维普资讯 http://www.cqvip.com

第24卷 第5期 铀 矿 地 质 Vol. 24 No. 5
2008年 9月 Uranium Geology Sep. 2008

小波分析在天然伽玛测井地质解释中的应用

杨镜明，张 霖，王 成

（核工业216大队，新疆 乌鲁木齐 830011）

[摘要] 在分析天然伽玛测井数据的信息特点和小波多分辨率分析原理的基础上，用小波多分辨率分析天然伽玛测井数据，消除其中的统计涨落等噪声干扰及提取天然伽玛放射性强度在不同沉积岩地层中分界标志特征和不同岩性中的变化特征，以提高应用天然伽玛测井资料进行地层划分及岩性识别的准确性和有效性。

[关键词] 小波变换；多分辨率分析；天然伽玛测井

[文章编号] 1000-0658（2008）05-0302-05 [中图分类号] P628；P631.8+4 [文献标识码] A

1 引 言

在铀矿勘查中，天然伽玛测井资料是确定铀矿床空间特征和进行储量计算的重要依据，也用于识别岩性、划分地层。由于受放射性统计涨落等干扰影响，且不同岩性和地层之间的放射性强度差异较弱，在实际的岩性识别、地层划分应用中它并未发挥其优势。因此，提取天然伽玛测井资料中的有用信息，发挥其地学应用价值是一个值得研究的课题。

在沉积岩系天然伽玛测井中所取得的信息包括：（1）不同岩性引起的局部中高频信号；（2）不同沉积时间和不同沉积环境引起的低频信号；（3）放射性统计涨落及外界强干扰引起的高频信号（噪声）。因此，利用伽玛测井资料既可进行岩性划分，还可进行地层单元划分。通常，测井曲线解释方法基本是以曲线形态分析为主要内容，即曲线的幅度、形状、接触关系、次级形态分析。由于伽玛测井资料包含不同层次的地质信息，且受噪声的干扰，给测井解释带来困难。如果不对这些干扰信号进行去噪处理，将会产生解释误差，特别是采用计算机自动解释分层（如人工神经网络等）时可能产生严重错误。为了提高地质解释的准确性和有效性，在对测井资料进行解释之前，明确地质解释目的，提取相关的天然伽玛测井信息，滤除无关的干扰信号是非常重要的。

小波变换是一种信号的时间-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[1]，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是进行放射性测量数值分析的有效工具。

2 小波多分辨率分析原理

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，与待变换的函数

[收稿日期] 2007-09-25 [改回日期] 2008-01-02

[作者简介] 杨镜明（1972-），男，高级工程师，2005年毕业于东华理工大学，获硕士学位。

维普资讯 http://www.cqvip.com

$f(t)$ 作内积，得到具有双参数 α（位移参数）和 b（伸缩参数）的函数[2]。

多分辨率分析又称多尺度分析。对于离散序列信号 $f(t) \in L^2(R)$，其小波变换采用 Mallat 快速算法，信号经尺度 $j=1, 2, \cdots, J$ 层分解后，得到 $L^2(R)$ 中各正交闭子空间 $(W_1, W_2, \cdots, W_J, V_J)$，若 $A_j \in V_j$ 代表尺度为 j 的逼近部分，$D_j \in W_j$ 代表细节部分，则信号可以表示为 $f(t) = A_j + \sum_{j=1}^{J} D_j$。据此函数可以根据尺度 $j=J$ 时的逼近部分和 $j=1, 2, \cdots, J$ 的细节部分进行重构。图 1 为 3 层多尺度分析结构图。

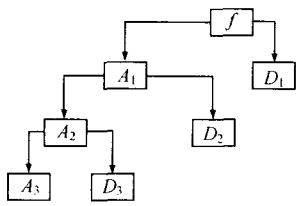


图 1　3 层多尺度分析结构图

Fig. 1　Flow chart of 3 layers multi-scale analysis

把小波变换引入多尺度分析的思想，可以将信号分解成各种不同的频率成分或各种不同的尺度成分，并且通过伸缩、平移聚焦到信号的任一细节加以分析。利用小波变换的上述特点，对天然伽玛测井信号进行分析，便可分离出各种频率（尺度）意义下的异常特征。

常用的小波函数有十几种，如 Haar 小波、Daubechies 小波（dbN）、Symlet 小波（SymN）、Morlet 小波等。小波分析中，小波母函数的选择是一个难题，笔者经过试验研究对比不同的小波基函数在天然伽玛测井中信号分解及信息提取的结果，在文中采用 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，且大部分呈不对称性，缩写 dbN 代表一类 Daubechies 小波基，N 为序号，在本文中 Daubechies 小波选取了 $N=4$（即 db4）进行变换。

3　天然伽玛测井信号分解及信息提取

3.1　小波分析提高天然伽玛测井曲线纵向分辨率的方法

天然伽玛测井中放射性强度局部变化为钻孔剖面上不同岩性的放射性强度反映。由于受放射性统计涨落等高频噪声干扰和背景变化的影响，使同一岩性在不同地层中放射性强度差别较大。因此，要提高天然伽玛测井曲线划分地层岩性的准确性，首先要消除以上两种干扰。

经对 16 个砂岩型铀矿勘查区钻孔的天然伽玛测井数据进行小波多尺度分析，总结得出：一般小波多尺度分解的第 3 层低频系数重构结果 A_3 曲线已基本消除了放射性统计涨落误差等高频噪声对天然伽玛测井结果的影响，而多尺度分析的第 n 层低频系数重构结果 A_n 曲线（n 为多分辨率小波分解的最大分解尺度，$n=\log_2 N$，N 为小波分析样本数）反映了不同地质年代沉积环境和沉积层的放射性强度特征，即背景变化趋势。因此，采用 $G_1 = A_3 - A_n$ 对天然伽玛测井局部异常进行去噪处理，以提高测井曲线划分岩性的分辨率。从图 2 可见，在钻孔地质柱状图不同深度（不同地层）上的松散粗砂岩和泥岩的天然伽玛曲线不在同一基线上，明显受不同地层的背景值影响。经小波多分辨率分析提取天然伽玛曲线的局部异常 A_3 和背景变化 A_n，并对局部异常进行背景值校正，得到 G_1 曲线。从图 2 可见，G_1 曲线不但将松散粗砂岩的天然伽玛曲线幅值校正到同一基线上，而且突出了不同岩性的天然伽玛测井曲线幅值的变化特征。G_1 曲线与三侧向电阻率 ρ_s 曲线峰值反向性明显，且其曲线幅度特征变化与地质柱状图岩性变化一致性较好。可见，采用 G_1 曲线进行岩性识别，无论人工解释或计算机自动分层解释，其结果都明显比采用原始测井曲线精度高。

3.2　沉积岩系地层放射性特征信息提取

根据不同地层放射性强度特征，天然伽

维普资讯 http://www.cqvip.com

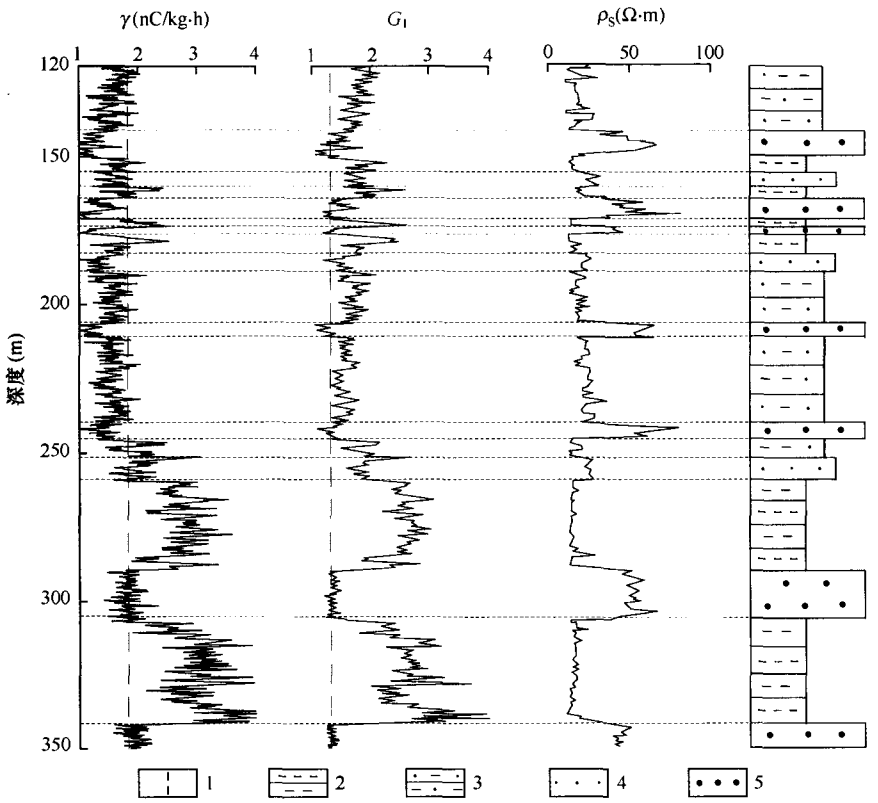


图2 天然伽玛测井小波多分辨率分析曲线及岩性柱状图

Fig. 2 Multi-resolution analysis of natural γ ray logging curve and the lithological column

1——松散粗砂岩基线；2——泥岩；3——泥质粉砂岩；4——细砂岩；5——粗砂岩；γ——天然伽玛测井原始曲线；G_1——A_3－A_{12}，其中：A_3——小波多尺度分解的第3层低频系数重构结果曲线，A_{12}——小波多尺度分解的第12层低频系数重构结果曲线；ρ_S——三侧向电阻率测井原始曲线。

玛测井曲线具有划分地层的能力。但从图3新疆伊犁盆地ZK7044天然伽玛测井原始曲线（γ）可见，曲线受严重干扰，信号的发展趋势较难分辨。经小波分析分解到第9层，测井曲线的发展趋势随着近似（低频）的变化越来越清晰。因而，随着尺度的增加和时间分辨率的降低，信号的发展趋势将表现得更为明显。此外，还可以在频率中理解它的含义，即尺度分解中的低频部分随着层次的增加，它所含有的高频信息会随之减小，当分解到下一个层次时，就有更高一些的频率信息被滤掉，而所剩下的就是信号的发展趋势（不同地层的放射性强度特征）。

图3为小波多尺度分解的6～9层低频重构曲线A_6、A_7、A_8、A_9。从图3可见，随着分解尺度的增加，信号的发展趋势越来越明显，其小波系数低频部分重构曲线比原始曲线能更清楚地辨别出各地层特征。通过盆地地层特征和该钻孔地质岩心编录分析确定，149.2、242.8和308 m分别为第三系（N）、白垩系（K）、中侏罗统（J_2）、下侏罗统（J_1）分界。A_8曲线相对于其它曲线对不同地层放射性强度的分层标志特征与地质分析更吻合，分层更清晰。笔者在实际工作中经多个钻孔分析试验得出，在提取不同地层的放射性强度特征时选用小波分析的$n-5$层近似（低频重构）作异常解释较合理。n为多分辨率小波分解的最大分解尺度，图3中γ曲线的小波分析样本数$N=6240$，计算得$n\approx13$。因此，选择A_8曲线为解释曲线。第三系的底部，有一

维普资讯 http://www.cqvip.com

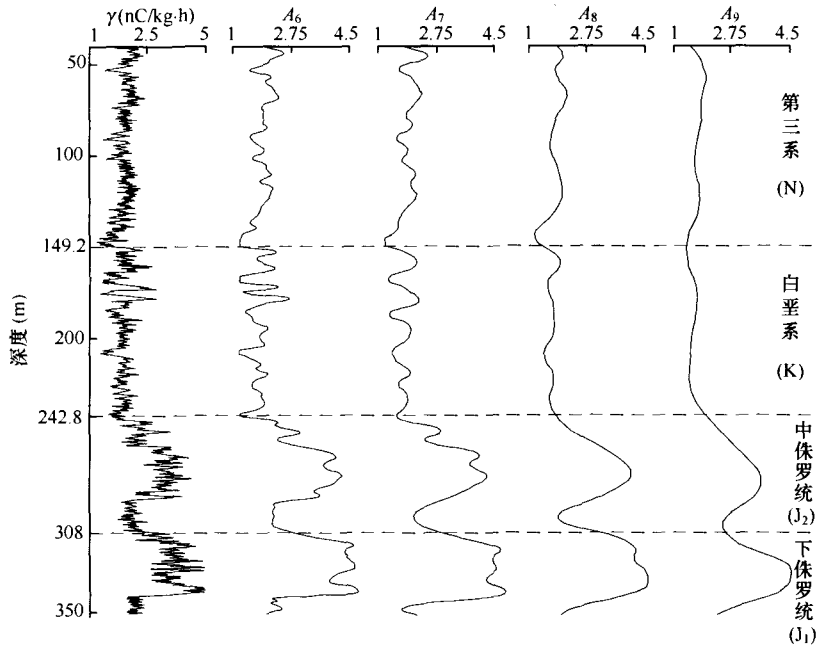


图 3　天然伽玛测井小波多分辨率分析近似曲线

Fig. 3　Multi-resolution analysis of natural γ ray logging

γ——伽玛测井原始曲线；A_6、A_7、A_8、A_9——分别为小波多尺度分解的 6～9 层低频重构曲线。

层砂砾岩，在 A_8 曲线 149.2 m 上方清楚地显示有放射性低值区；侏罗系为砂岩型铀矿找矿目的层，它与白垩系具有较大的放射性强度差异，A_8 曲线在 242.8m 处分界明显；中侏罗统（J_2）底部为一层粗砂岩层，在 A_8 曲线 308 m 上方放射性强度低值表现明显。

以上实例说明了，在砂岩型铀矿勘查中对天然伽玛测井数据进行小波多分辨率分析，消除放射性统计涨落和其他干扰，提取不同地层的放射性强度特征，进行地层划分和岩性识别是有效的。

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，在我国西部中新生代地层中勘查砂岩型铀矿的天然伽玛测井资料进行小波多分辨率分析，提取不同地层和岩性的放射性强度特征，在地质解释和铀矿勘查方面都取得了较好的成果，对丰富放射性测量数据处理方法有现实意义。但小波多分辨率分析不同层的低频重构曲线的实际物理意义，还需要进一步的深入探索和研究。

[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] 杨镜明，张　霖，王　成．小波变换在砂岩型铀矿地面氡及其子体测量中的应用［J］．铀矿地质，2008.24（3）：164～169．

（下转 320 页，Continued on page 320）

维普资讯 http://www.cqvip.com

The research on pre-processing method of uranium bearing sandstone specimen and simultaneously detecting of uranium and thorium

ZHU Ying, LI Gong-shun, BAI Jing-mei, QI Ling, GUO Guang-zhen

(*Research Institute No.* 280, *CNNC*, *Guanghan*, *Sichuan* 618300, *China*)

Abstract: A pre-processing method was researched for uranium bearing sandstone specimen. Specimen was resolved with sodium peroxide and anglomercted with CTMAB, so as to eliminate the effection of silica acid gel to the separation and concentration of uranium and thorium connected with polaragraphic, the uranium and thorium can be determined simultaneously. Linearity for uranium and thorium were found in ranges of 0.001～0.500 μg/10mL with their detection limits of 8.63×10^{-6} μg/mL and 5.16×10^{-6} μg/mL. This method has been used in the continuous determination of uranium and thorium with the content less than 5×10^{-6} in sandstones-type uranium deposit and satisfactory results has been gotten.

Key words: sandstones-type uranium deposit; pre-processing; CTMAB; uranium; thorium

---

(上接 305 页, Continued from page 305)

Application of multi-resolution wavelet analysis in the geological explanation of natural γ ray logging

YANG Jing-ming, ZHANG Lin, WANG Cheng

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

Abstract: This paper introduces both the characteristic of γ ray logging and the wavelet-based multi-resolution analysis. At the same time, the wavelet transformation is used to decompose the date of γ ray logging to reduce the disturbance of statistical noise and subtract the changing feature radioactivity in different kind sedimentary layers, so as to enhance the veracity and validity of natural γ ray logging to strata and lithologic discrimination.

Key words: wavelet transform; multi-resolution analysis; γ ray logging