衬值)来分别表示各指示元素的含量。所谓衬度,通常有两种含义:①异常峰值与异常下限之比;②异常峰值与背景平均值之比。这两种算法的意义是不同的,第一种算法得出的衬度 ≥ 1 即为异常;第二种算法得出的衬度,只表示背景平均值的倍数,这个数值多大才是异常,

还必须同异常下限值作对比后才能确定。实际工作中常采用第二种方法对指示元素含量进行变换,然后再将变换后的含量值(即衬度数值)累加或累乘,就得到累加值或累乘值。

累加或累乘值是矿化地段互有关联信息(元素含量)的综合反映。采用累加或累乘值,可使互有关联的信息得到加强,并降低偶然性误差,所以,利用累加或累乘值确定的异常,往往比利用单个指示元素所确定的异常更可靠,异常强度更大。利用这两个数值作出的累加晕或累乘晕与矿体和矿床的地质构造特征有更密切的联系,从而可大大提高对晕解释的可靠程度。

4. 累加指数和累乘指数

累加指数是每一个样品中前缘(矿上)元素衬度的累加值与尾部(矿下)元素衬度累加值的比值;同理,每一个样品中前缘(矿上)元素衬度的累乘值与尾部(矿下)元素衬度的累乘值之间的比值称为累乘指数。根据累加或累乘指数可以勾绘出矿体周围的异常变化。这两个指数值的变化可用于分辨分散矿化晕与工业矿化晕,通常累加或累乘指数在工业矿体的邻近和前缘部位较高,向尾部逐渐降低;而在分散矿化周围,累加或累乘指数从前缘到尾部,没有明显变化。利用这两个指数的变化特征,也可以判断矿体的剥蚀程度,预测隐伏矿体。

5. 同位素比值

同位素比值也是常用的地球化学指标之一,在化探工作中,测定同一样品中某一元素的轻、重同位素的含量和它们之间的比值,并根据所发现的同位素地球化学异常,可以寻找矿床和隐伏矿体。例如,在铀矿化探工作中采用同位素比值 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 和 $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ 值寻找隐伏铀矿体;利用 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的比值变化发现铀矿化。在某些多金属矿床围岩中, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比值能形成范围很大的晕(比Cu, Pb, Zn等元素的晕大),因

此,利用此值可找深部隐伏矿体。研究硫同位素,可以判别矿床的内、外生成因等。

虽然同位素比值也是一个重要的地球化学指标,但由于测试同位素的仪器设备贵重复杂,分析费用较高,所以此方法的迅速发展受到一定限制。

除上述指标外,在地球化学勘查工作中还常采用气体含量、放射性活度以及能反映成矿环境性质的温度、压力、pH, Eh 等参数作为指标来找矿。关于这些指标的意义和作用将在以后有关章节中论述。

三、地球化学异常

地球化学勘查是根据矿体在形成或风化破坏过程中,成矿元素在矿体周围及附近的天然物质中形成的各种地球化学异常进行找矿或评价环境质量的,因此,发现、解释和评价异常就成了地球化学勘查工作的基本任务。

各种地质体(如岩石、疏松覆盖物、水系沉积物)和其它天然物质(如水、空气和生物)中,某种地球化学指标(如元素和同位素的含量及比值、pH, Eh、温度等)与其地球化学背景比较,出现显著差异的现象称为地球化学异常。出现异常的地区称为异常区。异常和异常区是相对于背景和背景区而言的,具有相对性和地域性,总是通过比较而存在。

异常有正、负之分,高于背景上限值的含量称为正异常(通常所说的异常多指正异常)含量,因此背景上限值也是正异常下限值。异常下限要由一批背景样品的含量来确定。过去常常凭经验观察确定,现在一般多采用统计学方法来求得。通常用背景平均值加上两倍标准差作为正异常下限,用公式表示如下:

$$T = C_0 + 2\sigma$$

式中 T —— 异常下限; C_0 —— 背景值; σ —— 标准差。

背景含量的最低值称为背景下限值;低于背景下限值的含量