

文章编号:0253-9985(2008)05-0648-06

油气勘探二次创业的油储地球物理方法研究回顾

刘洪,李幼铭

(中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029)

摘要:经过油储地球物理和油气勘探二次创业前后18年的研究,基于保结构方法和拟微分算子技术,提出了算子运算转化为函数化运算、乘法运算转化为代数加法运算的波场有效表示方法,促进了快速有效的地震波场计算和资料处理方法的产出。高精度速度-深度建模、非对称走时时间偏移、叠前谱分解预测多次波、弹性参数反演、反假频重建等方法技术,正在实际资料试验研究中不断完善。

关键词:弹性参数反演;反假频重建;高精度速度-深度建模;非对称走时时间偏移;叠前谱分解预测多次波;地球物理方法;油气勘探

中图分类号:P631

文献标识码:A

Review on geophysical methodology of oil reservoirs in the second round of hydrocarbon exploration

Liu Hong, Li Youming

(Institute of Geology & Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The eighteen years of research on oil reservoir geophysics during the second round of hydrocarbon exploration provided a sound basis for the proposition of an effective expression of wave field based on structure preserved algorithm and pseudo-differential operator technique. The expression transfers operator calculation into function calculation and multiplication into summation and promotes the development of rapid and effective methods of seismic wave field calculation and data processing. Various techniques such as high-precision depth-velocity estimation, asymmetric travel-time migration, multiple prediction through pre-stack spectrum decomposition, elastic inversion, and dealias reconstruction, are continuously sharpening in the process of practical applications with real data.

Key words: elastic parameter inversion; dealias reconstruction; high-precision depth-velocity estimation; asymmetric travel-time migration; multiple prediction through pre-stack spectrum decomposition; geophysical method; petroleum exploration

“前新生代海相油气勘探关键地球物理技术”是刘光鼎先生建议和领导的^[1-3]2002—2007年中国科学院第二期知识创新工程重大项目“环渤海(湾)地区前新生代海相油气资源研究”^[4]的子课题。该课题目标是针对复杂大型断裂控制下的推覆体、生物礁及潜山的勘探,对孔缝洞、裂缝密集带和风化带进行以叠前(高维)处理为核心的地球

物理技术流程及系列研究,发展具有古生代海相残留盆地特点的储层地质地球物理建模方法,提高深层信号的分辨率和信噪比,压制多次波干扰,减少上覆地层对目标层AVO和AVA信息的污染,提高叠前地震波动力学特征提取的能力。该课题的研究基础是刘光鼎先生建议的第一期知识创新工程重大项目“油气勘探二次创业的前导研

收稿日期:2008-08-18。

第一作者简介:刘洪(1959—),男,研究员,地震波成像和油储地球物理。

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB209603);国家自然科学基金项目(40674072);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-147)。

究”^[5,6]和1992—2007年刘光鼎先生主持的国家自然科学基金委重大项目“陆相薄互层油储地球物理理论和方法研究”(简称“八五”油储)“陆相油储地球物理理论及三维地质图像成图方法(简称“九五”油储)”^[7,8]。

该课题针对古生代海相残留盆地深层油气储层地震噪声高、分辨率低、岩性判断困难等问题,以波传播和散射算子积分响应的有效表示方法研究为基础,把偏移、叠加、反褶积技术在横向变速条件下进行了有效推广,系统研究发展了高精度速度深度建模、非对称保幅叠前时间偏移、叠前谱分解预测多次波、弹性参数反演、反假频重建等方法技术,在试验区取得了实际效果。本文拟对这些方面的进展作一个简要回顾。

1 地震波场的有效表示方法

油气储层的波传播和成像的核心问题是用尽可能少的计算量实现精度尽可能高的地震波计算,其主要技术需求来自于速度深度建模、波场成像、储层特征提取和反演等方面,其理论基础就是地震波场的有效表示方法。笔者利用李群算法^[9]和拟微分算子技术^[10],导出了算子指数映射的频率波数域相位表达式^[10],导出了单程波格林函数频率波数域相位和时空域走时的表达式^[11]。

李群算法是一种保结构方法^[12]。数学上,保结构方法是一种建立向量到向量变换的方法。其中“结构”一词指的是向量的内积、行列式等几何量;在偶数维空间的行列式称为“辛结构”,在该空间用 Hamilton 方程组进行向量之间的变换可以保持“辛结构”不变。1984年,冯康作了“差分格式与辛几何”的报告^[13],提出了 Hamilton 方程组离散化的方法,可以保持离散化变换前后的向量的“辛结构”不变,开辟了保结构算法的新领域。在保几何结构思想的基础上进一步发展的李群算法^[9],其目的是使离散化的数值计算在保持群的性质的情况下更有效地提高物理表达精度。李群算法求解的齐次流形在许多领域都会遇到,是一个非常普遍通用的方法。

李群算法可以求解含深度或时间一阶导数的初值微分方程,其方法是将该初值微分方程变为一个李代数微分方程,求解之后,通过指数映射化为原方程的解。如果指数映射能够精确实现,则

李群算法的精度主要由李代数上级数的截断决定。因为李代数表达比李群的直接表达效率要高,如果指数映射能够精确实现,这种变换到李代数上的算法可望精度较高。形象地说,李群算法就是将“乘法运算转化为加法为主”的运算的方法。

早期的保结构方法,例如 Hamilton 系统辛几何方法,为了能够实现指数映射,使用差分代替指数映射,这相当于用 Pade 近似表示指数函数,这样可以保持模方守恒,实现稳定递推,但在相位计算上精度降低^[14]。为了发挥李群算法的作用必须找到指数映射的实现方法。

这是通过基函数的选择来实现的。选择不同的基函数,可以得到不同的表示。近代数学发现,平面波作为基函数有较大的便利,这就发展了拟微分算子理论。在微分算子的系数横向不变的情况下,以平面波为基函数的指数映射的相位可以用微分算子的系数直接表达;在系数横向变化情况下,我们的研究发现相位函数中除了包含微分算子的系数外,还需要用微分算子的横向导数^[10,11]。在水平层状介质中,平面波的传播可以用相移来实现;在横向变速介质中,平面波向下传播也可以用非平稳相移来实现,其中相移量用速度和速度横向导数的函数表达出来。在上述方法中,平面波表示方法或者频率波数域表示方法称为拟微分算子技术,它是通过频率波数域函数化运算表达实现算子运算的方法。用象征方法进行频率波数域求逆,可以通过函数除法^[10]加上求导修正来实现,这比频率空间域的求逆的研究(例如 Toeplitz 矩阵求逆)要更有利。

利用拟微分算子技术,单程波算子的李代数微分方程和指数映射都是在频率波数域求解;所得结果通过指数映射求出非平稳相移表达式,该表达式用速度、速度横向导数、频率、波数来表示,称为相位的频率波数域表达式^[11]。由于其频率波数的系数含有空间变量,在拟微分算子理论称为象征表达式。将象征表达式变换到时空域,归结为计算关于波数的 Fourier 积分。该积分可以通过鞍点法、相移加插值、离散慢度等方法实现。其中利用鞍点法可导出横向非均匀介质非对称走时的计算公式^[11]。

图1给出在横向变速介质中非对称走时计算与有限差分的对比,基与非对称走时的时间偏移

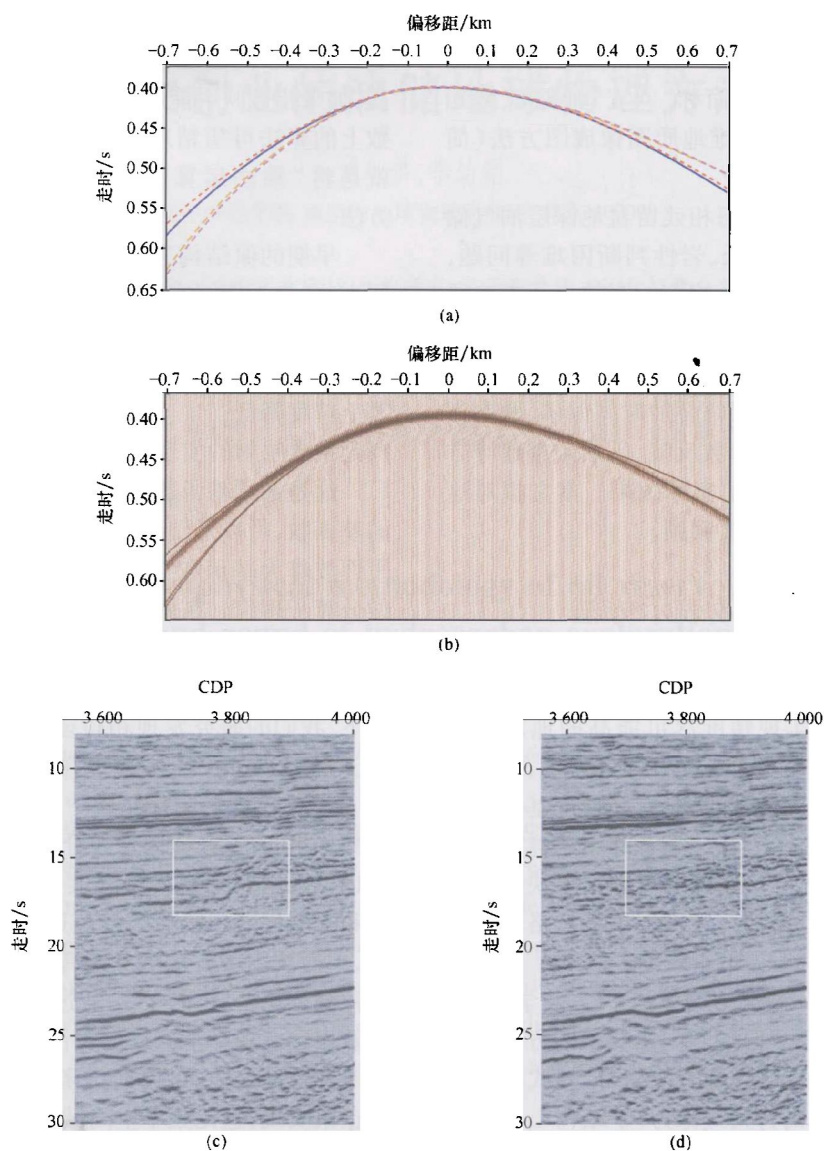


图1 非对称走时与叠前时间偏移成像

Fig. 1 Asymmetric travel-time and pre-stack time migration imaging

(a)位于 $x=0$ 的点源非对称走时计算,横向变速介质 $v_0=2\text{ km/s}$, $dv/dx=1.2\text{ (km}\cdot\text{s}^{-1})/\text{km}$,平均速度变化54.5%(长虚线,对称走时公式,只含有源像距的平方项;中虚线,对称走时公式,含有源像距的2,4次方项;短虚线,非对称走时公式,含有源像距的2,3次方项和关于速度的1次导数项;实线,非对称走时公式,含源像距的2,3,4次项和关于速度的1,2次导数项);(b)与有限差分(变面积图)对比;(c)叠前时间偏移成像(中国海上资料),走时公式含有偏移距的2,3,4次项和关于速度的1,2次横向导数项;(d)传统叠前时间偏移成像,走时公式含有偏移距的2,4次项,不含速度的导数项

与传统对称走时的时间偏移的对比。与有限差分计算方法比较的原因是,虽然计算速度比较慢,当可作为横向变速情况下的标准。与有限差分计算波形的走时比较表明,走时公式含有偏移距的2,3,4次项和关于速度的1,2次导数项与有限差分结果最接近,只含一阶导数与不含导数的精度依

次降低。将非对称走时的时间偏移(含速度横向导数)与对称走时时间偏移比较,非对称走时的时间偏移成像的小断层和层间细节比传统的叠前时间偏移更清楚。

图2给出积分法叠前时间偏移与叠前深度偏移在中国东部深层探区的对比。其中三维叠前时

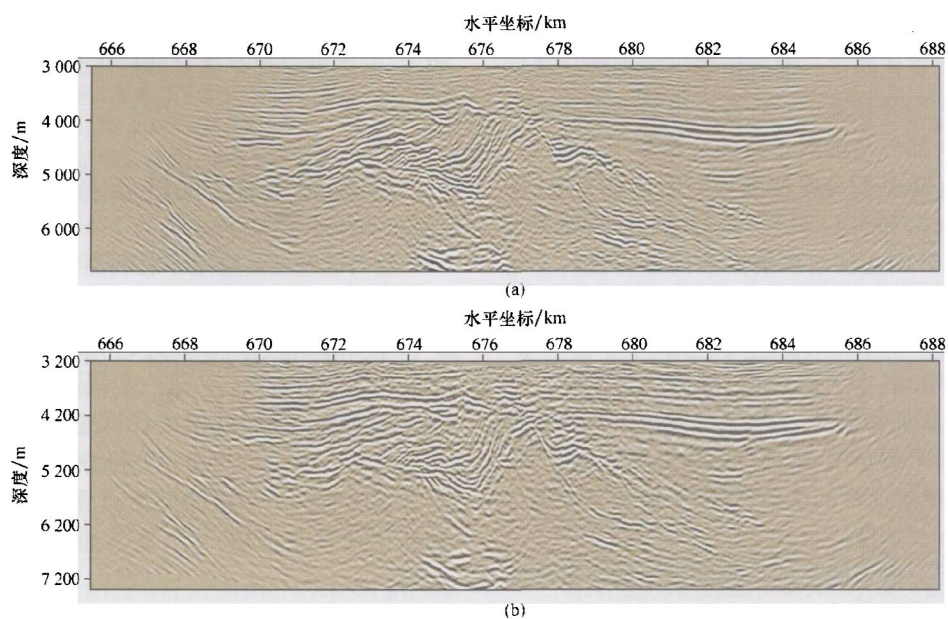


图2 大庆油田徐深1井三维叠前深度偏移(a)和大步长三维叠前时间偏移(b)效果的比较
Fig. 2 Comparison of (a) 3-D pre-stack depth migration and (b) long 3-D pre-stack time migration in Well Xushen-1, Daqing oilfield

间偏移方法,走时公式只含有源像距的平方项(通常称为直射走时公式)。研究表明,叠前时间偏移计算量较小,效果接近叠前深度偏移,构造信息更多、倾角变化更快,高低频信息丰富。三维叠前深度偏移使用一期创新工程重大项目的成果。上述基于拟微分算子技术和保结构方法的波场表示方法可以简称为“算子变函数、乘法变加法”。

上述基于拟微分算子技术和保结构方法的波场表示方法可以简称为“算子变函数、乘法变加法”。

2 高精度速度-深度建模

速度-深度模型是地震勘探深度定位的基础,在速度-深度模型准确的情况下叠前深度偏移成像技术可以基本保证深层油气藏的成像和定位。实际应用中(如窟窿山深度偏移速度模型),基于当前速度深度建模技术所确定的构造高点存在较大的水平位移和深度误差,形状受到畸变,生产中形象地称为“构造长轮子、深度长弹簧”。速度深度模型建模技术的不足,阻碍了深度偏移的应用,是国际研究的前沿之一。

根据国内外研究,高精度速度深度建模需要

解决聚焦参数估计、聚焦参数反演、度规量估计、坐标变换等问题。弯曲坐标系上波动方程的研究表明,时间域速度与深度域速度相差一个度规量^[15]。度规量就是坐标转换中坐标轴长度之间的比例关系,通俗称为几何扩散因子。动力学射线追踪给出了时间域层速度与度规量关系、深度域层速度与度规量关系。聚焦参数估计可以用叠前时间偏移来实现。聚焦参数反演通过时间域层析成像来实现。实践中聚焦参数估计10%的误差,会带来聚焦参数反演30%的误差,从而引起度规量估计和时深转换50%的误差。

我们在层析反演、动力学射线追踪等方法研究的基础上,发展了基于聚焦参数的速度分析方法^[16];利用非对称走时偏移方法提高了聚焦参数估计精度^[11,17,18];为了便于交互处理和拾取,我们大力发展了软件技术,在“九五”油储和一期创新重大项目所发展的油储软件技术基础上^[5~8],与中海油研究中心合作研发了海洋石油并行软件^[19,20]。

3 非对称保幅叠前时间偏移

为了在成像中保持反射系数的振幅,我们在非对称走时提高走时精度基础上,对 Kirchhoff 积

分保幅权系数,从几何扩散和透射系数两个方面,提出了横向变速修正。前者由单平方根算子象征的零次齐次部分计算^[10],后者由单平方根算子象征1次齐次部分与透射系数的交换算子计算^[11],发展了 Kirchhoff 积分保幅叠前时间偏移方法[图2(b),图1(c)和图1(d)]。我们还利用可分表示对AVA中界面起伏对反射系数的影响进行了研究^[21]。

我们在 Maslov 相空间方法^[22]、显格式(短算子)^[23]、隐格式(多方向分裂、螺旋坐标系^[24])和双域法(相移加插值、广义屏^[25])方法研究和并行集群技术研究的基础上,提出最优可分表示^[26,27],减少了 Fourier 变换的次数,提高了波动方程偏移的精度和计算速度。

最优可分表示的基础是宋健提出的高维空间的低维表示^[28]。在象征域,函数包含波数变量和空间变量,可分表示将它们表示成乘积的和,相移加插值、广义屏等方法都是可分表示的特例,但利用高维空间的低维表示理论,可以用最少的和得到最高的精度。该研究引起了国外的重视,已被应用于逆时偏移^[29]。

4 叠前谱分解预测多次波

在逆散射变换、孤立子、螺旋坐标系谱分解、SRME 和 Radon 变换、稀疏 Tao-P 变换^[30]研究的基础上,基于广义 Bremmer 级数理论和频率波数域象征运算方法,提出了横向变速情况下消除多次波的弹性波线性预测理论和谱分解实现方法,并进行了数值模型研究^[31]。该方法适合厚度较大的薄互层上覆层处理,而 SRME 和逆散射序列方法仅适合于厚度较大的多个上覆层。对谱分解中的预测算子引入李代数积分方法求解,可以对 O'Doherty-Anstey 公式进行精度改进和推广。O'Doherty-Anstey 公式是一个描述穿过上覆层的透射波功率谱与上覆层反射系数功率谱之间的一个经验公式,前人的近似证明很难进行精度改进和推广到横向变速。谱分解表达和改进的 O'Doherty-Anstey 公式,可以将原位地震响应随频率和入射角变化,具有“串珠状”“壳状”等波形特征、等效吸收、弹性波阻抗、低频阴影等特征,与油藏层内纵向和横向非均匀精细分布和特征联系起来,以便在储层内部结构复杂、不均匀性小于地震

波长的情况下,仍能直接计算精细储层模型原位响应,而避免等效介质对储层不均匀性分布的特殊假定。

5 反假频重建、弹性参数反演

在对稀疏反演应用于胜利油田井间地震研究的基础上,基于地震数据反假频原理^[32],提出在基于自动增益控制调制法的高频重建、波形特征对比和属性分析方法^[33],进一步提高了叠后地震资料储层预测和储层建模的计算速度、视分辨能力和可靠性。该技术与独立分量分析技术^[34],已被纳入大庆油田中深层储层预测成套技术,应用于前新生代扶余油层^[35-38]复杂油藏研究,已取得实效。

在研究速度深度模型建立技术的同时,波动方程叠前偏移继续被应用于我国东部油田,包括大庆油田、大港油田、南黄海^[39]等地区,在此基础上研发了弹性参数反演技术并将其用于大庆油田^[40]和胜利油田^[41]。

6 结论

深层油气资源勘探,需要进一步提升复杂条件下保构造、保振幅、保波形的处理技术和多尺度信息综合解释技术。本文的回顾说明,基于地震波场有效表示方法的研究,高精度速度深度建模、非对称保幅叠前时间偏移、叠前谱分解预测多次波、弹性参数反演、反假频重建等方法研究都取得了很大进步,并正在进行应用研究,为深层油气资源勘探的技术发展打下了良好的基础。

致谢:本文得到大庆油田陈树民高级工程师和吴永刚高级工程师的指导和帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 刘光鼎. 试论残留盆地[J]. 勘探家, 1997, 2(3): 1~4
- 2 刘光鼎. 雄关漫道真如铁——论中国油气二次创业[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 195~199
- 3 刘光鼎. 我国油气资源勘探开发中存在的主要问题及对策[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 4~11
- 4 郝天珧, 杨长春, 刘洪, 等. 环渤海地区前新生代油气资源的综合地质、地球物理研究[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1 269~1 279

- 5 李幼铭. 面向油气勘探开发提升地震偏移及属性刻画水平[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 198 ~ 210
- 6 李幼铭. 知识创新工程重大项目在大庆油田的技术成果要览[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1): 5 ~ 18
- 7 李幼铭. 对“油储”项目在大庆实施获得成果的概述及认识[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 135 ~ 142
- 8 李幼铭, 刘洪, 吴永刚, 等. 我国陆相油储地球物理研究历程回顾与认识[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1 280 ~ 1 284
- 9 Iserles A, Munthe K H, Nfrstt S, et al. Lie-group methods[J]. Acta Numerica, 2000, 9: 215 ~ 365
- 10 刘洪, 王秀闽, 曾锐, 等. 单程波算子积分分解的象征表示[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 463 ~ 471
- 11 刘洪, 刘国峰, 武威, 等. 三维波动方程逆散射的基础理论研究[J]. 石油物探, 2007, 46(6): 569 ~ 581
- 12 Feng K. Difference schemes for Hamiltonian formalism and symplectic geometry[J]. Journal of Computational Mathematics, 1986, 4(3): 279 ~ 289
- 13 冯康, 秦孟兆. 哈密顿系统的辛几何算法[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2003
- 14 杨辉, 刘洪, 李幼铭. 算子辛格式[J]. 地球物理学报, 2003, 46(4): 533 ~ 538
- 15 Cameron M K, Fomel S, Sethian J. Seismic velocity estimation and time-to-depth conversion of time-migrated images [A]. In: SEG ed. 76th annual meeting expanded abstracts [C]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2006. 3 066 ~ 3 070
- 16 谢桂生. 双聚焦偏移速度估计与可分表示叠前弹性反演[Z]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2005
- 17 裴江云, 刘洪, 李幼铭, 等. 共反射弧叠加方法在火山岩成像中的应用[J]. 地球物理学报, 2004, 47(1): 106 ~ 111
- 18 刘洪, 袁江华, 陈景波, 等. 大步长波场深度延拓的理论[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1 779 ~ 1 793
- 19 王秀闽, 刘洪, 孟小红, 等. 用于块体划分的最小回路法及模型试验[J]. 石油物探, 2007, 46(3): 249 ~ 253
- 20 赵连功, 谢桂生, 王秀闽, 等. 地震勘探观测系统定义模块的实现[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 729 ~ 734
- 21 谢桂生, 刘洪, 李幼铭, 等. 界面起伏条件下反射/透射算子 + 单程波方程的地震波模拟方法[J]. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1 172 ~ 1 178
- 22 秦孟兆, 陈景波. Maslov 渐近理论与辛几何算法[J]. 地球物理学报, 2000, 43(4): 522 ~ 533
- 23 李冰, 刘洪, 李幼铭. 波场延拓短算子构造方法[J]. 地球物理学报, 2003, 46(2): 246 ~ 251
- 24 罗明秋, 刘洪, 李幼铭. 适用于波场成像的谱法 LU 分解[J]. 地球物理学报, 2003, 46(3): 421 ~ 427
- 25 刘礼农, 刘洪, 李幼铭. SEG/EAGE 盐丘和推覆体模型的波动方程三维叠前深度偏移成像[J]. 地球物理学报, 2004, 47(2): 312 ~ 320
- 26 Chen Jingbo, Liu Hong. Optimization approximation with separable variables for the one-way wave operator[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(6): L06613
- 27 张致付, 刘洪, 陈景波, 等. 地震偏移的最优可分近似算法实现[J]. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1 422 ~ 1 427
- 28 宋健. 高维函数和流形在低维可视空间中的最优表达[J]. 科学通报, 2001, 46(12): 977 ~ 984
- 29 Zhang Yu, Zhang Guanqun. Explicit marching method for reverse-time migration [A]. In: SEG ed. 77th annual meeting expanded abstracts [C]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2007. 2 300 ~ 2 304
- 30 张红梅, 刘洪. 基于稀疏离散 $\tau-p$ 变换的叠后地震道内插[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(3): 281 ~ 285
- 31 刘洪, 袁江华, 勾永峰, 等. 地震逆散射波场和算子的谱分解[J]. 地球物理学报, 2007, 50(1): 240 ~ 247
- 32 刘喜武, 刘洪, 刘彬. 反假频非均匀地震数据重建方法研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(2): 299 ~ 305
- 33 曾锐, 刘洪, 秦月霜, 等. 基于自动增益控制调制法的高频重建技术[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 850 ~ 859
- 34 蒯晓宇, 刘洪, 曾锐, 等. 浅水型河流相的 ICA 地震识别方法[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(3): 856 ~ 863
- 35 胡学智, 鲍志东, 那未红, 等. 松辽盆地南部扶余油田泉头组四段沉积相研究[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(3): 334 ~ 341
- 36 李宏伟, 袁士义, 朱怡翔, 等. 河流相地层相分异与沉积物体积分配规律[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 356 ~ 360
- 37 邓宏文, 王洪亮, 李熙喆. 层序地层基准面的识别、对比技术及应用[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(3): 177 ~ 184
- 38 邓宏文, 王洪亮, 李小孟. 高分辨率层序地层对比在河流相中的应用[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(2): 90 ~ 95
- 39 朱振宇, 刘洪, 李幼铭. 波动方程叠前深度偏移及并行计算在南黄海地区的应用[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(2): 302 ~ 305
- 40 Shou Hao, Liu Hong, Gao Jianhu. AVO inversion based on common shot migration [J]. Applied Geophysics, 2006, 3(2): 98 ~ 104

(编辑 高岩)