

# 基于 ArcView3.2 的证据权重法 在层间氧化带型砂岩铀矿定量评价中的应用

韩绍阳, 侯惠群, 黄树桃

(核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘要: 介绍了证据权重法及其理论基础, 根据层间氧化带型砂岩铀矿成矿理论, 应用由 ArcView3.2 二次开发形成的砂岩铀矿勘查信息系统软件在克鲁伦盆地内提取控矿信息, 最后通过证据权重分析综合证据因子, 完成盆地内层间氧化带型砂岩铀矿的远景预测。

关键词: 证据权重法; 成矿信息提取; 层间氧化带砂岩铀矿; 远景预测

中图分类号: P631.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2002)06-0443-07

矿产资源定量评价实质上是运用计算机手段, 采用适当的数学模型, 研究区域矿床产出及其远景规模与各种成矿信息的关系, 查明各个控矿因素、矿化信息在确定矿床产出规模中所占的重要性。证据权重法是加拿大数学地质学家 F. A. Agterberg 提出的基于二值图像的一种地学统计方法, 是一种在假设条件独立的前提下综合证据因子的定量预测方法。该模型并不要求对区域控矿因素的重要性有先验的知识, 它用统计学方法研究各地质因素与矿产分布关系。其出发点是统计学, 即统计出研究区里既有某地质标志, 又有矿产地的面积, 某标志与矿产同时出现的概率越大, 其找矿意义无疑越重要, 其权重值也就越大, 将统计单元各独立找矿信息因子进行加权综合, 便可得到不同级别的远景区。

本次定量评价主要是针对克鲁伦盆地内发育的层间氧化带型砂岩铀矿, 做出定量预测。实施路线是以层间氧化带型砂岩铀矿成矿理论为指导, 通过系统软件提取控矿信息, 利用证据权重空间分析功能综合已有各种证据专题, 快速生成矿化远景概率图。控矿信息取自水文测量数据(水中  $R_n$ 、 $E_h$ 、 $O_2$ 、 $U$  等测量值)、蚀源区铀淋失量、距离盆缘一定距离的缓坡区等矿化标志信息和有利的成矿地质环境。

## 1 证据权重法及其理论基础

证据权重法的理论采用一种统计分析模式, 通过对一些与矿产形成相关的地学信息的叠加复合分析来进行矿产远景区的预测, 其中每一种地学信息

都被视为成矿远景区预测的一个证据因子, 而每个证据因子对成矿预测的贡献是由这个因子的权重值决定的。最后, 通过确定研究区内每一网格单元含矿概率大小来划分成矿远景区。

### 1.1 前验概率计算

前验概率计算, 即根据已知矿点分布, 计算各证据因子单位区域内的成矿概率。假设每个矿点所占的单元格面积为  $u$ , 研究区的面积(以单元格为单位)为  $A(T)/u = N(T)$ , 其中  $T$  表示研究区,  $A(T)$  表示面积,  $N(T)$  表示单元格数目。研究区内的矿点数为  $N(D)$ , 则随机选取一个单元格中矿点的概率为  $P(D) = N(D)/N(T)$ , 也被称为前验概率。几率为:

$$O(D) = P(D)(1 - P(D)).$$

### 1.2 权重计算

对任一个证据因子二值专题权重定义为:

$$W^+ = \ln \left\{ \frac{P(B/D)}{P(\bar{B}/D)} \right\},$$

$$W^- = \ln \left\{ \frac{P(\bar{B}/D)}{P(B/D)} \right\}.$$

式中  $W^+$ ,  $W^-$  分别为证据因子存在区和不存在区的权重值, 对于原始数据缺失区, 权重值为 0。

### 1.3 后验概率计算

证据权重法要求各证据因子之间相对于矿点分布满足条件独立。对  $n$  个证据因子, 若它们都关于矿点条件独立, 几率对数为:

$$\ln \{ O(D) \prod_{j=1}^n B_j^k \} = \sum_{j=1}^n W_j^k + \ln O(D);$$

$$W_j^k = \begin{cases} W^+ & \text{当证据因子存在时,} \\ W^- & \text{当证据因子不存在时,} \\ 0 & \text{当数据缺失时.} \end{cases}$$

后验概率为:

$$P(D/B) = O/(1 + O)$$

最后,根据研究区内每个网格单元后验概率的大小,生成综合成矿远景图。



图1 新巴尔虎右旗地质图

底主要由富铀的海西期花岗岩和侏罗纪火山岩组成,岩石铀含量为 $(4 \sim 8) \times 10^{-6}$ ,钍铀比为8~12。这些富铀的基底可为盆地富铀建造及砂岩铀矿成矿提供丰富的铀源。早白垩世断陷早期主要以洪积砂砾岩和湖、沼泽相含煤建造为主,晚期以河流冲积相砂岩、砂砾岩和湖、沼相粉砂泥岩建造为主,古气候主要为温湿气候。 $K_2 - N$ 期,本区以抬升和掀斜剥蚀作用为主,在盆地北边形成宽5~8 km的向南掀斜的缓坡区,地层倾角一般在 $3^\circ \sim 5^\circ$ 。该时期的古气候主要为干旱、半干旱炎热气候。该期构造演化极有利含氧富铀地下水的形成和砂岩铀矿成矿,是控制本区砂岩铀矿成矿的主要因素。

### 2.2 盆地盖层特征

本区断陷盆地的沉积盖层主要由下白垩统大磨拐河组( $K_1d$ )和上第三系呼查山组( $N_{1-2}h$ )组成。下白垩统大磨拐河组直接不整合于基底之上;上第三系呼查山组不整合于下白垩统大磨拐河组之上。区内第四系在断陷盆地中主要沿克鲁伦河分布,其沉积物主要为残坡积、冲积、洪积、风积等形成的砂砾石层、粘土、亚砂土和淤泥。区内第四系地层厚度为1~5 m<sup>数据</sup>。

## 2 克鲁伦盆地地质概况

克鲁伦盆地位于新巴尔虎右旗地区,面积约为1 455 km<sup>2</sup>(图1)。

### 2.1 盆地基底及古气候特征

克鲁伦盆地经历了富铀基底形成、早白垩世断陷、 $K_2 - N$ 抬升掀斜剥蚀3个构造演化期。富铀基

### 2.3 水文地质特征

克鲁伦断陷盆地是一个渗入型盆地。盆地内主要水系是克鲁伦河水系,其河流由西南向东北流入呼伦湖。地下水的主要补给来源是大气降水,地表水的补给区主要是盆地北西侧塔尔巴格特隆起区。克鲁伦河是地下水的主要排泄区。

## 3 克鲁伦盆地控矿信息的提取

钻探揭示,工作区找矿目的层发育古潜水氧化作用和古潜水转层间氧化作用,上第三系呼查山组普遍发育古潜水氧化作用,古潜水氧化作用的深度一般在40~70 m之间,现代潜水面约10 m,古潜水氧化转为层间氧化主要发生在70 m处,古潜水进入层间成为承压水而发生成矿作用。层间氧化带型砂岩铀矿主要富集在大磨拐河组地层之中。

### 3.1 从地球化学数据中提取控矿信息

地球化学和水文地球化学测量的主要目的是识别氧化还原过渡带、相关示踪元素分带性和还原性等,从而确定有利的铀元素富集成矿区。

根据层间氧化带型砂岩铀矿成矿原理,铀元素一般富集在氧化还原过渡带。在这个区间地下水中

的  $w(U)$ 、 $w(Rn)$ 、 $w(O_2)$ 、 $E_h$  的值都由于氧化还原作用的发生将产生急剧变化,根据地下水流向,在地层中如有层间氧化型砂岩铀矿富集,那么沿着地下水流向,水中各种参数值在氧化还原过渡带将发生突变,从而使各项参数在此带两侧有明显的变化。

根据这个原理,依据地下水采样点中的各种参数测量值,通过系统软件的数据可视化功能,利用制图工具,在补给区和排泄区之间依地下水流向大致圈出上述各种参数的由高到低的变化带,作为砂岩铀矿富集的一个有利区(氧化还原过渡带存在的有利位

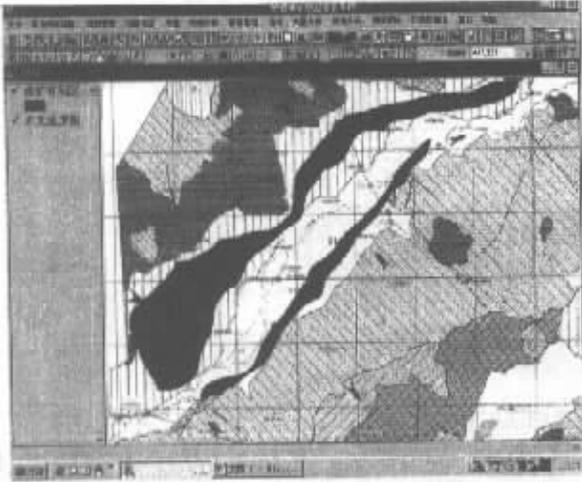


图 2 根据地下水中 Rn 浓度值圈出的成矿有利区

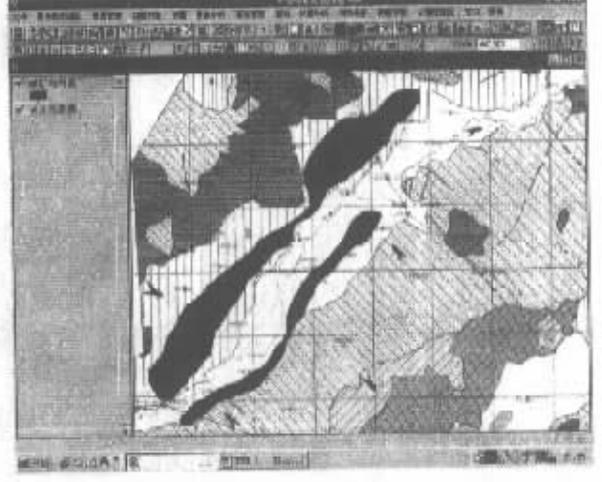


图 3 根据地下水中 O<sub>2</sub> 浓度值圈出的成矿有利区

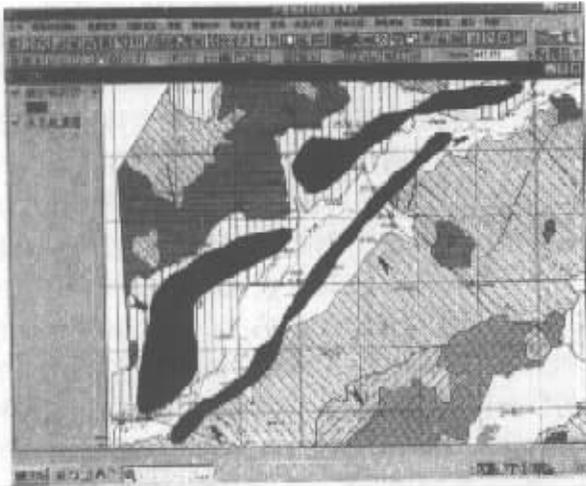


图 4 根据地下水中 U 浓度值圈出的成矿有利区

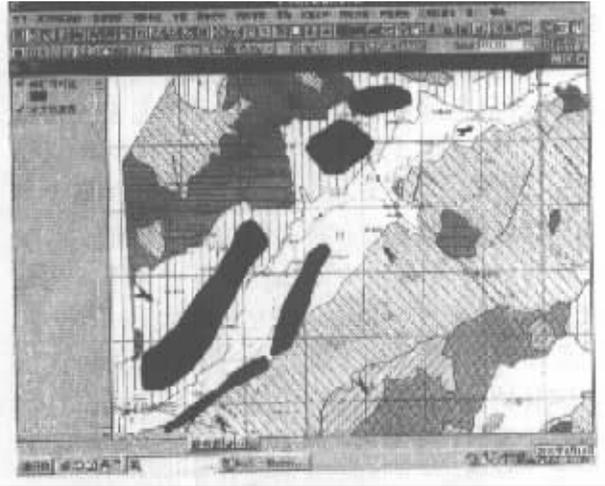


图 5 根据地下水中 E<sub>h</sub> 值圈出的成矿有利区

置)结果如图 25 所示。

### 3.2 根据蚀源区的铀源条件提取成矿有利区

铀源是砂岩铀矿成矿的必要条件,所以研究蚀源区岩石中铀元素的迁移量很有必要。利用系统功能可快速算出蚀源区内地质网格单元(100 m×100 m)从主岩形成至今铀元素的淋失量,这样可更有利于砂岩铀矿的定量预测分析。计算过程如下:研究区内的蚀源区由中酸性火山岩或花岗岩等火成岩组成,而在火成岩中 U、Th 元素的共生关系是非常密切的,其中的 Th 元素的化学性质比较稳定,在溶液中迁移能力极弱,U 元素比较活泼易于随水迁移;火成岩中铀元素的正常值为 33.5,所以从现在测得的

Th、U 含量数据可估算出蚀源区岩石形成至今铀元素的淋失量,即  $w(Th)/3.5w(U)$ 。利用系统软件中的“地图计算”功能则可很容易地实现这一过程。

沉积盆地蚀源区的铀源条件是沉积盆地铀成矿潜力评价的一个重要地质判据。将定量计算出来的蚀源区的铀淋失量和水文地质图相叠合,可以发现不同地段的花岗岩和火山岩的铀元素淋失量是不同的;由于外生铀矿床的铀元素主要来自周围的蚀源区,因此根据水文地质图上地下水流向,在地下水的补给区(蚀源区)铀元素的淋失量越多,则在对应的径流区富集成矿的概率越大。依据蚀源区铀淋失量

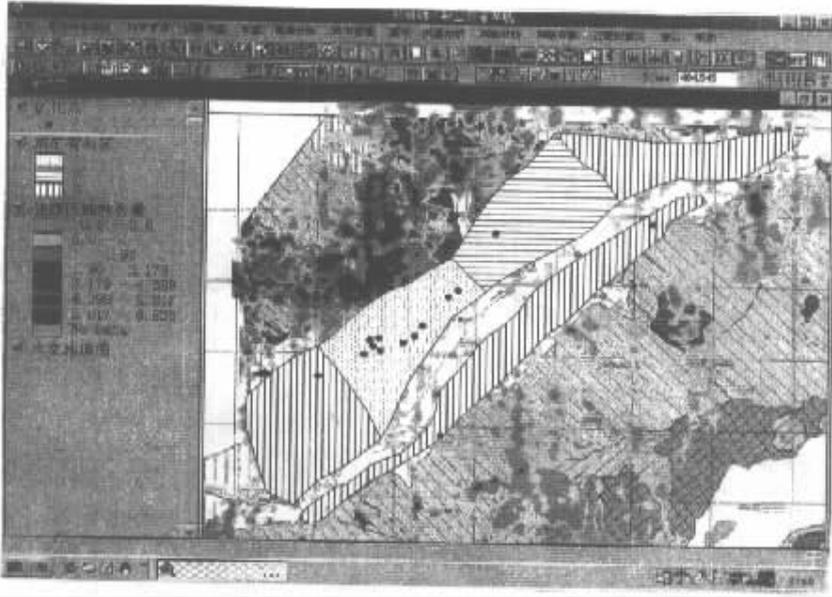


图6 依据铀淋失量圈定的成矿有利区

的差异,在盆地内划定3种不同的铀元素富集区,如图6所示,第一类区域对应的单位宽度的补给区中铀元素的淋失量最多,第二类次之,第三类则最少。

### 3.3 从距盆缘一定距离的缓坡区中提取控矿信息

利用布格重力异常可以圈出克鲁伦盆地的轮廓,由地质资料可知该盆地沉积地层倾角平缓且紧邻蚀源区,通过和已知矿化点相叠合(图7),可以发现已知的层间氧化带矿化点(矿化点存在位置为氧化还原过渡带)大都分布距盆地边缘一定距离的狭长区域内;由于蚀源区中的铀元素随着地下水的流动在缓坡区中迁移,被还原成矿的区间段(属于氧化还原过渡带)都是位于距盆缘一定距离的径流区内;这些位于径流区的区域和已知铀矿化点在空间上的分布具有一定的相关性。

为了定量地总结铀元素富集成矿的有利地带—氧化还原过渡带的空间展布规律,以盆缘为边界,

向内以2000 m为半径,做出6000 m的缓冲区域,可以很容易看出各个区域分布的矿化点数目并不相同。从布格重力异常和盆缘缓冲区的叠合图上可以看出在垂直缓冲区的方向上,盆缘左侧的布格重力异常的梯度变化小于右侧,从中可以推测盆地左侧缓坡区的倾角比右侧要小。克鲁伦盆地左右两侧缓坡区的倾角不同,故盆地左右两侧距盆缘相同距离的缓坡区对铀成矿的影响程度也是有差异的,盆地左右两边的缓坡带应作为权重值不同的两种证据因子来考虑,而盆地右边缓坡区内已知的矿化点只有2个,统计起来无代表意义,所以本次预测中不把它列为一个证据因子,只考虑左边缓坡区对成矿作用的影响程度。利用系统的网格提取功能从图7中提取的盆缘左侧的缓坡区如图8所示,距盆缘分别为0~2 km、2~4 km、4~6 km,把这三段区间做为有利程度不同的成矿区带来考虑。

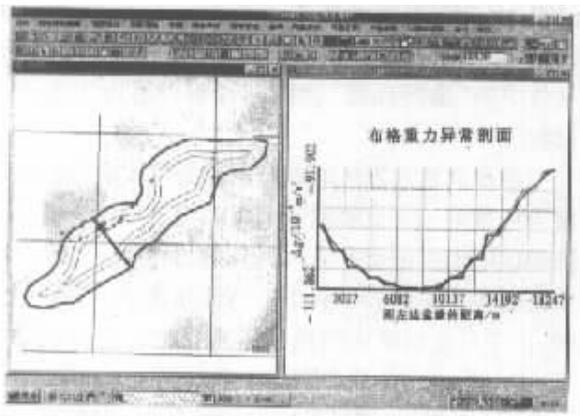


图7 矿化点、缓冲区和布格重力异常叠合

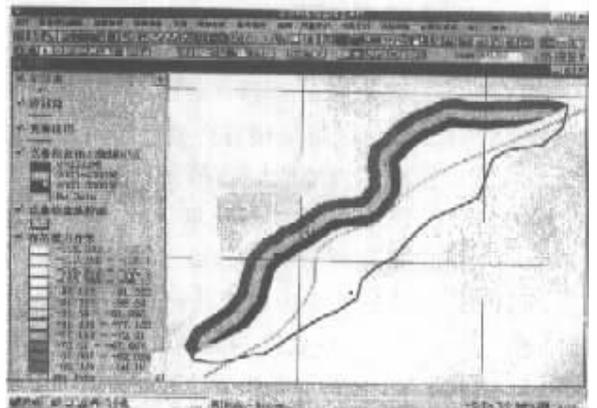


图8 最后划出的成矿有利区域

## 4 证据权重法的实现

本次定量预测的目的层为大磨拐河组地层,包括地表出露的大磨拐河组地层和第三系及第四系下面沉积的大磨拐河组地层。利用系统中矢量分析菜单中的“图形提取”功能,从新巴尔虎右旗地质图中

截取克鲁伦盆地地质图(shapefile)转换成 Grid 专题(网格大小为 100 m)。因盆地西南部分地区没有水文数据覆盖,所以本次预测的空间范围不包括水文数据空白区域,从克鲁伦盆地的网格专题中,提取有水文数据覆盖的区域作为证据权重分析中的研究区(study area grid)。证据权重分析的流程如图 9。



图 9 证据权重分析流程

### 4.1 前验概率计算

提取克鲁伦盆地内已知的层间氧化带型矿化点作为计算权重因子的矿点专题,取每个矿点所占的单元面积为 2.5 km<sup>2</sup> 根据前面介绍的算法计算出来

的先验概率为 0.025 3。

### 4.2 权重因子计算

权重因子的数值大小主要根据已知矿化点和证据因子之间的空间位置分布关系来确定。

表 1 盆缘缓冲距离的权重

class	A/km <sup>2</sup>	A <sub>u</sub>	P/个	W <sup>+</sup>	S(W <sup>+</sup> )	W <sup>-</sup>	S(W <sup>-</sup> )	W <sup>+</sup> - W <sup>-</sup>	S(C)	s(C)
1	185.7000	74.2800	2	-0.6717	0.7168	0.2393	0.3446	-0.9110	0.7954	-1.1454
2	180.9400	73.3760	5	0.3148	0.4635	-0.2030	0.4172	0.5178	0.6236	0.8304
3	168.5500	67.4200	4	0.1522	0.5155	-0.0776	0.3873	0.2298	0.6448	0.3564
-99	845.7800	338.3120	3							

注:表格中的 class 值表示证据因子的分类,其中的 -99 表示证据专题缺失数据的地方;A 表示证据因子中每类所占的面积,以平方公里为单位;A<sub>u</sub> 表示证据因子每类所占的面积,以每个矿点的所占的单元面积为单位;P 表示证据因子每类中的矿化点数;W<sup>+</sup> 表示证据因子每类存在处的权重值,W<sup>-</sup> 表示每类不存在处的权重值,S(W<sup>+</sup>) S(W<sup>-</sup>) 分别表示 W<sup>+</sup> 和 W<sup>-</sup> 的标准差;S(C) 表示 W<sup>+</sup> - W<sup>-</sup> 的标准差;s(C) 表示 studentized contrast,s(C) = (W<sup>+</sup> - W<sup>-</sup>) / S(C),下表同。

表 2 从蚀源区 U 淋失量提取的证据因子的权重

class	A/km <sup>2</sup>	A <sub>u</sub>	P/个	W <sup>+</sup>	S(W <sup>+</sup> )	W <sup>-</sup>	S(W <sup>-</sup> )	W <sup>+</sup> - W <sup>-</sup>	S(C)	s(C)
1	180.9600	72.3840	10	1.4669	0.3406	-1.0727	0.5032	2.5396	0.6076	4.1797
2	209.0600	83.6240	1	-1.1167	1.0060	0.1720	0.2834	-1.2887	1.0452	-1.2330
3	591.6700	236.6680	3	-1.0577	0.5810	0.7187	0.3127	-1.7764	0.6599	-2.6921
-99	399.2800	159.7120	0							

表 3 从地下水中 U 浓度提取的证据因子的权重

class	A/km <sup>2</sup>	A <sub>u</sub>	P/个	W <sup>+</sup>	S(W <sup>+</sup> )	W <sup>-</sup>	S(W <sup>-</sup> )	W <sup>+</sup> - W <sup>-</sup>	S(C)	s(C)
0	872.0400	348.8160	5	-0.5811	0.4505	0.5759	0.3410	-1.1571	0.5649	-2.0482
1	508.9300	203.5720	9	0.5759	0.3410	0.5811	0.4505	1.1571	0.5649	2.0482

表 4 从地下水中 Rn 浓度提取的证据因子的权重

class	A/km <sup>2</sup>	A <sub>u</sub>	P/个	W <sup>+</sup>	S(W <sup>+</sup> )	W <sup>-</sup>	S(W <sup>-</sup> )	W <sup>+</sup> - W <sup>-</sup>	S(C)	s(C)
0	906.0300	362.4120	4	-0.8459	0.5028	0.7593	0.3249	-1.6052	0.5986	-2.6814
1	474.9400	189.9760	10	0.7593	0.3249	-1.8459	0.5028	1.6052	0.5986	2.6814

表 5 从地下水中 O<sub>2</sub> 浓度提取的证据因子的权重

class	A/km <sup>2</sup>	A <sub>u</sub>	P/个	W <sup>+</sup>	S(W <sup>+</sup> )	W <sup>-</sup>	S(W <sup>-</sup> )	W <sup>+</sup> - W <sup>-</sup>	S(C)	s(C)
0	984.5800	393.8320	7	-0.3626	0.3814	0.5745	0.3866	-0.9370	0.5430	-1.7255
1	396.3900	158.5560	7	0.5745	0.3866	-0.3626	0.3814	0.9370	0.5430	1.7255

表6 从地下水中  $E_h$  值提取的证据因子的权重

class	$A/km^2$	$A_u$	$P/\text{个}$	$W^+$	$S(W^+)$	$W^-$	$S(W^-)$	$W^+ - W^-$	$S(C)$	$s(C)$
0	1022.9800	409.1920	5	-0.7429	0.4500	0.9474	0.3443	-1.6904	0.5666	-2.9834
1	357.9900	143.1960	9	0.9474	0.3443	-0.7429	0.4500	1.6904	0.5666	2.9834

### 4.3 条件独立性检验

在进行后验概率计算之前,必须检验所选证据因子间相对于矿点分布的条件独立性。本次证据权重分析的条件独立检验结果如表7所示。

表格中的数值表示证据因子关于矿点间的条件独立检验概率值,数值越小,表示两相交专题间相对于矿点分布的条件独立性越好。从上面表格可以看出,只有从水中  $R_n$  浓度提取的证据因子和其它证据因子间的条件独立性较差。所以在最后计算后验

概率的证据因子中排除取自水中  $R_n$  浓度的证据因

表7 证据专题间条件独立性检验概率

证据专题	$R_n$	U	$E_h$	Ulinshi	Buffer
$O_2$	0.4459	0.000	0.7354	0.5116	0.7132
$R_n$		0.8141	0.8141	0.1988	0.7199
U			0.1970	0.2749	0.3269
$E_h$				0.3480	0.6839
Ulinshi					0.1356

注:Ulinshi 为从盆地蚀源区 U 淋失量中撮的证据因子;  
Buffer 为从盆地缓冲距离中撮的证据因子。

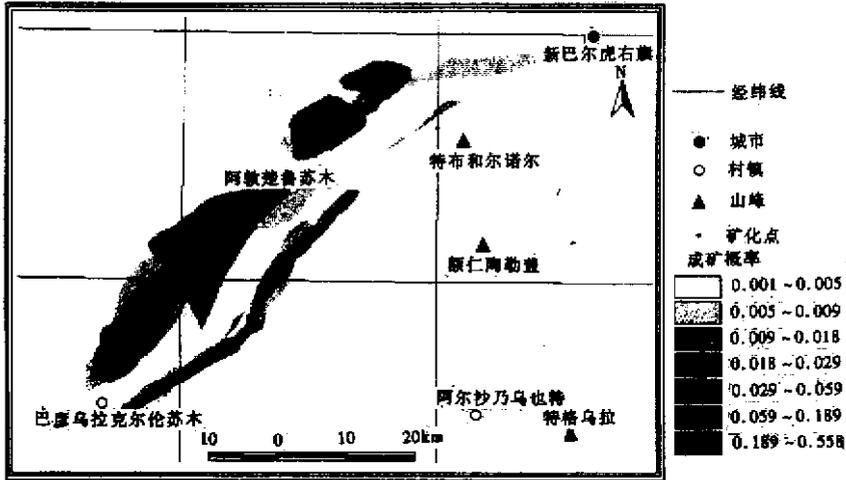


图10 克鲁伦盆地层间氧化带型砂岩铀矿远景预测

子,而保留其余5个证据因子参与后验概率计算。

### 4.4 后验概率计算

完成上述过程后,即可计算后验概率,并生成层间氧化带型砂岩铀矿综合远景预测图。

### 5 小结

层间氧化带型砂岩铀矿除和本次预测所讨论的证据因子相关外,还受地下水流速、岩石的孔隙度、基底的地形起伏、岩石中有机质和硫化物的丰度、局部排泄带的位置等诸多因素影响。因受客观实际条件限制,这方面的资料数据空缺,在预测中无法综合这些因素,本文中介绍的预测结果只是笔者综合了

铀源条件、地球化学数据等揭示的成矿有利信息得出的,故在其他控矿因素基本相同的地区,该预测方法有一定的参考价值。

### 参考文献:

[1] 朱裕生,肖克炎.成矿预测方法[M].北京:地质出版社,1997.  
[2] Bonham-Carter G F, Agterberg F P. Weights of evidence: a new approach to mapping mineral potential, statistical applications in the earth sciences[R]. Canada: Geological Survey of Canada, 1990.  
[3] 成都地质学院三系.放射性勘探方法[M].北京:原子能出版社,1978.

## BASED ON ArcView3.2 TO THE QUANTITATIVE EVALUATION OF THE INTERLAYER OXIDATION ZONE SANDSTONE URANIUM DEPOSITS

HAN Shao-yang , HOU Hui-qun , HUANG Shu-tao

( Beijing Institute of Geology for Nuclear Industry , Beijing 100029 , China )

**Abstract :** This paper describes the evidence weighting method and its theoretical basis. Based on the metallogenic theory of interlayer oxidation zone sandstone uranium deposits and applying information system software for exploration of sandstone uranium deposits which was formed by secondary development of ArcView3.2, the authors extracted ore-controlling information from Klulun basin, analyzed integrated evidence factors through evidence weight, and finally completed prospective prognosis of the interlayer oxidation zone within the basin.

**Key words :** evidence weighting method ; metallogenic information extraction ; the quantitative prediction of interlayered oxidation zone ; prospective prognosis

作者简介:韩绍阳(1975-)男,1998年华东地质学院地球科学系应用地球物理专业毕业,2001年获核工业北京地质研究院硕士学位。现任核工业北京地质研究院物化探研究中心助理工程师,研究方向 GIS 与地球物理信息处理技术,发表论文 3 篇。

上接 435 页

表生变化的因素复杂,总体上以物理风化作用占主导地位。物理风化形成的碎屑往往保留原岩特征,受有机质干扰少,因此能够较真实地反映汇水流域的地球化学特征;1:5 万水系沉积物测量在该区应以粗粒级砂质沉积物为主,样品的截取粒级以 -10 ~ +60 目为宜;在低山、丘陵区,运用水系沉积物测量的同时,辅以网格法土壤测量,能更有效地发现异常,找矿效果更为理想;对不同的亚景观或微景观,要有针对性地采取适宜的工作方法;对异常查证的结果要结合野外工作方法进行深入详细的分析研究。

### 参考文献:

- [1] 任天祥,张华,杨少平等.高寒山区表生作用地球化学特征的初步研究[A].第一届勘查地球化学学术讨论会论文选编[C].1982,1-19.
- [2] 王启军,陈建渝.油气地球化学[M].武汉:中国地质大学出版社,1988.
- [3] 袁见齐,朱上庆,翟裕生.矿床学[M].北京:地质出版社,1985,233-236.
- [4] 谢学锦,侯智慧,刘树信.黑龙江团结沟地区砂金成因探讨[J].地质与勘探,1987(10):46.
- [5] 涂光炽.低温地球化学[M].北京:科学出版社,1998,146-226.

## TECHNIQUES OF 1:50 000 STREAM SEDIMENT SURVEY IN FOREST-SWAMP AREA OF NORTHERN DA HINGGAN MOUNTAINS

MA Xiao-yang<sup>1,2</sup>, CUI Yu-jun<sup>2</sup>, LI Xiang-you<sup>2</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Heilongjiang Institute of Geological Survey, Harbin 150036, China)

**Abstract :** Based on a study of the techniques for 1:50 000 stream sediment survey in forest swamp-frozen soil landscape area of northern Da Hinggan Mountains, the authors have discovered that the adoption of relatively coarse grained fragments (-10 ~ +60 mesh) in stream sediments can effectively eliminate the interference of organic matter and strengthen the anomaly. It is also held that in areas where stream sediments are not well developed, the utilization of stream sediment survey with the help of grid soil survey can obviously raise the ore-prospecting efficiency.

**Key words :** weathering ; migration and enrichment of elements ; stream sediments ; soil ; grain size ; organic matter.

作者简介:马晓阳(1965-)男,高级工程师。1988年毕业于长春地质学院岩化系找矿地球化学专业,现为中国地质大学(北京)博士生。一直从事森林沼泽区地球化学勘查工作,发表论文数篇。