

矿化度对流体核磁共振性质影响的实验研究*

翁爱华 李舟波 王伟男 姜亦忠
(吉林大学地球物理系) (大庆石油管理局测井公司)

摘 要

翁爱华, 李舟波, 王伟男等 矿化度对流体核磁共振性质影响的实验研究 测井技术, 2001, 25(6): 401~ 404

横向弛豫时间 T_2 、含氢指数 HI 和扩散系数 D 是核磁共振测井技术中重要的参数, 通过实验研究发现矿化类型和矿化度对它们的影响是不同的, 具体的变化规律是: 扩散系数随矿化度的增加而减小, 但矿化类型不同, 扩散系数受矿化度的影响不同, 受 $CaCl_2$ 溶液的影响很小, 而受 $NaCl$ 和 KCl 溶液影响相对大; 自由流体的横向弛豫时间 T_2 随矿化度变化, 对于 $CaCl_2$ 溶液, T_2 随矿化度的增加而减小, 而对 $NaCl$ 和 KCl 溶液, T_2 随矿化度的增加而增大; 含氢指数 HI 随矿化度的增加而减小, $CaCl_2$ 溶液相对 $NaCl$ 和 KCl 溶液受到的影响要小得多。

主题词: 流体 核磁共振性质 矿化度 影响 实验研究

ABSTRACT

Weng A ihua, Li Zhoubo, Wang Weinan, et al. Experiments in Salinity Effect on Fluid Nuclear Magnetic Resonance Property. WLT, 2001, 25(6): 401- 404

The spin-spin relaxation time T_2 , hydrogen index HI and diffusion efficient D are the important parameters in nuclear magnetic resonance (NMR) logging. The experiment illustrated that the types of solution and salinities have different influence on the parameters. Three conclusions could be made from the experimented results. Firstly, diffusion coefficient of free fluid decreases as the salinity increases. But the influence depends on solution types. Secondly, hydrogen index of free fluid decreases with the increase of salinity. But $CaCl_2$ has relatively less effect on it. Lastly, T_2 of free fluid varies with different salinities and solution types. For $NaCl$ and KCl solution, the T_2 increases as the salinity increases. But the T_2 of $CaCl_2$ decreases when the salinity increases.

Subject Terms: fluid NMR property salinity influence experimental study

引 言

横向弛豫时间常数 T_2 、含氢指数 HI 与扩散系数 D 是核磁共振 (NMR) 测井技术中重要的参数, 对它们进行实验研究是进行 NMR 测井测量参数设置^[1, 2, 3]、数据处理解释和形成新的测井技术^[4]的物理基础。研究发现影响流体 NMR 特性的因素很多, 如温度、矿化度、压力等。由于储层不同, 地层水的矿化度和矿化类型也会不同, 观测到的核磁共振性质可能不同^[5~8]。但综合对比尚没有

太多的实验工作。实验主要目的是了解不同水型与矿化度对观测的横向弛豫时间 T_2 、扩散系数 D 和含氢指数 HI 的影响, 综合分析砂样颗粒粒径与矿化度对 T_2 与 D 的综合影响。

实验原理

实验主要研究矿化度和矿化类型对水溶液 NMR 特性的影响, 主要测量 3 个参数, 即 T_2 、 D 和 HI 。下面简单介绍它们的测量原理。

横向弛豫时间 T_2 测量采用 CPMG 脉冲序列, 稳定磁场均匀。为得到较高的数据质量, CPMG 序列参数的设置非常重要, 这些参数包括回波间隔 T_E 、回波总数 N_E

* 国家自然科学基金 (No.: 49874028) 资助项目

和等待时间 T_w 。实验中对于水样 $T_E = 600 \mu s, N_E = 8 k, T_w = 15 s$, 叠加次数 N_s 为 16 次, 作砂样测量时 $N_s = 64$ 。这样的设置保证完全极化, 同时能够测量到绝大多数慢弛豫组份。叠加次数的选择是足够的, 因为用极限情况 $N_s = 1000$ 次进行对比发现, 两种条件反演出的 T_2 谱形状几乎一致。为得到 T_2 , 对于观测到的 FD 数据主要是指指数拟合处理。对于纯流体, 由于假设为体积弛豫且快速扩散, 弛豫接近单指数, 因此利用单指数拟合求取平均弛豫时间 T_2 和初始强度 M_0 。对于水饱和砂样, 利用多指数拟合获得 T_2 谱分布^[9]。

扩散系数 D 的测量采用标准脉冲梯度场方法 (PFG)^[10]。图 1 是使用的脉冲序列。该脉冲序列由 3 个 90 脉冲和 2 个磁场梯度脉冲组成。第 1 个 90 脉冲将磁化强度转向横截面上。当磁化强度在横截面上时, 受到一个梯度脉冲的作用, 该梯度脉冲宽为 δ , 强度为 g 。这个脉冲标定自旋的位置。当梯度脉冲被使用后, 再用第 2 个 90 脉冲将自旋沿 z 方向转回去。自旋扩散一长时间 Δ 后, 施加第 3 个 90 脉冲, 在等待 τ 后, 第 2 个同样的梯度脉冲被用来标定自旋的位置, 回波产生, 其强度取决于扩散系数 D , 脉冲梯度间隔即扩散时间 Δ , 梯度脉冲矩 δg , 且存在如下关系

$$\log(EchAmp) = (\gamma g)^2 \delta^2 (\Delta - \frac{\delta}{3}) \quad (1)$$

式中, γ 为磁旋比。通常通过改变脉冲宽度 δ 进行一系列的测量, 得到公式 (1) 的最佳回归直线, 该直线的斜率正比于扩散系数 D 。图 2 是观测到的回波衰减信号。

含氢指数 HI 是流体中质子密度与常温条件下同体

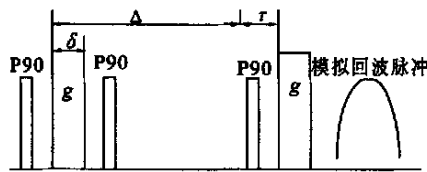


图 1 脉冲梯度场标准序列

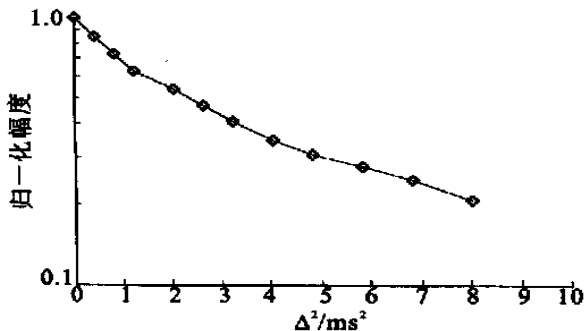


图 2 水样脉冲梯度核磁共振回波衰减曲线

积水的质子密度比值。为了利用 NMR 测井评价孔隙度和饱和度, 必须知道孔隙流体的 HI 。在实验中确定 HI 的方法是通过比较待测样品的 NMR 信号强度与同体积水的 NMR 信号强度比值求取。由于测量的信号强度受仪器采集参数的影响, 要求同一组样品的观测条件保持相对一致。

实验过程

1 材料及准备

实验主要材料为分成不同粒径的砂和 3 种溶质不同矿化度的水溶液。砂样是河砂, 其主要成份为石英, 用不同孔径的筛子将其分为粒径大小不同的 5 组, 具体的孔径分布见表 1。

表 1 砂样粒径分布及编号

| 编号 | F11 | F12 | F13 | F14 | F15 |
|-------|-------|-----|-------|----------|----------|
| 粒径/mm | 2~2.2 | 1~2 | 0.5~1 | 0.25~0.5 | 0.25~0.1 |

筛选好的砂样于沸水中去污后用清水冲洗干净, 烘干后对每种粒径用量杯量取 10 mL 砂样 5 份, 标记后置于恒温箱中待用。

实验对不同矿化度 3 种溶质的水溶液进行, 溶质分别是 NaCl, KCl 和 CaCl₂, 相应每种溶质的矿化度分别为 1.25%, 2.5%, 4.7%, 9.1%, 16.7%。这些水样摇匀后也置恒温箱中待用。

实验过程中, 所有用到的材料都置于同一恒温箱中恒温, 温度设置为 32 ~ 34 °C, 这样与测量仪器的磁体工作温度 35 °C 相当。

2 质量控制

(1) 采用英国 MARAN 公司的最新一代核磁共振仪做均匀场下 T_2 测量, 配合 CROWN 脉冲梯度仪做扩散系数 D 的观测。仪器磁体温度稳定在 (35 ± 0.1) °C。每天测量前用标样进行测量参数校正, 并且同种样品尽量在一天测完。

由于 T_2 和 D 对温度较为敏感, 除保持样品的初始温度与磁体温度相当外, 为避免观测过程中温度变化, 在测量过程中用绝热泡沫包裹。

(2) 多次观测以确保数据质量, 信号进行足量叠加以保证一定信噪比, 同时在观测过程中及时检查数据质量。

实验结果

图 3 给出了观测到的水样单指数横向弛豫时间 T_2

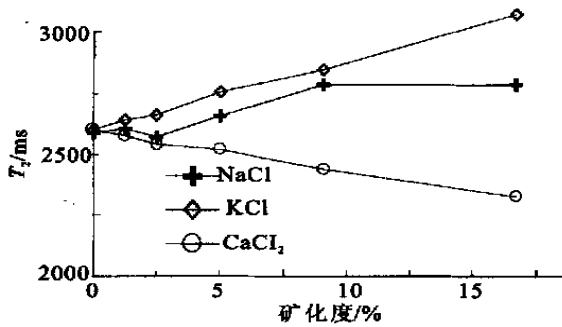


图 3 横向弛豫时间 T_2 与矿化度变化关系

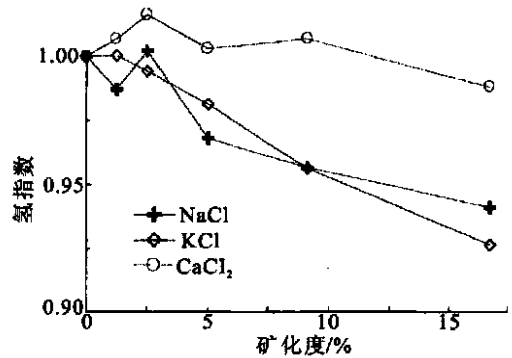


图 5 盐水的含氢指数 HI

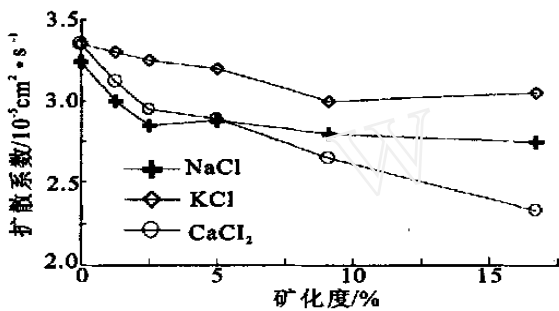


图 4 扩散系数 D 与矿化度 c 的变化关系

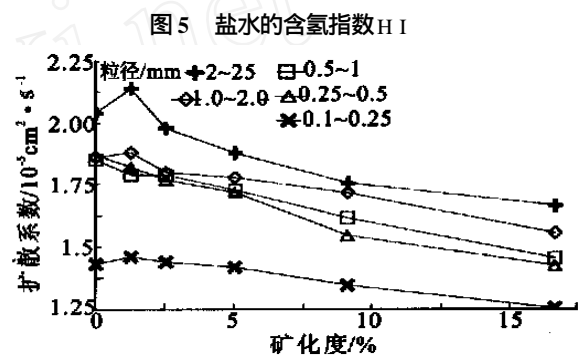


图 6 不同粒径砂样中 NaCl 溶液扩散系数与矿化度的变化关系

与矿化度的变化关系。从图 3 可见, 不同矿化类型与矿化度对 T_2 的影响是不同的, 对于 NaCl 与 KCl, T_2 随矿化度的增加而变大, 而 $CaCl_2$ 的情况则不同, 矿化度增加, T_2 减小。

扩散系数 D 随矿化度的变化情况见图 4。图 4 中扩散系数 D 的单位是 $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ (以下相同)。无论 NaCl, KCl 还是 $CaCl_2$ 溶液, 扩散系数 D 均随矿化度的增加而减小。但对 NaCl 和 KCl, 扩散系数 D 基本不受较大溶液矿化度的影响, 而 $CaCl_2$ 溶液的扩散系数始终受矿化度的影响。

矿化度对含氢指数 HI 的影响见图 5。由图 5 可见, 矿化度较小时含氢指数变化不大, 随矿化度的增加, NaCl 与 KCl 水型的矿化度对含氢指数的影响较大, 而对于 $CaCl_2$ 溶液, 含氢指数受矿化度的影响不大。

不同粒径砂样中流体的扩散系数 D 的变化关系研究更有意义。在有限孔隙空间中, 流体分子的扩散会表现为限制扩散, 即扩散系数 D 随孔隙大小的减小而减小^[11]。图 6 和图 7 示意出表 1 中不同粒径砂样被不同矿化度 NaCl 溶液饱和后测量得到的扩散系数变化规律。矿化度对不同粒径的砂样中 NaCl 溶液的扩散系数 D 影响不同, 总体上扩散系数随矿化度变大而减小。但不同粒径减小速度不同。粒径越大, 砂样孔隙越大, 扩散系数随矿化度增加减小越快。对于最小的粒径, 扩散系数受矿化度的影响也最小。其次, 对同一矿化度, 较大粒径 (F11~

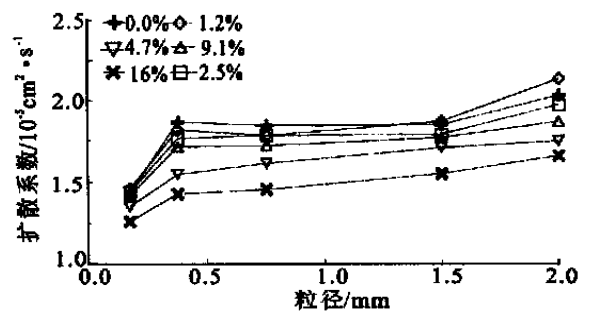


图 7 粒径对扩散系数的影响

F14) 砂样中, 扩散系数变化相对较小, 但对于最小粒径 (F15), 扩散系数明显变小, 可能受矿化度和限制扩散两方面的影响。

不同粒径砂样被不同矿化度的 NaCl 溶液饱和后的 T_2 分布见图 8。从图 8 中可见, 随粒径的减小, T_2 谱向左移动。但对比矿化度变化发现, T_2 谱受矿化度的影响较小, 更主要受粒径大小影响。

认识与结论

综合分析已有的实验结果与本次测量结果可以看出, 不仅矿化度影响 T_1 和 T_2 , 矿化类型的影响也很重

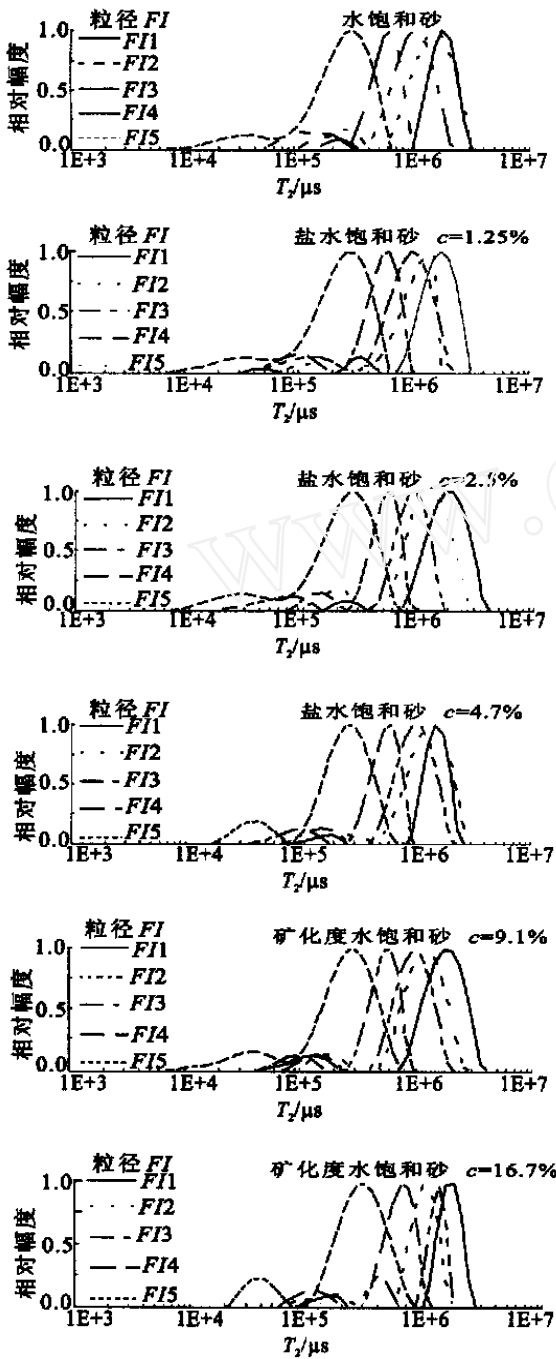


图8 不同粒径砂样中NaCl溶液T₂分布

要。比较发现,对T₂而言,1价Na⁺与K⁺和2价Ca²⁺与Mn²⁺对其具有相反的作用,Na⁺与K⁺阻止弛豫而Ca²⁺与Mn²⁺加速弛豫。同时HI和D随矿化度的增加而减小只是一个粗略的概念,从实验结果看,该减小仍与矿化类型有关,1价Na⁺与K⁺和2价Ca²⁺的作用显然不同。总之,通过实验可得到如下的结论:

1. 扩散系数随矿化度的增加而减小,相对NaCl和KCl而言,CaCl₂溶液的扩散系数受矿化度的影响要小;

2. T₂不仅随矿化度的不同而变化,还与矿化类型有关。对于CaCl₂溶液,T₂随矿化度的增加而减小,而对NaCl和KCl溶液,T₂随矿化度的增加而增大;

3. 含氢指数HI随矿化度的增加而减小,但CaCl₂溶液相对NaCl和KCl溶液受到的影响要小得多。

本文主要针对Na⁺与K⁺和2价Ca²⁺及其浓度变化对T₂,HI和D的影响进行了讨论,还应该针对其它的矿化类型做更多的实验,给出矿化度和矿化类型对流体核磁共振性质影响更全面的变化规律。同时,由于本文主要从实验上分析观测的结果,尚未上升到理论高度来对矿化度和矿化类型对核磁共振性质的影响进行全面系统的分析。

参考文献

[1] Akkurt R, Prammer M G and Moore M A. Selection of Optional Acquisition Parameters for MRL Logs *The Log Analyst*, 1996, Vol 37, No. 6: P43- 52

[2] Morriss C E, Deutch P, Freedman R, Mckee R and Kleinberg R L. Operation Guide for the Combinable Magnetic Resonance Tool *The Log Analyst*, 1996, Vol 37, No. 6: P53- 60

[3] 王为民,孙佃庆,苗盛.核磁共振基础实验研究.见:核磁共振测井理论与应用.北京:石油工业出版社,1998

[4] Akkurt R, Mardon D, Gardner J S, Marschall D M and Solanet F. Enhanced Diffusion: Expanding the Range of NMR Direct Hydrocarbon-typing Applications SPWLA 39th Annual Symposium, 1998, Paper: GG

[5] 阿克谢利罗德 C M 等著,梅忠武译.核磁测井.北京:石油工业出版社,1982

[6] Kleinberger R L and Vinegar H J. NMR Properties of Reservoir Fluids *The Log Analyst*, 1996, Vol 37: 20- 32

[7] Appel M, Freeman J J, Perkins R B and Van Dijk N P. Reservoir Fluid Study by Nuclear Magnetic Resonance SPWLA 41th Annual Symposium, 2000, Paper HH

[8] Horkwitz J P, Vinegar H J, Hartman D E, Coates G R and Clerk E A. Residual Oil Saturation Measurements in Carbonates with Pulsed NMR Logs SPWLA 36th Annual Symposium, 1995, Paper: Q

[9] Prammer M G. NMR Pore Size Distributions and Permeability at the Well Site 1994, SPE 28368

[10] MARAN 公司. IRNMR 用户手册 1999

[11] Mitra P P, Sen P N and Schwartz L M. Short-time Behavior of the Diffusion Coefficient as a Geometrical Probe of Porous Media *Physical Review B*, 1993, Vol 47, No. 14: 8 564- 8 574

(修改稿收稿日期: 2001-07-18 本文编辑 高宝善)

作 者 简 介

- 翁爱华** 1969年生。吉林大学地球探测与信息技术学院讲师,从事电磁法与核磁勘探研究工作。(地址:吉林省长春市吉林大学朝阳校区地球探测与信息技术学院地物系测井教研室 邮编:130026)
- 刘迪军** 1971年生。1993年毕业于石油大学(华东)应用电子技术专业。现在石油大学(北京)地球科学系攻读博士学位。从事信号检测、传输与处理方面的研究工作。(地址:北京昌平水库路石油大学地科系 邮编:102200)
- 邢光龙** 1968年生。1996年在吉林大学物理系获理学硕士学位,现在吉林大学物理系攻读博士学位。主要从事电磁波测井理论与资料反演方法研究。(地址:吉林省长春市解放大路119号吉林大学物理系 邮编:130023)
- 吴文圣** 博士研究生,1972年生。1998年毕业于石油大学(华东),获应用地球物理专业硕士学位。现在石油大学(华东)攻读应用地球物理专业博士学位。主要进行核测井方法研究。(地址:山东省东营市石油大学测井教研室 邮编:257062 电话:0546-8762619 E-mail:my-wws@sltx.com.cn)
- 李曙光** 1968年生。2000年在吉林大学物理系获理学硕士学位。现在河北秦皇岛市燕山大学数理系任教。(地址:河北秦皇岛市燕山大学数理系 邮编:130023)
- 件杰** 副教授,博士,1965年生。1989年毕业于西北工业大学自动控制系陀螺与惯性导航专业,获硕士学位;1977年获西安交通大学电磁场与微波技术专业博士学位。现为西安石油学院测控技术与仪器专业教研室主任。(地址:陕西省西安市电子二路18号西安石油学院仪器系 邮编:710065)
- 张雪芹** 助理工程师。1997年毕业于江汉石油学院石油工程系油藏专业。主要从事注硼中子寿命测井工艺技术研究与推广工作。(地址:河北省廊坊市43号信箱研究所 邮编:065077 电话:0317-2552497)
- 袁谋** 高级工程师,1962年生。1983年毕业于石油大学(华东)开发系。一直从事油田生产管理工作,现任胜利油田胜利采油厂厂长。(地址:山东省东营市胜利油田胜利采油厂 邮编:257051)
- 赵英** 高级工程师,1997年毕业于西北大学地质系,获硕士学位。主要从事油田开发地质工作。(地址:河北省河间市华北油田分公司第三采油厂 邮编:062450)
- 施培华** 高级工程师,1963年生。1984年毕业于石油大学测井专业。现主要从事现场测井科研及管理工作。现任吐哈油田录测井公司副经理。(地址:新疆鄯善火车站镇吐哈油田录测井公司 邮编:838202 电话:0995-8371679)
- 朱永贤** 高级工程师,工学硕士,1967年生。1991年毕业于中国地质大学石油地质专业。一直从事油田开发管理工作,现任吐哈油田丘陵采油厂副厂长兼总地质师。(地址:新疆鄯善吐哈油田丘陵采油厂 邮编:838202 E-mail:zyx@sohu.com)
- 陈锋** 工程师,1969年生。1991年毕业于石油大学(华东)机械系矿业机械专业。现从事射孔工艺技术研究,获四川石油局优秀科技工作者称号,多项科研成果获局科技进步一、二等奖,获一项国家专利。(地址:重庆市江北区大石坝四川石油管理局测井公司射孔工艺技术研究所 邮编:400021 E-mail:chenf@163.net)
- 张丽媛** 工程师,1972年生。1995年毕业于大庆石油学院勘探系矿场地球物理专业。现从事测井资料解释工作及与俄罗斯的合作项目。(地址:山东省东营市胜利油田测井公司资料解释研究中心 邮编:257096 电话:0546-8761757)
- 王佳平** 工程师,1966年生。1989年毕业于西安电子科技大学。现在大庆石油管理局测井公司研究所从事方法研究和多井解释工作。(地址:黑龙江省大庆市测井公司研究所 邮编:163412 电话:0459-5693413(办) E-mail:wangjp@cjdq.cnpc.com.cn)
- 黄宏才** 高级工程师。1981年毕业于华东石油学院矿场地球物理测井专业。一直从事测井解释研究及管理工作,现任中原油田测井公司副经理。(地址:河南省濮阳市中原油田测井公司 邮编:457001 E-mail:cjgslhy@zpeb.sinopec.com.cn)
- 范宜仁** 教授,1962年生。1982年毕业于华东石油学院矿场地球物理专业。长期从事测井资料解释应用、岩石物理性质等方面的研究。现为中国地质大学在读博士,现任石油大学地球资源与信息学院副院长。(地址:山东省东营市石油大学地球资源与信息学院 邮编:257062)
- 张筠** 高级工程师,1964年生。1985年毕业于武汉地质学院石油物探专业。一直从事测井资料解释与研究。现在中石化新星石油公司西南局测井公司从事技术研究工作。(地址:四川省成都市龙泉驿区星光东路 邮编:610100 电话:028-4872365)
- 赵彦超** 副教授,1961年生。现为中国地质大学研究生院在职博士生,主要从事油藏描述、测井地质的教学及科研工作。(地址:湖北省武汉市中国地质大学资源学院石油系 邮编:430074 电话:027-87482427(家) E-mail:yhzha@cug.edu.cn)