檀文慧,巴晶,符力耘等.2021.龙马溪一五峰组富有机质页岩三维岩石物理模板分析及"甜点"预测.地球物理学报,64(8):2900-2915,doi:10.6038/cjg2021O0380.

Tan W H, Ba J, Fu L Y, et al. 2021. 3D rock physics template analysis and "sweet spot" prediction of Longmaxi-Wufeng organic-rich shale. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese),64(8):2900-2915,doi:10.6038/cjg2021O0380.

龙马溪一五峰组富有机质页岩三维岩石物理模板分析 及"甜点"预测

檀文慧^{1,2},巴晶^{1*},符力耘³,José M. Carcione^{1,4},周欣¹

1河海大学地球科学与工程学院,地球探测研究所,南京 211100

2 中国石化石油物探技术研究院,南京 211103

3 中国石油大学(华东),地球科学与技术学院,山东青岛 266580

4 National Institute of Oceanography and Applied Geophysics (OGS), Trieste, Italy

摘要为识别四川盆地丁山区龙马溪一五峰组目的层富含页岩气的"甜点区",本文对页岩的有机碳含量、脆性、孔 隙度及微裂隙等核心指标进行分析研究.对页岩展开岩石物性特征和岩石物理分析,结果显示"甜点区"具有 TOC 含量高、高孔隙度、低密度、脆性高(石英含量高)的特点,此外储层的拉梅常数和密度的乘积 λρ 分布范围是 18~30 GPa・g・cm⁻³, 泊松比 v 范围是 0.18~0.22, 剪切模量 μ 范围是 13~18 GPa. 根据储层的岩石物理特征, 同时 考虑孔隙度、裂隙纵横比和矿物组分对优质页岩敏感弹性参数的影响,采用等效嵌入体应力平均(EIAS)理论模型 构建适合页岩气储层的三维岩石物理模板,进而预测储层的孔隙度、裂隙纵横比和石英矿物含量.基于测井数据, 对构建的三维岩石物理模板进行校正,将校正后的模板应用到研究工区,选取过三口井的二维测线和三维区块,进 行孔隙度、裂隙纵横比和石英矿物含量的定量预测.对比实际资料分析得出的优质页岩储层孔隙度预测范围与测 井结果吻合较好, 过三口井的目的层产气情况与预测结果一致性良好, 目的层页岩具有高孔隙度、低裂隙纵横比和 高石英含量的特征, 可有效地指示优质页岩储层分布.

关键词 页岩气;有机碳含量;脆性;孔隙度;"甜点"预测;岩石物理模板 doi:10.6038/cjg2021O0380 **中图分类号** P631 **收稿日期** 2020-10-09, 2021-04-15 收修定稿

3D rock physics template analysis and "sweet spot" prediction of Longmaxi-Wufeng organic-rich shale

TAN WenHui^{1,2}, BA Jing^{1*}, FU LiYun³, José M. Carcione^{1,4}, ZHOU Xin¹

1 School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China

2 Sinopec Geophysical Research Institute, Nanjing 211103, China

3 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong 266580, China

4 National Institute of Oceanography and Applied Geophysics (OGS), Trieste, Italy

Abstract For the purpose of identifying the "sweet spots" of rich shale gas in the Longmaxi-Wufeng target Formations of Dingshan area of Sichuan Basin, this work investigates the key indexes of shale, such as content of total organic carbon (TOC), brittleness, porosity, microfractures,

* 通讯作者 巴晶,男,1980年生,博士,河海大学教授,主要从事孔隙介质波传播理论、岩石物理学和储层流体地震检测方法研究. E-mail: jba@hhu.edu.cn

基金项目 国家自然科学基金项目(41974123),江苏省双创计划,江苏省杰出青年基金项目,国家科技重大专项课题(2017ZX05069-002)资助. 第一作者简介 檀文慧,女,1991年生,博士,工程师,主要从事致密油气储层岩石物理模型及脆性特征研究. E-mail: twh@hhu.edu.cn

etc. We analyze on the rock characteristics and perform rock physics analysis, and the results show that the sweet spot areas exhibit high TOC, high porosity, low density and high brittleness (high quartz content). Furthermore, $\lambda \rho$ (product of the first Lamé constant and density) ranges in $18 \sim 30$ GPa • g • cm⁻³, Poisson's ratio v ranges in 0. 18~0. 22, and shear modulus μ ranges in $13 \sim 18$ GPa for those reservoirs. According to the rock physics properties of reservoir, by considering the impact of porosity, crack aspect ratio and mineral components on the sensitive elastic parameters of high-quality shales, EIAS (equivalent inclusion-average stress) model is adopted to establish 3D rock physical templates for shales, and the reservoir porosity, crack aspect ratio and quartz content are predicted. Based on the log data, the constructed 3D rock physics templates are calibrated, and the calibrated templates are applied to the work area. For the 2D seismic test lines (crossing the three wells) and a 3D seismic dataset, porosity, crack aspect ratio, and quartz content are quantitatively estimated. Compared to the actual data analysis, it is concluded that the range of the predicted porosity for high-quality shale reservoirs are in good agreement with the log data. The gas production data for the target layer of the three Wells are consistent with predictions. The characteristics of high porosity, low crack aspect ratio, and high quartz content of rocks of target formation effectively indicate the spatial distribution of high-quality shale reservoirs.

Keywords Shale gas; Content of total organic carbon (TOC); Brittleness; Porosity; Sweet spot prediction; Rock physics template

0 引言

页岩气主要是指以吸附态和游离态赋存于富含 有机质的低孔、低渗页岩储集系统中的一种天然气, 已成为全球非常规油气勘探开发的重点领域(邹才 能等,2014,2016).从我国油气资源分布来看,四川 盆地及周缘的龙马溪一五峰组页岩成为国内页岩气 勘探的首选层位之一,其储层富含有机质,埋藏深度 适中、有机质演化程度高(邓继新等,2018).有机碳 含量可以反映烃源岩的生烃能力,寻找优质页岩气 储层不仅需要富含有机质的区域,同时也要寻找研 究区内储层脆性高、裂缝发育、有利于压裂改造的层 位(张晨晨等,2016).页岩储层经过压裂改造,可显 著提高页岩气的产量,因此脆性评价与储层压裂品 质息息相关(李庆辉等,2012; Smart et al., 2014; Lisle, 1997; Yang et al., 2015). 一般认为富含有 机质的脆性页岩,且孔隙度和微裂缝相对比较发育 的储层,是页岩气"甜点区"勘探开发的首选目标,其 关键评价指标及下限为压力系数大于 1.3、TOC 值 大于 3.0%、孔隙度大于 3.0% 及含气量大于 3.0 m³/t(邹才能等,2014,2016).

岩石物理模型是连接测井数据、地震属性与储 层参数的纽带,通过等效简化的方法将宏观声学响 应和微观结构特征等实际情况联系起来,从而有效 地预测弹性参数,为储层地震属性反演提供理论基 础(Ba等,2017;Zhang等,2020,2021). Xu和 White (1995)基于 Kuster-Toksöz 理论和微分等效介质模 型(Differential effective medium, DEM),将岩石孔 隙分为砂岩孔隙和泥岩孔隙,并提出用纵横比来描 述孔隙的几何形态,最终形成适用于砂泥岩储层的 Xu-White 模型. Guo 等(2013)根据自洽模型(Selfconsistent approximation, SCA) 和 Backus 平均方 法,提出了富含有机质的岩石物理模型,针对北美页 岩分析了矿物成分、孔隙度等参数对弹性性质与脆 性的影响.董宁等(2014)在 SCA 和 DEM 的基础上, 引入 Berryman 三维孔隙形态及 Brown-Korringa 固体 替换技术,建立适用于富有机质泥页岩的岩石物理 模型.邓继新等(2015)根据岩石的矿物、孔隙度、 TOC 含量及微观结构特征对龙马溪组页岩进行地 震岩石物理建模,研究结果可为该地区的测井及地 震甜点预测提供理论依据. Yang 等(2017)通过获取 的四川盆地页岩样品的数据,总结出地震岩石物理 特征与微观结构的联系,并加入了孔隙纵横比这一 影响因素,合理运用 SCA、DEM、Gassmann 等多个 模型,建立了适合页岩储层的岩石物理模型.印林杰 等(2020)考虑微纳米孔隙和不同成熟度下干酪根的 赋存状态,采用微纳米孔隙理论描述页岩微纳米孔

隙特性,结合各向异性 SCA-DEM 模型、各向异性 Eshelby-Cheng 模型和 Brown-Korringa 固体替换方 程等建立一种页岩储层岩石物理模型.

岩石物理模板(RPT)是从地质条件上进行约 束的岩石物理模型,是预测岩性和流体的有利工具 (Avseth et al., 2005),可以直接反映储层不同参数 (孔隙度、矿物等)和弹性参数之间的关系,能够定量 地解释测井和地震数据(Perez et al., 2011;Guo et al., 2013;巴晶等, 2013; Pang et al., 2019). 李宏 兵等(2019)基于等效介质理论和 Gassmann 方程建 立多重孔隙岩石的三维岩石物理模板,结合测井和 地震数据校正模板,从而有效预测复杂储层孔隙扁 度、孔隙度以及孔隙中的流体饱和度,提高了复杂储 层孔隙参数的预测精度.Tan 等(2020)考虑致密粉 砂岩的矿物组分、孔隙度和微观结构特征,结合 DEM 和 SCA 模型建立致密粉砂岩岩石物理模型, 构建多参数影响的弹性参数二维岩石物理模板,根 据实际资料对致密储层的脆性矿物进行定量预测. 庞孟强等(2020)考虑致密砂岩储层粒间孔隙和微裂 隙的双重孔隙结构,采用 Biot-Rayleigh 双重孔隙方 程,构建二维致密砂岩的岩石物理模板,结合实际资 料对储层孔隙度和裂隙含量进行了定量预测,从而 可以有效预测优质储层的分布区域.

页岩地震弹性性质不仅受矿物组分、有机碳含 量(TOC)、孔隙度的影响,而且还与本身的微观结 构有关.总体而言,由于其复杂性,目前页岩气"甜 点"预测难度较大,难以精细刻画页岩气商业开采 "甜点区"(赵文智等,2016;陈胜等,2017).本文根据 丁山区龙马溪一五峰组的页岩样品的测井解释结 果,分析其基本的物性和岩石物理特征,结合 EIAS 理论模型构建对有机质和脆性敏感的三维岩石物理 模板,将岩石裂隙、矿物组分、孔隙度和地震响应特 征联系起来.利用页岩的测井数据对模板进行校正, 基于校正后的三维岩石物理模板对工区地震数据进 行应用,进而对页岩储层"甜点区"敏感参数进行定 量预测.

1 工区基本特征

研究对象为丁山区志留系下统龙马溪组至奥陶 系上统五峰组的页岩气储层,优质储层主要集中在 龙马溪组底部-五峰组,厚度约为 30 m. 岩石类型以 硅质页岩为主,其次为混合质页岩及少量粘土质页 岩.丁山构造龙马溪组下段-五峰组地层为深水陆棚 相沉积,笔石类生物化石丰富,机械压实过程中同时 伴有生物成因的硅质胶结,造成岩石样品表现出高 TOC 含量(邓继新等,2018).

1.1 岩芯样品特征

本次岩芯取自 A 井,页岩气储层孔隙度范围为 0~7%,深度为 3582.44~3729.41 m,采用 X 射线 衍射实验定量分析岩芯的矿物组分,各个矿物组分 含量随深度的变化关系见图 1.随着深度的增加,岩 石的石英矿物随之增大,含量范围为 22.2%~69.1%, 平均约为 36%,黏土含量随着深度增大而减小,范 围在 13.2%~59.4%,平均成分约为 39%,长石含 量(斜长石和钾长石)平均约为 8%,碳酸盐岩矿物 含量(方解石和白云石)平均约为 8%,碳酸盐岩矿物 含量(方解石和白云石)平均约为 13%,黄铁矿含量 平均约为 2%,有机碳(TOC)含量范围为 0.46%~ 5.86%,平均值为 1.5%.图 2 是矿物组分分布的三 元图,从图中可以看出矿物组分主要是由黏土和硅 质矿物组成,成岩的过程中伴随着硅质胶结.页岩的 孔隙空间主要由粒间孔隙、溶蚀裂缝以及有机质孔 组成(邓继新等,2015).



图 1 丁山区龙马溪组至五峰组页岩的 矿物组分随着深度的变化规律

Fig. 1 Mineral components of the shale from Longmaxi to Wufeng Formations in Dingshan Area vary with the depth

1.2 有机碳含量 TOC

1.2.1 TOC 与矿物组分之间的关系

图 3 是有机碳含量(TOC)与不同矿物组分的 关系.图 3a 是 TOC 与石英含量之间的关系,随着







TOC 的增大,岩石石英矿物含量相应增大,具有较 好的正相关性. 前人研究认为石英属于脆性矿物 (Jarvie et al., 2007),因此可认为富有机质的层位 脆性矿物含量高.图 3b 是 TOC 与碳酸盐岩矿物含 量的变化关系,当TOC含量在0~1%之间增大时, 碳酸盐岩矿物含量快速下降,随着 TOC 含量继续 增大,碳酸盐岩矿物含量稳定在10%左右.图 3c 是 TOC 随黏土矿物含量的变化关系,随着 TOC 含量 的增大,岩石的黏土矿物含量随之减少.同样一些学 者研究发现硅质含量越高,页岩脆性越高,可压裂性 好,越有利于裂隙的产生,裂隙发育对页岩气藏的开 采效益和产量有直接的影响(Montgomery et al., 2005; Bowker, 2007; 李登华等, 2009; 王淑芳等, 2014). 生物成因硅质重结晶可以形成石英(秦建中 等,2010),从而增加页岩的脆性.有机碳含量 (TOC)对页岩气的富集是很重要的控制因素,决定 了页岩生烃的能力, 脆性矿物影响了岩石的压裂改 造,岩石越脆,越容易压裂.富有机质、脆性矿物含量 高的储层是页岩气勘探开发的主力层系. 1.2.2 TOC与孔隙度、弹性参数的关系

关于 TOC 含量的预测,一般需要建立 TOC 含量与其敏感性参数之间的定量关系,然后利用此定量关系进行反演,从而获得 TOC 含量的平面分布(陈胜等,2017).如图 4 所示,TOC 含量与孔隙度的关系中,TOC 含量与孔隙度具有较好的正相关性,相关系数 *R*²=0.83.该研究区二者之间的定量关系式为

TOC = $0.85 - 0.198\phi + 0.144\phi^2$, $R^2 = 0.83$.



(a) The relation between TOC and quartz content;(b) The relation between TOC and carbonate content;(c) The relation between TOC and clay content.

因此可以利用公式(1),将得到的孔隙度转换成 TOC含量.

为了优选对有机碳含量敏感的储层参数,根据测井解释数据(井A),如图5所示,图中色标是 TOC含量,本文分析了目的层的有机碳含量与不 同弹性参数和物性参数之间的关系.图5a是纵波 阻抗与拉梅常数和密度的乘积的关系交会图,从 图中可以看出 $\lambda \rho$ 随纵波阻抗的增大而增大, $\lambda \rho$ 低(18~30 GPa•g•cm⁻³)和纵波阻抗低(9~10





g・cm⁻³・km・s⁻¹)的情况下,对应 TOC 含量高; 图 5b 显示的是孔隙度和密度的关系交会图,二者具 有较好的负相关性,且孔隙度大、密度小则对应高的 TOC 含量;图 5c 是剪切模量与纵波阻抗的关系交 会图,可以看出剪切模量随着纵波阻抗的增大而 增大,高 TOC 含量对应着较高的剪切模量(13~ 18 GPa);同样,图 5d 显示泊松比在 0.18~0.22 范 围内,页岩气储层的 TOC 含量高.

1.3 脆性指数

页岩的脆性评价方法没有统一的标准,目前我 国主要是借鉴北美页岩气勘探开发中总结的经验公 式,依据弹性参数定义的脆性指数来评价有利压裂 层段(Rickman et al., 2008; Tan et al., 2018).杨 氏模量是表征岩石在受力时维持裂缝扩展的能力, 而泊松比则是反映应力的变化、岩石发生破坏时的 强弱(李庆辉等,2012).Rickman等(2008)通过对北 美页岩储层进行大量数据统计分析后提出了公式





Fig. 5 (a) Cross-plot between P-wave impedance and λρ; (b) Cross-plot between porosity and density;
(c) Cross-plot between P-wave impedance and shear modulus; (d) Cross-plot between P-wave impedance and Poisson ratio. The color bar denotes TOC.

(2)一(4),认为杨氏模量大和泊松比小的储层脆性高.

$$E_{BI} = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}}, \qquad (2)$$

$$v_{BI} = \frac{v_{\text{max}}}{v_{\text{min}} - v_{\text{max}}},$$
(3)
$$E_{\text{min}} + v_{\text{min}}$$

$$BI = \frac{E_{BI} + b_{BI}}{2}.$$
 (4)

其中 E 是杨氏模量, v 是泊松比, E_{max} (E_{min})是最大

(最小)杨氏模量, v_{max}(v_{min})是最大(最小)泊松比, 最大值和最小值为测量数据中的极值.

同样为了分析对页岩脆性敏感的岩石物理参数,基于不同的弹性参数对页岩脆性进行敏感性分析.图6分别是剪切模量、泊松比与纵波阻抗的关系 交会图,色标是脆性指数,结果显示高脆性对应高剪 切模量,泊松比小对应岩石脆性高,剪切模量和泊松 比能够很好地区分高脆性和低脆性储层.



图 6 (a) 剪切模量与纵波阻抗的交会图,色标是 TOC; (b) 泊松比和纵波阻抗的交会图,色标是脆性指数 Fig. 6 (a) Cross-plot between P-wave impedance and shear modulus, where the color bar denotes TOC; (b) Cross-plot between P-wave impedance and Poisson ratio, where the color bar denotes brittleness index

如图 7 所示,在 TOC 含量与脆性指数的交会 图中可知,当 TOC>3%,BI>50%,储层属于优质 页岩气储层,当2%<TOC<3%,40%<BI<50%, 储层属于较好的页岩气储层,当 TOC<2%,BI< 40%,属于较差的页岩气储层.图中还可看出优质页 岩气储层的泊松比较小.综上所述,低λρ、低纵波阻





抗、低泊松比以及较高的剪切模量对应高的 TOC 含量.高孔隙度和低密度也对应高的 TOC 含量. 高剪切模量和低泊松比对应高脆性储层.因此,优 质页岩气储层具有高 TOC 含量(>3%)、高孔隙度 (>3%)、低密度($<2560 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)、低拉梅常数和 密度的乘积(18~30 GPa · g · cm⁻³)、低纵波阻抗 ($9~10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)、低泊松比(0.18-0.22) 以及较高的剪切模量(13~18 GPa),脆性矿物含量 高,脆性高等特征.这些特征可以作为页岩"甜点区" 的综合评价标准.

2 页岩气"甜点区"敏感参数地震预测 方法

页岩气储层"甜点区"是指具有勘探开发价值的 页岩气富集区,主要表现为页岩储层厚度大,总有机 碳(TOC)含量高,处于"生气窗",含气量高,裂隙发 育,脆性高易压裂等(袁书坤等,2014).本文首先在 测井和地震资料的基础上,明确页岩储层的岩石物 理特征,对"甜点区"敏感性参数进行优选,进行地震 岩石物理建模.最后对优质储层的 TOC、脆性以及 孔隙度等核心参数进行定量预测,综合评价"甜点区".

2.1 理论方法

对实际的含气储层进行岩石物理建模一般包括 三个步骤(Xu and White,1996;Xu and Payne,2009): (1)分析矿物组分的配比,计算岩石基质的弹性参数 和密度;(2)计算岩石干骨架弹性模量与密度;(3)流 体替换.

2.1.1 Voigt-Reuss-Hill 理论

本文计算岩石基质的弹性模量采用 Voigt-Reuss-Hill 平均法(Hill,1952),即可得到理论的估 测值,具体公式如下:

$$M_{\rm H} = \frac{1}{2} \left| \frac{1}{\sum_{i=1}^{N} \frac{f_i}{M_i}} + \sum_{i=1}^{N} f_i M_i \right|, \qquad (5)$$

其中,*i* 表示矿物的相或者孔隙空间的第*i* 个介质, *f_i*表示第*i* 个介质的体积含量,*M_i* 表示的是第*i* 个 介质的弹性模量.

2.1.2 等效嵌入体应力平均(EIAS)理论模型

EIAS 理论模型可以建立体积/剪切模量与裂隙纵横比/裂隙体积比率之间的关系,可以分别计算低频和高频条件下的弹性模量.低频的体积模量 K^{sat}、剪切模量 μ^{sat}和高频的体积模量 K^{sat}、剪切模 量 μ^{sat}分别对应孔隙中流体压力连通和孔隙空间中 流体被孤立的情况.

假设多孔岩石中含有球形孔隙和裂隙,饱和岩石的高频体积模量和剪切模量为(Endres and Knight, 1997):

$$K_{\rm HF}^{\rm sat} = K_{\rm s} + \frac{\phi(K_{\rm f} - K_{\rm s})\bar{\gamma}}{1 - \phi(1 - \bar{\gamma})},\tag{6}$$

$$\mu_{\rm HF}^{\rm sat} = \frac{\mu_{\rm s}(1-\phi)}{1-\phi(1-\bar{\chi})},\tag{7}$$

其中(Berryman, 1980a; Mavko et al., 2009),

$$\bar{\gamma} = (1-c)P_1 + cP_2, \ \bar{\chi} = (1-c)Q_1 + cQ_2, \ (8)$$

$$P_1 = rac{K_{
m s} + 4\mu_{
m s}/3}{K_{
m f} + 4\mu_{
m s}/3}, \ P_2 = rac{K_{
m s}}{K_{
m f} + \pilphaeta_{
m m}},$$
 (9)

$$Q_{1} = 1 + \mu_{s} / \zeta,$$

$$Q_{2} = \frac{1}{5} \left[1 + \frac{8\mu_{s}}{\pi\alpha(\mu_{s} + 2\beta_{m})} + 2 \cdot \frac{K_{f} + 2\mu_{s} / 3}{K_{f} + \pi\alpha\beta_{m}} \right],$$
(10)

$$\beta_{\rm m} = \mu_{\rm s} \cdot \frac{3K_{\rm s} + \mu_{\rm s}}{3K_{\rm s} + 4\mu_{\rm s}}, \ \zeta = \frac{\mu_{\rm s}}{6} \cdot \frac{9K_{\rm s} + 8\mu_{\rm s}}{K_{\rm s} + 2\mu_{\rm s}}, \ (11)$$

其中 P₁ 和 Q₁ 对应于球形孔, 而 P₂ 和 Q₂ 近似对应 硬币状裂隙.这些参数有更精确的表达式, 适用于任 意纵横比的扁状球体, 包括球形孔隙和裂隙.

$$P = \frac{1}{3} T_{iijj}, Q = \frac{1}{5} \left(T_{ijij} - \frac{1}{3} T_{iijj} \right), \qquad (12)$$

其中 T_{iij} 和 T_{iiij} 表示椭球状嵌入体内的应变与均匀 远场应变场相关的张量(Berryman, 1980b; Mavko 等, 2009).

当流体压力在整个岩石孔隙空间达到平衡状态时,低频饱和岩石的体积模量和剪切模量(Endres and Knight, 1997)为

$$K_{\rm LF}^{\rm sat} = K_{\rm s} + \frac{\phi K_{\rm s} (K_{\rm f} - K_{\rm s}) \gamma_0}{(1 - \phi) (K_{\rm s} - K_{\rm f}) + [K_{\rm f} + \phi (K_{\rm S} - K_{\rm f})] \overline{\gamma}_0},$$
(13)

$$\mu_{\rm LF}^{\rm sat} = \frac{\mu_{\rm s}(1-\phi)}{1-\phi(1-\bar{\chi}_0)},$$
 (14)

此处

$$\bar{\gamma}_{0} = (1-c)P_{01} + cP_{02}, \ \bar{\chi}_{0} = (1-c)Q_{01} + cQ_{02},$$
(15)

$$P_{\rm o1} = 1 + rac{3K_{
m s}}{4\mu_{
m s}}, \; P_{\rm o2} = rac{K_{
m s}}{\pilphaeta_{
m m}}, \; (16)$$

$$Q_{01} = Q_1, \ Q_{02} = \frac{1}{5} \Big[1 + \frac{4\mu_s}{\pi\alpha} \cdot \frac{\mu_s + 8\beta_m}{3\beta_m(\mu_s + 2\beta_m)} \Big],$$
(17)

并且,

$$P_{0n} = P_n(K_f = 0), (n = 1, 2), Q_{0n} = Q_n(K_f = 0),$$

(n = 1, 2). (18)

上述方程式适用于低频状态时球形硬孔有效模量的计算.对于纵横比小于1的扁球形孔,式(15)中的系数可以由式(12)和(18)计算得到.孔隙度 ϕ 分为硬孔隙度 ϕ_s (硬孔隙)和软孔隙度 ϕ_c (软孔隙).背景固体基质的体积模量和剪切模量分别为 K_s 和 μ_s . 孔隙空间中可以是干燥或填充流体,流体体积模量为 K_f ,裂隙纵横比为 α ,此外,裂隙体积比率为c = d

<u>�</u>, 该参数与软孔隙和硬孔隙性质有关.

表 1	矿物	组分性质	(Mavko e	et al. ,	2009)
Tab	ole 1	Mineral o	component	prope	erties

	密度(kg・m ⁻³)	体积模量(GPa)	剪切模量(GPa)
石英	2650	37	44
钾长石	2540	47	24
斜长石	2630	76	26
黄铁矿	2630	147	133
方解石	2710	77	32
白云石	2870	95	45
干酪根	1300	2.9	2.7
黏土	2500	21	7
气	111	0.04	0

针对实际储层测井岩芯物性和岩石物理特征, 具体的建模流程如下:

(1)首先针对实际储层测井岩芯的矿物组分,使 用 Voigt-Reuss-Hill 边界理论估算页岩基质的体积 模量和剪切模量,页岩不同矿物组分的弹性性质如 表 1 所示.

(2)其次将岩石孔隙空间分为硬孔隙和裂隙,根据不同孔隙纵横比的大小表征岩石孔隙的大小,使用 EIAS 理论模型估算页岩干骨架的体积模量和剪切模量;

(3)如果岩石内部的孔隙填充流体,需要对岩石 进行流体替换,可利用 EIAS 理论模型估算页岩饱 和流体状态下的体积模量和剪切模量;

(4)最后根据构建的页岩岩石物理模型预测岩石的纵横波速度,结合岩石的体积密度,计算页岩气储层的弹性参数.

2.2 建模结果

2.2.1 不同影响因素下的岩石物理模板

为了识别高品质的页岩气储层,可基于不同 影响因素下的岩石物理模板特征,分析页岩气储 层的不同因素对"甜点区"敏感性弹性参数的影响.根据测井解释结果,可设页岩孔隙度的变化范围为0.5%~6.5%,裂隙纵横比变化范围为0.0006~0.0066,石英矿物体积分数从20%增加到70%,黏土矿物体积分数则相对从60%减少到10%,同时方解石矿物体积分数和长石矿物体积分数分别设为10%和7%,有机碳含量取平均值,体积分数约为3%,裂隙含量设为定值,占孔隙度的1.5%.

图 8a 是不同的孔隙度和矿物组分影响下剪切 模量-密度-拉梅常数和密度的乘积的岩石物理模 板,此时裂隙纵横比保持定值.结果显示随着孔隙度 的增大,剪切模量、密度以及拉梅常数和密度的乘积 都随之减小,随着石英含量的增大和黏土含量的相 对减小,剪切模量和密度有增大的趋势,拉梅常数和 密度的乘积变化不明显.图 8b 是不同的裂隙纵横比 和矿物组分影响下,剪切模量-密度-拉梅常数和密 度的乘积的岩石物理模板,此时孔隙度保持常数.随 着裂隙纵横比的增大,剪切模量和拉梅常数和密度 的乘积都随之增大,密度有略增大的趋势.图 8c 是 不同的裂隙纵横比和孔隙度影响下,剪切模量-密



(a) The effect of porosity and mineral component on the rock physics template; (b) The effect of crack aspect ratio and mineral component

on the rock physics template; (c) The effect of porosity and crack aspect ratio on the rock physics template.

度-拉梅常数和密度的乘积的岩石物理模板,此时矿物组分保持定值.随着孔隙度的增大,剪切模量、密度和拉梅常数和密度的乘积均减小,而随着裂隙纵横比的增大,三者均随之增大.

2.2.2 三维岩石物理模板

根据 2.2.1 页岩岩石物理模板设置的参数,结 合不同影响因素下的弹性参数构建三维岩石物理模 板,如图 9 所示.

图 9a 是在孔隙度、裂隙纵横比及矿物组分影响 下的剪切模量-密度-泊松比的三维岩石物理模板. 随着孔隙度的增大,剪切模量、密度及泊松比都具有 减小的趋势.随着石英含量的增加,黏土含量的相对 减小,剪切模量和密度随之增大,而泊松比减小.随 着裂隙纵横比的增大,剪切模量、密度及泊松比都具 有增大的趋势.图 9b 是在孔隙度、裂隙纵横比及矿 物组分影响下的剪切模量-密度-拉梅常数和密度的 乘积的三维岩石物理模板.随着孔隙度的增大,剪切 模量、密度以及拉梅常数和密度的乘积都随之减小. 随着石英含量的增大和黏土含量的相对减小,剪切 模量和密度有增大的趋势,拉梅常数和密度的乘积 变化不明显.随着裂隙纵横比的增大,剪切模量和拉 梅常数和密度的乘积随之增大,密度变化不明显.



图 9 不同影响因素下的三维岩石物理模板

(a) 在孔隙度、裂隙纵横比及矿物组分影响下的剪切模量-密度-泊松比的岩石物理模板;(b) 在孔隙度、裂隙纵横比及

矿物组分影响下的剪切模量-密度-拉梅常数和密度的乘积的岩石物理模板.

Fig. 9 3D rock physics template under different influencing factors

(a) The effect of porosity, crack aspect ratio and mineral component on μ - ρ -v rock physics template;

(b) The effect of porosity, crack aspect ratio and mineral component on $\mu \epsilon \rho \cdot \lambda \rho$ rock physical template.

3 测井数据校正三维岩石物理模板

本文针对页岩气储层建立了基于有机碳含量和 脆性敏感的岩石物理模板,在利用图板对储层"甜点 区"进行定量预测之前,需要利用测井数据对模板进 行校正,从而获得符合实际储层的岩石物理模板,进 而在图板的储层参数(文中指孔隙度、石英含量及裂 隙纵横比)范围内,对储层相关参数进行定量的 预测.

如图 10 给出校正后三维岩石物理模板与测井 数据的对比.图 10a 和 10b 是剪切模量-密度-拉梅 常数和密度的乘积岩石物理模板与测井数据的对比 情况,色标是测井数据的孔隙度和有机质含量.对比 测井数据和模板,结果显示二者的一致性较好,测井 数据的孔隙度分布与模板的变化趋势一致,且高孔 隙度的数据点对应高的有机质含量.同时高的有机 碳含量具有较高的剪切模量和较低的拉梅常数和密度的乘积,以及低的密度,较高的石英含量.图 10c 是剪切模量-密度-泊松比岩石物理模板与测井数据的对比情况,色标是脆性指数.图中可知脆性较高的数据点泊松比较低,且对应高的有机质含量和孔隙度.因此基于该模板可对储层孔隙度、石英含量以及裂隙纵横比进行预测.

4 "甜点区"储层参数地震定量预测

本文对工区一条过 A、B 和 C 井的测线进行目的层孔隙度、裂隙纵横比及石英含量的定量预测. 过 A 井目的层深度为 3702~3731 m,厚度为 28.9 m, 过 B 井目的层深度为 4332~4367 m,厚度为 35.5 m,过 C 井目的层深度为 2239~2272 m,厚度为 32 m.首 先提取反演得到的纵波阻抗、横波阻抗和密度,得到 该测线的纵波阻抗、横波阻抗和密度二维剖面(图



(a) 色标为孔隙度; (b) 色标为有机碳含量; (c) 色标为脆性指数.
 Fig. 10 3D rock physics template and log data

(a) The color bar is porosity; (b) The color bar is TOC; (c) The color bar is brittleness index.

11),根据纵波阻抗、横波阻抗和密度计算剪切模量、 泊松比、拉梅常数和密度的乘积,得到该测线的剪切 模量、泊松比、拉梅常数和密度的乘积二维剖面(图 12).由图 12(a—c)可知,目的层具有低拉梅常数和 密度的乘积(18~30 GPa • g • cm⁻³)、低泊松比 (0.18~0.22)和较高的剪切模量(13~18 GPa)的 特点,这些参数在横向上连续性较好.

基于前述提出的优质页岩储层参数三维岩石物 理模板,结合储层地震反演获取的密度、剪切模量、 泊松比、拉梅常数和密度的乘积,开展对比分析,基 于模板的储层参数范围,进行孔隙度、裂隙纵横比和 石英含量的预测.对数据点与模板边界差距较大的 情况按非储层处理.如图 13 给出了三维岩石物理模 板预测的储层孔隙度、裂隙纵横比和石英含量的二 维剖面和由弹性参数得到的脆性指数二维剖面,结 果显示目的层的孔隙度变化范围是 3~7%之间,且 过 A和B井的目的层孔隙度要高于过 C井目的层 孔隙度.目的层的整体裂隙纵横比较低,连通性好, 裂隙发育,而 C井裂隙纵横比较差.整个目的层的 石英矿物含量较高,且过 A和B井的目的层石英含 量要高于过 C 井目的层的石英含量,同时图 13d 可 以看出过 A 和 B 井的目的层脆性指数要高于过 C 井目的层的脆性指数,目的层的整体脆性较高.综上 所述,目的层横向连续性好,优质页岩储层具有高孔 隙度、高脆性(脆性矿物含量高)、裂隙纵横比小的特 点,且 A 和 B 井目的层要优于 C 井.

利用上述方法可以得到工区约 180 km² 的三维 地震预测结果.如图 14 给出了工区龙马溪组底部-五 峰组的中间切片三维页岩储层孔隙度、石英含量、脆 性指数和裂隙纵横比的预测结果.结果显示 B 井所处 的区域目的层孔隙度、脆性指数以及石英含量最高, A 井附近储层的预测结果参数次之,C 井储层预测结 果最差.B 井附近储层裂隙纵横比较小,A 井附近储 层裂隙纵横比次之,C 井裂隙纵横比略大.图 15 是 TOC 含量的三维预测平面分布,通过前文得出的 TOC 含量和孔隙度之间的拟合关系换算得到.结果 显示 TOC 含量较为发育,B 井属于优质气井,TOC 含 量高,A 井次之.在产气报告中,A 井属于高产井,初 产气量为 20.56(万方/天),B 井初产气量是 10.5(万 方/天),C 井初产量为 3.3(万方/天).综合分析得出



(a) 横波阻抗反演结果; (b) 纵波阻抗反演结果; (c) 密度反演结果.

Fig. 11 Target layer profile of the seismic inversion results of crossing-well 2D test line

(a) S-wave impedance inversion results; (b) P-wave impedance inversion results; (c) Density inversion results.

的结论,B井的储层优于 A 井附近的储层,而 B 井的 初产气量低于 A 井的产气量,这可能是由于压裂工 艺对页岩气产量的明显影响.整体而言,目的层预测 结果与实际情况基本一致,高孔隙度、高脆性(脆性矿 物含量高)、裂隙纵横比小可有效指示优质储层,工区 的甜点有利区分布,主要集中于西北方向.

5 结论

本文对研究工区的页岩气储层进行了岩石物

理特征分析,在矿物组分和有机质碳含量的关系 中,随着测井深度增加,石英矿物含量与有机质含 量具有较好的正相关性,黏土矿物含量与有机质 含量具有负相关性,即高有机碳含量的储层对应 石英含量高、黏土含量低.在分析有机质和脆性的 参数关系中,综合评价认为优质页岩气储层具有高 的有机碳含量(>3%)、低的拉梅常数和密度的乘积 (18~30 GPa•g•cm⁻³)、低泊松比(0.18~0.22) 以及较高的剪切模量(13~18 GPa),同时具有孔隙 度高(3%~7%)、密度低(小于 2560 kg•m⁻³)、储





层脆性高(脆性指数>50%)的特征.

根据页岩气储层的物性和岩石物理特征,利用 EIAS 理论模型,分析矿物组分、孔隙度和裂隙纵横 比对优质页岩气储层弹性参数的影响,进一步提出 适合页岩气储层描述的三维岩石物理模板.利用测 井数据对构建的三维岩石物理模板进行校正,从而 可对优质页岩气储层的孔隙度、石英矿物和裂隙纵 横比进行定量预测.

基于研究工区的储层地震数据,采用适用于优

质页岩储层的三维岩石物理模板,实现了二维测线 和三维地震资料的孔隙度、石英含量和裂隙纵横比 的定量预测.结果显示,过三口井的目的层孔隙度变 化与测井结果一致性好,且裂隙纵横比小、石英含量 高、目的层横向连续性较好,预测结果与实际产气情 况基本一致.根据实际地层岩石物理特征构建的三 维岩石物理模板,可较好地表征页岩气"甜点",从而 结合地震参数反演估算矿物含量、孔隙度及裂隙参 数,进而有效地指示优质页岩储层分布.



Fig. 13 The predicted 2D profile by 3D rock physics templates crossing the wells A, B and C(a) Porosity; (b) Crack aspect ratio; (c) Quartz content; (d) Brittleness index.



图 14 "甜点区"关键参数平面分布 (a) 孔隙度;(b) 石英含量;(c) 脆性指数;(d) 裂隙纵横比. Fig. 14 The map distribution of key parameters of "sweet spot" (a) Porosity;(b) Quartz content;(c) Brittleness index;(d) Crack aspect ratio.





References

- Avseth P, Mukerji T, Mavko G. 2005. Quantitative Seismic Interpretation: Applying Rock Physics tools to Reduce Interpretation Risk. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ba J, Yan X F, Chen Z Y, et al. 2013. Rock physics model and gas saturation inversion for heterogeneous gas reservoirs. *Chinese* J. Geophys. (in Chinese), 56(5): 1696-1706, doi: 10.6038/ cjg20130527.
- Ba J, Xu W, Fu L Y, et al. 2017. Rock anelasticity due to patchysaturation and fabric heterogeneity: A double double-porosity model of wave propagation. *Journal of Geophysical Researchsolid earth*, 122(3): 1949-1976.
- Berryman J G. 1980a. Long-wavelength propagation in composite elastic media I. Spherical inclusions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68(6): 1809-1819.

- Berryman J G. 1980b. Long-wavelength propagation in composite elastic media II. Ellipsoidal inclusions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68(6): 1820-1831.
- Bowker K A. 2007. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: issues and discussion. AAPG Bulletin, 91(4): 523-533.
- Chen S, Zhao W Z, Ouyang Y L, et al. 2017. Comprehensive prediction of shale gas sweet spots based on geophysical properties: a case study of the Lower Silurian Longmaxi Fm in Changning block, Sichuan Baisn. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 37(5): 20-30.
- Deng J X, Wang H, Zhou H, et al. 2015. Microtexture, seismic rock physical properties and modeling of Longmaxi Formation shale. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(6): 2123-2136, doi: 10.6038/cjg20150626.
- Deng J X, Tang Z Y, Li Y, et al. 2018. The influence of the diagenetic process on seismic rock physical properties of Wufeng and Longmaxi Formation shale. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 61(2): 659-672, doi: 10.6038/cjg2018L0062.
- Dong N, Huo Z Z, Sun Z D, et al. 2014. An investigation of a new rock physics model for shale. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57 (6): 1990-1998, doi: 10.6038/cjg20140629.
- Endres A L, Knight R J. 1997. Incorporating pore geometry and fluid pressure communication into modeling the elastic behavior of porous rock. *Geophysics*, 62(1): 106-117.
- Guo Z Q, Li X Y, Liu C, et al. 2013. A shale rock physics model for analysis of brittleness index, mineralogy and porosity in the Barnett Shale. *Journal of Geophysics and Engineering*, 10 (2): 025006, doi: 10.1088/1742-2132/10/2/025006.
- Hill R. 1952. The elastic behaviour of a crystalline aggregate. Proceedings of the Physical Society. Section A, 65(5): 349-354.
- Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. 2007. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of northcentral Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. AAPG Bulletin, 91(4): 475-499.
- Li D H, Li J Z, Wang S J, et al. 2009. Analysis of controls on gas shale reservoirs. Natural Gas Industry (in Chinese), 29(5): 22-26.
- Li H B, Zhang J J, Cai S J, et al. 2019. 3D rock physics template for reservoirs with complex pore structure. *Chinese J*. *Geophys.* (in Chinese), 62(7): 2711-2723, doi: 10.6038/ cjg2019K0672.
- Li Q H, Chen M, Jin Y, et al. 2012. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale gas reservoir. *Petroleum Drilling Techniques* (in Chinese), 40(4): 17-22.
- Lisle R. 1997. Structural geology of rocks and regions: Davis, G. H. and Reynolds, S. J. 1996. John Wiley and Sons, New York 2nd edition. Price £21.95 (hardback). *Journal of Structural Geology*, 19(5): 752-753.
- Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. 2009. The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media. New York: Cambridge University Press.
- Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. 2005. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth basin, north-central Texas: gas-shale play

with multi-trillion cubic foot potential. *AAPG Bulletin*, 89(2): 155-175.

- Pang M Q, Ba J, Carcione J M, et al. 2019. Estimation of porosity and fluid saturation in carbonates from rock-physics templates based on seismic Q. Geophysics, 84(6): 1-12.
- Pang M Q, Ba J, Carcione J M, et al. 2020. Analysis of attenuation rock-physics template of tight sandstones: reservoir microcrack prediction. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 63(11): 4205-4219, doi: 10.6038/cjg2020N0178.
- Perez M, Close D, Goodway B, et al. 2011. Developing templates for integrating quantitative geophysics and hydraulic fracture completions data: part I-Principles and theory. // 81st Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys. Expanded Abstracts, 1794-1798.
- Qin J Z, Shen B J, Fu X D, et al. 2010. Ultramicroscopic organic petrology and potential of hydrocarbon generation and expulsion of quality marine source rocks in South China. *Oil and Gasgeology* (in Chinese), 31(6): 826-837.
- Rickman R, Mullen M J, Petre J E, et al. 2008. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett shale. //78th Ann. Internat Mtg., Soc. Expi. Geophys.. Expanded Abstracts, doi: 10.2118/ 115258-MS.
- Smart K J, Ofoegbu G I, Morris A P, et al. 2014. Geomechanical modeling of hydraulic fracturing: why mechanical stratigraphy, stress state, and pre-existing structure matter. AAPG Bulletin, 98 (11): 2237-2261.
- Tan W H, Ba J, Guo M Q, et al. 2018. Brittleness characteristics of tight oil siltstones. Applied Geophysics, 15(2): 175-187.
- Tan W H, Ba J, Müller T, et al. 2020. Rock physics model of tight oil siltstone for seismic prediction of brittleness. *Geophysical Prospecting*, 68(5): 1554-1574.
- Wang S F, Zou C N, Dong D Z, et al. 2014. Biogenic silica of organic-rich shale in Sichuan basin and its significance for shale gas. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 50(3): 476-486.
- Xu S Y, White R E. 1995. A new velocity model for clay-sand mixtures. *Geophysical Prospecting*, 43(1): 91-118.
- Xu S Y, White R E. 1996. A physical model for shear-wave velocity prediction. *Geophysical Prospecting*, 44(4): 687-717.
- Xu S Y, Payne M A. 2009. Modeling elastic properties in carbonate rocks. *The Leading Edge*, 28(1): 66-74.
- Yang L, Ge H K, Shen Y H, et al. 2015. Imbibition inducing tensile fractures and its influence on in-situ stress analyses: a case study of shale gas drilling. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 26: 927-939.
- Yang Z Q, He T, Zou C C. 2017. Shales in the Qiongzhusi and Wufeng-Longmaxi Formations: a rock-physics model and analysis of the effective pore aspect ratio. *Applied Geophysics*, 14(3): 325-336.
- Yin L J, Yin X Y, Zong Z Y, et al. 2020. A new rock physics model method for shale on the theory of micro-nanopores. *Chinese J*. *Geophys.* (in Chinese), 63(4): 1642-1653, doi: 10.6038/

cjg2020M0448.

- Yuan S K, Chen K Y, Hardage B A, et al. 2014. Application of multi-wave exploration technology to detect the natural microfracture in Marcellus shale-gas reservoirs. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 53(5): 587-594.
- Zhang C C, Wang Y M, Dong D Z, et al. 2016. Evaluation of the Wufeng-Longmaxi shale brittleness and prediction of "sweet spot layers" in the Sichuan Basin. Nature Gas Industry (in Chinese), 36(9): 51-60.
- Zhang L, Ba J, Carcione J M, et al. 2020. Differential poroelasticity model for wave dissipation in self-similar rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 128:104281.
- Zhang L, Ba J, Carcione J M. 2021. Wave propagation in infinitupleporosity media. Journal of Geophysical Research-solid earth. https://doi.org/10.1029/2020JB021266.
- Zhao W Z, Li J Z, Yang T, et al. 2016. Geological difference and its significance of marine shale gases in South China. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 43(4): 499-510.
- Zou C N, Yang Z, Zhang G S, et al. 2014. Conventional and unconventional petroleum "orderly accumulation": concept and practical significance. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 41(1): 14-27.
- Zou C N, Dong D Z, Wang Y M, et al. 2016. Shale gas in China: characteristics, challenges and prospects (II). *Petroleum Exploration* and Development (in Chinese), 43(2): 166-178.

附中文参考文献

- 巴晶,晏信飞,陈志勇等. 2013. 非均质天然气藏的岩石物理模型 及含气饱和度反演. 地球物理学报,56(5): 1696-1706, doi: 10.6038/cjg20130527.
- 陈胜,赵文智,欧阳永林等.2017.利用地球物理综合预测方法识 别页岩气储层甜点——以四川盆地长宁区块下志留统龙马溪组 为例.天然气工业,37(5):20-30.
- 邓继新, 王欢, 周浩等. 2015. 龙马溪组页岩微观结构、地震岩石物

理特征与建模. 地球物理学报, 58(6): 2123-2136, doi: 10. 6038/cjg20150626.

- 邓继新,唐郑元,李越等.2018. 成岩过程对五峰一龙马溪组页岩 地震岩石物理特征的影响.地球物理学报,61(2):659-672, doi:10.6038/cjg2018L0062.
- 董宁, 霍志周, 孙赞东等. 2014. 泥页岩岩石物理建模研究. 地球物 理学报, 57(6): 1990-1998, doi: 10.6038/cjg20140629.
- 李登华,李建忠,王社教等. 2009.页岩气藏形成条件分析.天然气 工业,29(5):22-26.
- 李宏兵,张佳佳,蔡生娟等. 2019. 复杂孔隙储层三维岩石物理模版. 地球物理学报,62(7):2711-2723, doi: 10.6038/cjg2019K0672.
- 李庆辉,陈勉,金衍等.2012.页岩气储层岩石力学特性及脆性评价.石油钻探技术,40(4):17-22.
- 庞孟强,巴晶,Carcione J M 等. 2020. 致密砂岩衰减岩石物理图板 分析:储层微裂隙预测.地球物理学报,63(11):4205-4219, doi: 10.6038/cjg2020N0178.
- 秦建中,申宝剑,付小东等.2010.中国南方海相优质烃源岩超显微有 机岩石学与生排烃潜力.石油与天然气地质,31(6):826-837.
- 王淑芳, 邹才能, 董大忠等. 2014.四川盆地富有机质页岩硅质生物成因及对页岩气开发的意义.北京大学学报(自然科学版), 50(3):476-486.
- 印林杰,印兴耀,宗兆云等. 2020. 基于微纳米孔隙理论的页岩气 储层岩石物理建模方法. 地球物理学报,63(4):1642-1653, doi:10.6038/cjg2020M0448.
- 袁书坤,陈开远, Hardage B A 等. 2014. 北美 Marcellus 页岩气藏 多波勘探天然微裂缝检测. 石油物探, 53(5): 587-594.
- 张晨晨,王玉满,董大忠等. 2016. 四川盆地五峰组一龙马溪组页 岩脆性评价与"甜点层"预测. 天然气工业, 36(9): 51-60.
- 赵文智,李建忠,杨涛等. 2016. 中国南方海相页岩气成藏差异性 比较与意义. 石油勘探与开发,43(4):499-510.
- 邹才能,杨智,张国生等. 2014. 常规一非常规油气"有序聚集"理 论认识及实践意义. 石油勘探与开发,41(1):14-27.
- 邹才能,董大忠,王玉满等. 2016. 中国页岩气特征、挑战及前景(二).石油勘探与开发,43(2):166-178.

(本文编辑 胡素芳)