

黄 饶, 陈小宏, 李景叶. 疏松砂岩气藏地震 AVO 属性敏感性分析与评价. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 551~557, DOI: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.024.

Huang R, Chen X H, Li J Y. Sensitivity analysis and evaluation of AVO property in unconsolidated gas sandstone. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(2): 551~557 DOI: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.024.

## 疏松砂岩气藏地震 AVO 属性敏感性分析与评价

黄 饶<sup>1</sup>, 陈小宏<sup>1,3</sup>, 李景叶<sup>2,3</sup>

(1. 中国石油大学资源与信息学院 物探重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学 石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

**摘 要** 利用完全 Zoeppritz 方程分析了疏松砂岩气藏反射系数对密度比、纵波速度比、横波速度比、泊松比和含气饱和度的敏感性. 通过求取反射系数对各弹性参数的偏导得到反射系数对弹性参数的敏感性, 通过求取反射系数对含气饱和度的完全导数得到对含气饱和度的敏感性. 对于疏松砂岩气藏界面, P-P 波 AVO(振幅随偏移距变化)当入射角大于  $40^\circ$  对纵波速度比、横波速度比在低含气饱和度时敏感, 对泊松比的敏感性在气层饱和度较高和较低时差异明显, 对含气饱和度的敏感性在低饱和度时敏感, 且随入射角增加而增大; P-SV 波 AVO 对泊松比的敏感性在含气饱和度较高和较低时差异明显. 研究表明, 利用反射系数对弹性参数和含气饱和度的敏感性分析可以帮助识别低饱和和气藏.

**关键词** 疏松砂岩, 饱和度, AVO, 反射系数

DOI: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.024

中图分类号 P631

文献标识码 A

## Sensitivity analysis and evaluation of AVO property in unconsolidated gas sandstone

HUANG Rao<sup>1</sup>, CHEN Xiao-hong<sup>1,3</sup>, LI Jing-ye<sup>2,3</sup>

(1. Key Lab of Geophysical Exploration of CNPC, China Petroleum University, Beijing 102249, China;

2. Basin & Reservoir Research Center, China Petroleum University Beijing 102249, China;

3. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract** The paper analyzes the sensitivity of seismic reflectivity to contrasts in density, P-wave velocity, S-wave velocity, Poisson's ratio and gas saturation in unconsolidated gas sandstone using the complete Zoeppritz equations. Sensitivities of reflection coefficients to each bulk elastic parameter are computed as the partial derivatives of the seismic reflectivity relative to each parameter. The sensitivity of reflectivity to gas saturation is calculated as the full derivative of the reflectivities with respect to gas saturation. For the shale-sand interface of unconsolidated sandstone, P-P reflectivity is more sensitive to P-wave velocity contrast and S-wave velocity contrast at low gas-saturation values when the angle of incidence is greater than  $40^\circ$ . The sensitivity of reflectivity to Poisson's ratio shows greater variance between low gas-saturation and high gas-saturation, and to gas-saturation is more sensitive in low gas-saturation and the sensitivity increases as the angle of incidence increases. P-SV reflectivity has great contrast between low gas-saturation and high gas-saturation to Poisson's ratio. The study in this paper shows that it may help to discriminate low gas saturation by using the sensitivity of reflectivity to these elastic parameters and gas-saturation.

**Keywords** unconsolidated sandstone with high porosity, saturation, amplitude versus offset, reflectivity

收稿日期 2008-07-01; 修回日期 2008-12-16.

基金项目 国家自然科学基金(40574048, 40604016)、国家 973 项目(2007CB209606)和中石油中青年创新基金项目(07E1004)联合资助.

作者简介 黄饶, 男, 1983 年生, 湖北荆州人, 博士研究生; 研究方向: 储层预测及 AVO 正、反演研究.

(E-mail: huangrao1983@126.com)

## 0 引言

AVO 是一种利用振幅随偏移距变化来寻找油气藏的工具,在区分含水和含气储层、区分流体和岩性上得到了广泛的应用<sup>[1-11]</sup>,它的理论基础是 Zoeppritz 方程,表现为各种波的反射系数随着入射角的变化,它与上下层的岩性直接相关,因此分析反射系数对各个弹性参数的敏感性,有助于分析地震振幅信息中包含的流体信息。

区分商业气藏和低饱和度气藏一直是工业界的难点.气层在低饱和时和高饱和时通常具有相似的地震 AVO 响应.如何有效获取和精确利用 AVO 信息进行高饱和商业气藏识别一直是地球物理界研究的热点. Rosa(1976)对 P-P 和 SH-SH 反射系数求偏导来研究均匀各向同性界面两边弹性参数的敏感性<sup>[12]</sup>; Gomez(2007)进一步利用反射系数的完全导数研究了部分含气饱和时 P-P、P-SV 和 SH-SH 反射系数的敏感性<sup>[13]</sup>. 刘亚茹利用 Aki 近似公式对地震反射对含气饱和度敏感性进行了分析<sup>[14]</sup>.

本文针对疏松砂岩储层<sup>[15]</sup>,利用完全 Zoeppritz 方程对泥砂岩模型进行求解,对求解的地震 AVO 反射系数分别对密度比、纵波速度比、横波速度比、泊松比和含气饱和度进行了敏感性分析.这些参数的敏感性分析对于地震 AVO 反演具有很好的帮助,可以帮助理解在给定的入射角范围内从地震反射响应中提取哪些可靠的识别流体的信息.综合应用 P-P 波和 P-SV 波的反射系数对不同参数的敏感性信息,可以帮助识别低饱和度气藏,从而降低勘探风险。

## 1 岩石物理模型

在 AVO 研究中,岩石物理研究具有十分重要的作用,它是连接地震 AVO 响应与油藏参数的桥梁.为了计算不同孔隙度时疏松干岩石弹性模量,根据 Nur 和 Dvorkin 等人(1996)的研究<sup>[16]</sup>,对 Hashin-Strikman 的下边界计算公式进行修改,不同孔隙度岩石有效弹性模量计算式表示为

$$K_{\text{eff}} = \left[ \frac{\varphi/\varphi_0}{K_{\text{HM}} + \frac{4}{3}G_{\text{HM}}} + \frac{1-\varphi/\varphi_0}{K + \frac{4}{3}G_{\text{HM}}} \right]^{-1} - \frac{4}{3}G_{\text{HM}} \quad (1)$$

$$G_{\text{eff}} = \left[ \frac{\varphi/\varphi_0}{G_{\text{HM}} + \frac{G_{\text{HM}}}{6} \left( \frac{9K_{\text{HM}} + 8G_{\text{HM}}}{K_{\text{HM}} + 2G_{\text{HM}}} \right)} \right] +$$

$$\left[ \frac{1-\varphi/\varphi_0}{G + \frac{G_{\text{HM}}}{6} \left( \frac{9K_{\text{HM}} + 8G_{\text{HM}}}{K_{\text{HM}} + 2G_{\text{HM}}} \right)} \right]^{-1} - \frac{G_{\text{HM}}}{6} \left( \frac{9K_{\text{HM}} + 8G_{\text{HM}}}{K_{\text{HM}} + 2G_{\text{HM}}} \right), \quad (2)$$

$K_{\text{eff}}, G_{\text{eff}}$  分别是干岩石孔隙度为  $\varphi$  时的有效体积模量和有效剪切模量.其中  $K_{\text{HM}}, G_{\text{HM}}$  分别是干岩石在临界孔隙度  $\varphi_0$  ( $0.36 \leq \varphi_0 \leq 0.40$ ) 时的体积模量和剪切模量,  $K, G$  分别为岩石颗粒的体积模量和剪切模量,可利用 Hill 平均方程<sup>[17]</sup>计算。

对于饱和流体岩石的弹性模量可以通过 Gassmann 方程进行计算<sup>[18]</sup>,

$$K_{\text{sat}} = K \frac{\varphi K_{\text{eff}} - \frac{(1+\varphi)K_{\text{fl}}K_{\text{eff}}}{K} + K_{\text{fl}}}{(1-\varphi)K_{\text{fl}} + \varphi K - \frac{K_{\text{fl}}K_{\text{eff}}}{K}}, \quad (3)$$

$$G_{\text{sat}} = G_{\text{eff}}. \quad (4)$$

式中,  $K_{\text{sat}}, G_{\text{sat}}$  分别为饱和流体岩石体积模量和剪切模量,  $K_{\text{fl}}$  为孔隙流体体积模量。

当多种流体混合时,混合流体的体积模量可通过 Wood 方程<sup>[19]</sup>进行计算,饱和岩石的密度  $\rho_{\text{sat}}$  可以由密度的体积平均公式计算。

气藏岩石的纵、横波速度可以根据岩石体积模量、剪切模量与密度进行计算,其计算式可以表示为

$$V_p = \sqrt{\frac{K_{\text{sat}} + \frac{4}{3}G_{\text{sat}}}{\rho_{\text{sat}}}}, \quad (5)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G_{\text{sat}}}{\rho_{\text{sat}}}}. \quad (6)$$

用于疏松砂岩模型的储层的弹性参数见表 1,其中石英占 70%,长石占 20%,粘土占 10%。

表 1 砂岩储层的弹性参数

Table 1 Elastic parameters of sandstone reservoir

组成	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	体积模量 $K/(\text{GPa})$	剪切模量 $\mu/(\text{GPa})$
石英	2.65	37	44
长石	2.63	75.6	25.6
粘土	2.55	25	9
盐水	1.09	2.38	0
气	0.1	0.21	0

## 2 反射系数的敏感性计算

反射系数对弹性参数的偏导数可以描述反射系数对弹性参数的敏感性,为研究方便定义密度比为  $\eta = \rho_2/\rho_1$ ,纵波速度比为  $\gamma = \alpha_2/\alpha_1$ ,纵横波速度比为

$q_i = \alpha_i / \beta_i$ , 泊松比为  $\sigma_i = (0.5q_i^2 - 1) / (q_i^2 - 1)$ ,  $i = 1, 2$ , 其中  $\rho$  为密度,  $\alpha$  为纵波速度,  $\beta$  为横波速度, 下标 1, 2 分别表示界面的上下层介质. 则 Zoeppritz 方程的 P-P 波、P-SV 波反射系数表达式为<sup>[20]</sup>:

$$R_{PP} = -1 + \frac{2F_1 C}{D}, \quad (7)$$

$$R_{PS} = -\frac{2F_1 \sin\theta \cdot T}{D}. \quad (8)$$

其中:

$$F_1 = \cos\theta, \quad F_2 = \sqrt{1 - \frac{\sin^2\theta}{q_1^2}},$$

$$F_3 = \sqrt{1 - \gamma^2 \sin^2\theta}, \quad F_4 = \sqrt{1 - \frac{\gamma^2 \sin^2\theta}{q_2^2}},$$

$$Q = \frac{\gamma^2 \eta}{q_2^2} - \frac{1}{q_1^2}, \quad X = \eta - 2Q \sin^2\theta,$$

$$Y = 1 + 2Q \sin^2\theta, \quad Z = \eta - 1 - 2Q \sin^2\theta,$$

$$D_1 = \frac{(\gamma \cdot Z \sin\theta)^2}{q_1 q_2} + \frac{(\gamma \cdot X)^2 F_1 F_2}{q_2} + \frac{Y^2 F_3 F_4}{q_1},$$

$$D_2 = \gamma \cdot \eta \cdot \left( \frac{F_1 F_4}{q_1} + \frac{F_2 F_3}{q_2} \right) + 4Q^2 \sin^2\theta \cdot F_1 F_2 F_3 F_4,$$

$$D = D_1 + D_2.$$

$$C = \frac{\gamma^2 \cdot X^2 \cdot F_2}{q_2} + \frac{\gamma \cdot \eta \cdot F_4}{q_1} + 4Q^2 \sin^2\theta \cdot F_2 F_3 F_4,$$

$$T = \frac{\gamma^2 \cdot X \cdot Z}{q_2} + 2Q \cdot Y \cdot F_3 F_4.$$

其中  $\theta$  为入射角. 由式(7)和(8)可计算泥砂岩弹性界面的 P-P 和 P-SV 波的反射系数, 对其利用链式法则分别对  $\eta, \gamma, q_1, q_2, \sigma_1$  和  $\sigma_2$  求偏导数, 则可解析出反射系数对不同弹性参数的敏感性公式.

由式(7)和式(8)的 Zoeppritz 方程表达式可知, 反射系数仅依赖于入射角  $\theta$ , 密度比  $\eta$ , 纵波速度比  $\gamma$  和介质的纵横波速度比  $q_1$  和  $q_2$ . 因此反射系数对砂

岩储层的含气饱和度  $S_g$  的完全导数可表示为:

$$\frac{dR_{PP}}{dS_g} = \frac{\partial R_{PP}}{\partial \eta} \frac{d\eta}{dS_g} + \frac{\partial R_{PP}}{\partial \gamma} \frac{d\gamma}{dS_g} + \frac{\partial R_{PP}}{\partial q_2} \frac{dq_2}{dS_g}, \quad (9)$$

$$\frac{dR_{PS}}{dS_g} = \frac{\partial R_{PS}}{\partial \eta} \frac{d\eta}{dS_g} + \frac{\partial R_{PS}}{\partial \gamma} \frac{d\gamma}{dS_g} + \frac{\partial R_{PS}}{\partial q_2} \frac{dq_2}{dS_g}. \quad (10)$$

其中:

$$\frac{d\eta}{dS_g} = \frac{d\eta}{d\rho_2} \frac{d\rho_2}{dS_g} = \frac{1}{\rho_1} \frac{d\rho_2}{dS_g},$$

$$\frac{d\gamma}{dS_g} = \frac{d\gamma}{d\alpha_2} \frac{d\alpha_2}{dS_g} = \frac{1}{\alpha_1} \frac{d\alpha_2}{dS_g},$$

$$\frac{dq_2}{dS_g} = \frac{1}{\beta_2^2} \left( \beta_2 \frac{d\alpha_2}{dS_g} - \alpha_2 \frac{d\beta_2}{dS_g} \right).$$

### 3 反射系数敏感性分析

对砂岩储层, 当储层有效压力  $P = 17.5$  MPa, 孔隙度为 30% 时, 利用式(5)、(6)和岩石密度的体积平均公式计算出的砂岩不同饱和度时纵、横波速度和密度如表 2 所示. 其 AVO 响应曲线如图 1 所示. 从图中可以看出, 对于给定的疏松砂岩储层, 低饱和气层和饱和气层在 P-P 波反射系数和 P-SV 波反射系数上差异明显, 但低饱和气层和饱和气层的 AVO 变化趋势非常相似, 低饱和度气藏仍具有明显的 AVO 响应, 这给实际勘探中有效区分商业和非

表 2 泥岩盖层和不同含气饱和度砂岩的弹性参数

Table 2 Elastic parameters of shale caprock and sandstone with different gas-saturation

弹性参数	纵波速度 $v_p / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	横波速度 $v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
泥岩盖层	2850	1300	2.3
饱含气砂岩	2085.3	1358.6	1.875
含气饱和度 10%砂岩	2238.3	1271	2.143

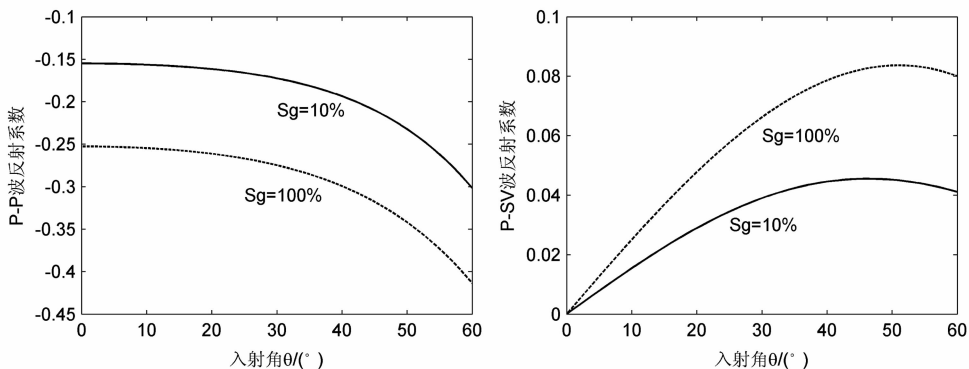


图 1 不同含气饱和度( $S_g$ )储层顶 P-P 波和 P-SV 波反射系数随入射角的变化

Fig. 1 P-P and P-SV reflectivities of upper interface versus angle of incidence with different gas-saturation

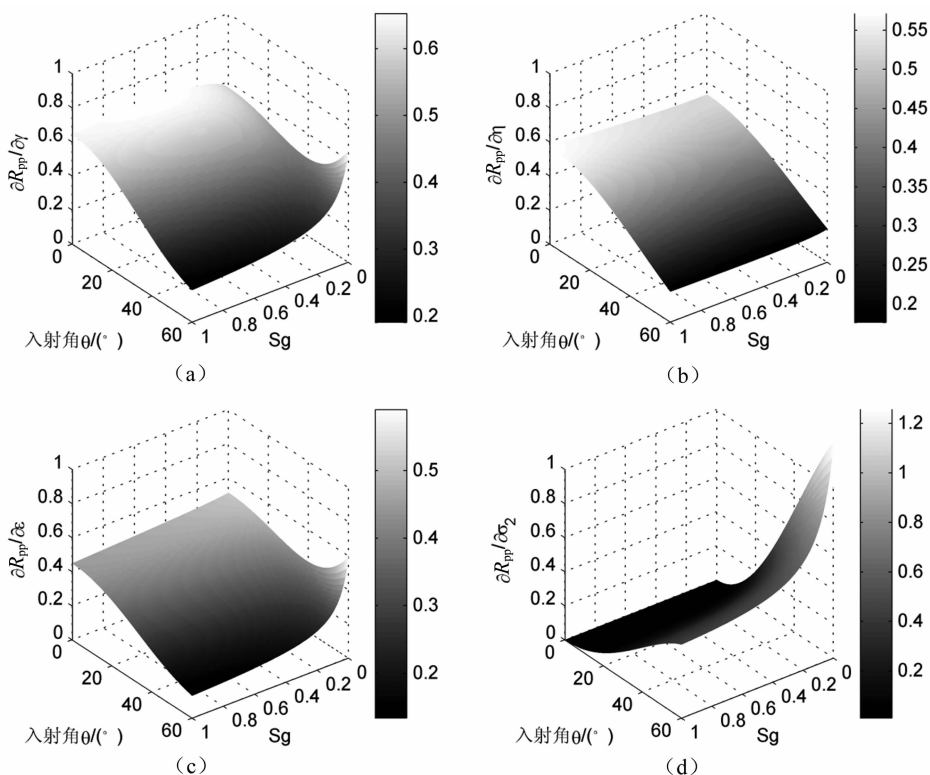


图2 P-P波反射系数对(a)P波速度比,(b)密度比,(c)横波速度比,(d)砂岩泊松比,随入射角和含气饱和度的敏感性  
Fig. 2 Sensitivities of P-P reflectivity to (a)P-wave velocity contrast, (b)density contrast, (c)S-wave velocity contrast, (d)Poisson's ratio of the sandstone versus angle of incidence and versus gas-saturation for shale/sandstone interface.

商业气藏带来很大挑战. 为降低风险, 对该泥砂岩模型进行反射系数对弹性参数敏感性、对含气饱和度的敏感性研究, 对有效识别部分饱和含气提供了一种新的属性分析技术.

从图2中可以看出, 对于饱和气  $S_g = 1$  时, P-P 反射系数对密度比  $\eta$ 、纵波速度比  $\gamma$  和横波速度比  $\epsilon$  在近角度时更加敏感, 随着入射角增加敏感性降低, 而对砂岩储层的泊松比则在大角度时更加敏感, 随着入射角增加敏感性增加. 但从图中可以看出, 饱和气时 P 波速度比和密度比的敏感性曲线很接近, 这也是难于分别反演纵波速度和密度的原因. 从图中可看出, 饱和度对密度比的敏感性影响不大, 对纵波速度比、横波速度比当入射角大于  $40^\circ$  时低饱和气时敏感性明显增强, 对泊松比的敏感性则低饱和度和饱和气藏差异更为明显.

图3中, 对于饱和气  $S_g = 1$  时, P-SV 波反射系数对密度比  $\eta$ 、纵波速度比  $\gamma$ 、横波速度比  $\epsilon$  和泊松比  $\sigma_2$  在小于  $40^\circ$  时随着入射角增加敏感性增强, 但对于本模型反射系数对密度比  $\eta$ 、纵波速度比  $\gamma$  和横波速度比  $\epsilon$  的敏感性相似, 很难将这三者的影响区分开, 而且这三者对不同饱和度的敏感性相差不

大. 但 P-SV 波反射系数对砂岩的泊松比  $\sigma_2$  的敏感性在低饱和度和饱和气藏时差异明显.

图4中实线为提取的图2(d)中入射角  $\theta = 30^\circ$  和  $\theta = 60^\circ$  时 P-P 波反射系数对泊松比敏感性随饱和度的变化, 随含气饱和度降低 P-P 波对泊松比的敏感性单调增大, 当含气饱和度小于 40% 时, 这一变化趋于明显. 虚线为提取的图3(d)中入射角  $\theta = 30^\circ$  和  $\theta = 60^\circ$  时 P-SV 波反射系数对泊松比敏感性随饱和度的变化, 同样具有随含气饱和度降低 P-SV 波的泊松比敏感性单调增大, 当含气饱和度小于 40% 时, 这一变化也是趋于明显, 因此 P-SV 波的泊松比敏感性也可帮助区分商业和非商业气藏. 更值得注意的是,  $\theta = 30^\circ$  时 P-SV 波的泊松比敏感性强于 P-P 波,  $\theta = 60^\circ$  时 P-P 波的泊松比敏感性强于 P-SV 波. 因此 P-P 波和 P-SV 波反射系数对不同弹性参数敏感性的结合可进一步降低识别低饱和度气藏的风险.

根据式(9)和(10)可以计算反射系数对含气饱和度的敏感性. 由图5可看出, 含气饱和度小于 40% 时, P-P 波反射系数对含气饱和度的敏感性明显比饱和气时强, 且随着入射角的增大而增大. 而

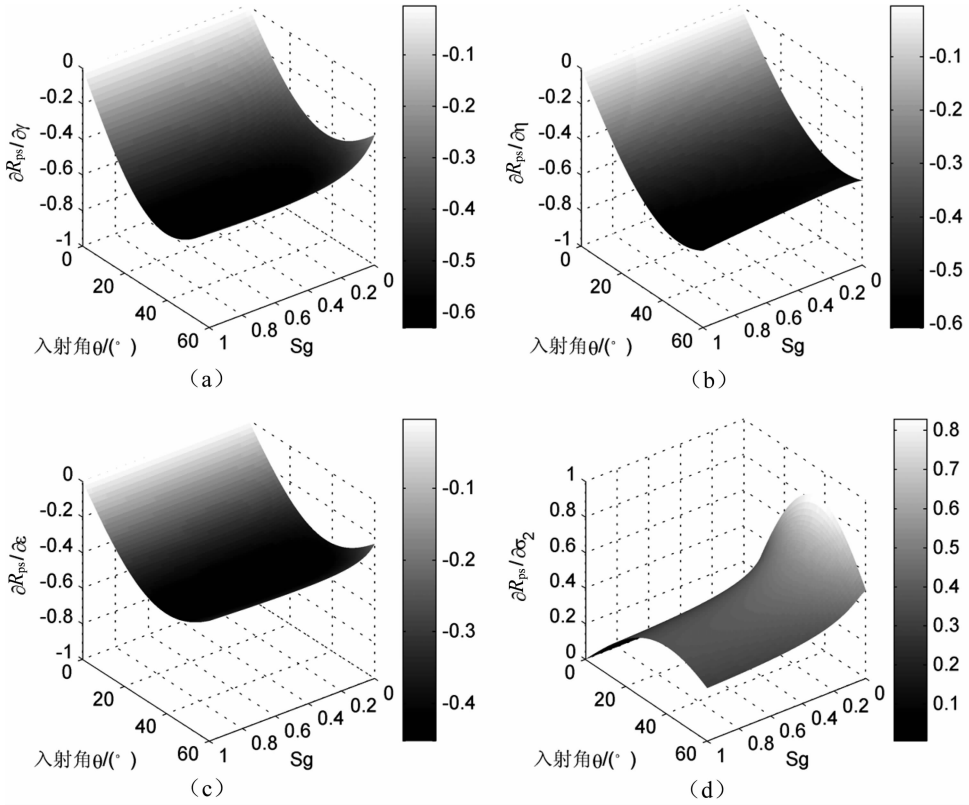


图 3 P-SV 波反射系数对(a)P 波速度比,(b)密度比,(c)横波速度比,(d)砂岩泊松比,随入射角和含气饱和度的敏感性  
 Fig. 3 Sensitivities of P-SV reflectivity to (a)P-wave velocity contrast,(b)density contrast,(c)S-wave velocity contrast, (d)Poisson's ratio of the sandstone versus angle of incidence and versus gas-saturation for shale/sandstone interface.

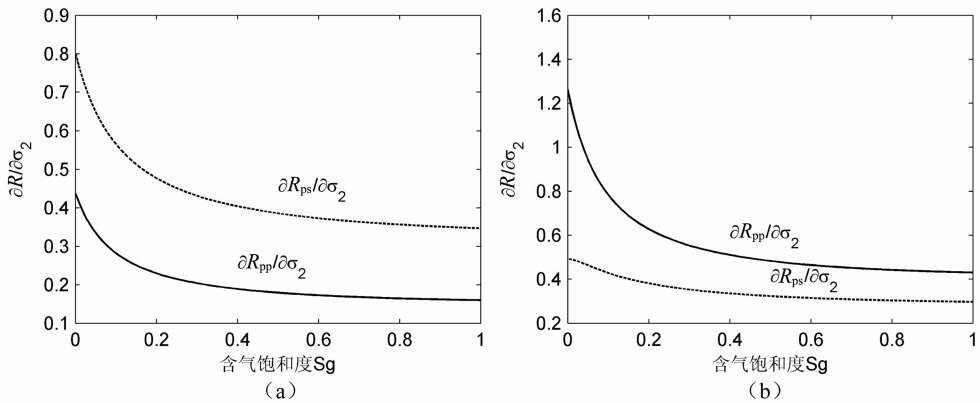


图 4 P-P 波、P-SV 波(a) $\theta=30^\circ$ 和(b) $\theta=60^\circ$ 时反射系数对砂岩泊松比,随含气饱和度的敏感性  
 Fig. 4 Sensitivities of P-P and P-SV reflectivity to Poisson's ratio versus gas-saturation at (a)  $\theta=30^\circ$  and (b)  $\theta=60^\circ$  of incidence.

P-SV 波反射系数对含气饱和度的敏感性随含气饱和度的变化没有 P-P 波明显. 因此对于本模型,利用 P-P 波反射系数对含气饱和度的敏感性的属性也可以很好的识别低饱和度气藏.

#### 4 结论与讨论

通过疏松砂岩气藏的岩石物理模型研究,利用

完全 Zoepprtiz 方程对密度比、纵波速度比、横波速度比、泊松比和含气饱和度进行了反射系数的敏感性分析,得到如下认识:

在不同入射角和不同含气饱和度时反射系数对这些参数的敏感性差异较大. 对于疏松砂岩,当入射角大于  $40^\circ$  时 P-P 波反射系数对纵波速度比、横波速度比的敏感性在含气低饱和时更敏感,对泊松比

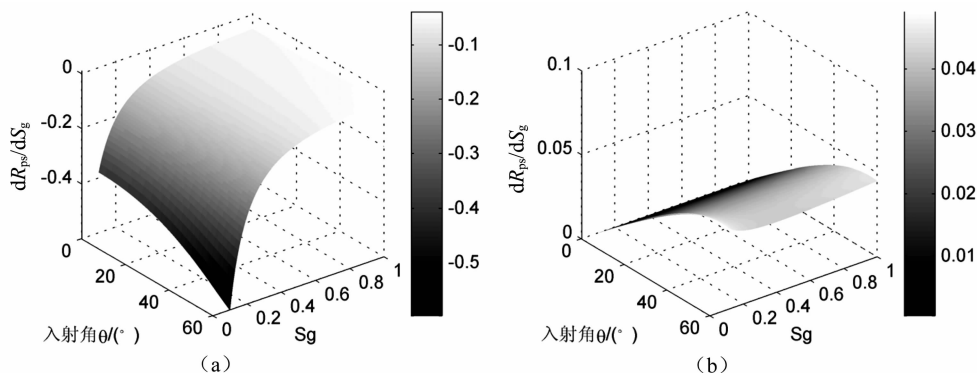


图 5 (a)P-P 波反射系数和(b)P-SV 波反射系数对含气饱和度,随入射角和含气饱和度的敏感性

Fig. 5 Sensitivities of (a)P-P reflectivity and (b)P-SV reflectivity to gas saturation versus angle of incidence and gas-saturation.

和含气饱和度的敏感性在大偏移距处对含气饱和度较高和较低时差异明显,对 P-SV 波反射系数对泊松比的敏感性对含气饱和度较高和较低差异明显.综合利用这些属性分析可以有效识别低饱和度气藏,从而降低勘探风险.

研究中对反射系数的敏感性分析只适用于入射角小于第一临界角的情况;本文只针对疏松砂岩进行了分析,对其余岩性应另作分析;只对单一界面进行了分析,没有考虑薄互层的情况.

## 参 考 文 献 (References):

[1] Ostrander W J. Plane-wave reflection coefficients for gas sands at non-normal incidence [J]. *Geophysics*, 1984, 49(10): 1637~1648.

[2] 张广娟, 胡天跃. 地震波 AVO 与地层岩性分析[J]. *石油地球物理勘探*, 2002, 37(6): 578~584.  
Zhang G J, Hu T Y. Seismic wave AVO and formation lithology analysis[J]. *OGP*, 2002, 37(6): 578~584.

[3] 孙鹏远, 孙建国, 卢秀丽. P-SV 波 AVO 方法研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2003, 18(4): 602~607.  
Sun P Y, Sun J G, Lu X L. Progress in research on the method of P-SV wave AVO [J]. *Progress in Geophysics*, 2003, 18(4): 602~607.

[4] 姜秀娣, 刘洋, 魏修成, 等. 一种同时反演纵波速度和泊松比的方法[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(2): 314~318.  
Jiang X D, Liu Y, Wei X C, et al. A P-wave velocity and poisson ratio nonlinear inversion method [J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(2): 314~318.

[5] 张璐, 印兴耀, 孙成禹. 双相介质的 AVO 正演模拟[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(2): 319~322.  
Zhang L, Yin X Y, Sun C Y. AVO simulation in two-phase media[J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(2): 319~322.

[6] 李景叶, 陈小宏, 郝振江, 等. 多波时移地震 AVO 反演研究[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(4): 902~908.

Li J Y, Chen X H, Hao Z J, et al. A study on multiple time-lapse seismic AVO inversion [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(4): 902~908.

[7] 夏红敏, 王尚旭, 李生杰. 含气地层的 AVO 响应分析[J]. *石油物探*, 2006, 45(4): 357~361.  
Xia H M, Wang S X, Li S J. AVO analysis on gas-bearing layer[J]. *GPP*, 2006, 45(4): 357~361.

[8] 谢用良. 川西丰谷地区三维 AVO 油气检测技术应用研究[J]. *天然气工业*, 2006, 26(3): 46~49.  
Xie Y L. Application study of 3D hydrocarbon detection technology in fenggu area in western Sichuan basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(3): 46~49.

[9] 尚永生, 杨长春, 王真理, 等. 塔里木盆地卡 4 区块 AVO 研究 [J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(5): 1408~1415.  
Shang Y S, Yang C C, Wang Z L, et al. AVO research in Ka-4 region of Tarim basin [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(5): 1408~1415.

[10] 陈建江, 印兴耀. 基于贝叶斯理论的 AVO 三参数波形反演 [J]. *地球物理学报*, 2007, 50(4): 1251~1260.  
Chen J J, Yin X Y. Three-parameter AVO waveform inversion based on Bayesian theorem [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(4): 1251~1260.

[11] 彭真明, 李亚林, 巫盛洪, 等. 碳酸盐岩储层多角度弹性阻抗流体识别方法[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(3): 881~885.  
Peng Z M, Li Y L, Wu S H, et al. Discriminating gas and water using multi-angle extended elastic impedance inversion in carbonate reservoirs [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(3): 881~885.

[12] Rosa A L. Extraction of elastic parameters using seismic reflection amplitude with offset variation [D]. Houston: University of Houston, 1976.

[13] Gomez C T, Tatham R H. Sensitivity analysis of seismic reflectivity to partial gas saturation [J]. *Geophysics*, 2007, 72(3): 45~57.

[14] 刘亚茹. 地震反射对含气饱和度敏感性分析[J]. *内蒙古石油化工*, 2007, 10: 112~113.

- Liu Y R. Sensitivity analysis of seismic reflectivity to gas saturation[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2007, 10: 112~113.
- [15] 李景叶, 陈小宏, 刘其成. 高孔低胶结砂岩储层饱和度和压力变化的时移地震 AVO 响应[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(1): 38~41.
- Li J Y, Chen X H, Liu Q C. Time-lapse seismic amplitude versus offset responses with change of saturation and pressure in unconsolidated sandstone reservoir with high porosity[J]. Journal of China University of Petroleum, 2006, 30(1): 38~41.
- [16] Dvorkin J, Nur A. Elasticity of high-porosity sandstones: Theory for two North Sea data sets[J]. Geophysics, 1996, 61(5): 1363~1370.
- [17] Hill R. The elastic behavior of crystalline aggregate[M]. London: Proceeding Physical Society, 1952: 349~354.
- [18] Gassmann F. Elastic waves through a packing of spheres[J]. Geophysics, 1951, 16: 673~685.
- [19] Wood A M. A textbook of sound[M]. New York: The Macmillan Company, 1955: 360~360.
- [20] Cerveny V, Ravindra R. Theory of seismic head waves[M]. Toronto: University of Toronto Press, 1971.