

# 小波变换在砂岩型铀矿地面氡气测量中的应用

杨镜明, 张 霖, 王 成

(核工业 216 大队, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**[摘要]** 放射性统计涨落和随机干扰是影响放射性测量效果的关键因素之一, 它对砂岩型铀矿在地表的放射性弱信息具有干扰甚至淹没的严重影响。本文采用小波多分辨分析氡气测量数据, 消除统计涨落等噪声干扰, 提取氡气测量反映深部砂岩型铀矿化信息, 为应用地面氡气瞬时测量方法圈定砂岩型铀矿成矿有利地段提供了新的方法和新的思路。

**[关键词]** 小波变换; 氡气测量; 砂岩型铀矿

**[文章编号]** 1000-0658(2008)03-0164-06

**[中图分类号]** P631.6<sup>+</sup>4

**[文献标识码]** A

## 1 引言

放射性测量具有仪器轻便、方法简单、测量结果直观、受地形地物和电磁等噪声干扰小等优点。但是, 放射性测量在工作环境相同、仪器工作稳定、工作条件良好、操作十分小心的情况下, 重复测量的结果往往不相同。这是放射性衰变统计涨落所致。这类误差称为统计涨落误差, 是放射性测量的主要误差来源。在实际工作中减小统计涨落误差的方法有: (1) 提高测量装置的灵敏度, 如采用大尺寸的闪烁晶体等; (2) 采用延长测量时间、增加测量次数来提高测量精度; (3) 减少测量时的本底计数。以上3种减小统计涨落误差的方法存在仪器设计困难和影响实际工作效率的问题。放射性衰变统计涨落误差及其它干扰因素, 对提取放射性弱信息(如深部铀矿化特征在地表及空中的反映)和放射性场局部细微变化特征的有用信息具有

严重干扰。因此, 在对放射性测量结果进行解释之前, 消除其噪声干扰是非常重要的。当前对放射性测量数据的降噪处理, 最常用的方法是多项式拟合移动平滑法, 但当平滑的点数选择不当时会歪曲数据信息, 导致异常位置偏移, 甚至降低和滤掉异常。尤其是在高本底上寻找弱峰或者需要分辨相距很近的重叠峰、以及寻找深部铀矿化在地表和空中产生的放射性弱异常时, 多项式拟合移动平滑分析方法往往不能达到理想的结果。作为在频域应用最广泛的分析手段——傅里叶变换, 处理线性问题是极为有效的工具, 但傅里叶分析的致命缺点是不能做局部分析和变换后的数据几乎丧失了全部时域的信息, 使得该方法在放射性测量数据处理中没有太大的实用价值。

地面放射性测量方法获得的观测数据包含各种频率成分。由于大地滤波作用, 放射性测量数据的低频成分主要反映深部(或区

**[收稿日期]** 2007-06-04 **[改回日期]** 2007-11-10

**[作者简介]** 杨镜明 (1972-), 男, 高级工程师, 1997年毕业于华东地质学院, 获硕士学位。

域) 地质信息, 中高频成分主要反映浅部(或局部) 地质信息, 而高频成分主要反映地表放射性核素不均匀分布和统计涨落误差及其它随机干扰。因此, 为了对测量数据作出确切的地质解释, 对这些数据进行空间异常分离是十分必要的。

小波变换是近几年发展起来的一个新的数学分支。它是一种信号的时间-频率分析方法, 具有多尺度分析的特点, 在时频两域都具有表征信号局部特征的能力, 可以由粗及细地逐步观察信号<sup>[1]</sup>, 能将放射性测量信号按不同频率特征分离。小波分析的这些特长决定了它可能是进行放射性测量数据分析的有效工具。

## 2 小波分析原理

小波分析作为数学的一个新分支在众多领域得到了广泛应用, 其核心是多分辨率分析, 能体现信号在时域和频域的局部特征。一个信号的小波变换是信号与小波基褶积所得到的信号系列, 小波基是由小波函数经平移和伸缩构成。小波分析最实用的算法是 Mallat 算法。

小波变换就是将小波函数  $\Psi(t)$  的自变量  $t$  进行位移和伸缩处理后, 与待变换函数  $f(t)$  作内积, 得到具有双参数  $a$  (尺度参数) 和  $b$  (平移参数) 的函数  $W_f(a, b)$ , 即:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\Psi[(t-b)/a]} dt$$

其逆变换为:

$$f(t) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \Psi_{a,b}(t) da db$$

通常  $\Psi(t)$  具有有限的支撑集, 即在  $t$  的一个有限集合, 例如在  $[0, T]$  之外全部等于 0, 记为  $Supp\Psi(t) = T$ 。此时, 上述积分只在包含  $b$  的视窗  $[b, aT+b]$  内部不等于 0; 而视窗的位置随  $b$  移动, 其大小随  $a$  伸缩。另外, 上述积分可以化成褶积, 因此小波变换是将视窗中的  $f(t)$  进行滤波处理, 此滤波是一种带通滤波。 $a$  越大频带越窄, 视

窗越大信号越模糊; 反之,  $a$  越小频带越宽, 视窗越小, 分辨率越高。

在实际应用小波分析时, 必须离散化连续小波。这一离散化是针对连续的尺度参数  $a$  和连续的平移参数  $b$  的。通常, 把连续小波变换中尺度参数  $a$  和平移参数  $b$  的离散化公式分别取作  $a = a_0^j$ ,  $b = ka_0^j b_0$ , 这里  $j$  及  $k$  均为整数, 扩展步长  $a_0 \neq 1$  是固定值, 为方便起见, 总是假定  $a_0 > 1$ , 步长  $b_0 > 0$ 。对应的离散小波函数  $\Psi_{j,k}(t)$  即可写作:

$$\Psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \Psi\left(\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j}\right) = a_0^{-j/2} \Psi(a_0^{-j} t - kb_0)$$

离散化小波变换系数可表示为:

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{j,k}^*(t) dt$$

其重构公式为:

$$f(t) = C \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} C_{j,k} \Psi_{j,k}(t)$$

式中:  $C$  是一个与信号无关的常数。

常用的小波函数有十几种, 如 Harr 小波、Daubechies 小波 (dbN)、Symlet 小波 (SymN)、Morlet 小波等, 在本文中选用 Daubechies 小波 (dbN)。dbN 具有紧支集的标准正交基, 没有固定的解析表达式, 且大部分具不对称性, 缩写 dbN 代表一类 Daubechies 小波基,  $N$  为序号, 笔者经过试验研究, 在本文中 Daubechies 小波选取了  $N=4$  (即 db4) 进行变换。

离散小波的快速算法 (Mallat 算法) 建立在信号空间多分辨率分析的基础上, 将不同分辨率的分子信号空间进行分解, 是一种具有塔式结构的迭代算法<sup>[2]</sup>。

## 3 地面氡及其子体测量小波多分辨率分析

氡是天然放射性元素铀系中的一个气体放射性元素, 有较强的迁移特性, 测量氡及其子体的放射性活度或含量的变化有利于寻找深部铀矿体。氡气测量方法分为累积测量和瞬时测量。瞬时测量方法工作效率高, 但

受干扰影响较大；累积测量方法工作效率低，但受干扰因素影响较小。氡气测量受放射性统计涨落、仪器稳定性、外界突然强干扰、其它非地质因素，如人为因素、天气、温度等因素影响，其中瞬时测量方法受干扰影响较大。因此，在对氡气测量结果解释前，进行信号分离处理，以提取反映深部铀矿化弱信息是必须的工作步骤。

自 20 世纪 90 年代初以来，我国铀矿勘查的主攻方向转为储量大、开采成本低的可地浸砂岩型铀矿。其主要产在北方大、中型中生代盆地，覆盖厚，地表的铀矿化信息十分微弱。地面放射性勘查方法的观测数据中既含有表现为低频特征的深部构造和铀矿化信息，又含有表现为中高频特征的浅部的细节信息及各种噪声干扰。如何将这些不同层次频率的信息分离，消除干扰，提取深部铀矿化信息是铀资源勘查发展领域中的战略性

前沿课题。小波分析能将信号分解成不同的空间与尺度成分，为氡气测量信号的逐级分解与深层次信息的提取提供了有效的数学工具。

### 3.1 小波分析在内蒙古东胜地区某砂岩型铀矿床放射性测量中的应用

内蒙古东胜地区某砂岩型铀矿床 143 号剖面采用 FD3016 闪烁测氡仪获取的测氡数据和土壤天然热释光测量数据由 2003 年东华理工学院“氡及其子体测量与异常解释方法研究”项目组野外采集。两种方法均为同点采样测量，测点距为 50 m。FD3016 闪烁测氡仪每点的测量时间为 2 min。从图 1 可见，FD3016 闪烁测氡原始曲线受放射性衰变统计涨落和浅部因素等噪声干扰，曲线跳跃剧烈，不利于地质解释。从图 2 可见，其与土壤热释光测量曲线形状相差较大。经小波多分辨分析后，分解的阶数越多，分解出的低频越低，高频

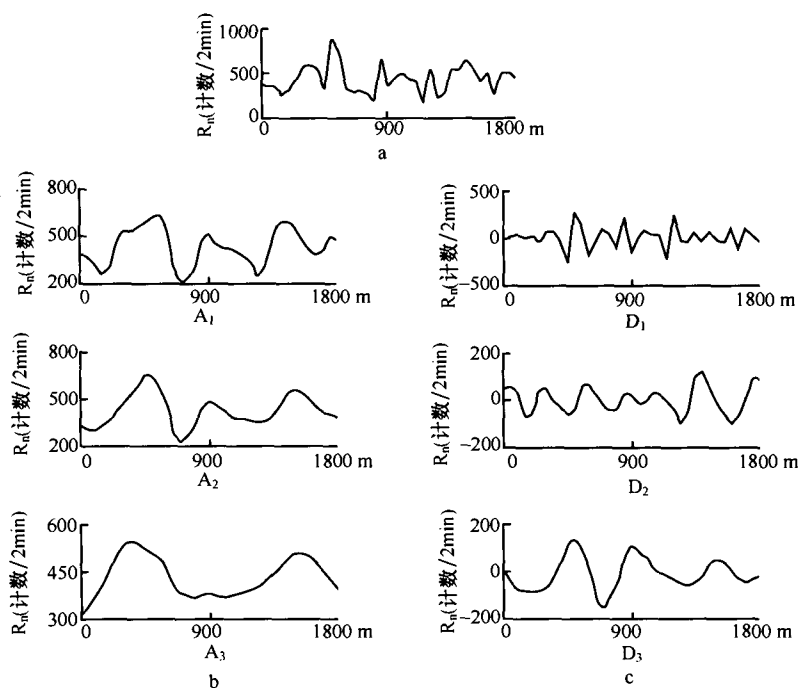


图 1 143 剖面氡气测量数据的小波分解与重构

Fig. 1 Wavelet decomposition and reconstruction of measured radon data from section No. 143

a—FD3016 闪烁测氡仪原始测量曲线；b—db4 小波多尺度分解近似（低频）曲线；c—db4 小波多尺度分解细节（高频）曲线；A<sub>1</sub>—小波多尺度分解一阶逼近；A<sub>2</sub>—小波多尺度分解二阶逼近；A<sub>3</sub>—小波多尺度分解三阶逼近；D<sub>1</sub>—小波多尺度分解一阶细节；D<sub>2</sub>—小波多尺度分解二阶细节；D<sub>3</sub>—小波多尺度分解三阶细节。

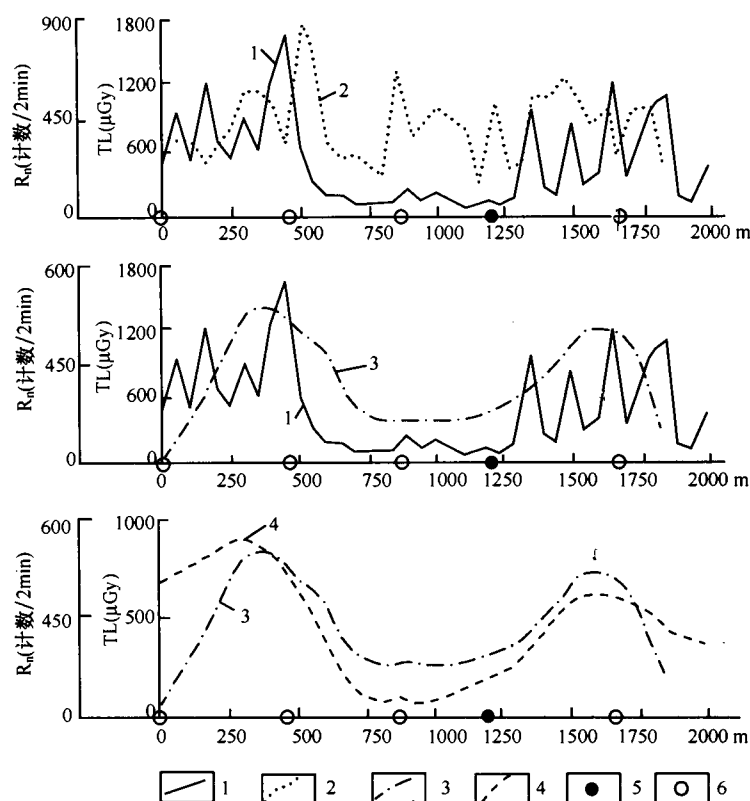


图 2 143 剖面氡气测量曲线和小波变换曲线

Fig. 2 Measured and wavelet transformed curves of radon from section No. 143

1——土壤热释光测量原始曲线 TL; 2——FD3016 闪烁测氡仪原始测量曲线; 3——FD3016 闪烁测氡仪测量小波变换三阶逼近曲线 (FD3016 - A<sub>3</sub>); 4——土壤热释光测量小波变换三阶逼近曲线 (TL - A<sub>3</sub>); 5——工业孔, 6——矿化孔。

也越低 (图 1)。但分解阶数不是无限的, 一般最大分解阶数  $n = \log_2 N$ ,  $N$  为小波分析样本数。笔者在实际工作中经多次试验得出, 在提取深部异常时选用小波分析的  $n-2$  阶逼近 (低频重构) 作异常解释较合理, 143 号剖面共有 38 个数据,  $n-2 \approx 3$ 。从图 1 可见, 小波多分辨分析一阶细节 (高频重构) 曲线  $D_1$  主要表现为放射性测量统计涨落及其他高频噪声干扰, 而一阶逼近曲线  $A_1$  为滤除了高频噪声干扰的放射性测量曲线; 小波多分辨分析二、三阶细节曲线  $D_2$ 、 $D_3$  主要表现为放射性测量数据中的中高频浅部核素不均匀分布和其他非地质因素干扰, 其二阶逼近曲线  $A_2$  为已滤除了主要高频噪声干扰, 但还有局部地质和非地质因素干扰。根据东华理工学院刘庆成、邓居智教授等在内蒙古东胜及其他地

区的研究, 一般在成矿有利地带, 氡浓度绝大多数呈现低值异常, 高值异常对应矿体两端, 形成“双峰夹一谷”的异常形状<sup>[3]</sup>。小波多分辨分析三阶逼近曲线  $A_3$  曲线表现为较完整的“双峰夹一谷”形状, 因此,  $A_3$  曲线的“山谷”应为成矿有利地带, 其与剖面上铀矿体分布位置吻合。从图 2 可见, FD3016 -  $A_3$  曲线与土壤热释光法原始测量曲线 (TL) 起伏形状基本一致, 但土壤热释光测量因受样品的粒度大小、仪器加热温度、仪器灵敏度选择 (王南萍等, 2002)、局部地质特征等因素影响, 其原始曲线表现为有局部跳跃的干扰异常。利用小波多分辨分析对 143 剖面的土壤热释光测量数据进行分解, 其三阶逼近曲线 (TL -  $A_3$ ) 已消除了干扰因素, 与 FD3016 -  $A_3$  曲线形状完全吻合, 且二者低值区均对

应铀矿工业孔位置 (图 2)。作为瞬时测量方法的 FD3016 闪烁测氦仪测量数据经小波多分辨分析, 提取的信号曲线与累积测量结果曲线形状具有一致性。这就为方便快捷的瞬时测氦方法提供了一种新的数据处理方法, 其结果与累积测量结果一样, 能较可靠地反映深部铀矿化特征。这也说明了采用小波多分辨分析消除瞬时氦气测量噪声干扰是可行的。瞬时测氦法与小波多分辨分析相结合, 不但具有瞬时测氦法快速方便的优点, 还具有累积测氦法数据稳定可靠、更有利于提取深部铀矿化信息的优点, 这就为放射性测量在可地浸砂岩型铀矿找矿工作中提供了一种新思路。

### 3.2 小波分析在新疆伊犁盆地 511 砂岩型铀矿床放射性测量中的应用

图 3 为新疆伊犁盆地 511 可地浸砂岩型铀矿床, 48 号土壤天然热释光测量剖面<sup>[4]</sup>, 其原始测量曲线呈较为复杂的锯齿状起伏变化, 虽然总体上表现为由两侧向中部小幅度跳跃式降低, 但因干扰因素使原始曲线起伏变化不利于地质解释。48 号剖面共有 33 个数据,  $n-2 \approx 3$ 。对 48 号土壤天然热释光测量数据进行小波多分辨分析后, 取其中三阶逼近曲线  $A_3$  作地质解释。从图 3 可见,  $A_3$  曲线呈“双峰夹一谷”的形状, 低值异常“山谷”对应深部铀矿体。因此, 土壤天然热释光测量数据经小波变换滤波处理后的  $A_3$  曲线与原

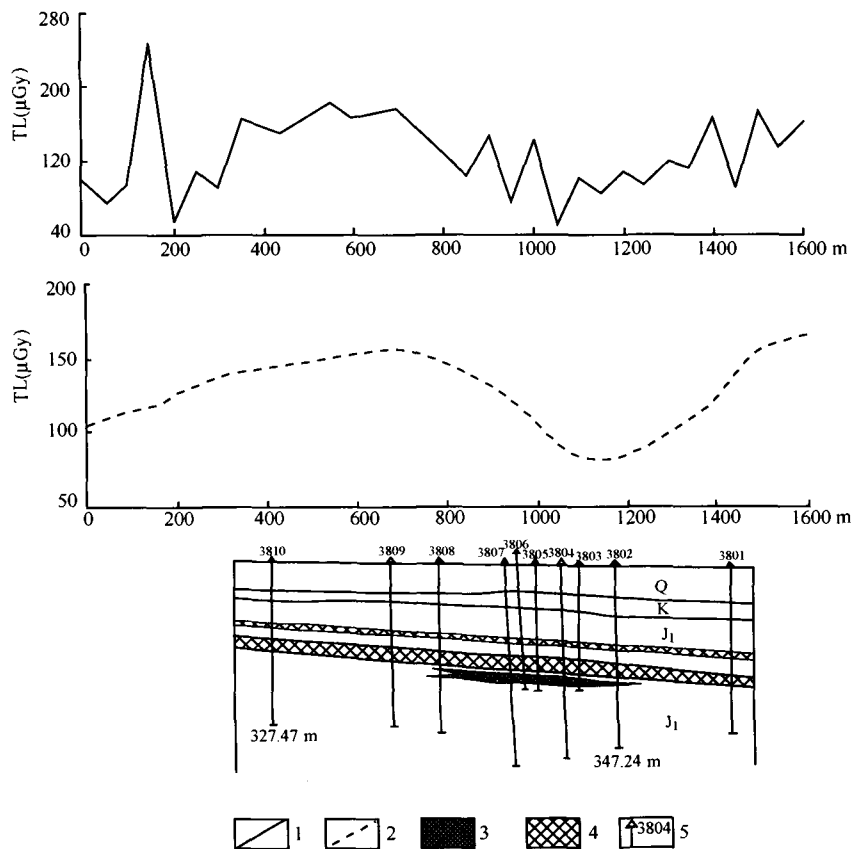


图 3 48 号剖面土壤热释光测量曲线和小波变换曲线

Fig. 3 Measured thermoluminescence curves and its wavelet transformation of soil from section No. 48

1——土壤热释光法原始测量曲线 TL; 2——土壤热释光测量小波变换三阶逼近曲线 ( $TL - A_3$ ); 3——铀矿体;  
4——煤层; 5——钻孔及其编号。

始曲线相比, 其地质解释的效率和精确性都明显地得到提高。

#### 4 结 论

对放射性测量结果进行了小波多分辨率分析以提取相关地质信息, 在国内外少有研究。笔者通过对近年来在中国西部中生代盆地中勘查砂岩型铀矿的地面氡气测量数据进行小波多分辨率分析, 提取地下深部铀矿化异常, 取得了新的成果, 对丰富放射性测量数据处理方法有现实意义。

#### [参考文献]

[1] 刘春生, 张晓春. 实用小波分析 [M]. 徐州:

中国矿业大学出版社, 2002.

[2] Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition; the wavelet representation [M]. IEEE TFans. 1989.

[3] 刘庆成, 邓居智, 杨亚新, 等. 氡及其子体测量与异常解释方法研究 [R]. 江西抚州: 东华理工学院, 2003.

[4] 刘庆成, 杨亚新, 邓居智, 等. 地气等物化探方法在隐伏砂岩型铀矿床找矿中应用研究 [R]. 江西抚州: 华东地质学院, 2000.

## Application of wavelet transform in Radon survey over the ground of sandstone-type uranium deposit

YANG Jing-ming, ZHANG Lin, WANG Cheng

(Geologic Party No. 216, CNNC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

**Abstract:** Statistical fluctuation and random interference are the key factors to influence radiometric survey, they may seriously interference and even cover up the weak information from the underground sandstone-type deposit. In order to eliminate the statistical fluctuation and random interference, this paper uses the multi-scale wavelet decomposition to analyze radon survey data so that the abnormal respond to the deep uranium mineralization can be subtracted. It provides a new method and thought to identify the favorable district for the method of instantaneous radon survey on the ground.

**Key words:** wavelet transform; radon survey; sandstone-type uranium deposit

(上接 174 页, Continued from page 174)

## Reducing statistical noise in GR-660 car gamma-ray spectral data through ANFIS

LI Bi-hong, LU Shi-li, HAN Shao-yang, WEI San-yuan

(Beijing Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** A procedure has been developed for reducing statistical noise in GR-660 car gamma-ray spectral data, the result after using ANFIS has shown that reduction in statistic noise is equivalent to increasing the detector volume by a factor typically between 22 and 1151 times. Profiles and maps have been found that the method can significantly enhance weak geological information and effectively improve detecting precision.

**Key words:** adaptive network-based fuzzy system; statistical noise; gamma-ray spectrum