

南黄海横波测井曲线预测 在叠前反演中的应用

吴淑玉^{1,2}, 陈建文^{1,2}, 刘俊^{1,2,3}, 张银国^{1,2}, 梁杰^{1,2}, 袁勇^{1,2}, 陶融⁴

(1 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

2 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071;

3 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074; 4 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100086)

摘要:南黄海中—古生界发育大套碳酸盐岩和碎屑岩的互层沉积。为了满足油气地质勘探的需求, 地球物理储层预测技术方法需要从叠后走向叠前阻抗反演, 而横波速度是储层特征评价和流体识别的重要参数, 因此, 对该研究区进行横波测井曲线分析值得探索。基于实测的岩石物理弹性模量, 通过 Biot-Gassmann 方程引进固结系数, 将据此计算的纵波速度与实测的纵波速度进行对比, 最终以其相对误差最小时的固结系数代入 Biot-Gassmann 方程求得横波速度, 其预测结果符合地层速度的分布规律, 并为叠前储层描述提供了可靠的基础资料。通过横波预测, 石炭系灰岩段的纵波速度为 5 500~6 500 m/s, 横波速度为 3 000~3 200 m/s, 溶孔发育的白云质灰岩段纵横波速度比变化幅度大, 碎屑岩孔隙发育地层横波速度变化幅度比纵波速度大。

关键词:南黄海; 碳酸盐岩; 碎屑岩; 横波速度; 叠前反演

中图分类号: P631.443

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2016.10008

南黄海中—古生界是我国东部海域未来取得油气突破的远景区域之一^[1,2], 近年来对南黄海盆地油气勘探已经引起了石油地质学家和地球物理学家的极大关注^[3,4]。盆地中—古生界为碳酸盐岩和碎屑岩的互层沉积^[5], 碳酸盐岩的非均质性决定了其储层预测的难度^[6,7], 为了达到钻探地质目的, 叠前阻抗反演是进行储层预测最有效的手段^[8], 而横波测井对于地震资料反演及准确

求取地层的岩石物理参数具有重要的作用, 通过横波测井曲线能够获得储层岩性识别、岩石弹性参数计算和地震流体识别等信息^[9,10]。

目前横波测井曲线预测方法有经验公式和岩石物理理论模型两大类, 经验公式是以纵波测井为基础, 通过拟合纵波速度、横波速度、孔隙度、岩石矿物组分、密度和泥质含量等参数的关系来计算横波速度^[11], 如李庆忠的横波速度计算公式^[12], Greenberg-Castagna 的横波预测方法^[13,14]。基于岩石物理理论模型预测横波速度测井曲线是通过建立横波速度与岩石物理参数之间的关系, 由一条或几条测井曲线来预测横波测井曲线^[15], 常用的岩石物理模型预测横波速度的方法包括: 基于 Biot-Gassmann 方程^[16,17]和 Xu-White 模型^[18,19]。

南黄海盆地缺乏横波测井曲线, 本文在采用 Biot-Gassmann 方程基础上, 提出新的思路进行岩

收稿日期: 2016-08-30

基金项目: 国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室基金(MRE201318, MRE201115); 国家海洋局海底重点实验室基金(KLSG1603); 国家自然科学基金(41406080); 南黄海油气资源调查(DD20160512); 南黄海前第三系油气前景研究(XQ-2005-01); 南黄海海域油气资源普查(GZH200800503); 南黄海崂山隆起和滩海区海相地层油气资源战略选区(XQ-2009-15)

作者简介: 吴淑玉(1985—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事地球物理方面的研究工作。E-mail: hnwushuyu@163.com

石物理分析,并求得横波测井曲线,处于勘探阶段的情况下,通过预测横波曲线进行叠前阻抗反演,从而达到满足储层预测和烃类检测的需求^[20]。

1 方法原理

经典的理论模型 Biot-Gassmann 方程^[16,17]为:

$$v_p^2 = \frac{1}{\rho} \left[K_d + \frac{4}{3} \mu_d + \frac{1 - K_d/K_s}{1 - \varphi - K_d/K_s + \frac{\varphi}{K_f}} \right] \quad (1)$$

$$v_s^2 = \frac{\mu_d}{\rho}$$

式中: v_p 和 v_s 分别为纵波与横波速度, m/s;

ρ 为岩石密度, g/cm³;

K_d 和 μ_d 分别为岩石基质的体积模量和剪切模量, MPa;

K_s 为固体矿物的体积模量;

K_f 为流体的体积模量;

φ 为孔隙度。

分析(1)式可知,求取纵横波速度的关键就是得到岩石骨架的弹性模量和流体的体积模量。

岩石是由固体的岩石基质和流动的孔隙流体组成的多相体(图 1),其中岩石的密度为固体和液体的综合密度^[21]:

$$\rho = \varphi \rho_f + (1 - \varphi) \rho_m \quad (2)$$

式中: ρ_m 为固体基质密度, g/cm³;

ρ_f 为液体密度, g/cm³。

假设地层中的流体为含油、气、水,液体的密度 ρ_f 为^[21]:

$$\rho_f = S_w \rho_w + S_o \rho_o + S_g \rho_g \quad (3)$$

式中: S_w 、 S_o 、 S_g 分别为水、原油、气的饱和度,其中 $S_w + S_o + S_g = 1$;

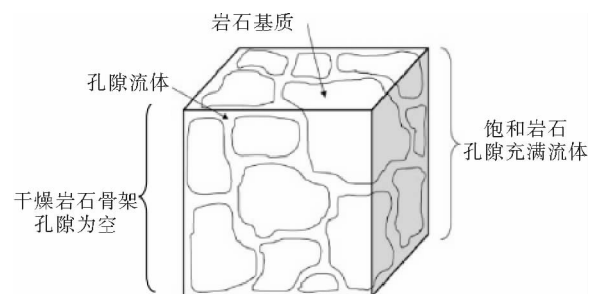


图 1 岩石体积模型

Fig. 1 Model of bulk-volume rock

ρ_w 、 ρ_o 、 ρ_g 为水、原油、气的密度。

岩石中固体的基质为砂岩、泥岩和碳酸盐岩(方解石或白云石),岩石骨架密度为:

$$\rho_m = \frac{V_{sh} \rho_{sh}}{(1 - \varphi)} + \left[1 - \frac{V_{sh}}{(1 - \varphi)} \right] \rho_c \quad (4)$$

式中: ρ_m 为岩石骨架密度, g/cm³;

ρ_{sh} 为泥岩密度, g/cm³;

ρ_c 为砂岩或碳酸盐岩(方解石或白云石)的密度,其中碎屑岩和碳酸盐岩要分段;

V_{sh} 为泥质含量。

根据 Wood 方程^[22]求得流体的体积模量:

$$1/K_f = S_w/K_w + S_o/K_o + S_g/K_g \quad (5)$$

式中: K_f 为流体的体积模量;

K_w 、 K_o 、 K_g 为水、原油、气的体积模量。

另外对于岩石基质,利用 Vogit-Russ-Hill (V-R-H)平均方法^[23-25]计算其弹性模量:

$$K_s = \frac{(K_r + K_v)}{2}, \mu_s = \frac{(\mu_r + \mu_v)}{2} \quad (6)$$

$$K_r = (1 - V_{sh}^*) K_m + V_{sh}^* K_{sh}$$

$$K_v = (1 - V_{sh}^*) / K_m + V_{sh}^* / K_{sh}$$

$$\mu_r = (1 - V_{sh}^*) \mu_m + V_{sh}^* \mu_{sh}$$

$$\mu_v = (1 - V_{sh}^*) / \mu_m + V_{sh}^* / \mu_{sh}$$

$$V_{sh}^* = V_{sh} / (1 - \varphi)$$

式中: K_s 、 K_m 、 K_{sh} 分别为基质、砂岩或碳酸盐岩、泥岩的体积模量;

K_r 和 K_v 分别为基质体积模量的上、下界;

μ_s 、 μ_m 、 μ_{sh} 分别为基质、砂岩或碳酸盐岩、泥岩的剪切模量;

μ_r 和 μ_v 为基质剪切模量的上、下界。

Pride^[26]等引入固结系数 α ($\alpha \geq 0$),由基质弹性模量计算岩石骨架体积模量:

$$K_d = K_s (1 - \varphi) / (1 + \alpha \varphi)$$

$$\mu_d = \mu_s (1 - \varphi) / (1 + 1.5 \alpha \varphi) \quad (7)$$

固结系数 α 取值范围为 $2 < \alpha < 20$,其中 1.5 为经验值,也可取值 5/3 或 2,目的是为了产生一个较精确的纵横波速度比, Lee^[27,28]将岩石的剪切模量修改为:

$$\mu_d = \mu_s (1 - \varphi) / (1 + \gamma \alpha \varphi)$$

$$\gamma = (\alpha + 2\alpha) / (1 + \alpha) \quad (8)$$

对 Biot-Gassmann 方程进行整理:

$$v_p^2 = \frac{1}{\rho} \left[K_d + \frac{4}{3} \mu_d + \right]$$

$$\frac{K_s - K_d}{1 - \varphi - K_d/K_s + \varphi K_s/K_f}] \quad (9)$$

从(10)式可以看出,第 3 项的分母由 $1 - \varphi - K_d/K_s$ 和 $\varphi K_s/K_f$ 两项构成,一般情况下 $1 - \varphi - K_d/K_s \ll \varphi K_s/K_f$,因此:

$$v_p^2 \approx \frac{1}{\rho} [K_d + \frac{4}{3} \mu_d + \frac{K_s - K_d}{\varphi K_s/K_f}] \quad (10)$$

将(8)式代入最终得到:

$$v_p^2 \approx \frac{1}{\rho} [\frac{K_s(1-\varphi)}{1+\alpha\varphi} + \frac{4}{3} \frac{\mu_s(1-\varphi)}{(1+1.5\alpha\varphi)} + (1+\alpha)K_f] \quad (11)$$

从上式分析,前面 2 项与基质的弹性模量有关,而第 3 项与流体有关,进行横波预测具体方法为:首先根据测井曲线解释的油、气、水的饱和度和密度,由自然伽马曲线计算的泥质含量,密度曲线计算的孔隙度,岩石物理实测的弹性模量参数,求取碎屑岩和碳酸盐岩的体积模量和剪切模量,油、气、水的体积模量,引进固结系数求得岩石骨架体积模量和剪切模量,通过 Boit-Gassmann 方程求得纵波速度,并与实际测量的纵波速度进行对比,通过不断迭代修改固结系数,使得最终计算的纵波速度和实际纵波速度的相对误差最小,最后将参数代入(1)式求得横波速度,其实现流程如图 2 所示。

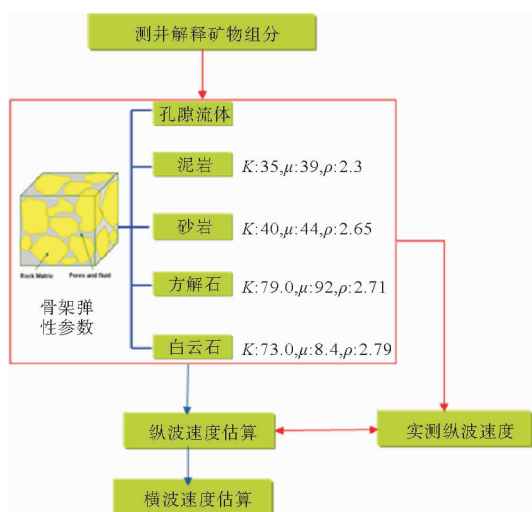


图 2 碎屑岩和碳酸盐岩横波预测流程

Fig. 2 The processing of Shear wave velocity predicted for clastic and carbonate rocks

2 测井曲线预处理

测井曲线横波预测是基于测井资料的质量控

制,因此,在横波预测之前需要对单井和多井测井质量以及一致性进行控制,其主要目的是补偿多井间由于不同仪器系列、不同测量环境和井眼条件引起的测量观测结果。测井曲线的质量控制包括深度和环境校正、测井曲线标准化^[29-31]。

2.1 曲线环境校正

利用密度—纵波速度交汇图能够有效识别出实测声波、密度曲线测量存在问题的层段,通过交汇图可以看出图 3a 蓝色、红色和粉色区域为声波和密度曲线测量失真层段,图 3b 为声波和密度校正后的交汇图。另外发现个别井段出现井眼垮塌对密度测井存在响应,采用经典的经验公式,在相同岩相和岩性、相同含流体类型测段建立多元线性关系方法,对密度和纵波曲线进行校正(图 4),图中第 4 道蓝色曲线为实测的声波曲线,红色曲线为校正后的声波曲线,第 5 道蓝色曲线为实测的密度曲线,红色为校正后的密度曲线。可以看出,井眼垮塌对声波测量结果的影响微乎其微,但其密度曲线差异特大。经过对测井曲线严重异常井段进行校正分析,密度和声波曲线得到了校正,井眼良好的层段校正前后曲线基本一致,吻合很好,因此校正后的测井曲线质量有了较大程度的改善。

2.2 测井曲线标准化

对研究区 3 口井灰岩段的声波曲线转成纵波速度曲线进行直方图分析(图 5a),图中不同颜色代表不同的井,由于不同年代不同仪器或者仪器刻度标准的不统一所测得的测井曲线值存在数据误差。蓝色线所示是 WX5-ST1 井 1 400~2 800 m 段三叠系青龙组灰岩,其纵波速度为 6 200~7 200 m/s,红色线为 CZ12-1-1 井 2 100~3 500 m 段石炭系灰岩,纵波速度为 5 400~6 600 m/s。根据下扬子钻井和岩性资料分析(表 1),三叠系灰岩的速度分布在 5 200~6 500 m/s,而石炭系为 5 600~6 500 m/s^[32],可以看出,石炭系灰岩地层的纵波速度比三叠系青龙组的灰岩速度高,CZ12-1-1 井速度分布符合以上规律,声波速度正确,从表 1 还可以看出,南黄海整个地层的灰岩速度都不超过 6 500 m/s,而 WX5-ST1 井三叠系灰岩地层速度过高,说明声波时差存在异常。绿色线为 CZ35-2-1 井 1 200~2 700 m 段三叠系青龙

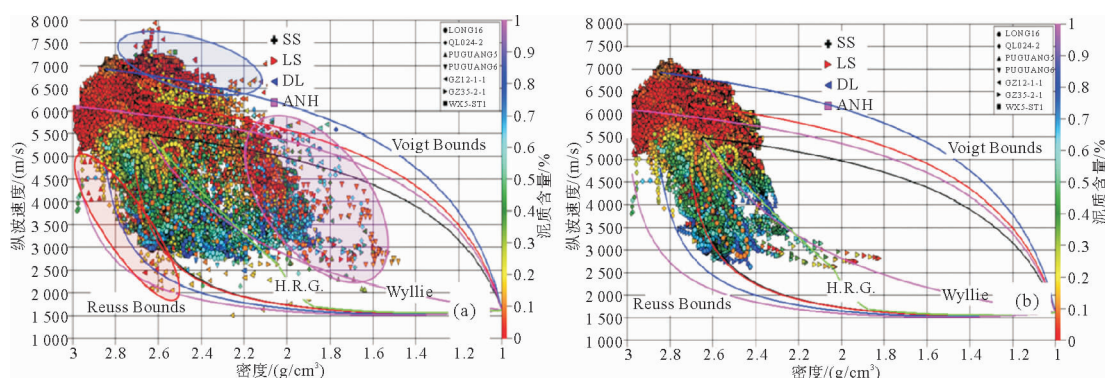


图 3 纵波速度和密度曲线进行环境校正前后对比交会图

Fig. 3 Crossplot of the P-wave velocity and density well logging before and after environmental correction

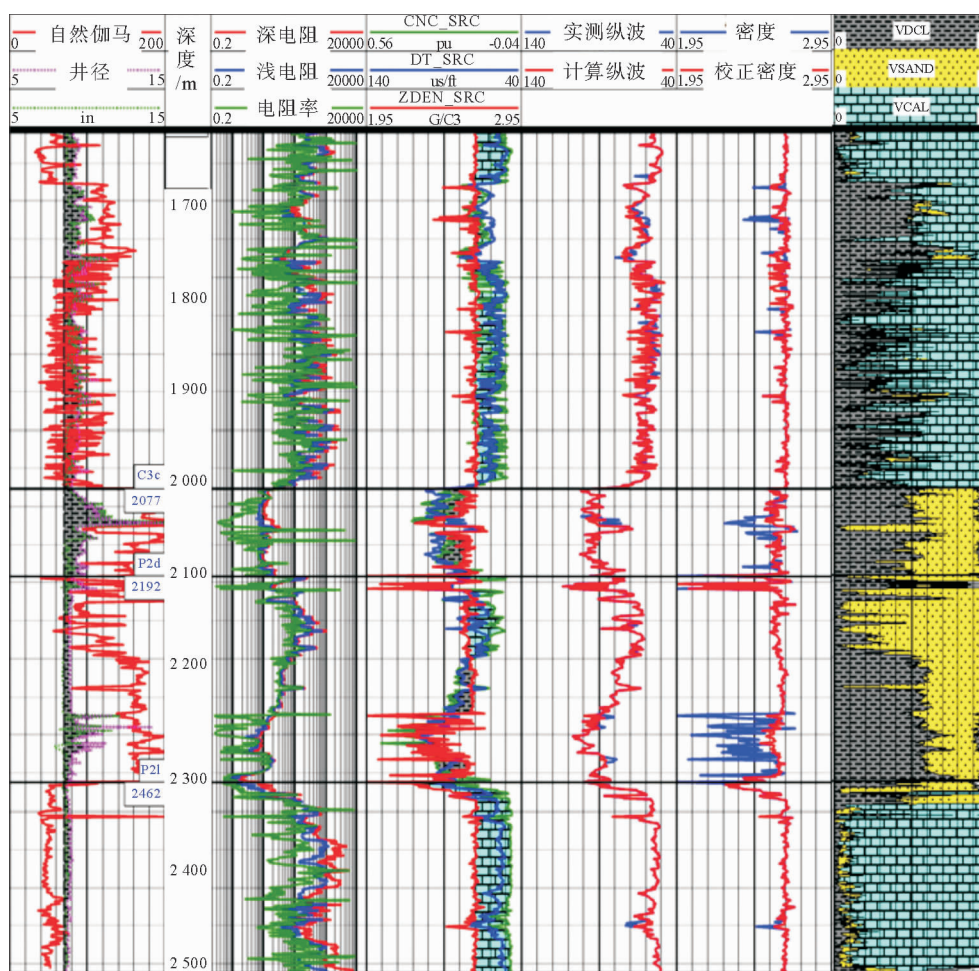


图 4 纵波速度和密度曲线校正前后对比曲线

Fig. 4 P-wave velocity and density well logging before and after correction

组和上二叠统的灰岩速度刚好分布在 4 800 ~ 6 200 m/s, 因此, 以 CZ35-2-1 井的三叠系地层为标准对 WX5-ST1 井进行标准化, 标准化后的纵

波速度直方图如图 5b 所示, 此时的 3 口井的测井曲线是符合地层速度分布特征。

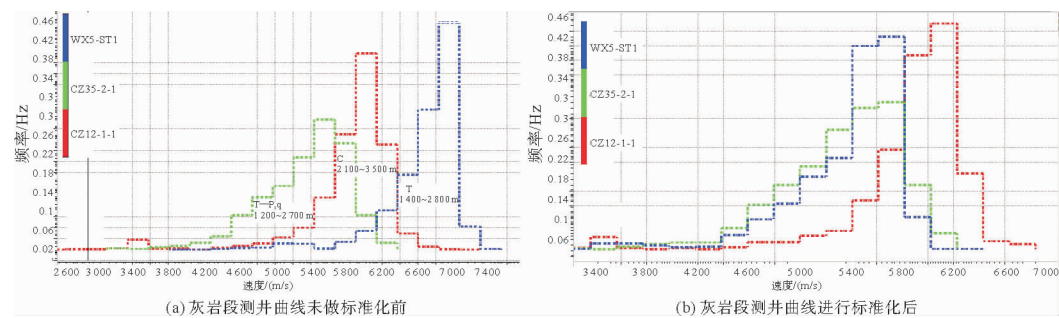


图 5 不同井灰岩段纵波速度标准化前后直方图对比

Fig. 5 Limestone P-wave velocity histogram in different depth before and after standardization

表 1 南黄海地层与岩性及地震波组特征对比(据文献[32]修改)

Table 1 Correlation of stratigraphy, lithology and characteristics of seismic wave groups(modified from reference [32])

特征波	速度/(m/s)	岩性	地层属性	地震层序
T ₂	1 700~2 500	粉砂岩、泥岩	第四系+新近系	I
	2 800~3 500	砂岩、泥岩	古近系三垛组+戴南组+阜宁组	II
T ₇	4 000~4 800	砂岩、泥岩	中—上白垩系泰州组+赤山组+蒲口组	III
T ₈	5 200~6 500	灰岩	三叠系下统青龙组	IV
T ₉	2 800~5 200	碎屑岩+煤系地层	二叠系上统龙潭组+大隆组	V
T ₁₀	5 600~6 500	灰岩	二叠系下统+中石炭统	VI
T ₁₁	4 200~5 260	泥岩、石英砂岩	下石炭统+泥盆系+志留系	VII
T ₁₂	4 900~6 500	灰岩、白云岩、硅质岩	奥陶系+中上寒武统	VIII
T ₁₃	5 700~6 000	冰碛岩、灰岩、白云岩	下寒武统+震旦系	IX
T _g	6 300 以上	变质岩	前震旦系	X

3 横波测井曲线预测

由图 6 可以看出,根据修改后的 Boit-Gas-smann 方程通过不断迭代修改固结系数求得的纵波速度与实测的纵波速度两者的相对误差整体较小,为 0~0.1%,在浅部地层两者的相对误差更小,几乎为 0~0.05%,而随着深度的加大,误差也增大。由于在成岩作用早期阶段主要为机械压实所引起的沉积物颗粒堆积方式的改变及波分颗粒的塑性变形,随着埋深的增加,成岩之后岩石孔隙的改造作用和胶结作用的影响,使得预测的纵波速度和实测的纵波速度存在一定的误差,但都在可容范围之内。将相关的岩石基质和流体的弹性参数及固结系数代入方程(2)式,最终求得的横波速度曲线(图 6),其速度范围为 2 000~4 000 m/s。综合图 6 和表 2 不同岩性段的纵波和横波速度,灰岩段的纵、横波速度比砂泥岩段的高,灰岩段的

纵波速度为 5 500~6 500 m/s,横波速度为 3 000~3 200 m/s,由于 2 870~2 900 m 深度段为深灰色白云质灰岩,岩石中溶孔和白云石发育,存在 10%的溶孔,因此,纵波和横波的速度变化较为剧烈。碎屑岩段主要为泥质粉砂岩和粉砂质泥岩,统计的砂岩和泥岩对应的纵波速度和横波速度变化幅度较小,某些深度段由于地层孔隙发育,横波速度变化幅度比纵波速度大。对预测横波速度和实测的纵波速度进行交汇图分析(图 7)可以看出,纵

表 2 南黄海石炭系地层的灰岩和碎屑岩的纵波速度和预测的横波速度

Table 2 P-wave velocity and shear wave velocity of the Carboniferous limestone and clastic rocks in the South Yellow Sea

	/(m/s)		
	灰岩	砂岩	泥岩
V _p	5 500~6 500	5 000~5 500	4 800~5 500
V _s	3 000~3 200	2 800~3 300	2 800~3 300

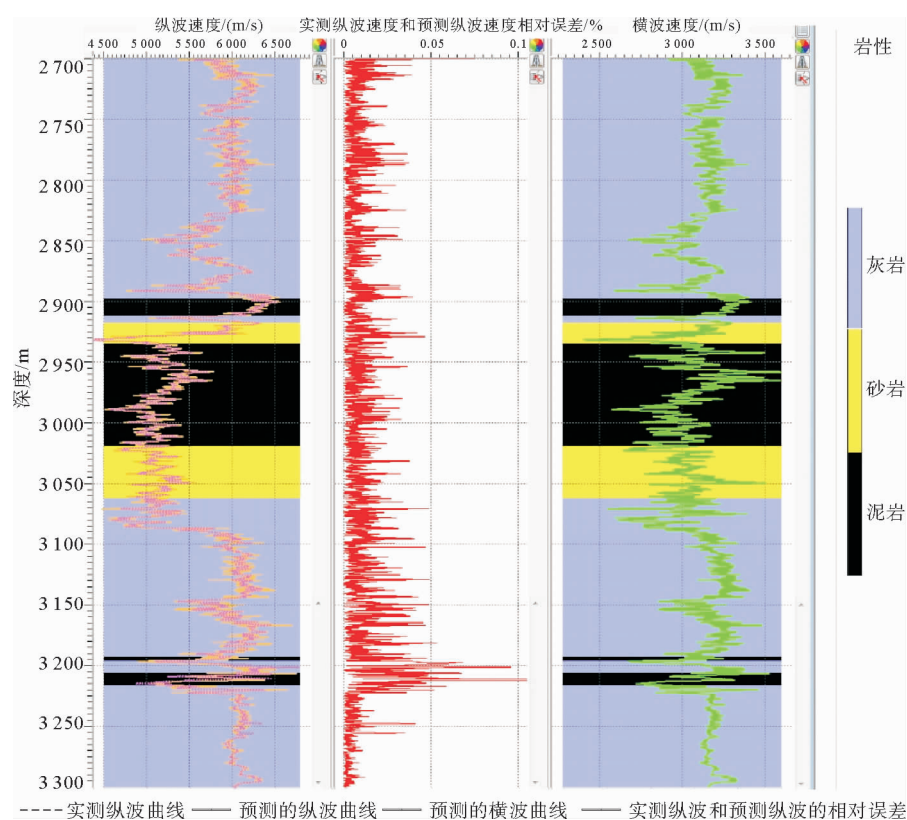


图 6 预测的纵横波速度曲线

Fig. 6 The curve of Shear wave velocity predicted

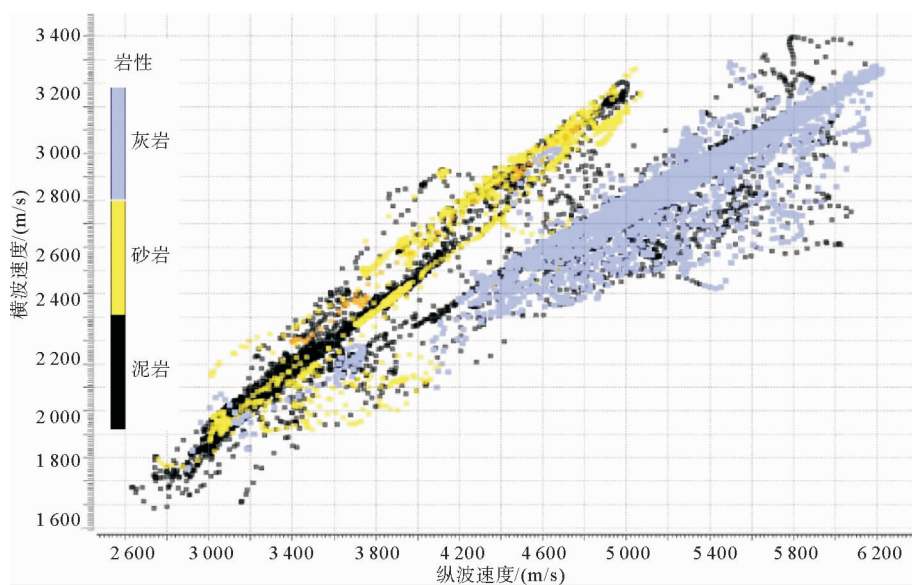


图 7 纵横波速度交汇图

Fig. 7 Crossplot of P-wave velocity and shear wave velocity

波速度曲线和横波速度为非线性关系,而不是基于经验公式计算的线性关系,从而能够反映油水层的岩石的物理性质,说明基于 Boit-Gassmann 方程对横波预测的结果具有一定的有效性。

4 应用效果

在岩石物理分析过程中,将 CZ35-2-1 井石炭

系一下二叠统栖霞组地层的碳酸盐岩和碎屑岩地层进行纵波阻抗和纵横波速度曲线交汇分析(图 8)可以看出,通过纵波阻抗可以将碳酸盐岩和碎屑岩区分开,碳酸盐岩的纵波阻抗为高值,为 $12\ 000\sim 18\ 000((\text{m/s}) * (\text{g}/\text{cm}^3))$;碎屑岩的纵波阻抗为低值,为 $5\ 000\sim 13\ 000((\text{m/s}) * (\text{g}/\text{cm}^3))$,而在碎屑岩层段,通过纵横波速度比能够

将含气砂岩、含水砂岩和泥岩段分开,随着纵横波速度比值从大到小,岩性是从泥岩过渡到含水砂岩再到含气砂岩段,说明纵横波速度比值越低,越偏向有利储层。因此,通过反演纵波阻抗能够区分碳酸盐岩和碎屑岩岩性,而且在碎屑岩层段在纵波阻抗中加入横波阻抗能够将有利储层进行识别。

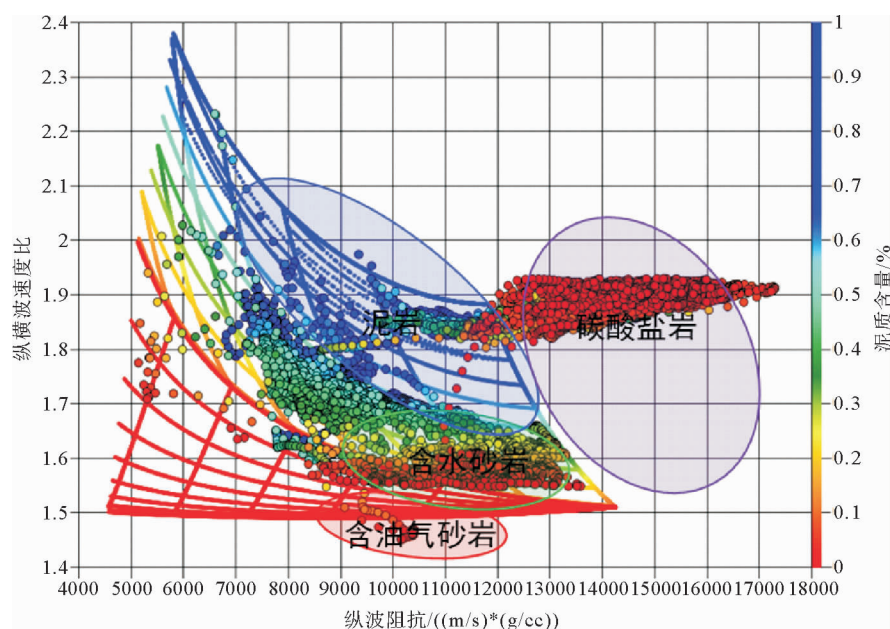


图 8 纵波阻抗和纵横波速度比交汇图

Fig. 8 Crossplot of P-wave impedance and V_p/V_s

通过叠前同时反演,得到石炭系一下二叠统栖霞组地层纵波阻抗和纵横波速度比(图 9)。纵波阻抗具有横向分区特征,反映与纵波阻抗相关的次生孔隙发育受古构造等地质因素控制,位于两端台地主要为碳酸盐岩沉积,纵波阻抗值越高岩性越偏向白云岩。由于位于古高地,受气候影响,海水蒸发盐度高,灰岩容易发生交代作用形成间歇性白云岩,位于凹陷处的主要是以砂岩和泥岩为主的碎屑岩。纵横波速度比具有垂向分带特征,说明了其相关的岩性随地质沉积时代的变化,可以看出在台地和沿着顶部界面局部地层纵横波速度比低,说明在台地处以白云岩为主的地层孔隙性较好。另外根据钻井揭示在石炭系和栖霞组顶面的风化壳地层,由于构造时间及沉积间断,碳酸盐岩地层暴露,在界面附近发生大量淋滤溶蚀作用,风化壳孔隙也极其发育,如 WX13-3-1 井 2 080.6 m 下二叠统栖霞组顶面风化壳根据测井

解释孔隙度为 20.19%, CZ12-1-1 井 2 070 m 石炭系船山组风化壳测井解释孔隙度为 14%, 2 口钻井揭示的风化壳孔隙度值高,说明碳酸盐岩经过一定淋滤溶蚀,在后期的孔隙没有被充填、压实和胶结的情况下,也可成为较有利储层。

5 结论

(1)南黄海中一古生界在纵向上表现为碳酸盐岩与碎屑岩互层的特征,为了满足油气勘探的需求,地球物理储层预测方法需要从叠后走向叠前阻抗反演才能获得储层的岩性、物性和油气性,因此,对该研究区进行横波测井曲线预测是一项重要而基本的技术手段。

(2)由引进固结系数根据 Biot-Gassmann 方程计算得到的纵波速度,与实测的纵波速度求得相对误差,在相对误差最小的情况下确定的固结

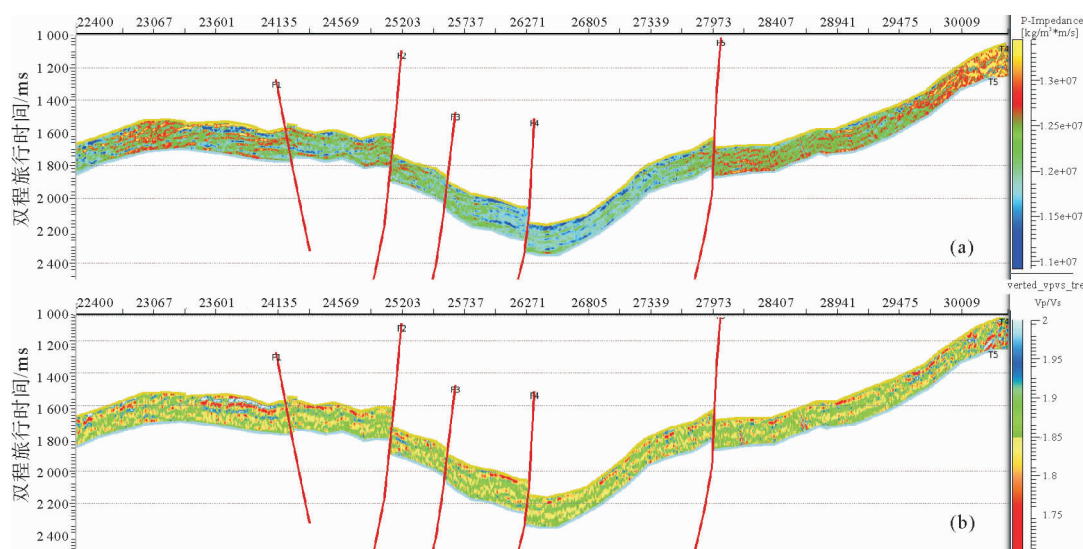


图9 石炭系一下二叠统栖霞组地层的纵波阻抗剖面(a)和纵横波速度比剖面(b)

Fig. 9 The P-wave impedance(a) and the V_p/V_s (b) profile of the Qixia Formation of lower Permian and Carboniferous System

系数,代入方程最终求得横波速度。预测结果能够反映油水层的岩石物理性质,其方法具有一定的有效性。

(3)横波速度测井曲线预测表明,在溶孔发育的白云质灰岩段纵横波速度变化剧烈,碎屑岩地层段纵横波速度数值相差不大,而在孔隙发育地层横波速度变化幅度比纵波速度大。

(4)将预测的纵波速度进行叠前同时反演,纵波阻抗具有横向分区特征,与纵波阻抗相关的次生孔隙受古构造等地质因素控制,纵横波速度比具有垂向分带特征,其相关的岩性随地质沉积时代的变化。

参考文献:

- [1] 陈建文,龚建明,李刚,等. 南黄海盆地海相中—古生界油气资源潜力巨大[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(1): 1-7.
- [2] 李刚,陈建文,肖国林,等. 南黄海海域的海相中—古生界油气远景[J]. 海洋地质动态, 2003, 19(8): 12-16.
- [3] 姚永坚,冯志强,郝天珧,等. 对南黄海盆地构造层特征及含油气性的新认识[J]. 地学前缘, 2008, 15(6): 232-240.
- [4] 张训华,吴志强,肖国林,等. 南黄海前新生代油气地震勘探面临的问题与努力方向[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(10): 1-7.
- [5] 吴淑玉,陈建文,梁杰,等. 南黄海海相中—古生界碳酸盐岩储层特征及成藏模式——对比四川盆地和苏北盆地[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(1): 13-21.
- [6] 陈勇,陈洪德,关达,等. 地震技术在碳酸盐岩生物礁油气储层流体识别中的应用[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(21): 6208-6215.
- [7] 谷明峰,徐美茹,周进高,等. 叠前同时反演技术在碳酸盐岩储层预测中的应用[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(2): 60-64.
- [8] 陈利,方于中,但志伟,等. 叠前同步反演在M地区储层预测中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2015, 37(1): 83-88.
- [9] 张元中,周开金,赵建斌,等. 砂泥岩地层横波测井曲线预测方法研究[J]. 石油物探, 2012, 51(5): 508-514.
- [10] 张璐. 基于岩石物理的地震储层预测方法应用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009.
- [11] 云美厚,高君,贺玉山,等. 储层速度和密度与孔隙度、泥质含量以及含水饱和度的关系[J]. 勘探地球物理进展, 2004, 27(2): 104-107.
- [12] 李庆忠. 岩石的纵、横波速度规律[J]. 石油地球物理勘探, 1992, 27(1): 1-12.
- [13] Castagna J P, Batzle M L, Eastwood R L. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks[J]. Geophysics, 1985, 50(4): 571-581.
- [14] Greenberg M L, Castagna J P. Shear-wave velocity estimation in porous rocks: theoretical formulation, preliminary verification, and applications[J]. Geophys Prospecting, 1992, 20(4): 195-209.
- [15] 谢月芳,张纪. 岩石物理模型在横波速度估算中的应用[J]. 石油物探, 2012, 51(1): 65-70.
- [16] Biot M A. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range, and II; high-frequency range[J]. Journal of the acoustical Society of America, 1956, 28(2): 168-191.
- [17] Gassman F. Elastic Waves Through a Packing of Spheres[J]. Geophysics, 1951, 16(3): 673-682.
- [18] Xu S Y, White R E. A new velocity model for clay-sand mixtures[J]. Geophysical Prospecting, 1995, 43(1): 91-118.
- [19] Xu S Y, White R E. A physical model for shear-wave velocity prediction[J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44

- (5): 687-717.
- [20] 吴淑玉,吴志强,周才凡,等. 黄海海域横波速度计算方法的研究[C]//中国地球物理学会. 中国地球物理. 长沙:中国科学技术大学出版社,2011.
- [21] Lee M W, Hutchinson D R, Collett T S, et al. Seismic velocities for hydrate-bearing sediments using a weighted equation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101(B9): 20347-20358.
- [22] Wood A W. A textbook of sound[M]. New York: The MacMillan Co., 1995: 360.
- [23] Voigt W. lehrbuch der kristallphysik[M]. Teubner: leipzig, 1928: 1-20.
- [24] Reuss A. Berechnung der fließgrenze von mischkristallen auf grund der plastizitätsbedingung für einkristalle[J]. *Zeitschrift für Angewandte Mathematic and Mechanic*, 1929, 9(1): 49-58.
- [25] Hill R. The elastic behavior of crystalline aggregate[J]//*Proceedings of the Physical Society of London*, 1952, A65(5): 349-354.
- [26] Pride S R. Relationships between Seismic and Hydrological Properties[M]//Rubin Y, Hubbard S. *Hydrogeophysics*. New York, 2005: 217-225.
- [27] Lee M W. Proposed module of dry rock and their application to predicting elastic velocities of sandstones[R]. US: U S Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5119, 2005.
- [28] Lee M W. A simple method of predicting S-wave velocity[J]. *Geophysics*, 2006, 69(5): 161-164.
- [29] 纪智,张庆国,孙德瑞. Z 区块测井曲线的标准化方法[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2014, 24(2): 191-194.
- [30] 封蓉,白兴家,王小平,等. 测井曲线标准化方法及在地质研究中的应用[J]. *辽宁化工*, 2016, 45(1): 99-100.
- [31] 侯伯刚,刘文岭,罗娜. 地震反演中测井数据的预处理[J]. *物探与化探*, 2009, 33(3): 331-336.
- [32] 吴志强,陆凯. 南黄海沉积层纵波速度与地震反射特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(2): 73-77.

APPLICATION OF S-WAVE WELL LOGGING PREDICTED FOR PRESTACK INVERSION IN THE SOUTH YELLOW SEA BASIN

WU Shuyu^{1,2}, CHEN Jianwen^{1,2}, LIU Jun^{1,2,3}, ZHANG Yinguo^{1,2},
LIANG Jie^{1,2}, YUAN Yong^{1,2}, TAO Rong⁴

(1 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environment Geology, Ministry of Land and Resource, Qingdao Insitute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China; 2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China; 3 College of Faculty of Earth Resource, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The Meso-Palaeozoic is a mixed clastic-carbonate sequence of epicontinental sea in the South Yellow Sea basin. In recent years, oil and gas exploration has been accelerated there, in order to meet the needs of oil and gas supply. Geophysical methods for reservoir prediction need to be improved as well from post-stack impedance inversion to pre-stack impedance inversion, as the shear wave velocity is the most important parameter for reservoir evaluation and fluid identification. Therefore, the shear wave velocity well logging is very important to the study area. Based on the measured rock physics elastic modulus, introducing in the coefficient of consolidation through the Biot-Gassmann equation, picking out the coefficient of consolidation when the relative error is minimum between calculated P-wave velocity and measured P-wave velocity, and then substituting the coefficient of consolidation into the Biot-Gassmann equation, we finally get the S-wave velocity. The prediction results of this paper fit well with the velocity distribution law in the formation, which has provided the reliable basic data for prestack reservoir description. From the S-wave prediction, the P-wave velocity of carbonate rock varies from 5 500 m/s to 6 500 m/s and the S-wave velocity of carbonate rock from 3 000 m/s to 3 200 m/s, V_p/V_s ratio is dramatic in the pore developed dolomitic limestone, and the S-wave velocity change is large than the P-wave velocity in the pore developed clastic rock.

Key words: South Yellow Sea; carbonate rock; clastic rock; shear wave velocity; prestack inversion