

· 讨论 ·

# 有关自然伽马能谱测井在储层 预测中的应用讨论

张景廉\* 刘全新 梁秀文 王斌婷

(中国石油天然气集团公司西北地质研究所)

## 摘 要

张景廉, 刘全新, 梁秀文, 王斌婷: 有关自然伽马能谱测井在储层预测中的应用讨论 石油地球物理勘探, 2000, 35(3): 395~ 400

当前通用的自然伽马测井方法无法区分总伽马计数中U、Th、K各自的贡献。当地层中含有钍矿物(如锆石英、独居石、褐帘石)、钾长石及钾矿时, $^{232}\text{Th}$ 、 $^{40}\text{K}$ 同位素对伽马计数的贡献不可忽略。文中通过实例强调了伽马能谱测井的必要性。在今后,建议能谱测井应与其它测井方法配合使用。

主题词 储层预测 伽马测井 伽马能谱测井

## ABSTRACT

Zhang Jinglian, Liu Quanxin, Liang Xiuwen and Wang Binting: Discussion on the application of natural gamma spectrometry log to reservoir prediction. OGP, 2000, 35(3): 395~ 400

The present natural gamma ray log fails to ascertain the respective contributions of U, Th and K elements to the total gamma values. When there exist thorium minerals (zircon sand, turnerite, tautolite), potash feldspar and potassium ore, the contributions of  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  isotopes to total gamma values are not negligible. Real examples prove the necessity of gamma spectrometry log. It should be used together with other log methods in the days to come.

**Subject terms:** reservoir prediction, gamma ray log, gamma spectrometry log

## 引 言

随着油气勘探与开发的不断发展,地震勘探在储层预测方面发挥了应有的作用。提高勘探精度是地球物理学家努力的方向,而约束反演的多解性则是大家关切的热点之一<sup>[1]~ [3]</sup>。

鉴于地震资料精度的限制,地球物理学家寄希望于测井资料的约束,而自然伽马测井在确定地层岩性(砂、泥岩)和孔隙率方面有较好的响应,在储层预测中常被用作主要的方法。

\* Zhang Jinglian, Northwest Geology Research Institute, Chengguan District, Lanzhou City, Gansu Province, 730020, China

本文于1999年6月15日收到,修改稿于同年12月28日收到。

本文对目前常用的自然伽马测井方法中存在的问题作一讨论。

## 自然伽马测井方法的原理及存在的问题

在自然伽马测井中,通常人们认为,若地层的自然放射性强度主要与地层中的泥质含量有关,而与其它岩石、矿物成分无关,则可按下述公式计算泥岩的体积<sup>[4]</sup>

$$V_{sh} = \frac{2^{C\Delta G} - 1}{2^C - 1} \quad \Delta G = \frac{GR - G_{min}}{G_{max} - G_{min}}$$

式中: GR 为自然伽马测井值;  $G_{min}$  为纯砂岩的自然伽马极小值;  $G_{max}$  为纯泥岩的自然伽马极大值; C 为经验系数,根据取心分析资料的天然伽马测井值按指数函数统计而确定。用自然伽马测井求泥质含量时,通常把地层中放射性物质都判别为泥质;因此,当其它岩石也具有放射性时,处理结果便会夸大泥质所占的体积(且没有考虑由于放射性矿物含量不均一所造成的误差)<sup>[5]</sup>。这主要表现在以下方面:

(1) 完全忽略了放射性元素 Th 和 K 对自然伽马的贡献。若一个盆地在沉降过程中,其蚀源区有燕山期花岗岩(在中国中、新生代盆地中常出现),这种花岗岩大多含钍的副矿物(如锆石英、独居石、褐帘石等),这些副矿物常与长石、石英等一起存在于砂岩中,它们对自然伽马的贡献是不容忽视的。另外,这种花岗岩还常含有一定数量的钾长石, $^{40}\text{K}$  对自然伽马的贡献同样不可忽略。此外,若盆地深部有卤水加入形成钾盐矿,则这种钾盐也可造成自然伽马异常。

(2) 关于放射性铀,它不仅仅以  $\text{UO}_2^{2+}$  形式被黏土矿物所吸附而在泥、页岩中富集成自然伽马异常,若物理化学条件合适,即在恰当的 pH、Eh 条件下,U 可在砂岩体中形成 U 异常、U 矿化、U 矿点乃至形成 U 矿床。美国西部有大量的这种砂岩型铀矿床,占全美国铀矿储量的绝大部分。中国内蒙某地白垩系砂岩中发现了一个万吨级的大型放射性铀矿床。上述情况在自然伽马测井中极易造成假象。另外,红、褐色泥页岩的铀含量不高,自然伽马强度显然很低。

(3) 就黏土矿物而言,它们对  $\text{UO}_2^{2+}$  的吸附能力是大相径庭的<sup>[13]</sup>,吸附能力最大的是斑脱岩,然后是 Na 蒙脱石、Ca 蒙脱石、Mg 蒙脱石、K 蒙脱石、绿黏土、蓝黏土、伊利石、NaK 高岭土、Ca 高岭土。深入研究还表明,这种吸附作用还与介质的 pH 值有关,并与 pH 值引起的零点电荷(ZPC)有关<sup>[14]</sup>。

上述情况显然被当今的大多数地球物理学家忽略了。要解决这些问题,除了作详细的地质、地球化学研究外,还要对井柱作自然伽马能谱测井,区分 U、Th、K 对自然伽马计数的贡献<sup>[4]~[12]</sup>。下面我们简述伽马能谱测井的必要性及一些实例。

## 自然伽马能谱测井的必要性

### 铀、钍、钾对总伽马强度的贡献

众所周知,岩石的自然放射性主要由  $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$  开头的两个放射系和放射性核素决定的。核衰变放出的伽马光子具有特定的能量,由于能量小于 100keV 的光子在穿透地层和仪器外壳时被大量吸收,它们对自然伽马测井读数的影响可以忽略不计,因而只需注意能量大于 100keV 的伽马辐射。

表 1 给出了钍系、铀系和钾在平衡状态下发射的伽马射线能谱成分(能量小于 100k eV 的谱线不包括在内)。为了计算每克岩石每秒由各种元素的放射性同位素发射的伽马光子总数,即岩石的自然伽马放射性系数  $A$ , 可以采用下述近似公式

$$A = A_U W_U + A_{Th} W_{Th} + A_K W_K$$

式中:  $A_U$ 、 $A_{Th}$  和  $A_K$  分别为 U、Th、K 三种元素每克物质每秒放出的伽马光子数, 即它们的自然伽马放射性系数(也称比放射性);  $W_U$ 、 $W_{Th}$  和  $W_K$  分别为三种元素的重量百分含量。这里忽略了其它放射性核素的贡献。表 2 列出了几种自然放射性物质在平衡状态下的特征参数。

表 1 铀系、钍系和钾的伽马射线能谱成分

能量间隔 M eV	铀 系		钍 系		钾	
	每次衰变产生的光子数	相对强度 %	每次衰变产生的光子数	相对强度 %	每次衰变产生的光子数	相对强度 %
0.1~0.3	0.38	17	0.61	24	0.11	100
0.3~0.5	0.43	19	0.27	11		
0.5~0.7	0.52	23	0.39	16		
0.7~0.9	0.12	5	0.23	9		
0.9~1.1	0.06	3	0.38	15		
1.1~1.3	0.28	13				
1.3~1.5	0.09	4	0.03	1		
1.5~1.7	0.05	2	0.21	9		
1.7~1.9	0.22	10	0.03	1		
1.9~2.1						
2.1~2.3	0.07	3			0.11	100
2.3~2.5	0.02	1				
2.5~2.7			0.35	14		
总计	2.24	100	2.51	100	0.11	100

表 2 几种自然放射性物质的特征参数

元素	每克元素每秒衰变次数	混合物在每次衰变产生的光子数	每克元素每秒产生的光子数	平均光子能量 M eV
U	$1.23 \times 10^4$	2.24	$2.8 \times 10^4$	0.80
Th	$4.02 \times 10^3$	2.51	$1.0 \times 10^4$	0.93
K	31.3	0.11	3.4	1.46
Ra	$3.63 \times 10^{10}$	2.20	$8.0 \times 10^{10}$	0.81

若只考虑能量大于 100k eV 的光子, 且放射系处于平衡状态, 可以算出:  $A_U = 2.8 \times 10^4$  光子/(s · g);  $A_{Th} = 1.0 \times 10^4$  光子/(s · g);  $A_K = 3.4$  光子/(s · g)。

U、Th、K 在不同岩石中含量不同, 以岩浆岩为例, U 在其中的含量为  $(0.6 \sim 4.0) \times 10^{-6}$ , Th 为  $(2.0 \sim 13.0) \times 10^{-6}$ , Th、U 含量的比值为 3~4; K 在岩浆岩中的含量为 1.4%~2.6%, K、U 含量的比值约为  $10^3$ 。

从上述极简单的分析中可以看出, 与 U 相比, Th、K 的放射性的确不可忽略不计, 特别是当碎屑矿物中含有大量钍矿物(如锆石英、独居石、褐帘石等)以及大量的钾矿物时更是如此。

自然伽马能谱测井的应用

当应用能谱测井时, 能发现某些仅用自然伽马测井所不能解决的问题。

高放射性铀砂岩储层

砂岩储层通常是低放射性地层,但当地层中含有高放射性矿物(如锆石英、独居石、褐帘石等)时,砂岩的U、Th、K含量也能显著增加。图1是高放射性砂岩的能谱测井曲线。

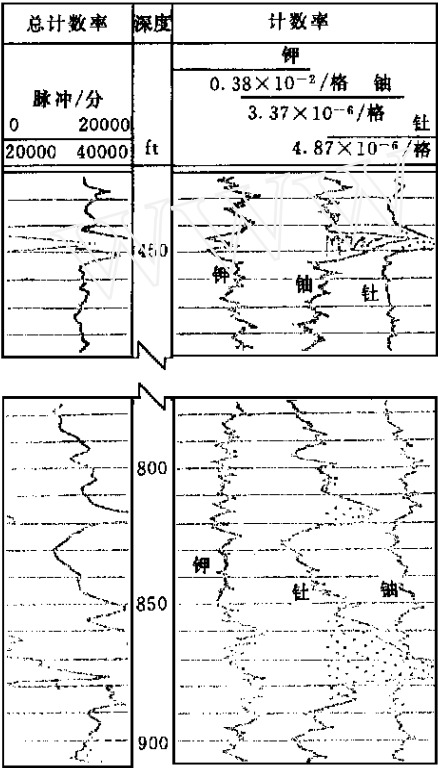


图1 高放射性砂岩的伽马能谱测井曲线<sup>[5]</sup>

从图1可以看出,深度为420~490ft的地层是由膨润土和凝灰岩薄层形成的高放射性层段,其特点是K含量低而U和Th含量高,尤其是Th含量很高。而深度为775~900ft的几段高放射性地层为砂岩,其特点与上面的那段高放射性地层不同,只有U含量很高而K和Th含量都低。

图2是另一个实例,该图是南德克萨斯白垩系San Niguel砂岩的自然伽马能谱曲线。该砂岩层顶部有一段自然伽马总计数率很高,只根据这条曲线划出的砂岩厚度较小,因其顶部是被当作泥岩扣除的。而用钾、铀、钍曲线作全面分析,才能看到扣除的高放射性部分是一个高含铀的低钾、低钍带,它仍是砂岩的一部分,钾和钍曲线给出的厚度才是真实的。岩心和试油资料都证明,该区有许多井皆能看到高含铀砂岩储层。

上述这些情况在美国、尼日利亚、英国北海等地均遇到不少,我国也应注意这类地层的研究。

高放射性碳酸盐岩储层<sup>[11]</sup>

高放射性碳酸盐岩储层分布广泛,在我国和国外都是石油测井常遇到的一种储层,也是老油田在寻找初期评价时漏失掉的储层的重要研究目标之一。我国华北地区的碳酸盐岩储层中高放射性地层占很大比例。在勘探初期,曾认为储层的自然伽马测井值应小于22API单位,高于这一水平的就定为非储层。但后来发现,并非所有高放射性地层都是泥质层,取心资料证明有些高放射性地层是碳酸盐岩储油层,其高放射性只是因U含量高造成的,而与泥质含量无关。

图3是在一口具有工业油流的井中测得的伽马能谱测井曲线。在3200~3222m深度段有三个高自然伽马层,其中只有3209~3212m这一层为泥质层,它的U、Th、K含量都高,深三侧向、声波时差和中子伽马曲线均显示为标准的泥岩。而深度为3202~3207m和3217~3221m的另两套地层,其测井曲线反映为石灰岩,符合储层标准,而放射性元素含量是高铀、低钍、低钾。这同样证明了U含量与地层的泥质含量并无必然联系。对两个高放射性储层(3202.6~3203m和3217.4~3220.4m)进行合试,酸化后产油率为61t/d,产水率为14m<sup>3</sup>/d。当使用自然伽马能谱测井后,在地质和测井解释上对高放射性储层的认识获得了一次飞跃。

钾盐矿的识别<sup>[11]</sup>

蒸发岩剖面中会遇到石膏、硬石膏、岩盐、钾岩等化学岩。这些盐岩的形成过程始于浓缩盐水的化学沉淀,矿物成分往往很纯。这些矿物具有固有而稳定的化学和物理特征。只要其化学成分中不含放射性物质,在剖面中就很容易辨认,在总自然伽马计数率和钾、铀、钍曲线上均呈

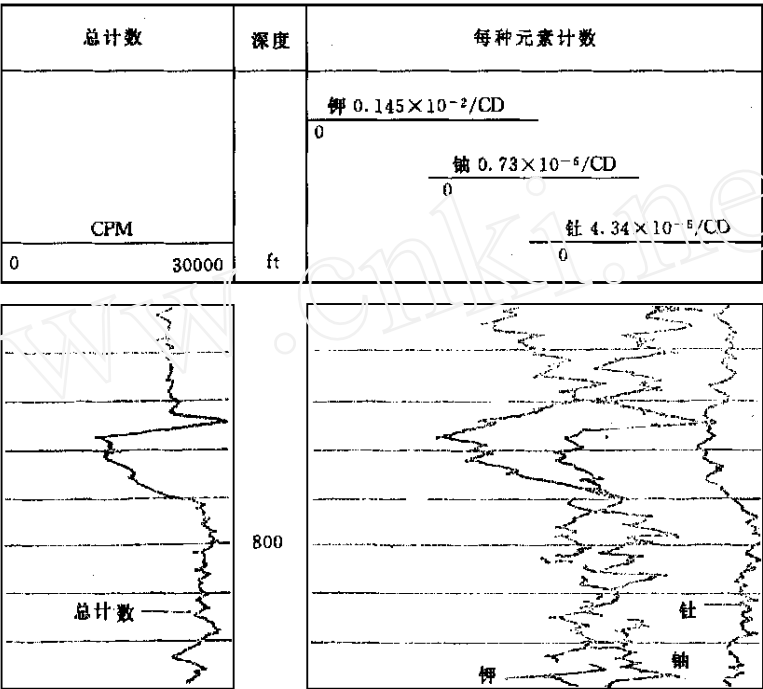


图 2 砂岩内高钍放射性的伽马能谱曲线<sup>[5]</sup>

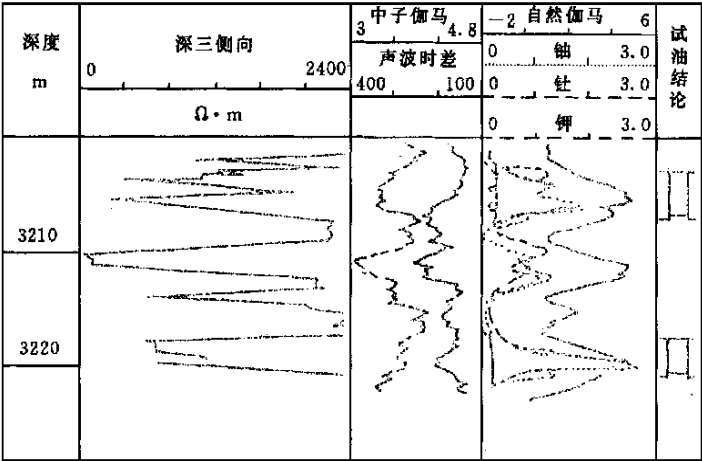


图 3 高放射性碳酸盐岩的伽马能谱测井曲线

图中的钍、钷、钾含量是用岩屑测定的相对值, 中子伽马测井采用条件单位, 声波时差单位为  $\mu s/m$

最低值。唯有钾盐中含放射性元素钾, 用高钾含量和极低钍、钷含量曲线可把钾盐与黏土岩区分开。图 4 为蒸发岩能谱测井曲线, 在大段岩盐中, 可分出页岩和钾盐夹层。

以上几个实例仅是自然伽马能谱测井在油气勘探中的一些应用。此外, 自然伽马能谱测井还被用于研究生油层、寻找页岩储层、识别放射性积垢、求泥质含量等等, 而  $Th/U$  含量比 ( $Th/U$ ) 还可用作研究沉积环境。

由于伽马能谱测井仪价格昂贵、体积较大、测井耗时较长、测速慢 (180m/h), 生产成本也

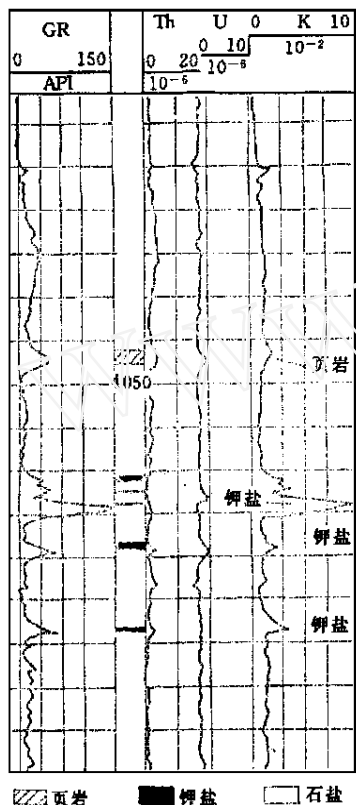


图 4 含有钾盐矿的伽马能谱测井曲线

高,这使得许多生产单位对其望而却步。从前面讨论的有关伽马能谱测井的应用实例来看,这种测井方法可提高测井解释的质量,从而保证储层预测的精度。

## 结 束 语

如前所述,由于种种客观和主观原因,几十年来只重视自然伽马测井,对能谱测井却不研究、不使用;一方面我们在研究新方法、新技术,另一方面对已有的方法(如能谱测井)却熟视无睹,这需引起我们的重视。从前面的实例中可看出,当前通用的自然伽马测井方法无法区分总伽马计数中U、Th、K各自的贡献。在识别高放射性砂岩储层、高放射性碳酸盐岩储层、钾盐矿时会产生误区。因此,建议勘探与开发部门在今后的测井解释中把自然伽马能谱测井与其它测井方法配合使用。

期望文中所谈的问题能对地球物理学家有所启迪,并在今后的勘探工作中从方法论的角度更新地球物理解释原则,即一方面不断研究新技术、新方法,另一方面深刻挖掘已有技术、方法的潜力,提高勘探精度。

西北大学地质系的马劲风博士与作者作了十分有益的书信讨论,并提出了很好的建议,特致谢意!

## 参 考 文 献

- 1 李庆忠 论地震约束反演的策略 石油地球物理勘探, 1998, 33(4): 134~ 140
- 2 赵圣亮, 马劲风, 谢言光等 复杂地质条件下的地震测井资料综合约束反演 西北大学学报(自然科学版), 1997, 27(5): 417~ 421
- 3 马劲风, 王学平, 钟俊等 测井资料约束的波阻抗反演中的多解性问题 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 7~ 10
- 4 欧阳健, 曾文冲 测井地层分析与油气评价, 石油工业出版社, 1987, 15, 17, 96~ 98
- 5 黄隆基 放射性测井原理, 石油工业出版社, 1985, 33~ 38, 63
- 6 芳森 B L. 自然伽马、中子的密度测井, 石油工业出版社, 1987, 142~ 151
- 7 德莱赛—阿特拉斯公司著, 尚作源等译 测井与解释技术, 石油工业出版社, 1991, 140~ 158, 315~ 317
- 8 肖慈, 欧阳健, 施发祥等译 测井地质学在油气勘探中的应用, 石油工业出版社, 1991, 191~ 207
- 9 原海涵 石油地球物理测井, 石油工业出版社, 1992, 171~ 221
- 10 马正 油气测井地质学, 中国地质大学出版社(武汉), 1994, 11~ 15
- 11 黄隆基, 首祥云, 王端平 自然伽马能谱测井原理及应用, 石油工业出版社, 1995
- 12 吴三省编译 自然伽马能谱测井译文集, 石油工业出版社, 1988
- 13 张景廉 铀成矿作用、核废物地球化学处理与吸附作用的关系 铀矿地质, 1989, 5(3): 158~ 163
- 14 Giblin AM. The role of clay adsorption of uranium ores in Ferguson J and Goleby A D, eds, Uranium in the Pine Creek Geosyncline, IA EA, 1980, 521~ 529

(本文编辑: 刘勇)

## 作者介绍

**王卫华** 高级工程师, 1952年生, 1976年毕业于江汉石油地质学校物探专业, 1990年在成都地质学院获应用地球物理学硕士学位。先后完成30余项科研课题, 在有关刊物上发表多篇学术论文。现任石油地球物理勘探局副总工程师。

**孙沛勇** 工程师, 1971年生, 1993年毕业于大庆石油学院物探专业, 1996年于石油大学地球科学系获硕士学位。现在石油地球物理勘探局研究院从事科研工作。

**张海江** 1973年生, 1994年毕业于长春地质学院应用地球物理专业, 获学士学位, 1997年获硕士学位。现在北京石油勘探开发科学研究院从事多分辨分析方法在地震勘探中的应用研究, 包括多尺度波动方程正演模拟及偏移成像等方面的工作。

**王西文** 高级工程师, 1956年生, 1982年毕业于西安地质学院, 1987年在该校硕士研究生毕业留校任教, 1989年调入西北石油地质研究所, 1993年去日本作访问学者三个月, 1997年进入中国科学院地球物理所攻读博士学位, 现任西北石油地质研究所综合研究中心副主任。

**詹世凡** 高级工程师, 1962年生, 1983年毕业于西南石油学院地球物理勘探专业, 获学士学位。主要从事野外采集方法及资料解释方法的研究工作。现任石油地球物理勘探局副总工程师。

**戴云** 博士研究生, 1973年生, 1995年毕业于成都理工学院应用地球物理专业, 现正在攻读博士学位。在学习期间, 参加了有关“二维、三维折射波静校正和长波长静校正”方面的科研项目。现主要从事长波长静校正, 二维、三维山地静校正方面的研究工作。

**黄平** 高级工程师, 1964年生, 1991年于西南石油学院获硕士学位。曾参加国家“八五”科技攻关项目、主持“九五”科技攻关项目。现在四川石油管理局研究院从事储层预测方法研究工作。

**赵生斌** 工程师, 1969年生, 1992年毕业于西南石油学院勘查地球物理专业。长期从事地震勘探采集方法研究及地震勘探现场施工管理工作。现在吐哈石油勘探开发指挥部物探公司从事研究工作。

**杨振武** 1966年生, 1989年毕业于江汉石油学院物探系, 获学士学位; 1996年在中国地质大学应用地球物理专业获硕士学位。曾发表论文多篇, 现在江汉石油管理局勘探开发研究院从事综合

地球物理解释工作。

**杨振武** 工程师, 1958年生, 1986年毕业于合肥工业大学计算机软件专业。曾发表论文多篇, 现在新星石油公司西南石油局第二物探大队从事地震资料特殊处理工作。

**何展翔** 高级工程师, 1967年生, 1989年毕业于中国地质大学应用地球物理系, 获硕士学位。现在石油地球物理勘探局地调五处任总工程师。

**季玉新** 高级工程师, 1967年生, 1988年毕业于青岛海洋大学海洋应用地球物理专业。长期从事物探方法和人机交互解释工作站的开发研究工作。现在攻读同济大学电子信息工程专业硕士研究生。并负责胜利石油管理局计算中心方法室的“泥岩裂缝油气藏检测的地震处理方法研究”课题。

**牟中海** 副教授, 1960年生, 1982年毕业于西北大学地质系石油与天然气专业。曾出版专著《地震地层解释方法及应用》、《地质绘图程序集》, 发表论文多篇。现在西南石油学院从事地震资料解释与石油地质的科研与教学工作。

**张占松** 讲师, 1965年生, 1990年毕业于江汉石油学院应用地球物理专业, 获硕士学位。主要从事测井资料地质分析、井间储层预测、计算机在地质中的应用以及层序地层学的研究工作。发表论文多篇。现为中国地质大学在读博士生。

**张雪建** 工程师, 1992年毕业于南开大学数学系数理统计专业, 现在大港油田集团公司地质研究中心从事地震资料解释方法和软件开发工作。

**陈遵德** 副教授, 1956年生, 1986年毕业于中国地质大学应用地球物理专业, 获工学硕士学位; 现在成都理工大学攻读博士学位。长期从事地震勘探数据处理与解释的教学工作, 曾发表论文多篇。现负责国家自然科学基金和湖北省自然科学基金课题的研究工作。

**徐建斌** 高级工程师, 1961年生, 1984年毕业于西南石油学院勘探系, 1995年获硕士学位。1985年至1999年在四川石油管理局地质调查处研究所从事地震勘探科研工作, 现在处科技科从事科技成果管理工作。

**张景廉** 高级工程师, 1941年生, 1964年毕业于中国科学技术大学地球化学专业。曾从事铀矿地球化学热力学、核废物地质处置等研究。现在西北石油地质研究所从事油气地球化学及油气无机成因的研究与探索。