

探面波技术;发展地震面波勘探理论与方法的同时要研制出更加简单,分辨率与精度更高的面波勘探仪器。

目前中国已有许多面波勘探生产单位和研究单位在从事各种尺度的面波法研究及应用工作,并已研制出一些采用多功能微机控制系统集合了采集及处理的高精度仪器和设备。因此,虽然中国的面波法研究和勘探工作比西方起步较晚,但其发展速度很快,预计不久将达世界水平。

本文在编写过程中得到了中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院徐义贤教授的悉心指导,在此表示感谢!

### 参 考 文 献

- Rayleigh L. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid[J]. Proceedings of the London Mathematic Society, 1887, 17(1): 4~11
- Thomson W T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium[J]. Journal of Applied Physics, 1950, 21(2): 89~93
- Haskall N A. The dispersion of surface waves on multilayered media[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1953, 43(1): 17~34
- Rosebaum J H. A note on the computation of Rayleigh wave dispersion curves for layered elastic media[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1964, 53(3): 1 013~1 019
- Thrower E N. The computation of the dispersion of elastic waves in layered media[J]. Journal of Sound and Vibration, 1965, 2(3): 210~226
- Harkrider D G. Surface waves in multilayered elastic media[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1964, 52(2): 627~679
- Jones J P. Rayleigh waves in a porous, elastic, saturated solid[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1961, 33(7): 959~962
- Mei C C, Foda M A. Wave-induced responses in a fluid-filled poro-elastic solid with a free surface boundary layer theory[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1981, 66(3): 597~631
- Tajuddin M. Rayleigh waves in a poroelastic half space [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1984, 75(3): 682~684
- 夏唐代, 吴世明. 流体—固体介质中瑞利波特性[J]. 水利学报, 1994(1): 67~75
- 夏唐代, 蔡袁强, 吴世明, 等. 各向异性成层地基 Rayleigh 波的弥散特性[J]. 振动工程学报, 1996, 9(2): 191~196
- 陈龙珠, 黄秋菊, 夏唐代. 饱和地基中瑞利波的弥散特性[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 6~9
- Knopoff L. A matrix method for elastic wave problems [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1964, 54(1): 431~438
- Waston H T. A note on fast computation of Rayleigh wave dispersion in the multilayered elastic half-space [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1970, 60(1): 161~166
- Anas A-Z. Dispersion function computation for unlimited frequency values[J]. Geophysical Journal International, 1979, 58(1): 91~105
- Menke W. Comment on 'Dispersion function computation for unlimited frequency values' by Anas-Zena[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1979, 59(2): 315~323
- Kennett B L N. Reflection rays and reverberations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1974, 64(6): 1 685~1 696
- 陈云敏, 吴世明. 成层地基的 Rayleigh 波特征方程的解法[J]. 浙江大学学报, 1991, 25(1): 40~52
- 欧阳联华, 王家林. 一种高频面波频散函数的快速算法——改进的 Abo-Zena 法[J]. 物探化探计算技术, 2002, 24(3): 204~214
- 李幼铭, 束沛镒. 层状介质中地震面波频散函数和体波广义反射系数的计算[J]. 地球物理学报, 1982, 25(2): 130~139
- 张碧星, 喻明, 熊伟, 等. 层状介质中的声波场及面波研究[J]. 声学学报, 1997, 22(3): 230~241
- 凡友华, 刘家琦. 层状介质中瑞雷面波的频散研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(5): 577~581
- Alterman Z, Karak F C. Propagation of elastic wave in layered media by finite-difference methods[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(1): 367~398
- Boore D M. Finite-difference methods for seismic wave propagation in heterogeneous materials[A]. In: Bolt B. Methods of computational physics[C]. New York: Academic Press, 1972. 1~37
- Alford R M, Kelly K R, Boore D M. Accuracy of finite-difference methods modeling of the acoustic wave equation[J]. Geophysics, 1974, 39(6): 834~842
- Virieux J. P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method[J]. Geophysics, 1986, 51(4): 889~901
- Levander A. Fourth-order finite-difference P-SV seismograms[J]. Geophysics, 1988, 53(11): 1 425~1 436
- Robertsson J O A, Blanch J O, Symes W W. Viscoelastic finite-difference modeling[J]. Geophysics, 1994, 59(11): 1 444~1 456
- Graves R W. Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86(4): 1 091~1 106

- 30 Bohlen T. Parallel 3-D viscoelastic finite-difference seismic modeling[J]. *Computers & geosciences*, 2002, 28(8):887~899
- 31 Gold N, Shapiro S A, Burr E. Modeling of high contrasts in elastic media using a modified finite difference scheme[J]. *Expanded Abstracts of 68<sup>th</sup> Annual International SEG Meeting*, 1997, ST 14. 6
- 32 Saenger E H, Gold N, Shapiro S A. Modeling the propagation of elastic waves using a modified finite-difference grid[J]. *Wave Motion*, 2000, 31(1):77~92
- 33 Saenger E H, Bohlen T. Finite-difference modeling of viscoelastic and anisotropic wave propagation using the rotated staggered grid[J]. *Geophysics*, 2004, 69(2):583~591
- 34 Bohlen T, Saenger E H. Accuracy of heterogeneous staggered-grid finite-difference modeling of Rayleigh waves[J]. *Geophysics*, 2006, 71(4):T109~T115
- 35 Stokoe II K H, Nazarian S. Effectiveness of ground improvement from spectral analysis of surface waves [A]. *Proceedings of the Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 91~95
- 36 Nazarian S, Stokoe II K H. Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems[A]. In: National Research Council. *Transport Research Record No 930* [C]. Washington D C: Falmer Press, 1983. 38~45
- 37 Stokoe II K H, Wright S G, Roesset J M. Characterization of geo-technical sites by SASW method[A]. In: Woods R D. *Geophysical characterization of sites* [C]. New Delhi: Oxford & IBH publidshers, 1994. 15~25
- 38 Xia Jinghai, Miller R D, Park C B. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves[J]. *Geophysics*, 1999, 64(3):691~700
- 39 Xia Jinghai, Miller R D, Park C B. Advantage of calculating shear-wave velocity from surface waves with higher modes[J]. *Expanded Abstracts of 70<sup>th</sup> Annual International SEG Meeting*, 2000, 1 295~1 298
- 40 Miller R D, Xia J, Park C B, et al. Using MASW to map bedrock in Olathe, Kansas [J]. *Expanded Abstracts of 69<sup>th</sup> Annual International SEG Meeting*, 1999, 433~436
- 41 Li Qingchun, Chen Jianwei, Wu Peng, et al. High resolution radon transformation and wave field separation [A]. In: ICEEG. *Geophysical Solutions for Environment and Engineering* [C]. USA: Science Press USA, 2006. 190~195
- 42 曹小林, 洪学海, 曹俊兴. 面波波形反演中的模拟退火法[J]. *成都理工学院学报*, 2000, 27(3):296~301
- 43 Pei Donghong, Louie J N, Pullammanappallil S K. Application of simulated annealing inversion on high-frequency fundamental-mode Rayleigh wave dispersion curves[J]. *Geophysics*, 2007, 72(5):77~85
- 44 肖柏勋. 高模式瑞雷面波及其正反演研究[D]. 长沙: 中南大学, 2000
- 45 张碧星, 肖柏勋, 杨文杰, 等. 瑞雷波勘探中“之”字型频散曲线的形成机理及反演研究[J]. *地球物理学报*, 2000, 43(4):557~567
- 46 张碧星, 鲁来玉, 鲍光淑. 瑞雷波勘探中“之”字型频散曲线研究[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(2):263~273
- 47 杨天春. 瑞利波“之”字形频散与道路结构频散曲线的正演研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004
- 48 陈祥, 孙进忠, 刘景儒. 瑞雷波“之”字型速度—深度曲线的成因[J]. *地球物理学进展*, 2004, 19(4):860~863
- 49 Marquering H, Snieder R. Shear-wave velocity structure beneath Europe, the Northeastern Atlantic and Western Asia from waveform inversions including surface-wave mode coupling[J]. *Geophysical Journal International*, 1996, 127(2):283~304
- 50 凡友华. 考虑高阶模的 Rayleigh 波勘探应用研究[D]. 北京: 北京大学, 2003
- 51 Park C B, Miller R D, Xia J. Multichannel analysis of surface waves(MAWS) [J]. *Geophysics*, 1999, 64(3):800~808
- 52 van Wijk K, Haney M M, Scales J A. LD energy transport in a strongly scattering laboratory model [J]. *Physical review E*, 2004, 69(2):036611
- 53 van Wijk K, Haney M M, Scales J A. Analysis of strong scattering at the micro-scale[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, 115(3):1 006~1 011
- 54 Herman G C, Huggins R J, Milligan P A. Imaging shallow objects and heterogeneities with scattered guided waves[J]. *Geophysics*, 2000, 65(1):247~252
- 55 Campman X H, van Wijk K V, Riyanti C D, et al. Imaging scattered seismic Surface waves[J]. *Near Surface Geophysics*, 2004, 2(4):223~230
- 56 Bodet L, van Wijk K, Bitri A, et al. Surface-wave inversion limitations from laser-doppler physical modeling [J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2005, 10(2):151~162
- 57 吴如山, 安艺敬一编. 地震波的散射与衰减[M]. 李裕澈译. 北京: 地震出版社, 1993. 325
- 58 Bataille K, Wu R S, Flatte S M. Inhomogeneities near the core-mantle boundary evidenced from scattered waves: A review[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1990, 132(1-2):151~173
- 59 聂永安, 曾健, 冯德益. 三维尾波散射问题的理论研究[J]. *地震学报*, 1995, 17(1):68~71
- 60 李小凡. 大延伸非均匀介质中地震波全弹性散射理论及弹性波单次散射理论[J]. *力学学报*, 2002, 34(4):559~568
- 61 李小凡. 大延伸非均匀介质中地震波全弹性散射理论及弹性波多次散射理论[J]. *力学学报*, 2002, 34(5):

- 743~755
- 62 李万杰. 局部不规则场地对 Rayleigh 波的散射[D]. 天津:天津大学建筑工程院,2005
- 63 Felsen L B. Hybrid ray-mode fields in inhomogeneous wave guides and ducts[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,1981,69(2):352~361
- 64 Felsen L B. Progressing and oscillatory waves for hybrid synthesis of source-excited propagation in layered media[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society,1984,79(1):11~33
- 65 Capdeville Y, Chaljub E, Vilotte J P, et al. Coupling the spectral element method with a modal solution for elastic wave propagation in global earth models[J]. Geophysical Journal International,2002,152(1):34~67
- 66 Mal A, Chang Z. A semi-numerical method for elastic wave scattering calculations[J]. Geophysical Journal International,2000,143(2):328~334
- 67 鲁来玉. 近地表面波的散射研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所,2007
- 68 Riyanti C D, Herman G C. Three-dimensional elastic scattering by near-surface heterogeneities [J]. Geophysical Journal International,2005,160(2):609~620
- 69 Sato H, Fehle M C. Seismic wave propagation and scattering in the heterogenous earth [M]. New York: Springer-Verlag New York Inc,1998. 164
- 70 Vrettos C. In - plane vibration of soil deposits with variable shear modulus: I. Surface wave[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,1990,14(3):209~222
- 71 Vrettos C. Dispersive SH - surface waves in soil deposits of variable shear modulus[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,1990,9(5):255~264
- 72 李玉堂. 稳态瑞雷波法数据处理与解释技术研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2006
- 73 刘云祯,王振东. 瞬态面波法的数据采集处理系统及其应用实例[J]. 物探与化探,1996,20(1):15~18
- 74 杨成林. 应用瑞利波等方法对公路质量进行无损检测[J]. 物探与化探,1996,20(2):104~115
- 75 林胜天. 多波列浅层地震勘探新技术在岩土工程勘察中的应用[A]. 见:中国建筑学会工程勘察学术委员会主编. 全国地下目的物探测方法技术研讨会论文集[C]. 北京:中国纺织大学出版社,1996. 16~25
- 76 张忠良,王峰. 浅谈运用物探手段来寻找地下空洞[A]. 见:中国建筑学会工程勘察学术委员会主编. 全国地下目的物探测方法技术研讨会论文集[C]. 北京:中国纺织大学出版社,1996. 43~52
- 77 李锦飞,李人厚. 瑞利波勘探技术的发展与应用[J]. 煤炭学报,1997,22(2):23~126
- 78 杨成林,葛宝来,王炎. SM98 瑞利波仪测试原理及应用效果分析[J]. 物探与化探,2000,24(5):332~338
- 79 Xia Jianghai, Xu Yixian, Chen Chao, et al. Simple equation guide high-frequency surface-wave investigation techniques[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2006,26(5):395~403
- 80 Park C B, Miller R D, Miura H. Optimum field parameters of an MASW survey[EB/OL]. [2002-03-22]. <http://www.kgs.ku.edu/Geophysics2/Expo%20Update/Pubs/Pubs/PAR-02-03.pdf>
- 81 Xu Yixian, Xia Jianghai, Miller R D. Quantitative estimation of minimum offset from multichannel surface - wave survey with actively exciting source[J]. Journal of Applied Geophysics,2006,59(2):117~125
- 82 Dean E A, Keller G R. Interactive processing to obtain interstation surface wave disperasion [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1991, 81 (3): 931~947
- 83 Pollitz F F, Hennen C G. Analysis of Rayleigh wave refraction from three-compenent seismic spectra[J]. Geophysical Journal International, 1993, 113 (3): 629~650
- 84 Chael E P. An automated Rayleigh wave detection algorithm[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,1997,87(1):157~163
- 85 胡家富,段永康,胡毅力,等. 利用 Rayleigh 波反演浅土层的剪切波速度结构[J]. 地球物理学报,1999,42(3):393~400
- 86 胡家富. Rayleigh 波在工程勘察中的解释方法探讨[J]. 岩土工程学报,1999,21(5):599~602
- 87 包军强,张学强,刘江平,等. 浅层多波的分离识别与提取[J]. 物探与化探,1998,22(5):336~376
- 88 李锦飞. TRES-1 型多分量瑞雷波勘探仪的研究及应用[J]. 物探与化探,1998,22(2):129~133
- 89 Hiroshi A, Koji T. S-wave velocity profiling by inversion of Microtremors H/V spectru[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,2004,94(1):53~63
- 90 陶夏新,刘曾武,郭明珠,等. 工程场地条件评定中的地脉动研究[J]. 地震工程与工程振动,2001,21(4):18~23
- 91 何正勤,丁志峰,贾辉,等. 用微动中的面波信息探测地壳浅部的速度结构[J]. 地球物理学报,2007,50(2):492~498
- 92 Satoh T, Kawase H, Iwata T, et al. S-wave velocity structure of the Taichung Basin, Taiwan, estimated from array and single-station records of micro-tremors [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001,91(5):1 267~1 282
- 93 Scherbaum F, Hinzen K G, Ohrnberger M. Determination of shallow Shear wave velocity profiles in the Cologne, Germany area using ambient vibrations[J]. Geophysical Journal International,2003,152(2):597~612
- 94 Zhao D A. Tomogrphic study of seismic velocity structure in the Japan Islands[D]. Sendai: Tohoku University, 1991
- 95 张智. 川滇地区地壳及上地幔结构面波层析成像[D].

- 长春:吉林大学,2007
- 96 赵晓艾. 欧亚大陆及西太平洋面波层析成像数据库[D]. 成都:成都理工大学,2006
- 97 宣瑞卿. 中国及邻区地壳上地幔面波频散层析成像[D]. 成都:成都理工大学,2005
- 98 Wu F T, Levshin A L. Surface-wave group velocity tomography of East Asia[J]. *Physics of the Earth and Planetary interiors*, 1994, 84(1—3): 59~77
- 99 Everdren J F. Determination of crustal structure from phase velocity of rayleigh waves, part II; San Francisco Bay region[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1957, 47(2): 87~88
- 100 Press F. Determination of crust structure from phase velocity of Rayleigh Waves, Part I; Southern, California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1956, 67(12): 1 647~1 658
- 101 Sato Y. Analysis of dispersed surface waves by means of Fourier transform. I[J]. *Bull Earthq Res Inst*, 1956, 33(1): 33~47
- 102 胡家富, 滕吉文, 庄真. 频时分析与网格频散反演技术[A]. 见: 阚荣举编. 云南地球物理文集[C]. 昆明: 云南大学出版社, 1992. 125~131
- 103 胡家富, 温一波, 谢应文. 利用地震面波频散反演岩石圈结构的奇异值分解算法[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(2): 211~217
- 104 樊广利. 常时微动、面波、检层法在场地土测试中的综合应用[J]. *水电站设计*, 2006, 22(4): 64~72
- 105 Al-Hunaidi M O. Difficulties with phase spectrum unwrapping in spectral analysis of surface wave nondestructive testing of pavements[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29(3): 506~511
- 106 吴成元, 邹桂高. 瑞利波法在挤密土桩复合地基检测中的应用[J]. *军工勘探*, 1995(2): 31~35
- 107 杨成林. 应用瑞利波等方法对公路质量进行无损检测[J]. *物探与化探*, 1996, 20(2): 104~115
- 108 张学强. 瑞利波法在地基工程质量检测中若干问题的研究[J]. *物探与化探*, 2000, 24(5): 346~351
- 109 成锁, 田钢, Xia Jianghai, 等. 多道面波分析技术在沙漠低降速带调查中的应用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2005, 35(1): 113~117
- 110 Luke B, Stokoe II K H. Application of SASW method underwater[J]. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 1998, 124(6): 523~532
- 111 Cho Young S, Lin Fengbao. Integrity analysis of single and multi-layer thin cement mortar slab structures using the spectral analysis of surface wave NDT method[J]. *Construction and Building Materials*, 2000, 14(8): 387~395
- 112 Kim D S, Shin M K, Park H C. Evaluation of density in layer compaction using SASW method[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, 21(1): 29~46
- 113 Cho Young S. NDT response of spectral analysis of surface wave method to multi-layer thin high strength concrete structures[J]. *Ultrasonics*, 2002, 40(1—8): 227~230
- 114 Xia J, Chen C, Li P H, et al. Delineation of a collapse feature in anisotropic environment using a multichannel surface wave technique[J]. *Geotechnique*, 2004, 54(1): 17~27
- 115 刘学伟, 郝圣宏, 何樵登. 用面波反演风化层 Q 值—补偿风化层吸收提高分辨率[J]. *石油物探*, 1996, 35(2): 89~95
- 116 罗国安, 杜世通. 小波变换及信号重建在压制面波中的应用[J]. *石油地球物探*, 1996, 31(3): 337~349
- 117 蒋连斌, 陈道宏, 高振山, 等. 一种去面波的新方法[J]. *石油地球物理勘探*, 1997, 32(3): 103~106
- 118 牛滨华, 吕景贵, 孙春岩, 等. 叠前面波干扰压制方法的研究与应用[J]. *现代地质*, 2001, 15(3): 326~332
- 119 曾校丰, 钱荣毅, 邓新生, 等. 油气反射波地震勘探记录中面波信息的提取[J]. *物探与化探*, 2001, 25(6): 443~446
- 120 李媛媛, 李庆春, 丁梁波, 等. 二维小波变换迭代法去除地震面波[A]. 见: 中国地球物理学会编. 中国地球物理[C]. 西安: 西安地图出版社, 2004. 51~52
- 121 王东才. 综合利用地质雷达和瞬态瑞利波法进行地表静校正[J]. *物探装备*, 2001, 11(2): 84~88
- 122 Lee V W, Karl J. Diffraction of SV waves by underground, circular, cylindrical cavities[J]. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1993, 11(8): 445~456
- 123 Liang Jianwen, Zhang Hao, Lee V W. A series solution for surface motion amplification due to underground twin tunnels SV waves[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, 2(2): 289~298
- 124 Fehler M, Roberts P. A temporal change in coda wave attenuation observed during an eruption of Mount St. Helens[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 93(10): 4 367~4 373
- 125 Robinson R. Temporal variations in coda duration of local earthquakes in the Wellington region, New Zealand[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1987, 125(4): 125~130
- 126 Snieder R, Vrijlandt M. Constraining the source separation with coda wave interferometry: Theory and application to earthquake doublets in the Hayward fault, California[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(B4): B04301
- 127 Snieder R. The theory of coda wave interferometry[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163(2—3): 455~473
- 128 陈丙午. 不规则地形对地震动及震害的影响[J]. *地震工程与工程振动*, 1982, 2(1): 12~20

文章编号: 1671-8585(2010)01-0011-05

# 岩心核磁 $T_2$ 谱与毛管压力曲线转换的研究

李 宁, 潘保芝

(吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林长春 130026)

**摘要:** 毛管压力曲线是评价岩石孔隙结构的重要途径, 核磁  $T_2$  谱分析岩石孔隙结构可以将毛管压力曲线作为接合点。由于岩石孔隙形状的假设模型不同, 核磁  $T_2$  转换毛管压力曲线法可分为两类, 一是线性转换方法, 包括直接转换法、平均饱和度误差最小值法、volokitn 经验公式法以及相似对比法; 另一类是幂级数法。线性转换方法与幂级数法的本质区别在于是否假设孔隙为球形或管柱状。综合叙述了这两类方法的理论原理, 并对比阐述了各方法的优缺点。

**关键词:** 岩心; 核磁  $T_2$ ; 毛管压力曲线; 孔隙结构; 研究进展

**中图分类号:** TE2

**文献标识码:** A

毛管压力曲线表示了非润湿相流体在不同的压力下, 穿过不同孔隙喉道进入孔隙内的情况, 在每一压力点下所对应的进入非润湿相流体体积(用饱和度表示)代表了某一孔隙吼道下的孔隙体积, 因此毛管压力曲线不仅描述了孔隙吼道的分布规律, 也描述了孔隙体积的分布<sup>[1]</sup>。

实验室测量毛管压力曲线需要进行取心, 价格昂贵且数量有限, 并且实验室岩心分析并不能代表整个的目的层段, 所以, 需要一种简便、廉价的方法来获得任意层段的毛管压力曲线进而反映孔隙结构特征随深度的变化<sup>[2]</sup>。

本文分别介绍了几种核磁  $T_2$  谱转换毛管压力曲线的方法, 并将目前所使用到的数种方法做了对比和分析。

## 1 $T_2$ 谱转换毛管压力曲线的理论

NMR 主要测量氢核的磁化强度及撤掉外磁场后的弛豫过程。信号的强度主要与岩石孔隙中氢核的数量有关, 因此可以反映岩石的孔隙度, 而衰减时间主要反映氢核磁化的弛豫时间<sup>[3,4]</sup>。水润湿相岩石孔隙中的氢核横向弛豫时间  $T_2$  的计算公式为<sup>[3,4]</sup>

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2B}} + \rho \frac{S}{V} + \frac{D(\gamma GT_E)^2}{12} \quad (1)$$

式中:  $T_{2B}$  为体积弛豫时间;  $T_{2S}$  为表面弛豫时间;  $T_{2D}$ ;  $D$  为扩散系数;  $\gamma$  为旋磁比;  $G$  为磁场梯度;  $T_E$  为回波间隔;  $\rho$  为岩石表面弛豫率;  $S$  为孔隙表面积;  $V$  为孔隙体积。

当孔隙中仅饱和一种流体时, 水的体积弛豫  $T_{2B}$  一般为 3 000 ms, 体积弛豫项可以忽略; 当磁

场均匀(对应磁场梯度  $G$  很小), 同时回波间隔  $T_E$  足够短时, 扩散弛豫项也可以忽略。于是有<sup>[5]</sup>

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{S}{V} \quad (2)$$

这里的  $S/V$  为孔隙面积和孔隙体积之比值, 这个值与孔隙半径有关, 所以孔隙内流体的弛豫时间与孔隙空间大小及形状有关, 孔隙尺寸越小, 表面相互作用越强烈, 则弛豫时间越短。因此, 在这种表面弛豫起主导作用的条件下, 可利用  $T_2$  分布来评价孔隙大小及其分布<sup>[6]</sup>。

目前研究岩石孔隙结构主要采用岩心毛管压力曲线, 然而在实际生产中取心较少, 进行毛管压力曲线实验的样品就更少、并且造价高, 一定程度上限制了应用范围, 而利用核磁测井资料获得毛管压力曲线刚好弥补了这一不足, 为用核磁测井资料进行储层分类奠定了基础。

理论上核磁共振  $T_2$  分布谱和毛管压力曲线都表示与孔隙尺寸和孔隙吼道相关的孔隙体积的分布, 所以两者之间存在紧密联系。

毛管压力公式为<sup>[7]</sup>

$$P_c = 2\sigma \cos\theta / r \quad (3)$$

式中:  $P_c$  为毛管压力;  $\sigma$  为流体表面张力;  $\theta$  为接触角度;  $r$  为毛管半径。

式(2)左右两端与式(3)相除, 有

$$P_c T_2 = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho r} \frac{V}{S} \quad (4)$$

设  $C = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho r} \frac{V}{S}$ ,  $C$  即为转换系数。于是式(4)简

收稿日期: 2009-09-03; 改回日期: 2009-11-02。

第一作者简介: 李宁(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事地球物理测井方法的研究。

化为

$$P_c = C/T_2 \quad (5)$$

可以看到,  $T_2$  谱转换毛管压力曲线的过程其实是寻找转换系数  $C$ <sup>[8]</sup>。

上述这种思想实质上是认为  $T_2$  分布和孔径分布是一种线性关系, 并且认为大孔径部分和小孔径部分的  $T_2$  分布和孔径分布关系是相同的。大多数的转换方法都做了这个假设。另外还有一种思想, 对单峰  $T_2$  谱采用单一的幂级数进行转换; 对于双峰  $T_2$  谱分布, 在大孔隙处和小孔隙处采用不同的幂级数, 分段构造毛管压力曲线, 这种方法称为分段幂级数法<sup>[9]</sup>。

## 2 基于线性关系的转换方法

### 2.1 直接转换法

运华云等提出了  $T_2$  谱和毛管压力简便转换

方法, 对于式(4), 若假设孔隙为理想的球体, 则  $S/V=3/r$ ; 若假设孔隙为理想的圆柱体则  $S/V=2/r$ <sup>[7]</sup>。假设孔隙半径和喉道半径成正比, 式(4)可化为<sup>[3]</sup>

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{F_s}{r} \quad (6)$$

将汞的参数  $\sigma=49.44 \text{ N/cm}^2$ ,  $\theta=140^\circ$  代入, 对于式(5)中的  $C$  有

$$C = \frac{0.735}{\rho F_s} \quad (7)$$

式中:  $\rho$  为表面弛豫率;  $F_s$  为孔隙形状因子。采用这种方法进行的转换在冀东油田效果良好。但是需要注意的是, 对于实际岩心样品,  $\rho$  和  $F_s$  的确定比较困难。图 1 为采用直接转化的  $T_2$  谱和毛管压力曲线对比, 可以看出, 用这种方法计算出的毛管压力曲线比较可信<sup>[10,11]</sup>。

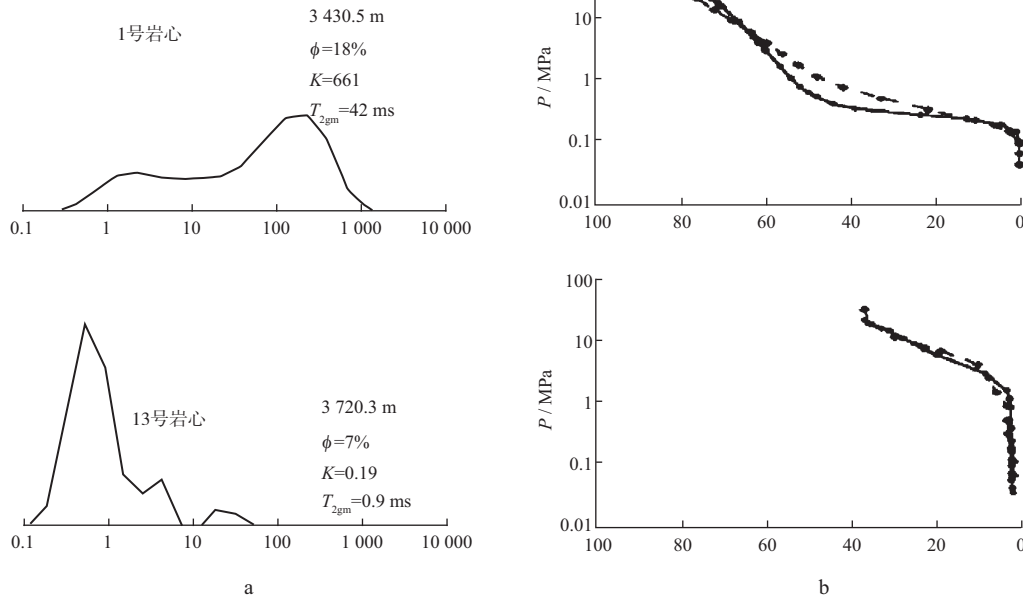


图 1  $T_2$  谱和毛管压力曲线对比

a 实测  $T_2$  谱; b 毛管压力曲线(虚线为转化曲线, 实线为实测曲线)

### 2.2 饱和度最小误差法<sup>[12]</sup>

Volokitn 等 2001 年提出了一种平均饱和度误差最小值法, 对与转换系数  $C$  有关的平均饱和度误差函数  $g(\delta S_w)_{\text{field}}(C)$  分析, 使转换得到的毛管压力曲线与试验得到的毛管压力曲线形态最接近。基本思路是将饱和度误差平均地分散给一定范围内的毛管压力  $P_c$ <sup>[1]</sup>。

$$g(\delta S_w)_{\text{field}}(C) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(S_{w, \text{Hg}} - S_{w, \text{NMR}})_i(C) \quad (8)$$

式中:  $i=1, 2, 3, \dots, n$  ( $n$  为  $T_2$  谱的数据点数)。

$$g(S_{w, \text{Hg}} - S_{w, \text{NMR}})_i(C) = \sqrt{\frac{1}{P_{c, \text{high}} - P_{c, \text{low}}}} \cdot \sqrt{\int_{P_{c, \text{low}}}^{P_{c, \text{high}}} S_{w, \text{Hg}}(P_c)_i - S_{w, \text{NMR}}(P_c - CT_2^{-1})_i dP_c}$$

式中:  $S_{w, \text{Hg}}$  为进汞饱和度,  $S_{w, \text{NMR}}$  为核磁反向累加饱和度,  $P_{c, \text{low}}$  为启动毛管压力,  $P_{c, \text{high}}$  为最大毛管

压力。

通过改变  $C$  值,使平均饱和度误差函数  $g(\delta S_w)_{\text{field}}(C)$  取最小值,这时的转换毛管压力曲线和压汞毛管压力曲线形态最相似,此时的  $C$  即为最佳转换系数。

### 2.3 经验公式法

目前应用较多的是 Volokitn 所提出的一个经验公式,表示毛管压力与核磁  $T_2$  谱之间的关系<sup>[13]</sup>

$$P_c = \frac{1}{T_2} \left( 1 + \left( \frac{A}{BT_2 + 1} \right)^c \right) \frac{D}{K} \quad (9)$$

式中: $A, B, C$  分别为与孔隙结构、储层类型相关的经验系数,可用实验室岩心毛管压力曲线刻度核磁  $T_2$  分布谱分析确定; $D$  为经验系数,一般默认为 2 000。 $K$  为渗透率。该关系式较适合低孔隙度地层。

系数  $A, B, C$  和  $D$  的确定是计算毛管压力的关键,使用多块岩心,进行岩心分析获得其毛管压力曲线然后反刻度,确定出  $A, B, C, D$  的值<sup>[14]</sup>。

### 2.4 相似对比法

上述方法在  $T_2$  和  $P_c$  的转换过程中,需要涉及到某些岩石特征参数(如  $\rho$  和  $F_s$ )或者经验系数,使用中有一定困难,所以下面介绍一种直接利用岩心核磁  $T_2$  谱和压汞分析数据之间的相关性,客观确定  $T_2$  和  $P_c$  之间转换系数的方法,可以避免确定岩石特性参数的困难,即相似对比法,这种方法从  $C/T_2 \sim A_m$  ( $A_m$  为对应于  $T_2$  的测量信号幅度)和  $P_c \sim S_{\text{Hg}}$  ( $P_c$  为压汞的驱替压力、 $S_{\text{Hg}}$  为对应于  $P_c$  压力区间的汞饱和度)的数据相关性来考虑,通过数据点之间的相关系数  $R$  来寻找最佳的转换系数<sup>[15]</sup>。

假定一个  $C_i$  值( $C_i$  为给定的  $i$  个不同  $C$  值),

将  $C/T_2 \sim A_m$  和  $P_c \sim S_{\text{Hg}}$  放在一张图上,图 2 是  $T_2$  谱分布和毛管压力分布的对比。对于  $C/T_2 \sim A_m$  曲线,横轴为  $C/T_2$ ,竖轴为  $A_m$ ;对于  $P_c \sim S_{\text{Hg}}$  曲线,横轴为毛管压力,竖轴为进汞饱和度。如果改变  $C$  值,则  $C/T_2 \sim A_m$  曲线位置发生改变,可以找到一个  $C$  值,使两条曲线重合度达到最高,则这时的  $C$  值就是最佳转换系数<sup>[15]</sup>。

这里  $C/T_2 \sim A_m$  的数据点数有  $N$  个, $P_c \sim S_{\text{Hg}}$  的数据点数有  $N_1$  个,很明显  $N > N_1$ ,这就有了数据点数不对应的问题。由于数据点数的不对应,不能直接计算相关系数。首先,根据横轴  $C/T_2$  和  $P_c$  的相关性,对于每个  $P_c$  值,根据式(10),从同为横轴的  $T_2$  数据中挑选出一个与  $P_c$  最接近的  $T_2$  值,也就是  $df_j$  取最小时的  $T_2$  值,这里要注意,因为  $T_2$  数据是从小到大的顺序排列的,所以  $C/T_2$  的顺序倒转,即大的  $T_2$  值在图 2 的左侧,所以这里对于  $T_2$  的下标做了  $N - K_j$  这样的处理,以保持顺序一致。

$$df_j = \left| \frac{C_i}{T_{2(N-K_j)}} - P_{c_j} \right| \quad (10)$$

找到一组  $T_2$  值后(个数为  $N_1$  个),用下标  $K_j$  来标识,同时也就找到了与  $T_2$  相对应的一组  $A_m$  值,然后根据公式(11),计算两条曲线的相关系数  $R$ 。

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_1} (A_{mk_j} - \bar{A}_m)(S_{\text{Hg}j} - \bar{S}_{\text{Hg}})}{\sqrt{\sum_{j=1}^{N_1} (A_{mk_j} - \bar{A}_m)^2 \sum_{j=1}^{N_1} (S_{\text{Hg}j} - \bar{S}_{\text{Hg}})^2}} \quad (11)$$

改变  $C_i$  值,则可以改变  $df_j$  的结果,以至于影响  $T_2$  数据的选取,最终影响相关系数  $R$  的计算结

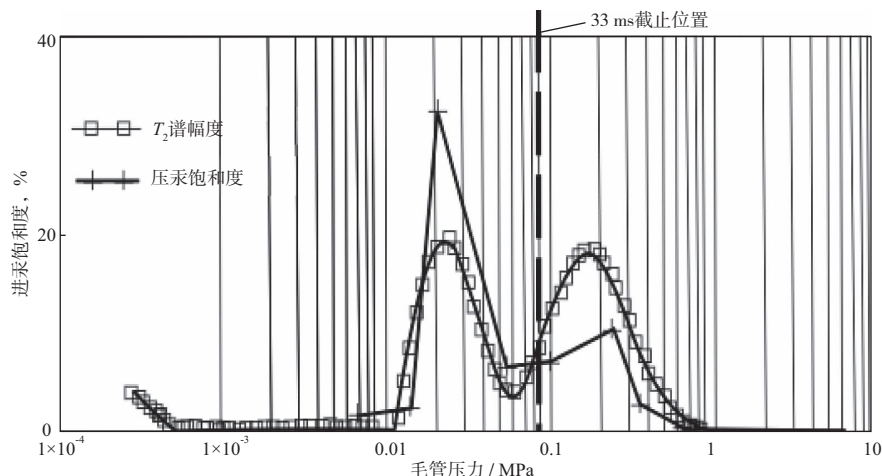


图 2  $T_2$  谱分布和毛管压力分布

果。使相关系数  $R$  取得最小值的  $C_i$  值就是要找的最佳转换系数。

很显然,确定  $C_i$  值的过程,主要是利用了  $C/T_2 \sim A_m$  与  $P_c \sim S_{Hg}$  两组数据之间的相关性,不涉及岩心特性的具体参数,所以,  $C$  值选定相对客观而且简单。应该指出的是,两组数据之间的相似性,是在  $T_2$  与  $P_c$  之间进行转换的基础。如果两种数据之间相关性不好,这种方法就不再适用。

使用  $T_2$  谱转换毛管压力曲线的时候,普遍对体积弛豫做了忽略处理,但是事实情况是这种忽略会产生误差。当地层的孔隙范围较广时,对于快扩散特性的小孔隙,体积弛豫可以忽略,但是对于慢扩散特性的中、大孔隙来说,体积弛豫并不能忽略,于是提出了分段转换法对孔隙的结构进行评价,即将  $T_2$  谱分为两个区域,分界点就是体积弛豫能否忽略的临界点,  $T_2$  谱和孔径在不同的区域,转换公式不同。

### 3 基于非线性关系的分段幂级数法<sup>[16]</sup>

目前的各种转换方法都是基于  $P_c = C/T_2$  这个公式进行转换,公式的实质是认为  $T_2$  分布和孔径分布是一种线性的关系。  $P_c = C/T_2$  的最基本的假设是将孔隙简化为了球状或柱状,但是实际情况下的地层孔隙形状十分复杂,考虑到孔隙内流体的弛豫时间与比表面有关,而比表面与孔隙结构有关,所以孔隙比表面与孔径的关系复杂,是非线性关系。假设  $T_2$  分布谱和孔径分布之间的关系是幂级数的形式,则更接近实际情况<sup>[16]</sup>。

基于这种用幂级数的方法对  $T_2$  谱进行转换,以构造毛管压力曲线的方法,对单峰  $T_2$  谱采用单一的幂级数进行转换;对于双峰  $T_2$  谱分布,在大孔隙处和小孔隙处采用不同的幂级数,分段构造毛管压力曲线。

对于式(2),将非线性关系表示为

$$\frac{1}{T_2} = \frac{\rho}{f(r)}$$

得到转换公式

$$P_c = g\left(\frac{1}{T_2}\right) \quad (12)$$

式中:  $g$  为一个函数,经过推导可以得到  $g$  函数的通用表达式。

$$g = \frac{2\sigma\cos\theta}{f^{-1}(\rho T_2)} \quad (13)$$

公式中  $r$  的函数  $f(r)$  与孔隙的表面积和体积有关:  $f(r) = V/S$ 。假设不同的孔隙模型,体积和表面积之比不同,则可得到不同的关系式。

假设孔隙为规则球体,

$$\frac{V}{S} = \frac{r}{3}$$

于是

$$g = \frac{2\sigma\cos\theta}{3\rho_2} \frac{1}{T_2}$$

假设孔隙为规则圆柱体

$$\frac{V}{S} = \frac{r}{2}$$

则有

$$g = \frac{\sigma\cos\theta}{\rho} \frac{1}{T_2}$$

假设孔隙为不规则形状且具有

$$\frac{V}{S} = \frac{r^M}{N}$$

则有

$$g = \frac{2\sigma\cos\theta}{(N\rho)^{\frac{1}{M}}} \left(\frac{1}{T_2}\right)^{\frac{1}{M}}$$

对于单峰  $T_2$  谱,采用转换公式

$$P_c = m\left(\frac{1}{T_2}\right)^n \quad (14)$$

对于双峰  $T_2$  谱,采用转换公式

$$\text{大孔径处, } P_c = m_1\left(\frac{1}{T_2}\right)^{n_1} \quad (15)$$

$$\text{小孔径处, } P_c = m_2\left(\frac{1}{T_2}\right)^{n_2}$$

式中:  $m_1, n_1, m_2, n_2$  为待定的未知参数。使用  $T_2$  几何平均值和毛管半径平均值的相关性来确定幂函数中的参数。对于单峰  $T_2$  分布,当大孔和小孔之间有拐点时也归结为双峰,此时拐点为分界点,对于双峰  $T_2$  分布,该分界点即为两波峰之间的波谷处<sup>[16]</sup>。图 3 分别为单峰和双峰情况下使用幂级数法转换的毛管压力曲线,图上标注了岩心的孔隙度和渗透率。



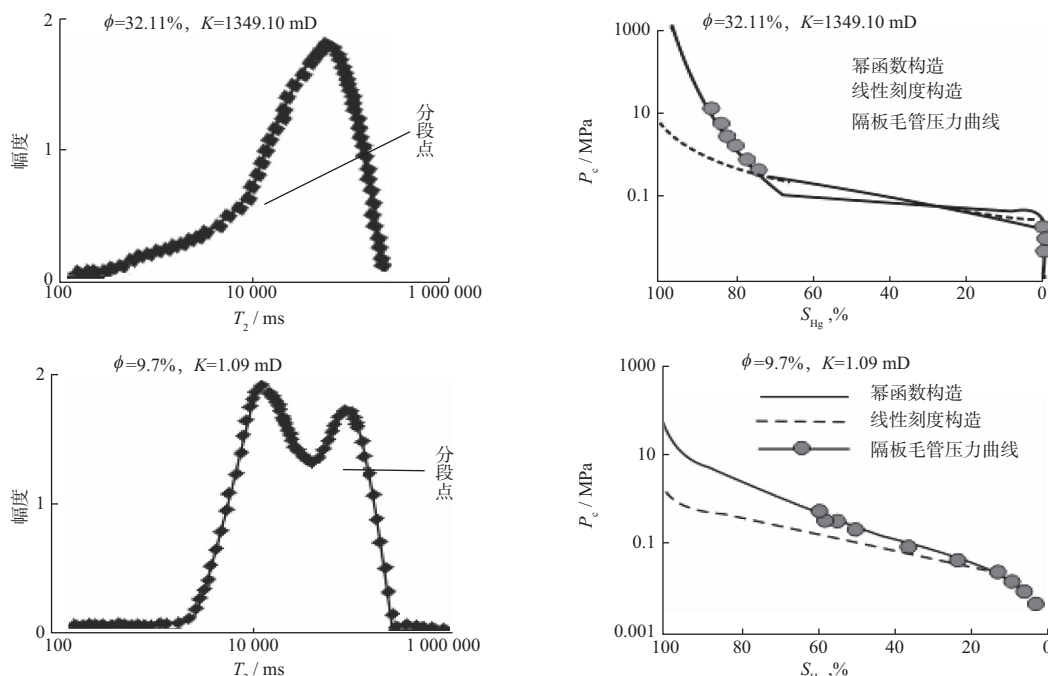


图 3  $T_2$  分布谱以及转换的毛管压力曲线和实测毛管压力曲线对比

## 4 结论

1) 对于直接转换法、平均饱和度误差最小值法、Volokitn 经验公式法、相似对比法以及分段幂级数法,直接转换法由基础理论公式直接推导所得,最容易理解,使用也最为简便,但是对于复杂问题有可能会存在较大的误差。平均饱和度误差最小值法则综合了数学统计方法,适用性进一步扩大。Volokitn 经验公式法涉及参数较少,使用简单,但是需确定经验系数,对于不同地区,确定所需经验系数的难度不同。相似对比法基于数据的相关性,完全避开了经验系数,避免确定岩石特性参数的困难,但是在数据相关性不好的情况下,不适用。分段幂级数法所假设的孔隙模型更接近实际情况,理论更为完善,精度更高,但是比较繁琐。

2) 这些方法中,随着方法复杂程度的提高,其转换精度也会相应提高。对于简单储层,各种方法的精度差别不大,即使是最简单的直接转换,也可得到较好的毛管压力曲线,但是如果岩层复杂,则可考虑较为复杂的方法。

### 参 考 文 献

- 1 刘晓鹏,肖亮,张伟. 储层毛管压力曲线构造方法及其应用[J]. 西南石油大学学报,2008,30(6):126~130
- 2 阙洪培,雷卞军. 核磁共振  $T_2$  谱法估算毛管压力曲线综述[J]. 西南石油学院学报,2003,25(2):9~11
- 3 查传钰,车文华,顾伟康. 用核磁共振测井资料评价岩石孔隙分布[J]. 江汉石油学院学报,1998,20(2):38~42

- 4 Coates G,肖立志,Prammer M. 核磁共振测井原理与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2007. 1~188
- 5 齐宝权,夏宏泉,张贤辉. NMR 测井识别储层流体性质的方法及应用[J]. 西南石油学院学报,2001,23(1):18~22
- 6 张松扬,范宜仁. 核磁共振测井技术评述[J]. 勘探地球物理进展,2002,25(4):21~26
- 7 肖亮. 利用核磁共振测井资料评价储集层孔隙结构的讨论[J]. 新疆石油地质,2008,29(2):260~263
- 8 运华云,赵文杰,刘兵开,等. 利用  $T_2$  分布进行岩石孔隙结构研究[J]. 测井技术,2002,26(1):18~21
- 9 何雨丹,毛志强,肖立志,等. 利用核磁共振  $T_2$  分布构造毛管压力曲线的新方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2005,35(2):177~181
- 10 李海波,朱巨义,郭和坤. 核磁共振  $T_2$  谱换算孔隙半径分布方法研究[J]. 波谱学杂志,2008,25(2):273~279
- 11 陈振标,张超谟,张占松,等. 利用 NMR  $T_2$  谱分布研究储层岩石孔隙分形结构[J]. 岩性油气藏,2008,20(1):105~110
- 12 肖亮,刘晓鹏,陈兆明,等. 核磁毛管压力曲线构造方法综述[J]. 断块油气田,2007,14(2):86~88
- 13 朱建华. 核磁测井在海拉尔地区储层分类中的应用[J]. 大庆石油地质与开发,2008,27(3):136~138
- 14 Li Guoxin, Wang Yuhua, Zhao Jie. Petrophysical characterization of a complex volcanic reservoir[J]. Petrophysics,2008,49(2):113~129
- 15 刘堂宴,马在田,傅容珊. 核磁共振谱的岩石孔喉结构分析[J]. 地球物理学进展,2003,18(4):737~742
- 16 何雨丹,毛志强,肖立志,等. 核磁共振  $T_2$  分布评价岩石孔径分布的改进方法[J]. 地球物理学报,2005,48(2):373~378

(编辑:任 鹏)