

利用地震资料反演地层的碳酸盐含量

熊艳¹, 钟广法¹, 李前裕¹, 吴能友², 李学杰², 马在田¹

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

2. 广州海洋地质调查局, 广东广州 510760

摘要: 基于碳酸盐含量与地层速度、密度之间的关系, 在井资料约束下, 使用人工神经网络方法反演高分辨率地震资料所反映的地层碳酸盐含量, 并应用于南海北部陆坡 ODP184 航次 1146 和 1148 孔区, 取得较好效果。方法的关键是从井旁地震道中提取多种属性, 利用逐步回归法, 确定 6 种与碳酸盐含量相关性最好的地震属性, 分别是平均频率、道积分绝对振幅、主频、时间、道微分瞬时振幅和瞬时频率, 然后进行地层碳酸盐含量反演。反演结果相对于岩心分析的碳酸盐含量的误差大多在 $\pm 5\%$ 之内, 较为精确地揭示了地震地层剖面上碳酸盐含量的分布。

关键词: 碳酸盐含量反演; 地震资料; 人工神经网络; ODP184 航次; 南海北部。

中图分类号: P631.4

文章编号: 1000-2383(2006)06-0851-06

收稿日期: 2006-05-12

Inversion of Stratal Carbonate Content Using Seismic Data

XIONG Yan¹, ZHONG Guang-fa¹, LI Qian-yu¹, WU Neng-you², LI Xue-jie², MA Zai-tian¹

1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China

Abstract: Based upon the relationship between carbonate content and stratal velocity and density, we attempted to apply the artificial neural network to the inversion of carbonate content summarized from the high-resolution seismic data limited by controlled well measurements. The method was applied to the slope area of the northern South China Sea near ODP Sites 1146 and 1148, with satisfactory results. The key to this method is the collection of several properties from seismic profiles across or near the wells. Then the progressive regression method was primarily applied to the determination of six seismic properties, most closely related to carbonate content variations, which are defined as average frequency, integrated absolute amplitude, dominating frequency, reflection time, derivative instantaneous amplitude, and instantaneous frequency. Finally, the stratal carbonate content is reversed. The reversal results thus obtained, with the errors of carbonate content mostly ranging within $\pm 5\%$ relative to those measured from sediment samples, show a relative accurate picture of carbonate-content distribution along the slope profile.

Key words: carbonate content inversion; seismic data; artificial neural network; ODP Leg 184; northern South China Sea.

海相沉积物中碳酸盐含量的分布数据蕴含着重要的古海洋、古环境和古气候演变方面的信息, 直接与全球碳储库相关, 在科学研究和资源勘探中具有不可替代的意义和广泛的用途 (Trentesaux *et al.*, 2001; 陈晓良等, 2002; 黄维等, 2003)。地层中碳酸盐含量数据的获取主要根据岩样测定, 常规测井结果一般只提供半定性资料 (Kenter *et al.*, 2002; Wal-

lace *et al.*, 2002; Fabricius, 2003)。最近, 有利用高分辨率地球物理测井资料来反演地层组分包括碳酸盐含量的尝试 (钟广法等, 2006)。但这些方法只能获得样点或井孔处地层的碳酸盐含量, 无法预测井间碳酸盐含量的空间分布。而大范围碳酸盐含量的空间分布规律, 是认识盆地演化与区域构造和沉积作用以及古环境变迁之间耦合作用的一个重要前

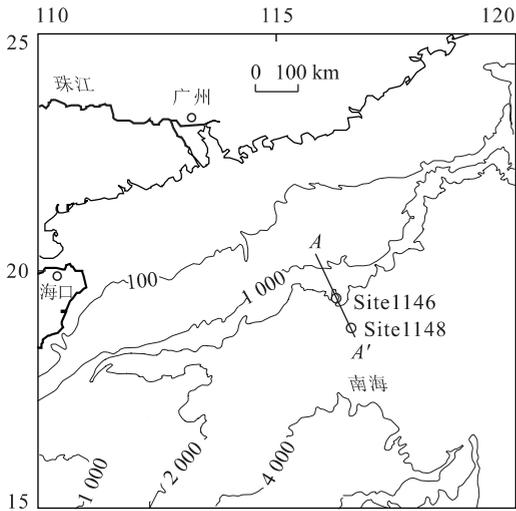


图 1 研究区位置略图(水深线单位 m)
Fig. 1 Location map of the study area

提. 本文基于碳酸盐含量与地层速度、密度之间的关系,应用高分辨率地震资料反演 ODP184 航次 1146 和 1148 孔地层的碳酸盐含量,取得较好效果,并应用于该两孔附近南海北部陆坡区的地震剖面,反演结果初步恢复了不同地层层序中碳酸盐分布的基本特点.

1 研究材料

ODP184 航次在南海北部陆坡 5 个深水站位钻孔 14 口,其中 1146 和 1148 两孔钻入海底地层的深

度较大,分别钻揭中新统和渐新统(Wang *et al.*, 2000). 作为方法探索,本文以这两孔所在区域为研究区. 所使用的研究材料包括: ODP184 航次获得的上述两孔岩心碳酸盐含量、P 波速度和密度测试数据,声波、密度测井资料,以及广州海洋地质调查局采集的过这两孔的高分辨率反射地震资料(图 1).

2 理论基础

地震反射反映了地层的波阻抗或速度、密度信息. 碳酸盐含量与地层速度、密度之间的相关性,是根据地震资料反演地层碳酸盐含量的重要基础和前提. 利用地震资料预测砂岩百分含量及孔隙度是油气储层评价的重要手段(Wong *et al.*, 1997; Sarg and Schuelke, 2003),但用来定量分析碳酸盐和其他沉积物组分在国内外都未见有报道.

南海深海沉积地层按其成分及结构可以简化为陆源碎屑、碳酸盐(包括无机碳酸盐矿物和钙质化石)、粘土矿物及孔隙等组分(钟广法等,2006). 根据岩石体物理模型,其物理性质包括速度、密度取决于上述诸组分的差异. 其他因素,如压实成岩作用、埋藏深度等,均通过影响上述组分的相对体积含量而影响地层的物理性质. 由于碳酸盐矿物的速度、密度与其他组分有较大的差异,因此碳酸盐含量的多寡直接影响地层的速度和密度. 这一点可以从图 2 所示的 1146 和 1148 两孔岩心实测碳酸盐含量与声

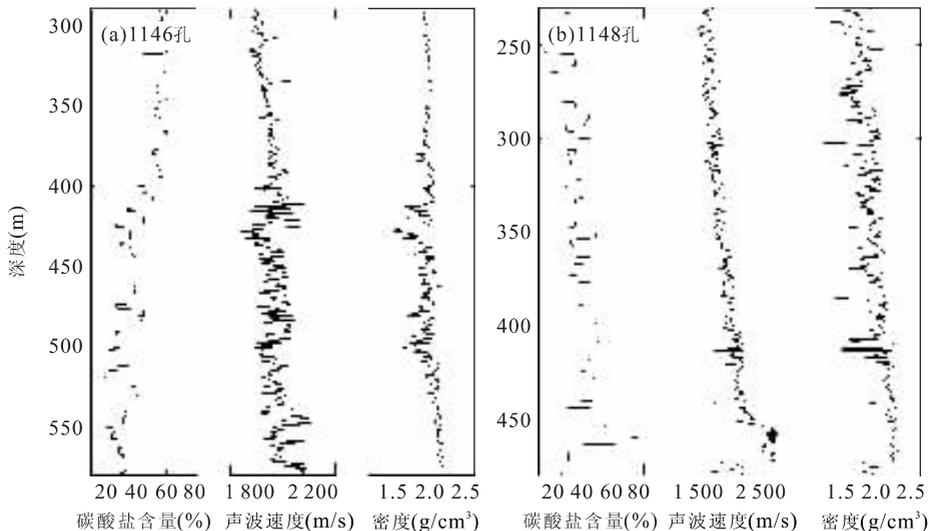


图 2 岩心实测的碳酸盐含量、声波速度和密度测井曲线之间的关系

Fig. 2 Relationship between core-measured carbonate content, P-wave velocity and density logs at ODP Site 1146 (a) and ODP Site 1148 (b)

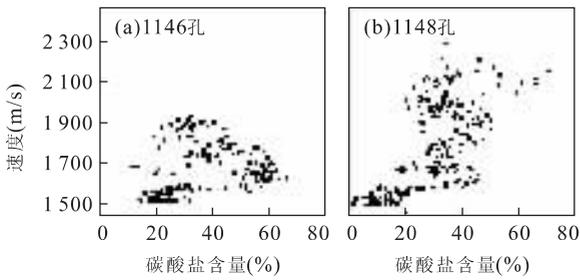


图 3 岩心实测的碳酸盐含量与速度交会图

Fig. 3 Cross-plots of core-measured P-wave velocity versus carbonate content

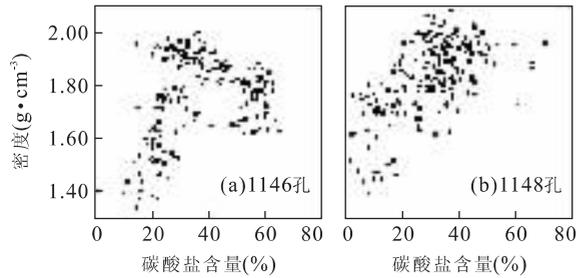


图 4 岩心实测的碳酸盐含量与密度交会图

Fig. 4 Cross-plots of core-measured density versus carbonate content

波速度、密度测井曲线之间相同的变化趋势得到初步印证。

为了更深入地研究碳酸盐含量与地层速度、密度之间的关系,分别绘制了 1146 和 1148 孔岩心实测的碳酸盐含量和声波、密度散点图。结果表明,南海深海沉积物中碳酸盐含量与速度、密度总体存在正相关,但为非线性关系(图 3, 4)。因此,不能用简单的线性拟合建立碳酸盐含量与声波速度和密度之间的关系。

3 方法原理

利用地震资料反演碳酸盐含量的基本思路是:从地震资料中提取多种属性,建立地震属性与地层碳酸盐含量之间的关系,利用该关系由地震剖面反演得到地层的碳酸盐含量剖面。地震属性是由地震数据经过数学变换而导出的地震波的几何学、运动学、动力学和统计学特征。考虑到并非所有的地震属性都与地层碳酸盐含量相关,所以首先需要对地震属性进行筛选,即从众多属性中挑选出与地层碳酸盐含量相关性最好的一组属性。然后,根据这些属性反演地层的碳酸盐含量。

3.1 地震属性的提取和选择

地层的波阻抗或速度、密度的变化,表现为地震反射的振幅、频率、相位等特征的变化。从地震数据中提取的属性主要有:振幅包络、加权振幅的余弦相位、加权振幅的频率、加权振幅的相位、平均频率、视极性、余弦瞬时相位、道微分、道微分瞬时振幅、主频、瞬时频率、瞬时相位、道积分、道积分绝对振幅、二次微分、时间等(Hampson *et al.*, 2001)。由于并非所有的属性对目标值(即碳酸盐含量)的变化都有响应,因此首先要进行属性的选取,即属性优化,选出与目标值相关性好的那些属性。属性优化的方法有多种,本文采用逐步回归方法。

对于确定的时间位置 t ,如果目标值 $y(t)$ 和某种地震属性 $x(t)$ 存在线性关系,即可以通过线性回归来拟合:

$$y(t) = ax(t) + b. \quad (1)$$

系数 a 和 b 由最小二乘法确定。如果目标值同时与 n 种属性 $A_1(t), A_2(t), \dots, A_n(t)$ 相关,则目标值 $L(t)$ 可以表示为:

$$L(t) = \omega_0 + \omega_1 A_1(t) + \omega_2 A_2(t) + \dots + \omega_n A_n(t). \quad (2)$$

式中, ω_i 为属性 $A_i(t)$ 的权值,可以通过最小化均方预测误差求得:

$$E^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (L_i - \omega_0 - \omega_1 \cdot A_{1i} - \omega_2 \cdot A_{2i} - \dots - \omega_n \cdot A_{ni})^2. \quad (3)$$

因此,给定一组属性,由上式可以确定其最优权值系数。这些系数在这种意义上是最优的,即实际目标值与预测目标值之间的均方预测误差最小。

属性选取的步骤如下:(1)首先用穷举搜索找出单个最佳属性。对每种属性求解最佳系数,并计算预测误差。具有最小预测误差的那个属性就是最佳属性,把它记作属性 1;(2)属性 1 与其他属性构成属性对,对于每一属性对,求解最优系数,并计算预测误差。预测误差最小的属性对就是最优属性对。把最优属性对中的第 2 种属性记作属性 2;(3)将确定的属性 1 和属性 2,与其他属性中的每种属性构成属性组,求解最优系数,并计算预测误差。求得最佳属性组,将其第 3 个属性记作属性 3。重复上述过程,直到达到期望求得的属性个数。属性的个数可根据误差达到期望范围来确定。

3.2 人工神经网络反演

如果选定的地震属性与目标函数值存在线性关

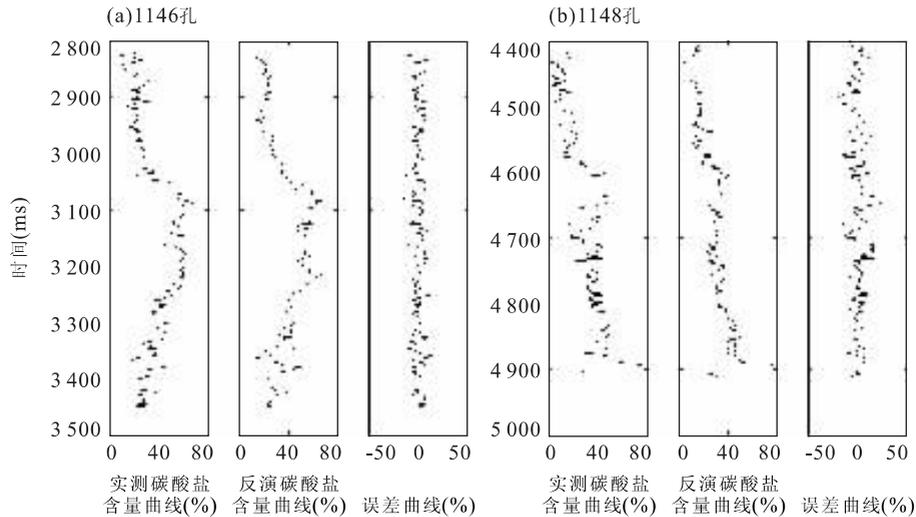


图 5 岩心实测碳酸盐含量曲线与根据井旁道反演的碳酸盐含量曲线之间的对比

Fig. 5 Comparison of core-measured carbonate content and inverted carbonate content from seismic data

系,则可直接用多元线性回归方法拟合关系式,利用属性计算出目标值。但是,在实际中,一种地震属性往往是多种地层物性参数的综合反映,与单一目标值(本文为碳酸盐含量)之间不一定存在明显的线性关系。多种属性情形下,属性与目标值之间的关系更为复杂。因此,必须采用非线性算法,才能较好地拟合出目标值与多种属性之间的复杂关系。

人工神经网络是一种大规模并行分布处理的非线性系统,可以处理那些难以用数学模型描述的系统(Rosenblatt, 1962; Hecht-Nielsen, 1989; Bishop, 1995),可以逼近任何非线性的特性,具有很强的自适应、自学习、联想记忆、高度容错和并行处理能力,近年来广泛应用于测井、地震结合的地层物性反演(Hampson *et al.*, 2001; Nikravesh *et al.*, 2001a, b, 2004; 吴大奎等, 2004)。

本文以岩心实测的地层碳酸盐含量曲线作为目标值,采用多层前馈神经网络,构造地震属性和目标值之间的非线性关系。

多层前馈神经网络由一个输入层、一个输出层、一个或多个隐层组成。每一层有若干个节点,节点之间由权值连接,并由权值确定输出层结果。本文中,输入层的节点数与选取的属性数相同。由于预测的目标只有一个,即地层的碳酸盐含量,故输出层只有一个节点。隐层的个数和节点可由试验决定。

将从井旁地震道中提取的属性做为输入层参数,对应井位处岩心实测的碳酸盐含量曲线做为输出层的目标值曲线,进行神经网络的训练,求出节点

间的最优权值。权值的确定是一个非线性最优化问题,其目标是使预测的目标值与实际目标值之间的均方误差最小。训练好的网络,即可用于地震资料预测目标曲线。

4 结果与讨论

采用 Su *et al.* (2004) 对 1146 和 1148 站位的地层划分,通过合成地震记录,将其转换到时间域,对地震剖面的层位进行了标定。通过时深转换,将岩心碳酸盐含量曲线转换到时间域,与地震道进行对比。

从 1146 和 1148 孔的井旁地震道中提取多种属性,利用逐步回归法,确定了 6 种与碳酸盐含量相关性最好的地震属性,用于地层碳酸盐含量反演。这 6 种属性分别是平均频率、道积分绝对振幅、主频、时间、道微分瞬时振幅和瞬时频率。

利用多层前馈神经网络方法建立起碳酸盐含量与上述地震属性之间的关系,反演得到碳酸盐含量曲线。由图 5 可知,根据井旁道反演得到碳酸盐含量曲线,与岩心实测的碳酸盐含量曲线在趋势上吻合较好。误差大多在 $\pm 5\%$,较真实地反映了地层碳酸盐含量变化的基本特点。少数井段误差在 $\pm 10\% \sim 15\%$,如 1148 站 4 480~4 500 ms 和 4 680~4 720 ms 区间,据分析,与滑坡、崩塌等再沉积作用有关。

将训练好的神经网络,应用到高分辨率地震数据,根据筛选出来的地震属性,反演得到地层碳酸盐含量剖面,如图 6 所示。

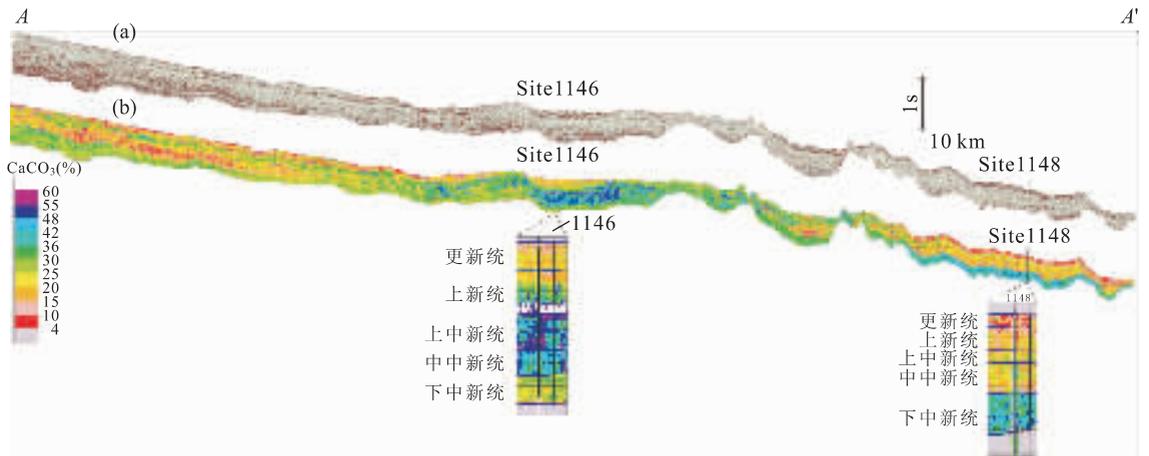


图 6 (a)未解释的地震剖面;(b)反演的碳酸盐含量剖面(测线 AA'位置见图 1)

Fig. 6 (a) Un-interpreted seismic profile, (b) inverted carbonate content profile

从反演的碳酸盐含量剖面分析,纵向上,1146 站位附近中中新统到上新统碳酸盐含量相对较高,其上覆及下伏地层中碳酸盐含量相对较低;1148 站位附近,从中中新统、上新统,到更新统,碳酸盐含量总体表现为逐渐降低趋势。横向上,下中新统碳酸盐含量分布较稳定,主要介于 20%~40%之间;中中新统到上新统下部,碳酸盐含量横向变化较大,顺陆坡而下朝深水方向,碳酸盐含量递减,由 60%逐步降低到 20%;更新统地层碳酸盐含量普遍较低。另外,碳酸盐含量在斜坡上较低而在平缓处和深水区较高。这些特征,体现了南海从张裂(~33 Ma)到停止扩张(~16 Ma)及扩张停止后(16~0 Ma)不同演化阶段在深水区的沉积和底流活动特点(Li *et al.*, 2006)。我们的结果为探讨大范围碳酸盐沉积作用,提供了一个较准确和较直观的替代性定量模式。

5 结论

基于碳酸盐含量与地层速度、密度之间的关系,本文尝试在井资料约束下,采用人工神经网络方法从高分辨率地震资料中反演地层的碳酸盐含量,并应用于南海北部陆坡 ODP184 航次 1146 和 1148 孔区,取得较好效果。对比岩心分析的碳酸盐含量,反演结果误差大多在±5%之内,较为精确地揭示了地震地层剖面上碳酸盐含量的变化趋势。本研究尝试应用高分辨率地震资料反演地层碳酸盐含量,为探讨大范围碳酸盐沉积作用,提供一个较准确和较直观的替代性定量模式。相信随着新方法的不断应用和完善,从高分辨率地震剖面直接读取碳酸盐以及

其他沉积物含量的日子将很快到来。

致谢:本文的工作是在汪品先院士的建议和指导下完成的;ODP184 航次岩心分析数据和测井资料来源于国际大洋钻探计划;广州海洋地质调查局提供了高分辨率反射地震资料,在此表示感谢!

References

- Bishop, C., 1995. Neural networks for pattern recognition. Oxford University Press, New York.
- Chen, X. L., Zhao, Q. H., Jian, Z. M., 2002. Carbonate content changes since the Miocene and paleoenvironmental implications, ODP Site 1148, northern South China Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 22(2): 69–74 (in Chinese with English abstract).
- Fabricius, I. L., 2003. How burial diagenesis of chalk sediments controls sonic velocity and porosity. *AAPG Bulletin*, 87: 1755–1778.
- Hampson, D., Schuelke, J., Quirein, J., 2001. Using multi-attribute transforms to predict log properties from seismic data. *Geophysics*, 66(1): 220–236.
- Hecht-Nielsen, R., 1989. Theory of backpropagation neural networks. Presented at IEEE Proc., Int. Conf. Neural Network, Washington, DC.
- Huang, W., Liu, Z. F., Chen, X. L., et al., 2003. Searching physical indicators of carbonate contents of deep sea sediments. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(2): 157–162 (in Chinese with English abstract).
- Kenter, A. M., Anselmetti, F. S., Kramer, P. H., et al., 2002. Acoustic properties of “YOUNG” carbonate rocks, ODP Leg 166 and boreholes Clino and Unda, western Great Bahama Bank. *Journal of Sedimentary*

- Research*, 72:129—137.
- Li, Q. Y., Wang, P. X., Zhao, Q., et al., 2006. A 33 Ma lithostratigraphic record of tectonic and paleoceanographic evolution of the South China Sea. *Marine Geology*, 230:217—235.
- Nikravesh, M., 2004. Soft computing-based computational intelligent for reservoir characterization. *Expert Systems with Applications*, 26:19—38.
- Nikravesh, M., Adams, R. D., Levey, R. A., 2001a. Soft computing: Tools for intelligent reservoir characterization (IRESC) and optimum well placement (OWP). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 29(3/4):239—262.
- Nikravesh, M., Aminzadeh, F., Zadeh, L. A., 2001b. Soft computing and earth sciences (Part 2). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 31(2—4):67—204.
- Rosenblatt, F., 1962. Principals of neurodynamics. Spartan, New York.
- Sarg, J. F., Schuelke, J. S., 2003. Integrated seismic analysis of carbonate reservoirs: From the framework to the volume attributes. *The Leading Edge*, 22(7):640—645.
- Su, X., Xu, Y., Tu, Q., 2004. Early Oligocene-Pleistocene calcareous nannofossil biostratigraphy of the northern South China Sea (Leg 184, Sites 1146—1148). In: Prell, W. L., Wang, P. X., Blum, P., et al., eds, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Volume 184.
- Trentesaux, A., Recourt, P., Bout-Roumzeilles, V., et al., 2001. Carbonate grain-size distribution in hemipelagic sediments from a laser particle sizer. *Journal of Sedimentary Research*, 71:858—862.
- Wallace, M. W., Holdgate, G. R., Daniels, J., et al., 2002. Sonic velocity, submarine canyons, and burial diagenesis in Oligocene-Holocene coolwater carbonates, Gippsland basin, southeast Australia. *AAPG Bulletin*, 86:1593—1607.
- Wang, P. X., Prell, W., Blum, P., et al., 2000. Proceedings of the ocean drilling program, initial reports, Volume 184. Ocean Drilling Program, College Station, 1—77.
- Wong, P. M., Tamhane, D., Wang, L., et al., 1997. Network approach to know ledge-based well interpolation: A case study of a fluvial sandstone reservoir. *Journal of Petroleum Geology*, 20:363—372.
- Wu, D. K., Li, Y. L., Wu, Z. M., et al., 2004. Research on the neural network algorithm of joint inversion of seismic and log data. *Natural Gas Industry*, 24(3):55—57 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, G. F., Li, Q. Y., Chen, Q., et al., 2006. Oligocene mineral component inversion using geophysical well logs from ODP Hole 1148A, South China Sea. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 34(10) (in press, in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈晓良, 赵泉鸿, 翦知湓, 2002. 南海北部 ODP184 站中新世以来的碳酸盐含量变化及其古环境意义. *海洋地质与第四纪地质*, 22(2): 69—74.
- 黄维, 刘志飞, 陈晓良, 等, 2003. 寻求深海碳酸盐沉积含量的物理标志. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(2): 157—162.
- 吴大奎, 李亚林, 伍志明, 等, 2004. 地震、测井资料联合反演的神经网络算法研究. *天然气工业*, 24(3): 55—57.
- 钟广法, 李前裕, 陈强, 等, 2006. 根据测井资料反演 ODP1148A 孔渐新统的矿物组成. *同济大学学报*, 34(10)(待刊).