

# 海洋拖曳式 $\gamma$ 能谱仪在渤海的应用

侯胜利<sup>1,2</sup>, 刘海生<sup>3</sup>, 王南萍<sup>1,2</sup>

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室和地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083
2. 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083
3. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084

**摘要:** 为了加快我国海洋矿产资源勘探与开发, 研制了中国第一台海底拖曳式多道  $\gamma$  射线能谱仪, 并在渤海地区进行了初次用于勘查油气田的测量试验, 结果表明: 仪器可以在现场测量海底沉积物、岩石等的天然放射性核素铀、钍、钾( $^{40}\text{K}$ )的含量, 在已知油气田上方放射性核素的含量出现相对低值异常, 本方法具有现场、快速和经济的特点。

**关键词:** 海洋  $\gamma$  能谱仪; 测量技术; 数据处理; 渤海; 油气田。

中图分类号: P631.6

文章编号: 1000-2383(2007)04-0528-05

收稿日期: 2007-04-12

## The Application of the Marine Towed Gamma-Ray Spectrometer in Bohai Ocean

HOU Sheng-li<sup>1,2</sup>, LIU Hai-sheng<sup>3</sup>, WANG Nan-ping<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources; Geo-detection Laboratory of the Ministry of Education, Beijing 100083, China
2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
3. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract:** In order to speed up the marine mineral exploration of China, the first seabed towed gamma-ray spectrometer was developed and it was tested in Bohai Ocean for oil exploration for the first time. The results show that the concentration of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  of rocks and unconsolidated sediments on the sea floor can be acquired in-site. There is a relative low abnormality in the known oil field. It is a rapid and cheap in-site method to explore the marine resource.

**Key words:** marine gamma-ray spectrometer; measuring technique; data processing; Bohai Ocean; oil and gas field.

海洋放射性测量可以追溯到 20 世纪 50 年代后期, 前苏联最早开始这类仪器的研制与应用, 其后许多国家包括美国、英国、比利时、加拿大、丹麦、法国、德国、日本、荷兰、挪威等也先后开展了这方面的研究。国际原子能机构(IAEA)设在摩纳哥的海洋环境实验室也一直继续这方面的研究和应用。目前国外已研制出以碘化钠晶体或高纯锗为探测器具有 1024 道或更高道数的海底  $\gamma$  射线能谱仪(Povinec, *et al.*, 1996), 进行现场  $\gamma$  射线能谱测量, 得到海洋沉积物或岩石铀、钍、钾的含量。海洋放射性测量已经应用于海洋地质填图、矿产勘查、沉积物运移研究和一些环境应用, 包括放射性废弃物处置和深埋评价及核武器试验对海洋环境影响等(Jones, 2001)。

在国内, 由于在海底进行现场放射性测量对仪器及其方法技术要求较高, 一直未开展这方面工作, 而我国是一个具有 300 多万平方公里领海的国家, 海洋中蕴藏着丰富的国民经济急需的矿产资源。国外的实际应用证明, 海洋现场放射性测量是一种经济、快速的测量方法, 为了给我国海洋矿产资源调查和开发提供一快速、经济的手段, 在国家海洋“863”项目的资助下, 中国地质大学(北京)研制成功了我国第一台海底拖曳式多道  $\gamma$  射线能谱仪, 达到了国外发达国家仪器水平, 并在渤海湾进行了现场实际测量, 首次在现场取得了我国海底放射性核素铀、钍、钾的数据。本文主要介绍我国第一台海底拖曳式多道  $\gamma$  能谱仪和测量方法技术及其在渤海地区的实际应用。

基金项目: 国家 863 计划项目(No. 820-03-01); 北京市重点学科“地球探测与信息技术(XK104910598)”资助。

作者简介: 侯胜利(1966—), 男, 博士, 主要从事放射性测量的教学与科研工作。E-mail: wlhou@cgub.edu.cn

# 1 $\gamma$ 能谱测量的基本原理

$\gamma$  能谱测量是通过记录分析天然放射性核素产生的  $\gamma$  射线谱线特征求取各核素的含量的。自然界主要的天然放射性核素是铀系、钍系及不成系列的钾-40, 它们能够放射出自己特有的不同能量的  $\gamma$  射线, 海底  $\gamma$  能谱仪通过测量海底沉积物、岩石等产生的  $\gamma$  射线能谱, 并对其进行谱线分析就可以获得铀、钍、钾的含量信息(图 1)。

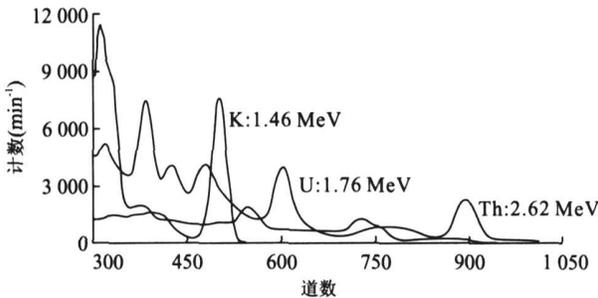


图 1 铀、钍、钾( $^{40}\text{K}$ )的  $\gamma$  射线能谱曲线  
Fig. 1 The gamma-ray spectra of U, Th,  $^{40}\text{K}$

铀系、钍系及钾-40 的  $\gamma$  射线能谱具有明显区别(章晔等, 1992), 选择 3 个不同能量的  $\gamma$  射线分别代表对应的 3 个核素, 在测量谱线上求取这 3 个  $\gamma$  射线能量峰的净面积, 带入下列方程组:

$$\begin{cases} N_K = a_{11} \cdot C_K + a_{12} \cdot C_U + a_{13} \cdot C_{Th} \\ N_U = a_{21} \cdot C_K + a_{22} \cdot C_U + a_{23} \cdot C_{Th} \\ N_{Th} = a_{31} \cdot C_K + a_{32} \cdot C_U + a_{33} \cdot C_{Th} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $N_K$ 、 $N_U$ 、 $N_{Th}$  分别表示在测量谱线上选取的代表钾( $^{40}\text{K}$ )、铀、钍的特征能量段的净面积计数率(扣除环境及仪器本底), 单位: 计数/秒(cps);  $C_K$ 、 $C_U$ 、 $C_{Th}$  分别表示被测对象中钾( $^{40}\text{K}$ )、铀、钍的含量, 待求未知量; 系数  $a_{ij}$  ( $i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$ ) 分别表示单位含量的钾( $^{40}\text{K}$ )、铀、钍在钾( $^{40}\text{K}$ )、铀、钍特征能量段贡献的计数率, 单位: (cps)/单位含量; 可通过仪器标定求得, 为已知量。

通过求解方程组(1), 可求得测量对象钾( $^{40}\text{K}$ )、铀、钍的含量。

# 2 海底 $\gamma$ 能谱测量的探测系统

海底  $\gamma$  能谱测量系统的仪器硬件主要包括两大部分, 在海底拖曳的水下部分和位于船上的水上部

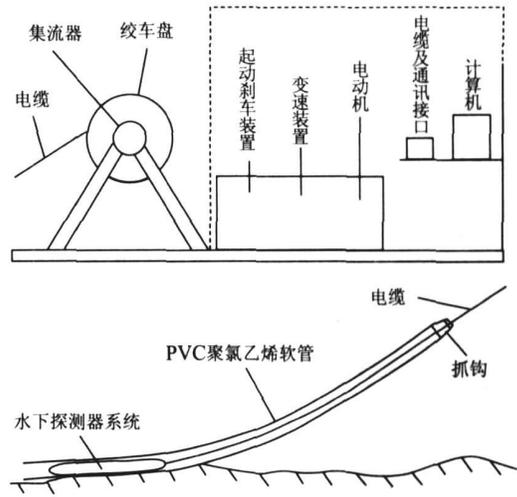


图 2 海洋  $\gamma$  能谱测量系统整体结构示意图  
Fig. 2 The sketch map of the marine gamma-ray spectrometer

分。水下部分是用来探测海底沉积物中放射性核素产生的  $\gamma$  射线, 并将其转换成数字信号, 形成谱数据文件, 然后经过长电缆传输给水上部分, 水下部分主要包括: 探测器、信号处理系统(1 024 道多道分析器)、数据通讯系统、PVC 聚氯乙烯防护套; 水上部分实现对拖引水下部分电缆的收放控制, 对水下部分进行控制测量, 并接收和处理经过长电缆传输上来的  $\gamma$  射线谱数据文件。主要包括: 拖曳和传输用的电缆、集流器、绞车盘、刹车控制装置、变速装置(变速箱)、提供动力的电动机、电源及通讯接口和计算机。图 2 为海洋  $\gamma$  能谱测量系统整体结构示意图。

# 3 海上测量方法技术

油气田上方放射性异常一般比较微弱(Saunders *et al.*, 1987), 要在现场测量中发现和采集这种异常存在比较大的难度, 因此一方面要求在仪器设计上努力提高仪器的测量精度, 在硬件上能够满足测量微弱放射性异常要求, 另一方面在实际海上测量时要使采集数据过程的各个环节满足测量精度要求。

## 3.1 测量船速控制

测量中船的运行速度对测量结果存在比较大的影响, 船速越慢, 船在相同距离上运行的时间越长, 测量精度相应提高。由于这次试验是国内第一次, 也是世界上第一次在已知油气区进行的现场  $\gamma$  能谱测量勘探油气田的试验, 没有实际测量经验, 因此采用了使船保持最慢的速度运行, 即 3.5 节/h, 以保证测

量结果的精度。

另外,为了试验船速对测量结果的影响,在其中一条测线上分别进行了两个船速的测量试验,分别是 3.5 节/h 和 5 节/h。

### 3.2 电缆绞车的操作控制

要确保探测器部分在测量过程中与海底尽量保持恒定的接触,主要通过绞车收放电缆来实现,下放电缆的长度与海水深度和船速有关,当水深或船速发生变化时,要及时操作绞车调节电缆的长度,以保持合适的拖引状态。由于探测器总是在船后几十米至上百米,水深的变化可根据船上水深测量装置给出的数据大致估计出来,经过计算,下放电缆长度约为水深的 3 至 5 倍。在测量过程中尽量保持船速的恒定,当不得以改变船速时,下放电缆的长度必须随之改变,船速减慢,需要减小下放电缆的长度,船速加快,应适当增加下放电缆的长度。

### 3.3 计算机屏幕监视水下探测器

测量系统的探测器部分是否与海底保持接触状态,是海洋现场放射性测量能否取得成功的关键,海水会对放射性核素产生的  $\gamma$  射线造成明显衰减,特别是对低能  $\gamma$  射线衰减作用更为明显。因此仪器测量结果一方面反映了海底沉积物放射性核素含量的高低变化,另一方面还会受到探测器部分与海底接触状态的影响。

为了实现实时监视仪器探测器在水下与海底的接触情况,专门设计编制了“实时监视”程序模块,在进行连续测量时自动调用“实时监视”程序模块,如图 3 所示,“实时监视”模块能够将测量点的总道计数高低以曲线图的形式在计算机屏幕的“实时监视”窗口显示出来,当仪器探测器与海底之间距离发

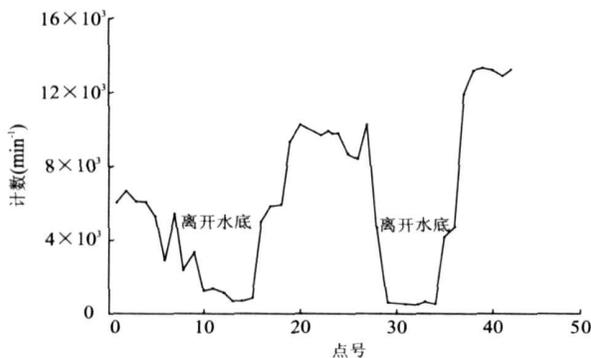


图 3 计算机屏幕监视探测器与海底接触状态

Fig. 3 The state of detector with sea-bed is monitored by computer

生变化时,由于海水对  $\gamma$  射线的衰减作用,使测点总道计数变化能够反映仪器探测器与海底之间的接触状态,当仪器探测器部分在海底正常移动时,监视窗口的总道计数曲线变化平缓,数值较大,而一旦仪器探测器离开海底,监视窗口的总道计数曲线会急剧“下跳”,数值急剧减小,因此根据实时监视窗口曲线的形态变化,可以及时了解水下探测器的情况,及时调整水下电缆长度,保证探测器与海底良好接触。

## 4 海洋 $\gamma$ 能谱测量的数据处理与成果解释

### 4.1 海洋 $\gamma$ 能谱测量的数据处理

海洋水下  $\gamma$  能谱仪测量记录的是每个采样点 1024 道计数,以数据文件的形式储存在磁盘上,因此要将这些数据进行处理,最终计算出每一采样点的钾、铀、钍含量和总道的计数率。这些任务主要通过计算机数据处理程序来完成,首先打开存放每条测线测量结果的数据文件,调用稳谱程序,进行稳谱处理,然后调用含量计算程序模块,自动进行各点的含量计算,并将计算结果存放在数据文件中。

海洋水下  $\gamma$  能谱仪在海上测量时,设置测量时间为 1 min,即连续测量每分钟记录一条谱线,每条谱线对应一测量起始时间;在仪器测量期间,船上差分 GPS 卫星定位测量系统,记录船的运行路线,每 100 m 记录一个点位坐标,每一点位坐标对应一时间,资料整理是将  $\gamma$  能谱仪记录的每点测量谱线与船上 GPS 定位系统记录的点位坐标对应起来。

将经过上述处理整理的数据利用计算机绘图软件进行成图,分别绘出 5 条测线的钾、铀、钍含量及总道计数率剖面曲线图。

### 4.2 成果解释

4.2.1 试验区石油地质概况 渤中(即渤海中部)凹陷试验区内含有两个性质不同的区块:含油区块 BZ-25 深浅均含油,1 500 ~ 3 000 多米;含气区块 BZ-29 埋藏较浅,约 1 500 多米。该区域是海洋石油总公司在渤海工作的重点地区。

4.2.2 成果解释 海洋  $\gamma$  能谱测量数据经数据处理和资料整理后,绘制出海洋  $\gamma$  能谱测量剖面曲线图:图 4 图 5 分别为试验区测线 L4、L5 的海洋  $\gamma$  能谱测量成果解释曲线图。根据已知石油地质资料、测井及其它资料,对海洋  $\gamma$  能谱测量结果进行分析解释。

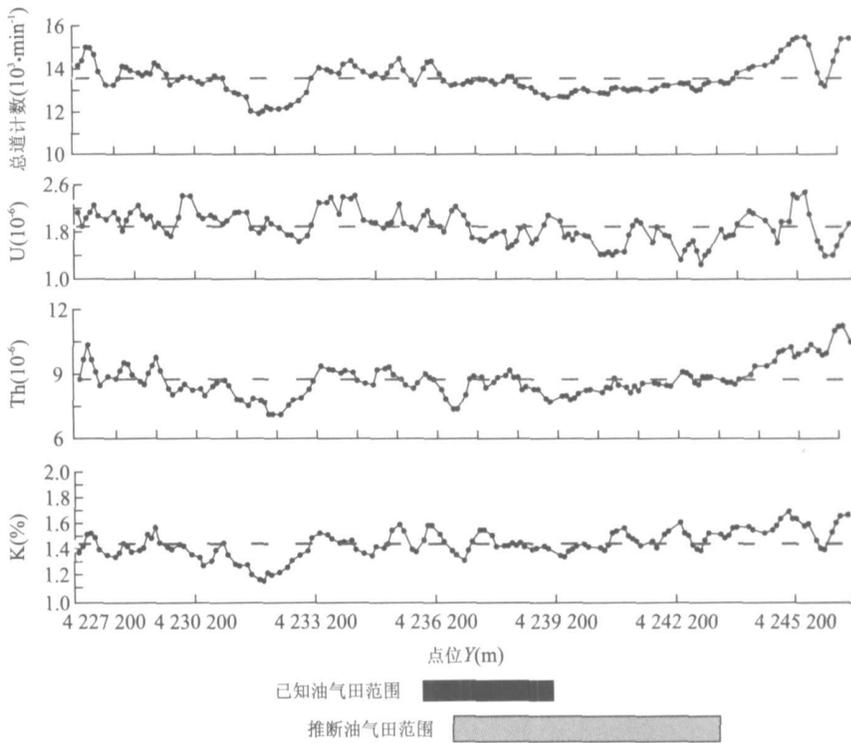


图 4 L4 线海洋  $\gamma$  能谱测量成果解释曲线

Fig. 4 The result curve of gamma-ray measurement for Line 4

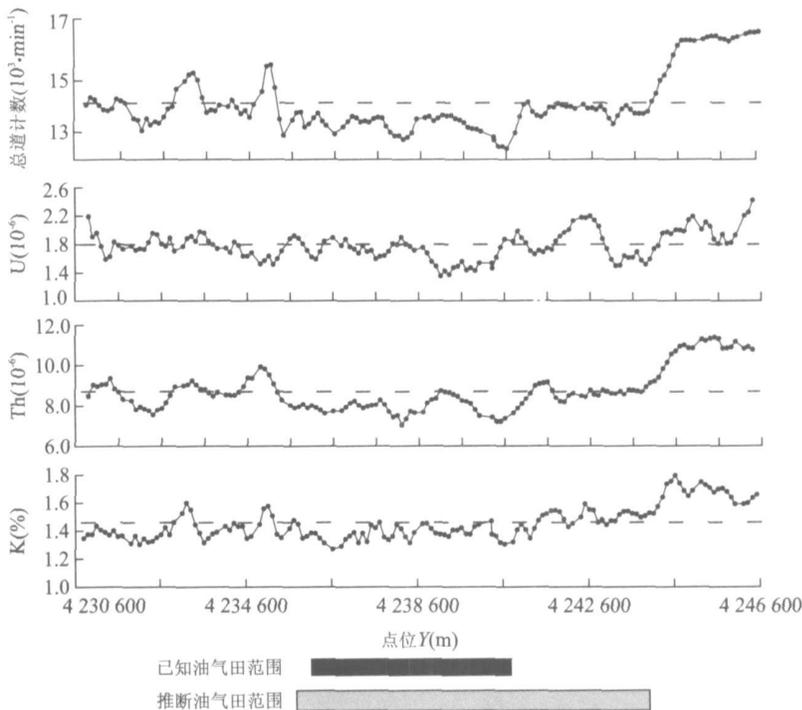


图 5 L5 线海洋  $\gamma$  能谱测量成果解释曲线

Fig. 5 The result curve of gamma-ray measurement for Line 5

测线 L4、L5 方向基本为南北向, L4 线长度 19 km, L5 线长度 16 km, 均穿过一 BZ25-1 井控制 的油气田区. L4 线总道每分钟计数平均为 13 500, 平均当量铀含量、平均当量钍含量分别为  $1.85 \times 10^{-6}$  g/g,  $9.5 \times 10^{-6}$  g/g.

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$10^{-6}$ 和  $8.91 \times 10^{-6}$ , 已知油气田范围基本位于总道计数、铀、钍含量曲线的低值异常区, 而在钾含量剖面曲线图上则没有明显低值异常; 可能由于剖面上左侧断裂构造的影响, 放射性低值区向右偏移, 在已知油气田的右侧仍有低值异常, 在同时进行的浅地层剖面和侧扫声纳解释曲线图的对应位置也有油气显示, 因此推测已知油气田的右侧可能还有油气田存在. 从 L5 线的图 5 看, 已知油气田也位于  $\gamma$  能谱测量的低值异常区, 总道计数、铀、钍、钾的含量均显示低值异常, 与已知油气田对应较好, 低值异常范围比已知油气田稍大, 同 L4 线的相似, 低值异常的右边界比已知油气田靠右, 说明已知油气田的右侧仍是有利的油气田勘探区.

从几条剖面的试验结果看, 海洋油气田上方也存在放射性异常, 并与陆上油气田上方放射性异常形态一致, 即在油气田上方出现相对低值异常(王平和熊盛清, 1997).

## 5 结论

现场海洋  $\gamma$  能谱测量是一种快速、经济的海洋地球物理勘探方法. 新研制的海洋  $\gamma$  能谱仪在渤海的初步试验证明海洋  $\gamma$  能谱测量可以快速测量海底沉积物、岩石的放射性核素铀、钍、钾( $^{40}\text{K}$ )的含量, 在已知油气田上方也测到与陆地油气田相似的低值放射性异常, 仪器已经达到国外同类仪器的先进水平.

国外的应用实例说明海洋  $\gamma$  能谱测量不但可以应用于海洋地质矿产的勘查, 也可应用于海洋工程地质调查和环境放射性污染监测. 我国拥有辽阔的海域, 因此海洋放射性测量在我国具有广阔的应用前景.

## References

- Jones, D. G., 2001. Development and application of marine gamma-ray measurements: A review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 53: 313–333.
- Povinec P. P., Osvath, I., Baxater, M. S. 1996. Underwater gamma-spectrometry with HpGe and NaI(Tl) Detectors. *Appl. Radiat. Isot.*, 47: 1127–1133.
- Saunders D. F., Terry, S. A., Thompson, C. K., 1987. Test of natural uranium resource evaluation gamma-ray spectral data in petroleum reconnaissance. *Geophysics*, 52: 1547–1556.
- Wang P., Xiong S. Q., 1997. The theory and application of radioactive exploration over oil and gas field. Geological Publishing House, Beijing.
- Zhang Y., Hua R. Z., Shi, B.S., 1992. Radioactive method exploration. Nuclear Energy Press, Beijing.

## 附中文参考文献

- 王平, 熊盛清, 1997. 油气田放射性勘查原理方法与应用. 北京: 地质出版社.
- 章晔, 华荣洲, 石柏慎, 1992. 放射性方法勘查. 北京: 原子能出版社.