

利用直接数据数值法估算 San Juan 盆地 Morrison 组 Westwater Canyon 段 的铀资源量

R. B. McCammon, W. I. Finch,

J. O. Kork, N. J. Bridges

摘要 最新研制的直接数据数值法被用于估算新墨西哥州 San Juan 盆地 Morrison 组 Westwater Canyon 段的尚未发现的铀资源量。基本地质信息取自 1 800 个地球物理测井、40 个试验井中的碎块样品和 40 个测量剖面的数据。利用这些数据,评价了盆地内 2 068 个单元中每一个单元内铀富集的有利性。有利性是根据每一个单元中的地质特征与 5 种矿床模型的地质特征的对比相似关系而得出。每一个单元中尚未发现资源量的估算,是根据矿床类型、深度、边界品位和资源地区而分类的。

Westwater Canyon 段的尚未发现铀资源量的估算值是 2.6×10^6 t U_3O_8 , 估算误差 0.25×10^6 t U_3O_8 。估算值约两倍于美国能源部在 NURE 项目(铀资源评价)中所得到的数值。铀资源总量的估算是 3.5×10^6 t U_3O_8 , 包括了已发现的资源量和尚未发现的资源量。

引言

本文描述了用直接数据数值法估算新墨西哥州 San Juan 盆地 Morrison 组 Westwater Canyon 段的尚未发现铀资源量,也就是用数据直接估算尚未发现资源量。

近年来为区域资源调查所收集的数据类型和数据量的增加,有可能开发综合性更强的资源评价方法。本文研究的例子是成因-地质模型的发展,它考虑了矿石形成过程以及观测到的矿床地质特征。

本研究应用的铀资源量度是指矿石中 U_3O_8 的最低品位为 0.01% 的资源量。已发现资源量相应于 DOE (美国能源部)的储量。尚未

发现资源量相对应于 DOE 的潜在资源。本文所涉及区域内的铀资源量是已发现资源量和尚未发现资源量的总和。

研究地区划分为 5 292 个正方形单元,每一个单元的边长为 4 km,测网如图 1 所示,东西方向有 63 个单元,南北方向有 84 个单元。单元号是 1 到 5 092,按从左到右、从底部到顶部的顺序进行编号。

该区按基本单元来估算矿产资源量,具有良好的依据。首先,估算能够很容易地与小段结合,以满足特定的判据:例如,按基本单元估算的资源量能够很容易地按矿床类型、深度或资源地区重新组合。其次,网格的使用便于用计算机来处理资源数据。简化了数据的集

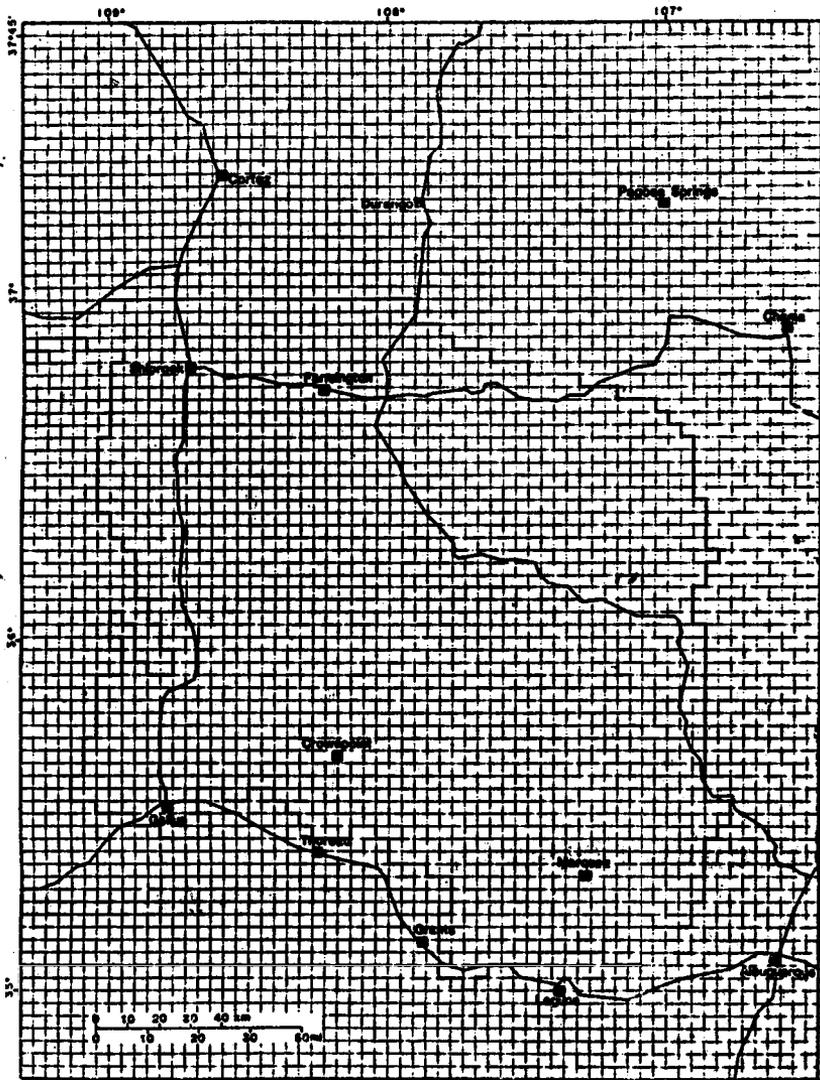


图 1 San Juan 盆地和 4×4 km 网格的单元分布图
(圈定部位代表已估算但尚未发现铀资源量的地区)

码、存储和检索，使任何人能够按个人意愿，从相同的数据中，很容易地检验、对比或产生新的计算结果。最后，资源数据的空间分布，例如每个基本单元中的地质有利性、勘探程度、以及提供的资源量能够很快地转换成数字映像图件。

数据源和数据库

地层数据 San Juan 盆地 Westwater Canyon 段的地层数据是从 1800 个地球物理测井和 40 个露头测量剖面得到的，这些数据由

美国地质调查局作了说明。

图 2 是含有一个或者多个数据的单元。每一个单元必须分配一个地层数据元。根据位于半径为 20 km (5 个单元) 范围内的 (从每一个单元中心计算) 钻孔或者露头，在每一个单元中心对每一个数据元作了加权滑动平均计算。规定的加权系数与单元中心到钻孔或露头之间的距离倒数的 5 次幂成正比。对于含有较多钻孔的地区，为了保持数据中的局部变化，使用了 5 次幂。在 Grants 铀区，表明了该均值的差异很大，这对控矿因素的认识具有重要意义。

数据库

利用所建立的数据库,处理图1网格中每一个单元所产生的数据元。数据元以矩阵形式排列,矩阵中的行代表单元号,列代表观测的变量值。可以利用数据库中含有的全部可用数据,以及用作数据编码的各种代码的说明。

矿床类型

在 Westwater Canyon 段铀矿床分为3种类型:① 延展型或者原生型;② 残积型(延展型的剩余部分);③ 卷状型或者再造型。

本研究中应用的成因-地质模型,是一种板状腐殖酸盐型铀矿床,它们属原始的延展型矿床。对于尚未发现的延展型矿床的潜在资源,它仅局限于地面还原的环境;残积型矿床局限于地面氧化带环境;卷状型矿床局限于氧化舌状体。

以边界品位为 0.1% U_3O_8 , 延展型矿床的平均大小是 7 250 t U_3O_8 , 矿石平均品位为 0.22% U_3O_8 。残积型矿床较小,平均约 1 350 t U_3O_8 , 矿石平均品位是 0.2% U_3O_8 。卷状型矿床最大,平均约 9 400 t U_3O_8 , 矿石平均品位为 0.16% U_3O_8 。

模型的使用和设计

利用地质数据估算尚未发现的铀资源量的最有效方法是设计一个模型,该模型是根据上述3种矿床类型所共有的地质因素的特征而设计的。这些因素的逻辑表示式是由 Finch 等人研制的,被看作为成因-地质模型。Granger 等人研制了 Westwater Canyon 段板状腐殖酸盐型铀矿床的成因-地质模型。该模型包括了 11 个次级假设,都与板状腐殖酸盐型矿床的形成阶段有关。把 11 个次级假设减至 8 个(图3)。每一个次级假设或阶段,都由部分数据提供了证据。全部成矿有利性被看成是由数据提供证据的次级假设的数字函数,相对权被分配到每一个次级假设中。把选择的若干不同变量和分配的权引入到各个次级假设中,用来表示地质

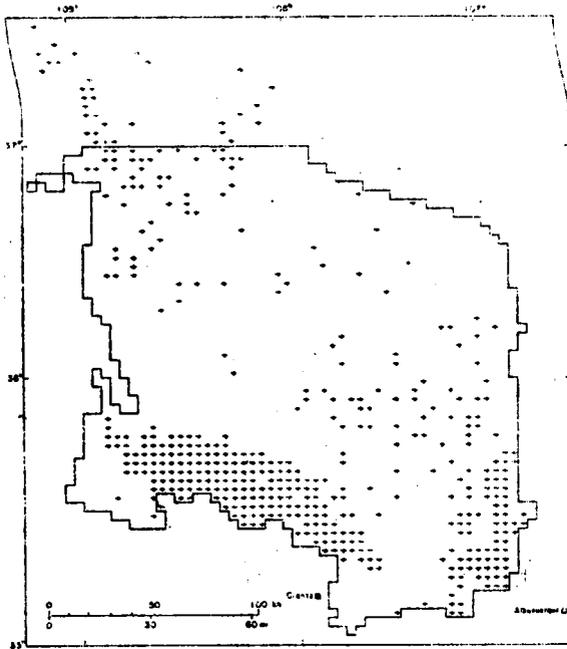


图2 含有地层数据的单元位置

根据矿床类型(T—延展型;M—残积型;L—卷状型)分类的单元和已发现资源量。短破折号是勘探单元。(圈定部位代表已估算但尚未发现铀资源量的地区)

岩石数据 岩石数据是通过碎块样品的显微镜鉴定得到的,样品取自 40 个石油试验井、美国地质调查局 9 个试验钻孔中的岩心、公司的 50 个勘探井和 14 个测量剖面。

从每一个井和测量剖面上记录的数据,包括:位置、标高、到 Westwater Canyon 段顶部的深度、颜色、结构、Westwater Canyon 段岩石组成成分和钛铁矿-磁铁矿蜕变间距的厚度。

勘探数据 San Juan 盆地铀矿勘探区的信息来自矿体和钻孔位置图,这些图是从已公布和尚未公布资料汇编而成。根据该地区矿体赋存情况和钻孔的分布和数量,把勘探程度值分配到每一个单元中。在 Grants 铀区勘探程度是最高的,该区被分割成 64 个相等的子区;不论是含有一个矿体或者是含有一个或多个钻孔的每一个单元小块,按 0/64 到 64/64 作为单元号。

已发现资源量 列出了表征铀矿特性的品位和吨位数据。

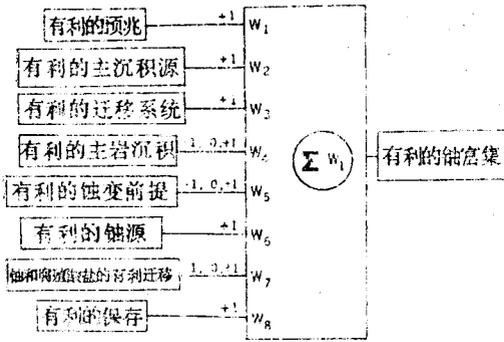


图3 新墨西哥州 Grants 铀区板状腐殖酸盐型铀矿床的成因-地质模型简图。
对于有意义的地区，根据可利用的数据，每一个地质因素(W_1, \dots)赋予+1, -1 或 0

因素，这些因素则定义了3种矿床类型。每一个表示式代表了矿床模型的形式。这种方法就是利用单元内的数据信息与模型的特征进行对比，从而确定由模型所代表的矿床类型的有利性。

矿床模型 矿床模型是作为三元转换变量的线性组合权而定义的。三元转换变量是一个变量，这个变量把+1值赋予所有的变量，则它就支持了一种特定的次级假设；把-1值赋予所有的变量，则它就否定了这种次级假设；把0值赋予变量，该变量就没有提出任何评价。3种矿床类型中的每一种(延展、残积和卷状)需要不同的三元转换变量。对于延展型矿床，每个单元中赋予+1，在这些单元中氧化物变量等于地面还原物，否则赋予-1。同样，对于残积和卷状矿床，每个单元中赋予+1，在这些单元中变量“氧化物”等于地面氧化物和氧化舌状体，同样也可赋予-1。

n 变量是关于特定矿床模型的三元转换变量，对于所考虑的模型，其给定单元的有利性由下式给出：

$$f = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (1)$$

式中： $a_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是权系数； $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是 n 个三元转换变量。

权系数由控制区内所有单元中的三元转换变量值得到。所选择的变量反映了地质因素，它们定义了由模型代表的那种类型的矿床。

(1) 式中的权系数 a_i 是用解矩阵方程确定的

$$(X'X)a = \lambda a \quad (2)$$

式中： X' 是 X 的转置； λ 是乘积矩阵($X'X$)的最大本征值； X 是 m 个控制单元(地区模型)的 $m \times n$ 三元转换变量矩阵，这些单元含有以模型表示的矿床类型； a_i 是方程式(1)中的 f 值，介于-1和+1之间。在该地区的模型中， f 值应该是+1或接近+1。在任何其它单元中， f 值等于+1或接近+1， f 值被认为对于由模型代表的矿床产出类型是有利的。

地区-相关模型 在延展型矿床的模型结构中可以看到，在横穿 Grants 铀区的各个地区，其三元转换式是不同的，它必须从非矿化区(单元)中识别出矿化区。特别是涉及到有利的主岩沉积物的变量，例如净砂岩的厚度，砂岩与泥岩的比率，以及某些砂岩与泥岩的交替数量，沿盆地南部，从西到东显示出了系统性变化。为了适应这些变化，对于延展型矿床，构成了3种地区-相关模型。然而，对于残积型和卷状型矿床，每种类型仅仅需要单个地区-相关模型。

由每一个模型所定义的变量选择方法，以及对应的三元转换式，可以认为是一种重复过程。就绝大部分而言，该方法通过不同加权变量的组合试验转换的比较而得出。其最佳考虑是：模型需要最少的变量。该方法首先是假设在控制(模型)地区中，变量的组合集明显地从模型地区外的变量值的组合集得到的。利用上述技术，选择了变量的子集。

一旦变量经过选择，便可根据每一个模型所定义的乘积矩阵($X'X$)，来确定方程式(1)中所定义的权系数。

如上所述，权系数是这样被确定的，即方程式(1)中所定义的有利性 f 值介于-1和+1之间。变量的权系数在对有利性的确定中，是一种相对重要的测量。

模型的验证 在确认一个地区-相关矿床模型之前，必须在大于模型区的地区试验它的效能。在这样的试验中，不论是存在的或者是

表 1 Grants轴区Morrison组 Westwater Canyon段, 利用地区-相对矿床模型, 在验证地区计算的有利性值(单元频数表示在限定范围内的单元数; 非有利性类以 0 表示; 有利性类以 1—5 表示, 分别对应于每一个模型; T—延展型; M—残积型; L—卷状型)

有利性等级		地区-相关矿床模型														
		T1			T2			T3			M			L		
下限	上限	模型 (单元频数)	非模型 (单元频数)	有利性 类别												
-1.00	-0.90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0
-0.90	-0.80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.80	-0.70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.70	-0.60	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.60	-0.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0
-0.50	-0.40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	24	0	2	5	0
-0.40	-0.30	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	52	0
-0.30	-0.20	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0
-0.20	-0.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0
-0.10	0.00	0	11	0	1	4	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0
0.00	0.10	0	15	0	0	7	0	1	30	0	2	27	0	0	0	0
0.10	0.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	0	0	0	0
0.20	0.30	0	0	0	1	16	0	0	0	0	0	0	0	4	6	0
0.30	0.40	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4	0
0.40	0.50	0	0	0	1	3	0	0	6	0	1	52	0	5	46	0
0.50	0.60	0	0	0	0	2	0	1	19	0	2	9	0	0	0	0
0.60	0.70	0	29	0	0	0	0	0	0	0	4	14	0	0	0	0
0.70	0.80	1	10	0	6	31	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.80	0.90	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.90	1.00	6	25	1	8	33	2	11	18	3	10	33	4	12	11	5
总单元数		7	167		17	100		13	73		23	223		29	183	

未知的矿床, 由模型代表的矿床类型都假设为已知的。验证的过程也提供了在尚未发现资源量的估算中误差测量的方法。

对每一个验证地区内的单元, 使用了方程式(1), 对每一个模型都测定了它的有利性(表1)。这些模型单元是含有以每一种模型为代表的那种矿床类型的单元。非模型单元是在最近已经勘探过的每一个验证地区的单元, 不含有以模型为代表的那种矿床类型。为了方便起见, 有利性等级一般从-1.0到+1.0, 间距为0.1。

利用模型估算资源量

将已知地区的一个由矿床勘探得出的有效识别标志, 用于估算基本上是未知地区的矿床数量以及 U_3O_8 的总量, 通常需要一个很长

的过程。显然, 这样的过程不能一蹴而就, 必须采用一系列步骤。

已发现资源量与成矿有利性 第一步是给有利性下定义, 其次也是相当重要的一步是把有利性与资源量联系起来。因为尚未发现资源量常常是未知的, 有必要去探索有利性与已发现资源量之间的关系。

图4的散点图表示 Grants 轴区赋存于每个单元中的有利性与已发现资源量的关系。该图清楚地表明, 在本次研究中对模型的定义, 其有利性程度和已发现资源量之间没有关系, 因此, 通过这种散点图, 去模拟一个函数是没有意义的。判作为有利的单元, 看来好象是含有高的资源量, 然而, 确含有低的资源量。

但是, 应当考虑到, 上面所提到的某些有利性的临界值, 则有一个已发现资源量的期望

资源量估算

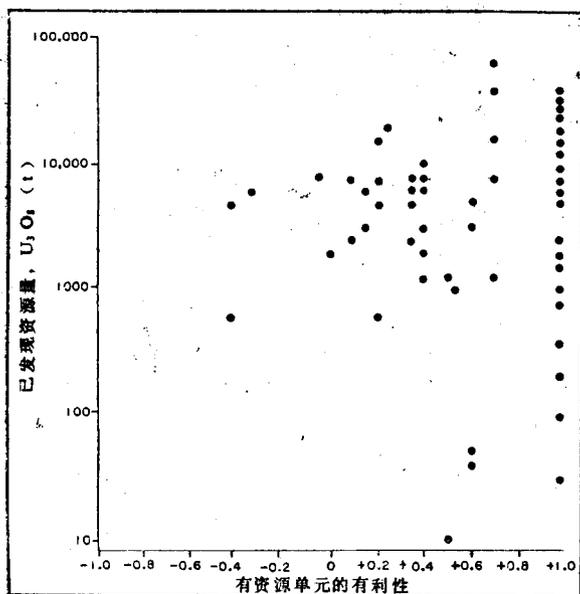


图 4 Grants 铀区, 在有资源单元中的已发现资源量与成矿有利性的散点图

值。

一级预测 如果精确地知道, 在需要检索的单元中成矿有利性值与期望资源量之间的关系, 那末对一个矿床模型地区的总的期望资源量可以通过计算每一个单元的期望资源量得到, 然后在该矿床模型区内总和所有单元中的量。然而, 由于不知道所计算的成矿有利性和期望资源量之间的关系, 因此, 必须进行综合考虑。一种可行的综合方法是: 把有利性值分级, 分成若干个有利性等级, 而且把每一个等级与期望资源量相联系。图 4 中点的散射宽度所表示的一级预测区是最佳的地区, 也是在目前的研究中有希望的地区。

对于一级预测方法, 必须要估算在一个单元中所计算的成矿有利性和期望资源量之间的未知关系。完全有理由把期望资源量为 0 的单元与划分为非有利单元相联系, 但是划分为有利单元的期望资源量必须从已知区得到, 使用某个地区的值作为标定有利性——资源量的函数。一级预测方法能够应用到标定地区的所有单元中, 它能够用于计算有利单元的期望资源量。用该值来预测未知地区的期望资源量*。

根据有利性, 作为估算一个地区的尚未发现资源量的一级预测方法, 在本次研究中, 用来估算了图 1 中所圈定的 DOE 的每一个资源区的尚未发现资源量。图 5 表示 Westwater Canyon 段 5 种地区-相关矿床模型的有利性。把有利性与每一个单元的平均资源量估算值结合起来就可对 Westwater Canyon 段的铀资源量进行估算。

除综合估算外, 各种资源量的次一级估算也是有意义的。可以确定为值得进一步勘探的地区, 是与估算为高值的尚未发现资源量有关的地区。根据埋藏深度和矿床类型的估算类目, 可以更好的了解矿体的形成过程。最后, 由地理位置分类的估算是有价值的, 可以用由不同方法得到的估算进行比较。因此, 根据有利性和每个单元中的平均资源而计算的次一级资源量, 是根据矿床类型、深度、边界品位和资源地区而进行分类的。特别有意义的是表 2 所列出的铀资源量估算, 正象所期望的那样, 与最大的尚未发现资源量有关的资源区是 Ambrosia Mount Taylor 地区。这个地区含有最大

表 2 Westwater Canyon 段, DOE 资源区, 铀资源量的估算资源, 边界品位为 0.01% U_3O_8 (t U_3O_8)

DOE 资源区	已发现资源量	尚未发现资源量	总计
Gallup	167 962	218 808	386 770
Blackjack	188 053	62 172	250 225
Ambrosia-Mt. Taylor	416 762	922 573	1 339 335
Laguna	87 623	264 211	351 834
West Chaco Canyon	18 978	682 760	701 738
East Chaco Canyon	0	35 869	35 869
Nacimiento	0	19 869	19 869
Shiprock	0	129 550	129 550
Central Basin	0	251 085	251 085
Chama	0	0	0
总计	879 378	2 586 897	3 466 275

* 具体方法可参阅原文的附录和计算机程序——译者。

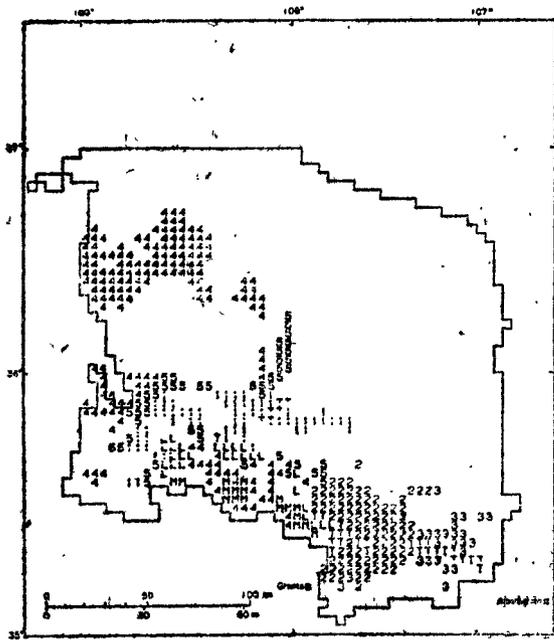


图 5 San Juan 盆地,DOE 资源区内各单元中,关于地区-相关矿床模型的有利性分布。有利性单元以数字表示,对应于地区-相关矿床模型:1,T1; 2,T2; 3,T3; 4,M; 5,L

量的已发现的资源量,并且表明是最有希望的尚未发现矿床的地区。这些矿床,假如确实存在的话;比那些迄今已找到的矿床,将赋存在更大的深度。

估计误差 由直接数据数值法得到的估算误差来自对矿床模型结构的处理。特别是在变量的选择、三元转换式的进行、权系数的计算、有利性的定义,以及根据有利性对资源量的分配上带进了误差。在很大程度上,这些误差的产生是由于缺乏对地质变量与铀富集分布的数量和大小的关系的认识。

另一个较大的误差或者不确定性是原始数据。在 San Juan 盆地的大面积内,数据是缺少。事实是,在本研究中将邻区得到的变量值,外延到该区,作为该区的变量估值。因此,必须小心地引用这些数据,特别是用来估算高的尚未发现资源量。

与用其它方法得到的估算进行比较 本文介绍的估算尚未发现资源量的数值方法,在很大程度上是美国地质调查局研制的另一种成

果,该法是用在能源部的国家铀资源评价项目中。DOE 方法,主要根据地质学家收集的资料,使用地质类推法原理。两种方法在方式上是不同的,而原始数据是同样的。在 NURE 的方法中,地质学家主观地估计地质有利性、矿化地区所占的百分比以及尚未发现资源的直接资源量。在本文的研究中,地质有利性、矿化地区所占的百分比,以及尚未发现资源的资源量,是根据数据估算的,这些数据明显地涉及到矿床模型。这就排除了估算中的大部分主观性。而且,由于估算是按单元进行的,根据地理、地质、物理变量,或者品位的从属判别,能够很快地进行总体估算。这样的估算在紧接着的资源研究中还具有别的用途,因为它在推论上提出了有效的途径,从数据直接引向了估算。

本文所介绍的在 Westwater Canyon 段得到的尚未发现资源量的估算能够直接与 NURE 项目中得到的潜在资源相比较。表 3 给出了每一个资源地区的估算值的比较。总的说来,本次得到的估算值两倍于 NURE 项目中得到的估算值。

表 3 Westwater Canyon 段铀潜在资源估算值与尚未发现资源量的对比,边界品位为 0.01%U₃O₈

DOE 资源地区	潜在资源 (NURE) ¹ (× 103t U ₃ O ₈)	尚未发现资源量 (USGS) (× 103t U ₃ O ₈)
Gallup	86	219
Blackjack	95	62
Ambrosia-Mt. Taylor	343	922
Laguna	35	264
West Chaco Canyon	272	683
East Chaco Canyon	145	36
Nacimiento	29	20
Shiprock	126	130
Central Basin	150	251
Chama	—	—
Total	1 281	2 587

¹U. S. Department of Energy (1980)

本次估算的总资源量为 3.5×10^6 t U₃O₈, 包括已发现的资源量和尚未发现的资源量。在

NURE 项目中,资源量估算是由总体估算得到的,这种估算是按地理位置划分的地区,上述两种方法在地区的大小上有某些差异。然而,可以有趣地看到,从 NURE 项目中计算得到的资源量的总估算值,基本上证实了本次研究中的计算结果。

结 论

本文介绍了估算一个地区内尚未发现矿产资源量的方法,该法是根据地质数据的数量、勘探程度和已发现资源量,以及所使用的成因-地质模型的结构而进行的。这些数据和概念的综合,使之能够用来估算 San Juan 盆地

Morrison 组 Westwater Canyon 段的尚未发现铀资源量。成因-地质模型不仅提出了成矿有利性,而且用来实际测量未勘探地区的资源量。

在估算一个地区的资源量时,使用地理单元进行估算也已经得到了证实。计算结果不仅可以用图体加以描绘,而且允许用不同的模型,按照各种可利用的形式,来重新评价数据。因此,这种方法产生了一种可能性,即把估算的结果与用其它方法估算的结果进行比较。

薛禹选摘译自《国际原子能机构》
资料(1987)

王从周校