海陆过渡相页岩层系总有机碳含量地震定量预测：以鄂尔多斯盆地大宁–吉县区块为例

吴勇[1*]，王旭旭[2]，周路[1]，李树新[3]，李永洲[3]，吴丰[1]

1. 西南石油大学地球科学与技术学院，成都 610500；
2. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院，西安 710018；
3. 中国石油煤层气有限责任公司，北京 100028

* 通信作者，E-mail：wycan_112@126.com

2025-01-09 收稿；2025-06-09 修回；2025-06-13 接受

基金项目：中国石油-西南石油大学创新联合体科技合作项目 (2020CX030103)

中图分类号：P631.8；P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)04-0354-14　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20250019

摘　要：海陆过渡相页岩气作为非常规油气的重要接替资源，明确其总有机碳(total organic carbon，简称 TOC)含量的空间分布对页岩气“甜点”的预测具有重要意义。由于海陆过渡相页岩 w(TOC)与岩石弹性参数无有效表征关系，导致海相页岩气评价中常用的基于敏感弹性参数预测 w(TOC)的方法难以适用。针对这一难题，在测井参数拟合法实现 w(TOC)测井评价的基础上，引入基于相控的波形指示模拟地震预测方法实现了海陆过渡相页岩地层 w(TOC)的空间预测。结果表明，海陆过渡相页岩具有单层厚度薄、有机质含量高、纵向分布不规律的特点；基于储层特征参数的井震高频模拟有效预测了海陆过渡相页岩 w(TOC)，反演结果纵、横向分辨率较高，与测井参数建模解释的 w(TOC)曲线吻合度高，符合率达 84.4%，能够反映页岩储层 w(TOC)空间变化规律。本研究有效解决了海陆过渡相页岩气“甜点”关键评价参数(w(TOC))无法利用岩石弹性参数定量预测的难题，为海陆过渡相页岩气勘探开发提供了技术支撑。

关键词：鄂尔多斯盆地；海陆过渡相；页岩气；总有机碳含量；波形指示模拟；地震定量预测

我国发育海相、海陆过渡相、陆相 3 类富有机质页岩，其中海相页岩气已在四川盆地奥陶系-志留系的五峰组-龙马溪组实现了商业性规模开发，已形成涪陵、威远、长宁、昭通等多个页岩气产区[1]。而海陆过渡相页岩作为页岩气资源的重要组成部分，具有累计厚度大、分布面积广、资源潜力大的特点。近年来，国内多家石油企业及单位围绕海陆过渡相页岩层系开展了大量钻探及试井工作，在鄂尔多斯盆地东南部延川地区、大宁-吉县地区、沁水盆地等地区，多口水平井、直井在二叠系山西组页岩段经压裂试气均获得工业气流，海陆过渡相页岩气的钻探及试气成果揭示了其丰富的资源潜力和良好的勘探开发前景[2-5]。

页岩气勘探开发实践证明，页岩总有机碳含量是评价页岩生烃能力的关键指标，也是页岩气“甜点”评价的重要参数之一。目前基于地震资料开展 w(TOC)预测的相关研究在海相页岩中应用较为广泛，前人对页岩 w(TOC)的空间预测逐渐形成了一套较为成熟的预测思路，即通过岩石物理分析建立 w(TOC)与弹性参数之间的关系，寻找预测 w(TOC)的敏感弹性参数，在此基础上，应用地震预测技术从地震数据中计算出与有机碳含量相关的弹性参数，

著录信息：吴勇，王旭旭，周路，等. 海陆过渡相页岩层系总有机碳含量地震定量预测：以鄂尔多斯盆地大宁–吉县区块为例 [J]. 地质科技通报，2025，44(4)：354-367.
WU Yong，WANG Xuxu，ZHOU Lu，et al. TOC content seismic quantitative prediction of marine-continental transitional shale stratum: Taking the Daning-Jixian Block in the Ordos Basin as an example[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2025，44(4)：354-367.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

进而实现 w(TOC)的空间预测[6-10]。前人研究表明密度参数对四川盆地及其周缘海相页岩 w(TOC)的预测具有一定的普适性，通过叠前反演获取密度反演数据体，根据计算模型进行转换从而定量预测 w(TOC)的空间展布[11-13]。对比四川盆地海相页岩地层，海陆过渡相页岩层系沉积环境多样、岩性组合复杂、页岩累计厚度大、横向非均质性强、矿物成分复杂、有机质及烃类含量变化大，多种因素共同造就了海陆过渡相页岩的特殊性及复杂性。目前有关海陆过渡相页岩 w(TOC)评价的研究以室内实验分析、测井解释等为主[14-18]，已有的少量研究较好地解释了海陆过渡相页岩有机质分布范围及纵向变化，但针对页岩 w(TOC)地震空间预测方面研究较为匮乏，同时应用于海相页岩的 w(TOC)地震预测思路和方法是否适用于海陆过渡相页岩地层还未曾开展相应的研究，困扰着页岩气“甜点”区的评价与优选。因此，笔者以鄂尔多斯盆地大宁-吉县区块山$_2^3$亚段为研究对象，利用最新的钻井、测井（伽马能谱测井）、三维地震以及测试分析资料，开展海陆过渡相页岩 w(TOC)地震预测研究，探讨适用于海陆过渡相页岩地层 w(TOC)预测方法，为解决海陆过渡相页岩气“甜点”区预测等难题提供技术支撑。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于我国中西部地区，整体呈南北走向，是我国形成时间最早、演化历史最长的一个沉积盆地，北起阴山山脉，南抵秦岭，东接吕梁山，西至贺兰山，总面积达 3.7×10^5 km^2[19]。大宁-吉县区块位于鄂尔多斯盆地东南部，属于过渡性盆缘构造，构造位置位于晋西挠褶带南部与伊陕斜坡东南缘，整体呈现出由东向西倾斜的单斜构造，构造形态呈现“一隆一凹两斜坡”的特征[20]。目前，海陆过渡相页岩气试气井均位于西部斜坡带，本次选取大宁-吉县区块西部斜坡带的三维地震区作为重点研究区，面积约 250 km^2，研究区内构造条件相对稳定，地层平缓，断层不发育（图 1a，b）。

研究区内自下而上发育上石炭统本溪组、下二叠统太原组、下二叠统山西组，沉积期间海水频繁变化，发生多次海侵-海退，形成了多期海陆过渡相沉积旋回。在太原组沉积期末发生大规模基准面（相对海平面）下降，海水在较短地质时间内向盆地东南部退去[21]，沉积环境逐渐从海相向陆相转变。山西组沉积时期，大宁-吉县地区作为南北物源过渡地带，以三角洲前缘-滨海沉积环境为主，为典型的海陆过渡相沉积环境[3-4]。大量钻探资料表明，鄂尔多斯盆地东缘山西组山$_1$段、山$_2$段均有页岩沉积，其中山$_2$段页岩厚度为 21.4 ~ 92.3 m（平均 41.2 m），页岩累计厚度大、夹层少而薄，根据岩性组合特征山$_2$段自上而下可细分为山$_2^1$、山$_2^2$、山$_2^3$亚段（图 1c）。目前研究区在勘探开发过程中，发现山$_2^3$亚段海陆过渡相暗色页岩累计厚度大、w(TOC)高（测井解释 w(TOC)为 1.4% ~ 8.88%，平均 4.91%）、气测显示好，是研究区海陆过渡相页岩气勘探的重点目标层段。

2 总有机碳含量分布及测井解释

2.1 数据来源及研究方法

本研究通过野外露头及岩心观察，开展了岩性组合、沉积构造观察记录，并结合研究区取心井（A1 井、邻区 A34 井）选取山$_2^3$亚段共计 266 块页岩样品开展了 TOC 含量测试分析，为明确海陆过渡相页岩有机质丰度特征提供数据支撑。其中，TOC 含量测试采用 Leco 碳硫测定仪测定，由中国石油勘探开发研究院非常规油气重点实验室完成。在此基础上，综合研究区 20 余口井测井（声波时差、密度、自然伽马、伽马能谱测井等）、录井等资料，基于测井资料连续性强、分辨率高的特征，通过利用岩心 TOC 标定测井曲线，采用$\Delta\log R$法以及测井参数拟合法对研究区山$_2^3$亚段海陆过渡相页岩 TOC 进行解释与评价。

2.2 总有机碳含量分布特征

通过南方海相页岩气勘探实践证明，总有机碳含量在一定程度上决定着页岩的生烃能力，也是页岩气富集的重要影响因素[13]。前人研究证明，海陆过渡相页岩有机质具备陆源生烃母质和海相生烃母质双源输入的特征，干酪根类型为Ⅱ$_2$型，腐泥组组分体积分数 50% ~ 60%，含量远小于海相页岩，镜质组和惰质组含量高，对 TOC 含量具有较高的贡献，在相似的热演化条件下，海陆过渡相页岩的生烃能力差于海相页岩（图 2a），但研究区富有机质页岩镜质体反射率（R_o）介于 2.63% ~ 2.68%（平均 2.66%），仍处于过成熟阶段，具备页岩气大量生成的条件[22-23]。因此，w(TOC)同样也是海陆过渡相页岩气“甜点”预测的关键参数。

由于海陆过渡相页岩地层沉积环境多变，导致暗色页岩、碳质页岩和煤层等频繁互层，富有机质页岩分布不连续，且单层厚度较小，具有较强的非均质性。通过统计 266 块页岩样品 TOC 实验测试数据：研究区山西组页岩 w(TOC)分布范围较广，w(TOC)介于 0.14% ~ 36.6% 之间（平均值 3.52%），w(TOC)

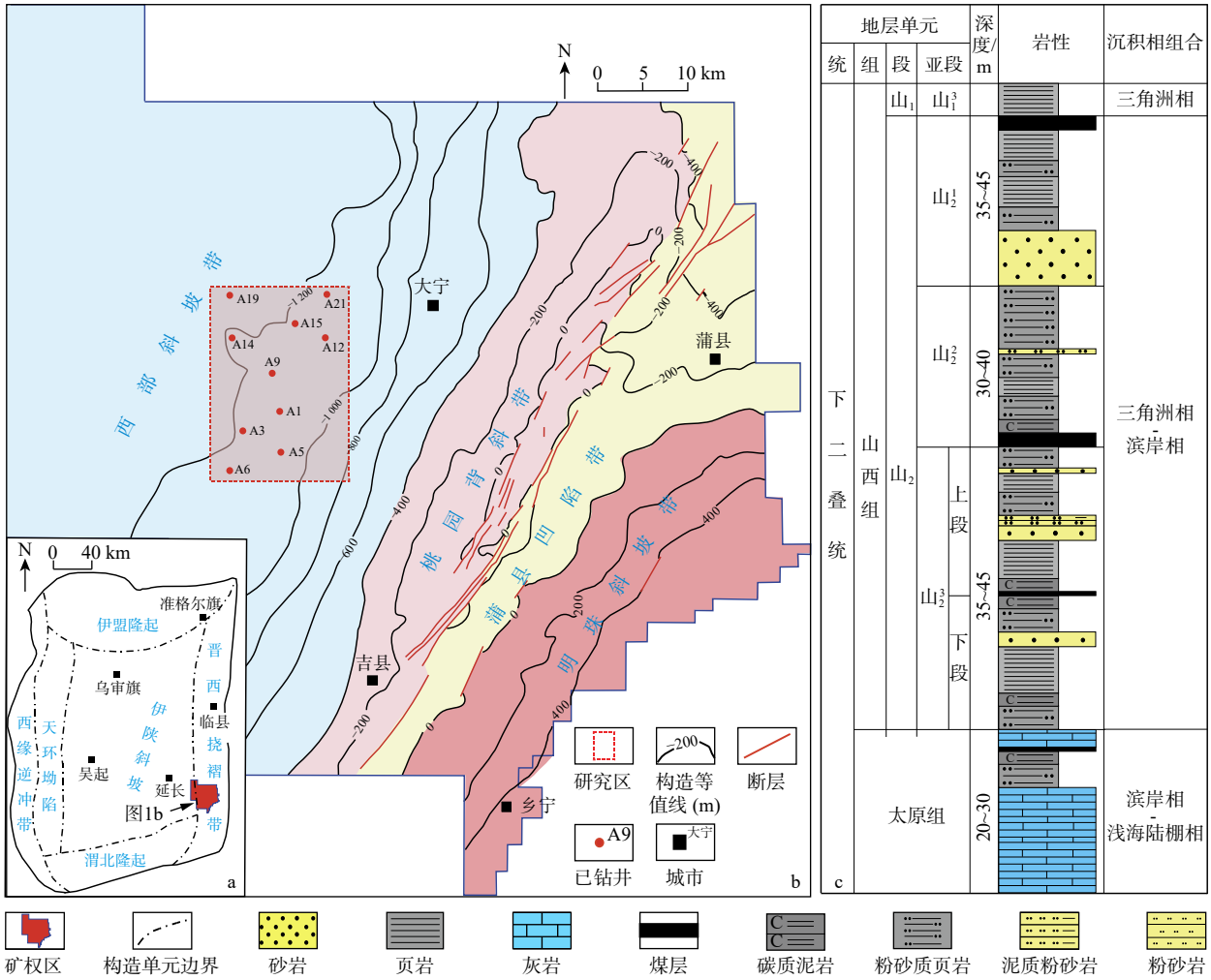


图 1　研究区位置 (a，b) 及地层柱状示意图 (c)（据文献 [20] 修改）

Fig. 1　Location of the study area (a, b) and schematic diagram of stratigraphic columns (c)

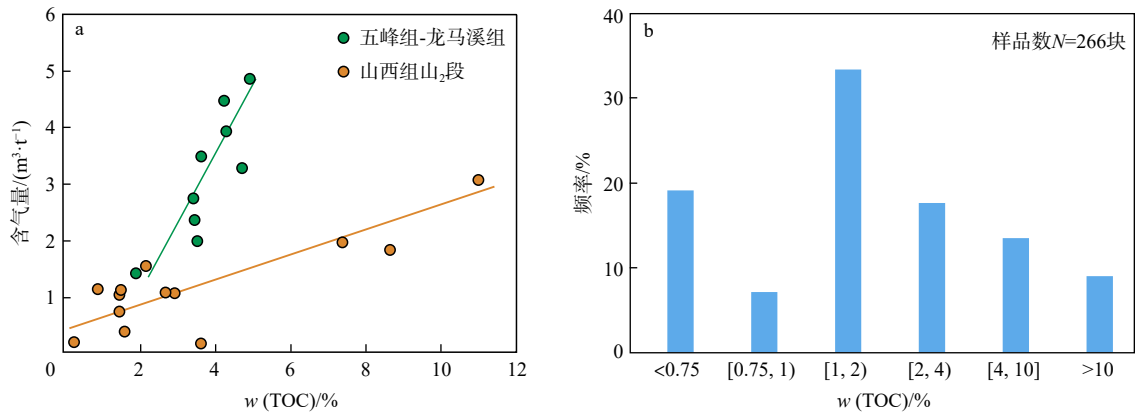


图 2　海相与海陆过渡相页岩含气量与 w（TOC）相关性（a）和研究区山$_2^3$ 亚段页岩样品 w（TOC）分布直方图（b）

Fig. 2　Correlation between gas content and TOC content in marine shales and transitional shales (a), histogram of TOC content distribution in transitional shale samples of Shan$_2^3$ sub-member within the study area (b)

分布在<0.75%、[0.75%, 1%)、[1%, 2%)、[2%, 4%)、[4%, 10%]、>10% 的占比分别为 19.17%, 7.14%, 33.46%, 17.67%, 13.53%, 9.03%, 其中 w(TOC)≥1% 的占比为 73.69%, w(TOC)≥2% 占比为 40.23%, w(TOC)≥4% 占比为 22.56%(图 2b), 表明研究区山$_2^3$ 亚段暗色页岩具有较高的有机质丰度。

2.3　总有机碳含量测井解释

页岩 w(TOC)的测井定量评价是对实验测试分

析方法的有效补充，一方面能够利用测井资料的连续性获取高密度的 w(TOC)数据，明确 w(TOC)的纵向变化特征，另一方面为基于地震资料开展 w(TOC)预测提供数据支撑。目前，海相页岩中总有机碳含量测井评价方法主要包括Δlog$R$ 法以及测井参数拟合法。

2.3.1　Δlog$R$ 法

1979 年埃克森(Exxon)与埃索(Esso)公司通过实验提出了一种利用测井资料计算有机质含量的方法——Δlog$R$ 法，目前，该方法在国内外各类烃源岩 TOC 测井定量评价中应用最为广泛的一种，其利用常见测井曲线有效识别富有机质岩石，并对 w(TOC)进行准确估算[24-26]。该方法是利用常规测井曲线识别并剔除油层、蒸发岩、井壁垮塌段等干扰井段后，对孔隙度曲线(通常为声波时差)进行适当的刻度叠合于电阻率曲线之上，使得在贫有机质的普通泥岩(非烃源岩)层段 2 条曲线趋势一致并重合在一起，而在富有机质的层段，2 条曲线之间存在一定的幅度差异，此幅度差在对数电阻率坐标上的读数就是Δlog$R$，其中Δlog$R$ 值越大，表明烃源岩或页岩气储层有机质含量越高。

PASSEY 等[27] 在 1990 年经过大量数据统计分析后，制作了计算总有机碳含量的图版，并总结出了一个计算 w(TOC)的经验公式：

$$\Delta\log R = \lg(R/R_{基线}) + 0.02\times(\Delta t - \Delta t_{基线}), \quad (1)$$

$$w(\mathrm{TOC}) = (\Delta\log R)\times 10^{(a-b\times R_o)}, \quad (2)$$

式中：Δlog$R$ 为声波时差(AC)与电阻率(RT)曲线在一定规则下重叠后的幅度差；R 为测井电阻率值，Ω·m；$R_{基线}$为基线对应的测井电阻率值，Ω·m；Δt 为测井声波时差值，μs/m；$\Delta t_{基线}$为基线对应的测井声波时差值，μs/m；w(TOC)为总有机碳质量分数，%；a，b 为地区经验值，常数，一般 a=2.297，b=0.168 8；R_o 为镜质体反射率，%。

该方法适用于未成熟-中等成熟烃源岩的 TOC 定量评价，对于过成熟烃源岩，页岩有机质热演化程度高，随着成熟度的增加，有机质大量转化为油气，改变了孔隙结构及流体性质，导致电阻率和声波时差等测井响应的变化规律不再遵循Δlog$R$ 法原本基于较低成熟度页岩建立的关系，同时成熟度过高可能会出现有机质碳化现象，对地层电阻率同样具有较大影响，从而导致Δlog$R$ 法的预测精度大幅下降[24, 28-31]。

通过利用岩心 TOC 标定测井曲线，将该方法应用于海陆过渡相页岩地层中，可以看出井下富含有机质页岩段，有机碳含量较高，声波时差和电阻率曲线均有响应，同时在煤层段、局部富有机质页岩段具有较为明显的Δlog$R$ 异常(图 3)，但无法完全准确识别富有机质页岩段，例如图 3 中 2 294 ~ 2 298 m 优质页岩段，Δlog$R$ 异常仅识别出局部一段，下段电阻率异常明显，无法有效反映出高 w(TOC)的特征，2 275 ~ 2 278 m 优质页岩段具有同样的异常特征。造成这一现象是由于Δlog$R$ 法主要基于岩石组分和质地均一的假设，无法有效推广频繁互层的砂泥岩地层中[32]，同时由于海陆过渡相沉积环境变化频繁，多岩性纵向上频繁叠置，矿物组分及含量变化迅速，地层非均质性强，并且研究区页岩镜质体反射率(R_o)介于 2.63% ~ 2.68%，处于过成熟阶段[22]，上述原因均对该方法的应用具有较为显著的影响，因此，该方法无法准确表征 TOC 含量及其变化趋势。

2.3.2　测井参数拟合法

在上述方法无法准确计算海陆过渡相 TOC 含量的前提下，利用岩心测试所得 TOC 样本值标定测井曲线，分析岩心 w(TOC)与不同测井曲线(声波时差、补偿中子、密度、自然伽马、电阻率等)之间的相关性(图 4a ~ h)，优选 TOC 预测的敏感参数曲线，并使用岩心样品实验分析的有机质含量进行标定，计算页岩层系的连续有机质含量，进而实现 TOC 含量的测井评价。

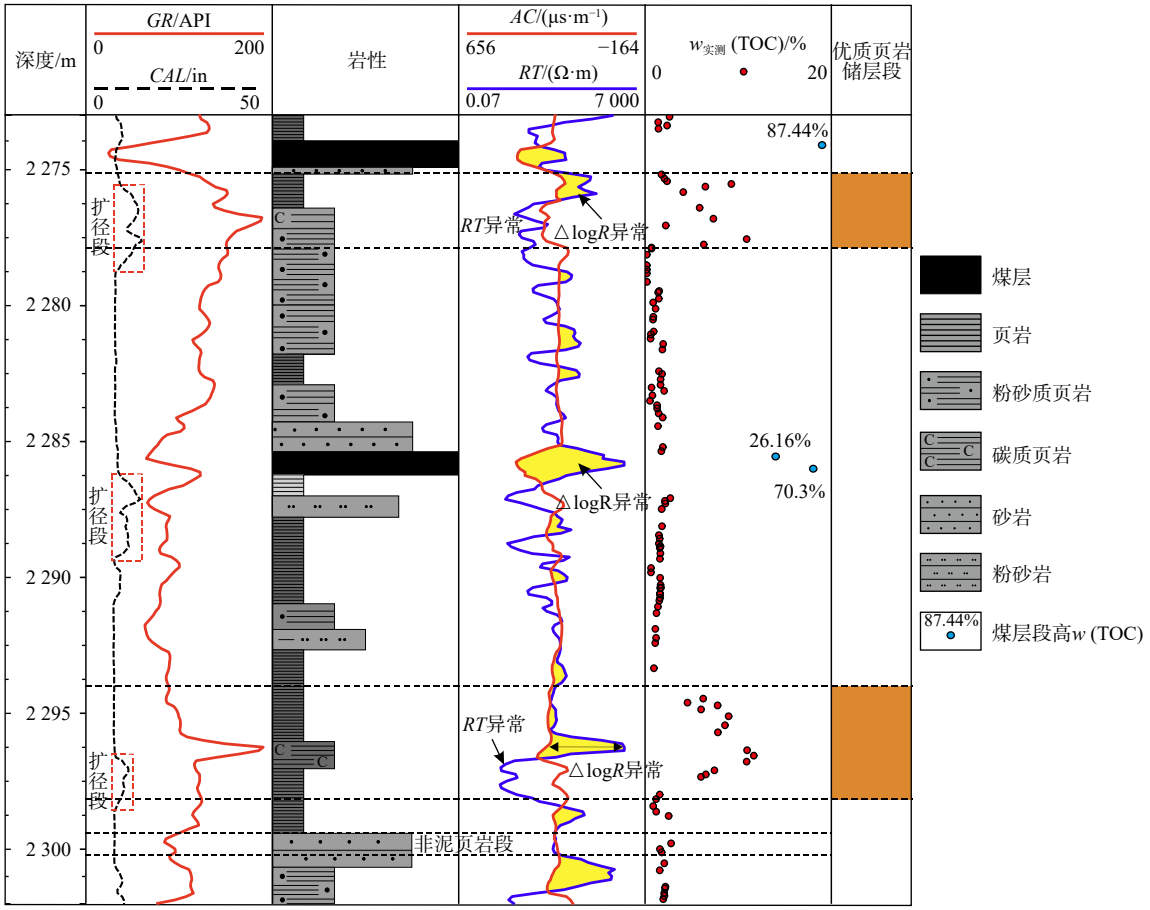
通过岩心实测 w(TOC)与测井曲线交会分析，岩心 w(TOC)与铀曲线具有良好的正相关性(图 4a)，其原因主要是当富含有机质的页岩达到一定成熟度时就会开始生烃，在此过程中也伴随着腐殖酸和有机酸的生成，这些腐殖酸能够与铀离子发生一系列反应使铀元素沉淀和富集，并且在有机质生烃过程中会形成大量的微孔隙，这些微孔隙能够对铀元素产生吸附作用[28, 33]。前人研究表明海陆过渡相富含有机质的页岩主要形成于弱水动力、还原环境中[14, 16]，而铀含量与氧化还原条件有关，在还原环境中有机质含量高，铀含量高。同时，山$_2^3$ 亚段高 w(TOC)段伽马能谱测井响应中的铀(U)含量明显异常于周边泥页岩(图 5)。

通过上述分析，利用岩心 $w_{非煤层段}$(TOC)与伽马能谱测井中铀曲线的关系图拟合建立了适用于研究区海陆过渡相页岩 $w_{非煤层段}$(TOC)的计算公式：

$$w_{非煤层段}(\mathrm{TOC}) = 1.415w(\mathrm{U}) - 3.506\,8, \quad (3)$$

式中：$w_{非煤层段}$(TOC)为非煤层段有机碳质量分数计算结果，%；w(U)为自然伽马能谱测井铀测井值，10^{-6}。

研究区山西组山$_2^3$ 亚段海陆过渡相页岩层系纵向上页岩与薄煤层、砂岩等多岩性互层，其中煤层具有高 w(TOC)特征，其含量与页岩 TOC 含量不在一



GR. 自然伽马; *CAL*. 井径; *AC*. 声波时差; *RT*. 电阻率; $w_{实测}$(TOC). 总有机碳质量分数实测值; 1 in=0.025 4 m; 下同

图 3　基于Δlog*R* 方法识别页岩有机质含量示意图

Fig. 3　Schematic diagram for identifying shale organic matter content based on the Δlog*R* method

个数量级之上(图 3)。因此, 公式(3)不适用于煤层 *w*(TOC)的计算, 而煤层 *w*(TOC)与声波时差(*AC*)具有良好的线性关系(图 4i), 从而建立了适用于研究区煤层段 *w*(TOC)的计算公式:

$$w_{煤层段}(\mathrm{TOC}) = 0.492\,7AC - 115.89, \qquad (4)$$

式中: $w_{煤层段}$(TOC)为煤层段有机碳质量分数计算结果, %; *AC* 为声波时差测井值, μs/m。

应用公式(3)、(4)分别对研究区非煤层段、煤层段 TOC 含量进行计算, 其结果如图 5 所示, 从计算得到的 TOC 曲线来看, $w_{预测}$(TOC)与 $w_{岩心}$(TOC)吻合度较高, 且纵向变化特征与 $w_{岩心}$(TOC)在趋势上具有良好的一致性。从单井计算结果来看, 研究区 $山_2^3$ 亚段海陆过渡相页岩 *w*(TOC)介于 0.065%～38.66%, 平均 4.21%, 垂向上变化较快, 与深度之间不具有规律性, 该现象不同于南方五峰组-龙马溪组海相页岩 TOC 含量整体向上逐渐降低的规律[34-35]。同时, 不同井区富有机质页岩段分布位置不一样, 例如 A1 井富有机质页岩主要分布在 $山_2^3$ 亚段的下段, 岩性以暗色页岩为主, 而邻区 A34 井富有机质页岩主要分布在 $山_2^3$ 亚段的中段, 岩性以碳质页岩和暗色页岩为主(图 5)。

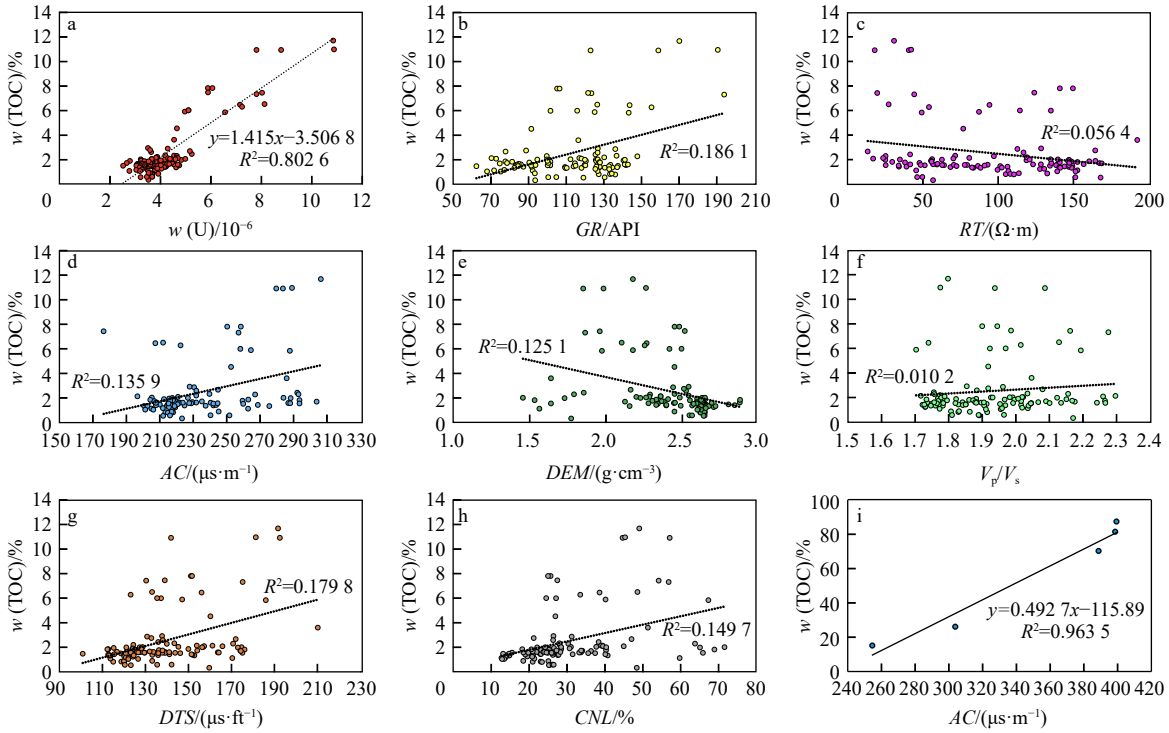
3　敏感参数分析及预测方法优选

3.1　敏感参数分析

为了明确与海陆过渡相页岩 *w*(TOC)具有良好相关性的敏感弹性参数, 对实测岩心 *w*(TOC)与弹性参数进行了交会分析(图 6), 结果表明, 研究区海陆过渡相页岩 *w*(TOC)与纵波速度、横波速度、密度、纵横波速度比、泊松比、杨氏模量等弹性参数之间无明确的函数表征关系, 无法通过地震预测技术开展相关的弹性参数预测进行页岩 *w*(TOC)的空间预测。

3.2　地震预测方法优选

基于海陆过渡相页岩 *w*(TOC)无法利用弹性参数进行表征, 通过对目前常用的反演预测方法进行了调研与对比(表 1), 其中稀疏脉冲反演方法、基于模型的叠后反演方法分辨率较低, 不适用于薄层及储层横向变化快的地层条件[36-37]; 非线性反演结果解



a ~ h. 非煤层段；i. 煤层段。*DEM*. 密度；V_p/V_s. 纵、横波速度比；V_p. 纵波速度；V_s. 横波速度；*DTS*. 横波时差；*CNL*. 补偿中子；下同

图 4　研究区海陆过渡相页岩层系岩心 TOC 与测井参数相关分析图

Fig. 4　Correlation analysis of core TOC and logging parameters in transitional shale strata of the study area

的非唯一性问题严重，同时缺乏地球物理理论及地质规律的支撑[38]；地质统计学反演方法虽具有较多优点，但其反演结果受初始模型的约束和控制，多解性问题较严重，横向分辨率低，在井数较少时，反演结果随机性强，与地质规律差异较大[39-40]。而波形指示反演/波形指示模拟方法具有分辨率高、反演精度高的优点，同时具有相控思想，不受井数量和井位分布的影响，反演结果符合地质规律，更加适用于薄层预测，不仅可实现高分辨率波阻抗反演，同时可实现自然伽马、孔隙度等非阻抗储层参数的相控高分辨率模拟，但在反演过程中井资料一致性处理，井-震标定以及层位解释精度均对反演结果有所影响[41]。

结合研究区海陆过渡相页岩气“甜点”单层厚度薄，横向变化快的特点，因此，本研究引入了基于波形相控的波形指示模拟方法，通过开展储层参数特征曲线波形指示模拟，实现研究区海陆过渡相页岩 TOC 含量的预测。

4　总有机碳含量地震预测

4.1　总有机碳含量地震预测流程

4.1.1　方法原理

基于地震岩石物理分析结果，结合常用地震预测方法优选，引入了基于相控的波形指示模拟地震预测方法，该方法是在地质统计学思想的基础上发展起来的一种高精度反演方法，其核心在于运用地震波形在薄层中的调谐特征，以此作为判别和优化反射系数结构的主要控制条件，利用地震波形的横向变化特征代替传统的变差函数，进而描述储层的空间差异变化[42-43]。同时结合了地震波形分类及地震沉积学的基本原理，通过地震波形相控的理念，以地震波形的相似性为主要依据，驱动井间高频测井曲线模拟，实现高分辨率薄层反演[44-46]。

波形指示模拟具体流程如图 7a 所示，其中优选样本井最为关键，选取依据主要是地震波形的相似性，通过选取与待预测地震波形相关性高的样本井作为有效样本建立初始模型，将有效样本井的特征参数概率分布作为先验信息，将初始模型与地震资料通过匹配滤波得到似然函数。基于贝叶斯理论，根据先验概率和似然函数得到后验概率分布，通过初始模型参数扰动实现最优解，完成“波形相控”思想下的相控反演结果[41]。

4.1.2　有效样本

有效样本数是实现地震相控的关键参数，用于估算待预测点反演结果，如图 7b 所示，对于待预测点而言，根据地震波形的相似性，将波形相似的井点

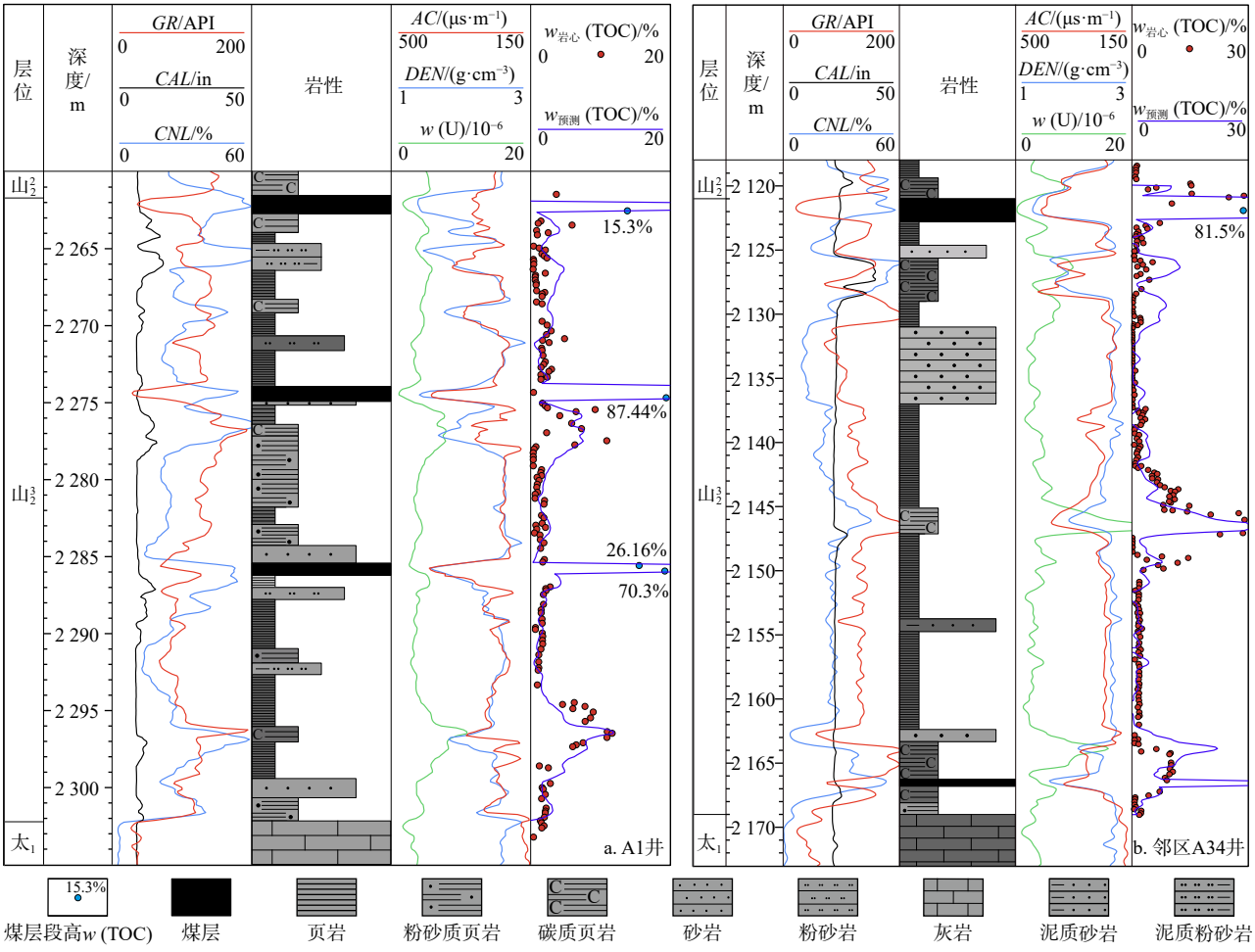


图 5　研究区 (a) 及邻区 (b) 山$_2^3$ 亚段 TOC 测井计算结果

Fig. 5　Results of TOC logging calculation in the study area (a) and adjacent regions (b) of the Shan$_2^3$ sub-member

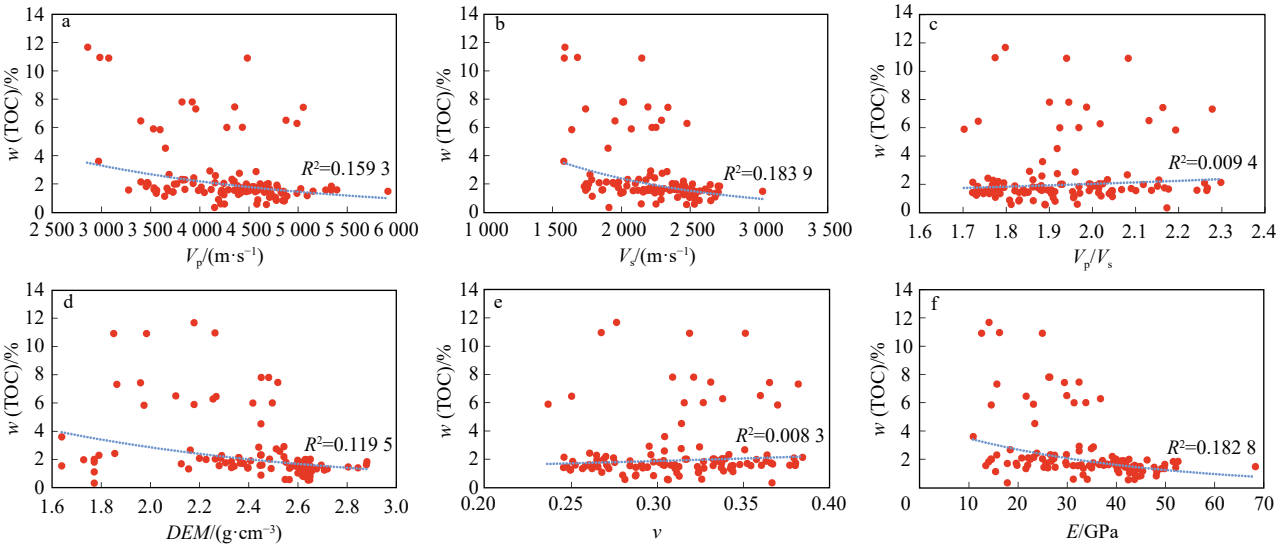


图 6　研究区山$_2^3$ 亚段 w（TOC）与弹性参数交会图（v. 泊松比；E. 杨氏模量）

Fig. 6　Cross-plot of TOC content versus elastic parameters for the Shan$_2^3$ sub-member

（蓝色井点）上的曲线定义为有效样本，将参与估算，而其他红色井点为非有效样本，不参与估算。当有效样本数越小，算法在筛选相似地震波形时门槛越高，其描述的储层空间变化也越大，反演结果的空间非均质性越强。反之，有效样本数越大，筛选相似地震波形时门槛越低，储层的空间变化越小，反演结果

表 1　常用地震反演方法的优缺点对比[36-41]

Table 1　Comparison of the advantages and disadvantages of common seismic inversion methods

反演方法	优势	局限性
稀疏脉冲反演	可得到绝对波阻抗；反演快速高效	①分辨率受限于地震资料分辨率，分辨率低； ②标定结果和子波等因素影响较大，多解性强； ③不适用于薄层预测。
基于模型的叠后反演	纵向分辨率较高，与测井信息吻合度较高	受模型控制，横向分辨率低，不适用于储层横向变化快的地质条件。
非线性反演（神经网络、支持向量机…）	反演结果精度往往较高，时效性好	①解的非唯一性问题更加严重； ②缺乏地球物理理论及地质规律的支撑； ③非线性反演算法自身仍存在一定的缺陷，且计算效率普遍较低。
地质统计学反演	①整合高分辨率的测井信息和低分辨率的三维地震数据； ②增加了确定性地震反演垂向的细节信息； ③得到符合地质特征的油藏属性模型； ④产生具有细节信息的岩石物理模型准备进行后续的油藏模拟。	①反演结果受初始模型约束和控制，多解性强； ②高频成分来自于随机模拟，横向分辨率低，且没有相控思想； ③井数少时，随机性强，与地质规律差异较大。
波形指示反演/波形指示模拟	①反演结果具有较高的分辨率和反演精度； ②地震波形驱动测井曲线实现高分辨率反演，具有相控思想，不受井数量和井位分布影响，反演结果符合地质规律； ③不仅可实现高分辨率波阻抗反演，同时可实现自然伽马、孔隙度等非阻抗储层参数的相控高分辨率模拟。	①受井资料处理结果的影响； ②易受井–震标定结果的影响； ③反演精度与层位解释精度密切相关。

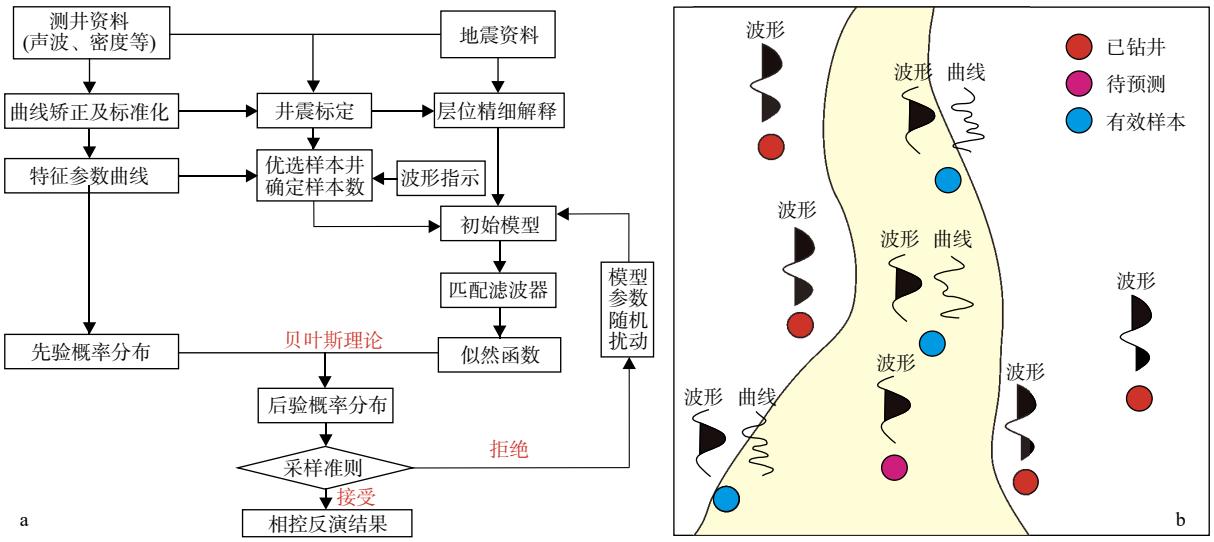


图 7　地震波形指示模拟流程图（a）和有效样本分析示意图（b）

Fig. 7　Schematic workflow of waveform indication simulation (a) and analysis of effective samples (b)

的空间连续性更强[47]。

对于研究区山$_2^3$亚段海陆过渡相页岩层系，有效样本数的选择取决于沉积的稳定性、地震资料的品质以及参与反演的井数，需要通过多次实验拟合确定有效样本数，根据研究区沉积特征及最佳样本拟合实验结果，有效样本数取 6 为最佳。

4.1.3　最佳截止频率

确定有效样本数之后，需开展最佳截止频率参数优选，受有效样本数的控制，随着最佳截止频率的增加，反演结果分辨率逐渐增大，同时反演剖面的随机性也逐渐增强。图 8 为研究区波形指示模拟最佳截止频率质控图，相关指数曲线在频率 200 Hz 后趋于水平，大于 240 Hz 之后基本水平，进入水平之前的

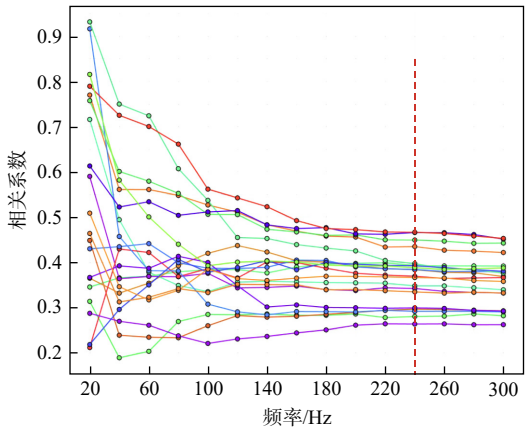


图 8　研究区波形指示模拟最佳截止频率质控图

Fig. 8　Quality control chart of the optimal cut-off frequency for waveform indication simulation in the study area

频率就是最佳有效频率，研究区最佳截止频率初始值为 200 ~ 240 Hz。

前人利用波形指示模拟方法针对储层参数预测也开展了相应的研究工作，张双杰等[48] 针对吉木萨尔芦草沟组页岩油“甜点”预测时，利用孔隙度参数曲线开展波形指示模拟，有效刻画了页岩油“甜点”储层的分布特征，并有效提高了纵横向分辨率；毛永强等[49] 利用计算 TOC 曲线开展波形指示模拟，有效预测了松南地区陆相泥页岩 TOC 含量的空间变化，经钻井资料进一步证实波形指示模拟技术预测页岩 TOC 参数空间分布的可行性；顾雯等[50] 利用波形指示模拟方法，基于特征参数的井震高频模拟，精确模拟了 TOC“甜点”参数。上述应用实例均表明波形指示模拟方法针对页岩储层“甜点”参数预测具有良好的应用效果，因此本研究针对岩石物理弹性参数无法有效表征海陆过渡相页岩气“甜点”参数的问题，拟采用地震波形指示模拟方法开展储层参数预测研究。

4.2　总有机碳含量地震预测

为了降低以铀曲线作为中间参数进行地震预测在后续转换过程中造成的误差，本研究在获取连续 TOC 含量曲线的基础上，利用波形指示模拟方法直接对 TOC 参数曲线进行地震预测。波形指示模拟预测结果与测井解释 TOC 曲线具有良好的一致性，纵向上，同一口井钻遇不同页岩段，其 TOC 含量差异明显，整体表现出明显的分层性，横向连续性较差，也映证了海陆过渡相页岩纵横向变化快的特征（图 9）。

为了验证预测结果的可靠性，选取 A5、A11 井对反演预测结果进行验证，对比结果表明反演预测结果与模型计算的 TOC 曲线吻合度高，在 A5 井底部测井解释 w(TOC)为 3% ~ 8%，预测结果 w(TOC)为 4% ~ 7%，并且该井中部 w(TOC)相对高值段也有异常显示（测井解释 w(TOC)为 3% ~ 4.5%，地震预测 w(TOC)为 3% ~ 4%）（图 10a）；在 A11 井处计算 w(TOC)与预测 w(TOC)具有一定的对应性，高 w(TOC)层数吻合度高，但底部分辨率相对较低（图 10b），整体上 2 口验证井 TOC 反演吻合度较高。在此基础上，通过对总有机碳含量地震预测结果与测井解释结果进行对比，整体符合率为 84.4%，该结果能有效反映山$_2^3$ 亚段 w(TOC)的空间变化情况，可为后期页岩气“甜点”评价提供可靠的地震预测成果。

根据 w(TOC)预测数据体，分别提取山$_2^3$ 亚段上段、下段页岩层段 w(TOC)平面分布图（图 11），山$_2^3$ 亚段上段 w(TOC)分布范围为 1% ~ 6%，高值区主要分布在 A19−A14−A8−A1−A4 井一线，北部及西南部 w(TOC)高值零星分布（图 11a）；山$_2^3$ 亚段下段 w(TOC)分布范围为 3% ~ 7%，高值区主要分布于中部区域（图 11b）。山$_2^3$ 亚段下段页岩沉积及有机质富集受地貌控制明显，研究区中部低地貌洼地发育低能-还原的泻湖/海湾沉积环境，是富有机质页岩沉积有利相带[16]，在有利相带内 w(TOC)呈高值特征；山$_2^3$ 上段整体趋于高能-好氧沉积环境，不利于有机质富集与保存，沉积微相的差异变化造成局部 w(TOC)高值异常，w(TOC)整体呈现出下段优于上段的特征。

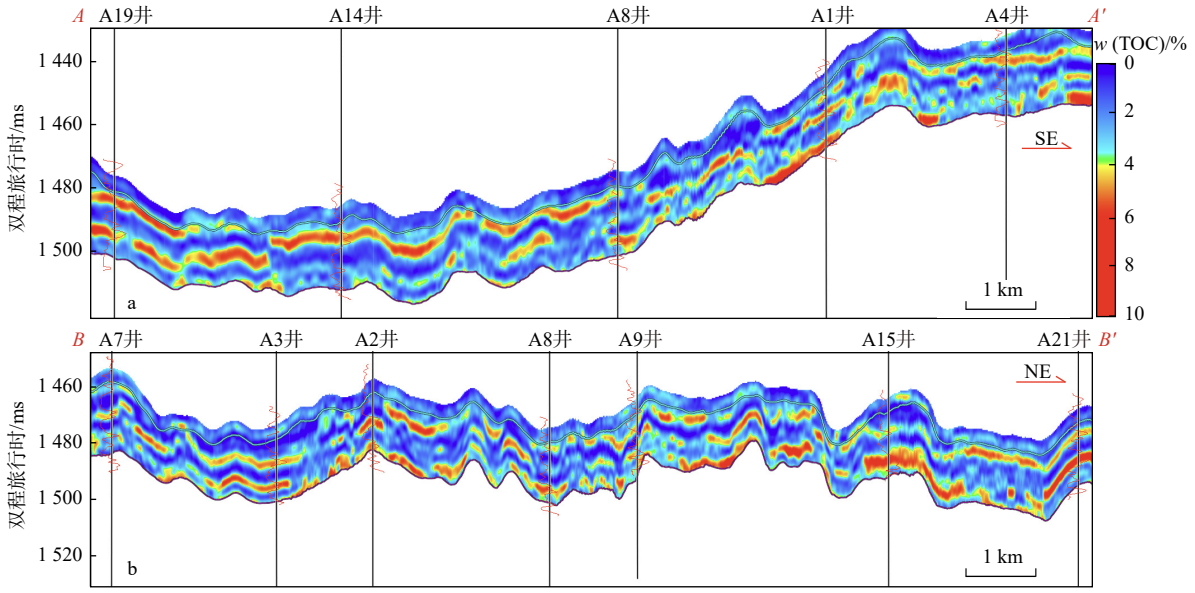


图 9　研究区山$_2^3$ 亚段 TOC 预测剖面图（井旁红色曲线为测井解释的 w（TOC）曲线；剖面位置见图 11）

Fig. 9　TOC prediction profile of Shan$_2^3$ sub-member in the study area

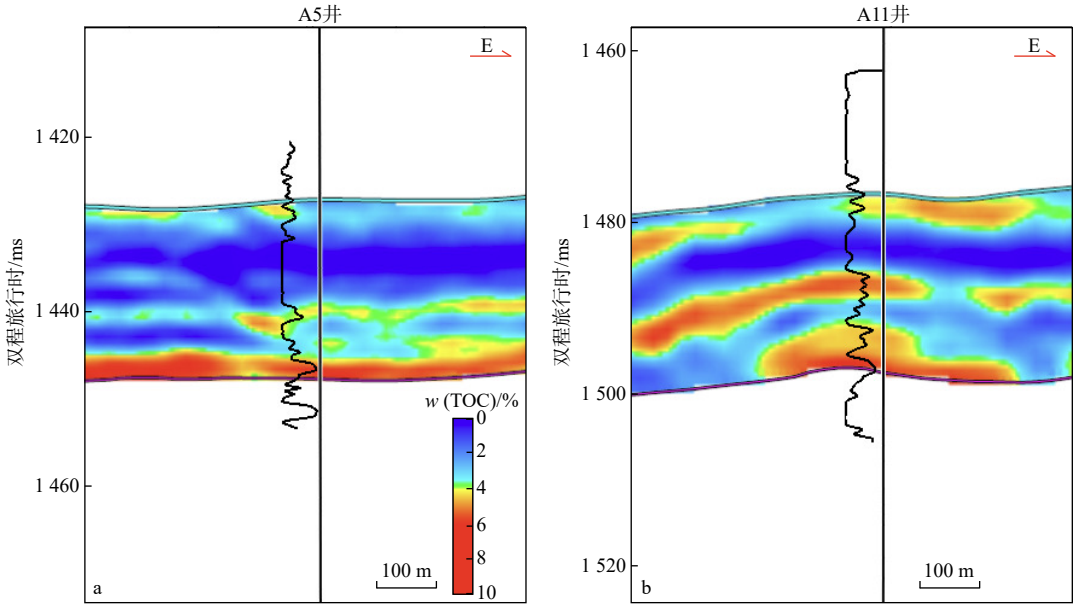


图 10　验证井 A5、A11 井 TOC 预测剖面（井旁黑色曲线为测井解释的 w（TOC）曲线）

Fig. 10　TOC prediction profiles for the verification wells A5 and A11

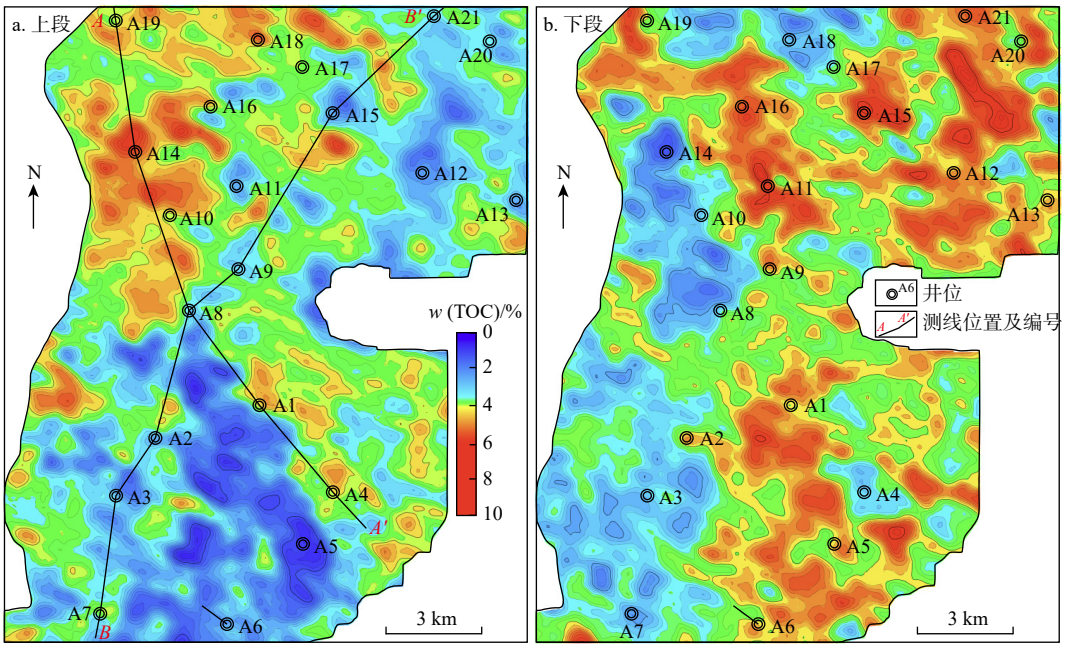


图 11　研究区山$_2^3$ 亚段 w（TOC）预测平面分布图

Fig. 11　Planar distribution map of predicted TOC for the Shan$_2^3$ sub-member in the study area

5　结　论

（1）海陆过渡相页岩地层多岩性频繁互层，富有机质页岩单层厚度小、有机质含量高、纵向随机分布。海相页岩 w(TOC)测井评价的$\Delta\log R$ 法在沉积环境变化频繁的海陆过渡相页岩地层适用性差，针对发育煤层的海陆过渡相页岩地层，采用测井多参数拟合法建立的 w(TOC)计算模型有效刻画了海陆过渡相页岩层系 w(TOC)展布特征。在参数建模过程中，需对煤层段、非煤层段加以区分，分别进行 w(TOC)计算模型的构建。

（2）海陆过渡相页岩总有机碳含量与岩石物理弹性参数之间不存在有效表征关系，无法通过预测相关弹性参数进行 w(TOC)间接预测。引入基于相控的波形指示模拟地震预测方法，利用地震波形和总有机碳含量参数曲线开展井-震高频模拟，实现了海陆过渡相页岩 w(TOC)的空间预测。实际应用表明，该方法同时提高了纵、横向反演分辨率，反演结

果可靠，预测符合率高，为海陆过渡相页岩气“甜点”关键参数定量评价提供了有效支撑。

（3）应用波形指示模拟方法过程中，有效样本数、最佳截止频率是影响反演结果（分辨率、剖面连续性）的重要计算参数，须结合研究区沉积特征、地震资料的品质以及参与反演的井数等实际地质情况反复实验论证。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 邹才能，赵群，董大忠，等. 页岩气基本特征、主要挑战与未来前景 [J]. 天然气地球科学，2017，28(12)：1781-1796.
ZOU C N, ZHAO Q, DONG D Z, et al. Geological characteristics, main challenges and future prospect of shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(12): 1781-1796. (in Chinese with English abstract)

[2] 郭旭升，胡东风，刘若冰，等. 四川盆地二叠系海陆过渡相页岩气地质条件及勘探潜力 [J]. 天然气工业，2018，38(10)：11-18.
GUO X S, HU D F, LIU R B, et al. Geological conditions and exploration potential of Permian marine-continent transitional facies shale gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(10): 11-18. (in Chinese with English abstract)

[3] KUANG L C, DONG D Z, HE W Y, et al. Geological characteristics and development potential of transitional shale gas in the east margin of the Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3): 471-482.

[4] 董大忠，邱振，张磊夫，等. 海陆过渡相页岩气层系沉积研究进展与页岩气新发现 [J]. 沉积学报，2021，39(1)：29-45.
DONG D Z, QIU Z, ZHANG L F, et al. Progress on sedimentology of transitional facies shales and new discoveries of shale gas[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 29-45. (in Chinese with English abstract)

[5] 邹才能，赵群，丛连铸，等. 中国页岩气开发进展、潜力及前景 [J]. 天然气工业，2021，41(1)：1-14.
ZOU C N, ZHAO Q, CONG L Z, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14. (in Chinese with English abstract)

[6] 陈勇. 川东南焦石坝及丁山地区五峰-龙马溪组页岩气储层特征及“甜点”预测技术研究 [D]. 成都：成都理工大学，2016.
CHEN Y. Research on reservoir characteristics and "sweet spot" prediction technology of shale gas of Wufeng-Longmaxi Formation in Jiaoshiba and Dingshan area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)

[7] 侯华星，欧阳永林，曾庆才，等. 川南地区龙马溪组页岩气“甜点区”地震预测技术 [J]. 煤炭科学技术，2017，45(5)：154-163.
HOU H X, OUYANG Y L, ZENG Q C, et al. Seismic prediction technology of shale gas "sweet spots" in Longmaxi Formation of South Sichuan area[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 154-163. (in Chinese with English abstract)

[8] 李金磊. 海相页岩气甜点地震预测及评价技术研究 [D]. 成都：西南石油大学，2019.
LI J L. Study on seismic prediction and evaluation technology of marine shale gas sweet-spot[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019. (in Chinese with English abstract)

[9] 邓宇，曾庆才，陈胜，等. 四川盆地威远地区五峰组-龙马溪组页岩TOC含量地震定量预测方法及应用 [J]. 天然气地球科学，2019，30(3)：414-422.
DENG Y, ZENG Q C, CHEN S, et al. Seismic quantitative prediction method and application of TOC content in Wufeng-Longmaxi Formation shale reservoirs in Weiyuan area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(3): 414-422. (in Chinese with English abstract)

[10] GUO Z Q, LV X Y, LIU C, et al. Prediction of organic richness in shale gas reservoirs using a novel organic-inorganic decoupling seismic inversion method[J]. Gas Science and Engineering, 2023, 110: 204864.

[11] 陈胜，赵文智，欧阳永林，等. 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 [J]. 天然气工业，2017，37(5)：20-30.
CHEN S, ZHAO W Z, OUYANG Y L, et al. Comprehensive prediction of shale gas sweet spots based on geophysical properties: A case study of the Lower Silurian Longmaxi Fm in Changning Block, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(5): 20-30. (in Chinese with English abstract)

[12] ZENG Q C, CHEN S, HE P, et al. Quantitative prediction of shale gas sweet spots based on seismic data in Lower Silurian Longmaxi Formation, Weiyuan area, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 422-430.

[13] 王梦，康昆，龙浩，等. 页岩气储层总有机碳含量地震定量预测方法及其在四川盆地LZ区块的应用 [J]. 大庆石油地质与开发，2021，40(3)：130-136.
WANG M, KANG K, LONG H, et al. TOC seismic quantitative prediction method for the shale gas reservoirs and its application in Block LZ of Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(3): 130-136. (in Chinese with English abstract)

[14] GU Y F, LI X T, QI L, et al. Sedimentology and geochemistry of the Lower Permian Shanxi Formation Shan 2^3 submember transitional shale, eastern Ordos Basin, North China[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 859845.

[15] 吴鹏，高丽军，李勇，等. 海陆过渡相岩性频繁互层型页岩气潜力评价方法：以鄂尔多斯盆地临兴区块下二叠统山西组为例 [J]. 天然气工业，2022，42(2)：28-39.
WU P, GAO L J, LI Y, et al. An evaluation method for shale gas potential of marine-continent transitional facies with frequent interbedded lithology: A case study on the Lower Permian Shanxi Formation in Linxing Block of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(2): 28-39. (in Chinese with English abstract)

[16] WANG X X, ZHOU L, WU Y, et al. Restoration of palaeogeomorphology and its petroleum-geological significance: Transitional-facies deposition during the Early Permian in the southeastern Ordos Basin, North China[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023,

221：111310.

[17] 李梦蕾，张超谟，石文睿，等. 提高煤系页岩储层 TOC 计算精度的改进方法 [J]. 石油物探，2024，63(4)：817-825.
LI M L, ZHANG C M, SHI W R, et al. A method to improve the accuracy of TOC calculation for coal-measure shale reservoirs[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2024, 63(4): 817-825. (in Chinese with English abstract)

[18] 罗力元，李勇，李树新，等. 鄂尔多斯盆地东缘大吉地区山$_2^3$ 亚段海陆过渡相页岩气富集控制因素 [J]. 天然气地球科学，2025，36(3)：554-566.
LUO L Y, LI Y, LI S X, et al. Controlling factors of marine and continental transitional shale gas enrichment in Shan$_2^3$ sub-member, Daji area, eastern margin of Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2025, 36(3): 554-566. (in Chinese with English abstract)

[19] ZHAO B S, LI R X, QIN X L, et al. Geochemical characteristics and mechanism of organic matter accumulation of marine-continental transitional shale of the Lower Permian Shanxi Formation, southeastern Ordos Basin, North China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 205: 108815.

[20] 赵龙梅，文桂华，李星涛，等. 鄂尔多斯盆地大宁-吉县区块山西组 2^3 亚段致密砂岩气储层“甜点区”评价 [J]. 天然气工业，2018，38(增刊 1)：5-10.
ZHAO L M, WEN G H, LI X T, et al. Evaluation of the "sweet spot" of tight sandstone gas reservoir in sub-member 2^3 of Shanxi Formation in Daning-Jixian Block, Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(S1): 5-10. (in Chinese with English abstract)

[21] 鲁静，邵龙义，孙斌，等. 鄂尔多斯盆地东缘石炭-二叠纪煤系层序-古地理与聚煤作用 [J]. 煤炭学报，2012，37(5)：747-754.
LU J, SHAO L Y, SUN B, et al. Sequence-paleogeography and coal accumulation of Carboniferous-Permian coal measures in the eastern Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 747-754. (in Chinese with English abstract)

[22] 蔡光银，蒋裕强，李星涛，等. 海陆过渡相与海相富有机质页岩储层特征差异 [J]. 沉积学报，2022，40(4)：1030-1042.
CAI G Y, JIANG Y Q, LI X T, et al. Comparison of characteristics of transitional and marine organic-rich shale reservoirs[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(4): 1030-1042. (in Chinese with English abstract)

[23] HE Q B, CHEN S J, LI S X, et al. Organic geochemical characteristics and hydrocarbon generation mechanism of marine-continental transitional organic-rich shale: A case study from the Shanxi Formation in the eastern margin of the Ordos Basin[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 219: 111116.

[24] 蒋旭东，曹俊兴，逯宇佳，等. 川东南地区海相页岩气层 TOC 含量多参数融合预测 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版)，2018，45(1)：121-128.
JIANG X D, CAO J X, LU Y J, et al. A comprehensive prediction of multiple parameters of TOC in marine gas shale, southeastern Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2018, 45(1): 121-128. (in Chinese with English abstract)

[25] ZHANG H Y, WU W S, WU H. TOC prediction using a gradient boosting decision tree method: A case study of shale reservoirs in Qinshui Basin[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 221: 111271.

[26] SHALABY M R, JUMAT N, LAI D, et al. Integrated TOC prediction and source rock characterization using machine learning, well logs and geochemical analysis: Case study from the Jurassic source rocks in Shams field, NW Desert, Egypt[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 176: 369-380.

[27] PASSEY Q R, CREANEY S, KULLA J B, et al. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(12): 1777-1794.

[28] 李亚男. 页岩气储层测井评价及其应用：以川南地区为例 [D]. 北京：中国矿业大学(北京)，2014.
LI Y N. Research on logging evaluation method of shale gas reservoir and its application: Take south of Sichuan area for example[D]. Beijing: China University of Mining & Technology(Beijing), 2014. (in Chinese with English abstract)

[29] OLDENBURG T B P, BROWN M, BENNETT B, et al. The impact of thermal maturity level on the composition of crude oils, assessed using ultra-high resolution mass spectrometry[J]. Organic Geochemistry, 2014, 75: 151-168.

[30] ABARGHANI A, GENTZIS T, LIU B, et al. Preliminary investigation of the effects of thermal maturity on redox-sensitive trace metal concentration in the Bakken source rock, North Dakota, USA[J]. ACS Omega, 2020, 5(13): 7135-7148.

[31] 张海波. 昭通地区五峰组-龙马溪组泥岩有机碳含量测井评价及软件实现 [D]. 北京：中国地质大学(北京)，2016.
ZHANG H B. The fast logging evaluation method for measuring TOC in the mudstone of Wufeng-Longmaxi Formation in Zhaotong region and a newly developed software of the method[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2016. (in Chinese with English abstract)

[32] LAI J, ZHAO F, XIA Z L, et al. Well log prediction of total organic carbon: A comprehensive review[J]. Earth-Science Reviews, 2024, 258: 104913.

[33] 史彪，吴丰，李树新，等. 海陆过渡相优质页岩测井识别：以鄂尔多斯盆地大宁–吉县地区山$_2$段为例 [J]. 地质科技通报，2023，42(2)：115-126.
SHI B, WU F, LI S X, et al. Logging identification of high-quality shale of the marine-continent transitional facies: An example of the Shan 2 Member of the Daning-Jixian area in the Ordos Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 115-126. (in Chinese with English abstract)

[34] 何骁，吴建发，雍锐，等. 四川盆地长宁-威远区块海相页岩气田成藏条件及勘探开发关键技术 [J]. 石油学报，2021，42(2)：259-272.
HE X, WU J F, YONG R, et al. Accumulation conditions and key exploration and development technologies of marine shale gas field in Changning-Weiyuan Block, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 259-272. (in Chinese with English abstract)

[35] 陈轶林，孔令明，梁浩然. 下古生界海相页岩 TOC 测井预测模型优选及应用：以川南长宁地区为例 [J]. 地质论评，2023，69(3)：1021-1030.

CHEN Y L, KONG L M, LIANG H R. Optimization of total organic carbon from well logging data in Lower Paleozoic marine shale: A case study from Changning area, southern Sichuan Basin[J]. Geological Review, 2023, 69(3): 1021-1030. (in Chinese with English abstract)

[36] 王琦, 李红梅. 开发地震在大庆长垣喇嘛甸油田储层预测中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 490-496.
WANG Q, LI H M. Application of development seismology to reservoir prediction of Lamadian oilfield in Daqing placanticline[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 490-496. (in Chinese with English abstract)

[37] 王权锋, 王元君, 李晶, 等. 锦州 27 区多井约束地震反演及储层预测 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(2): 23-26.
WANG Q F, WANG Y J, LI J, et al. Multi-wells constrained seismic inversion and reservoir prediction in the 27th region, Jinzhou[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(2): 23-26. (in Chinese with English abstract)

[38] 王丽萍. 智能优化算法叠前 AVO 非线性反演研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2015.
WANG L P. Study on intelligent optimization algorithm with application to prestack AVO nonlinear inversion[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2015. (in Chinese with English abstract)

[39] 罗艳玲. 喇嘛甸油田河流相储层井震结合预测方法 [J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(4): 143-146.
LUO Y L. Predicting method by the well and seismic integration for the fluvial facies reservoirs in Lamadian oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(4): 143-146. (in Chinese with English abstract)

[40] 张文彪, 段太忠, 刘彦锋, 等. 定量地质建模技术应用现状与发展趋势 [J]. 地质科技情报, 2019, 38(3): 264-275.
ZHANG W B, DUAN T Z, LIU Y F, et al. Application status and development trend of quantitative geological modeling[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(3): 264-275. (in Chinese with English abstract)

[41] CHEN Y H, BI J J, QIU X B, et al. A method of seismic meme inversion and its application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1235-1245.

[42] 高君, 毕建军, 赵海山, 等. 地震波形指示反演薄储层预测技术及其应用 [J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 142-145.
GAO J, BI J J, ZHAO H S, et al. Seismic waveform inversion technology and application of thinner reservoir prediction[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 142-145. (in Chinese with English abstract)

[43] 王红岩, 周祥林, 胡伟, 等. 西湖凹陷平北斜坡带含煤系地层储层预测 [J]. 石油物探, 2021, 60(4): 595-603.
WANG H Y, ZHOU X L, HU W, et al. Prediction of coal-bearing strata reservoir in the Pingbei slope zone of the Xihu Depression[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(4): 595-603. (in Chinese with English abstract)

[44] 杨涛, 乐友喜, 吴勇. 波形指示反演在储层预测中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 769-776.
YANG T, YUE Y X, WU Y. Application of the waveform inversion in reservoir prediction[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(2): 769-776. (in Chinese with English abstract)

[45] 杜佳, 刘彦成, 白洁玢, 等. 基于波形指示模拟的致密砂岩储层预测 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 94-100.
DU J, LIU Y C, BAI J B, et al. Prediction of tight sandstone reservoirs based on waveform indication simulation[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5): 94-100. (in Chinese with English abstract)

[46] 何文渊, 毕建军, 陈彦虎. 地震波形指示反演方法、原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
HE W Y, BI J J, CHEN Y H. Method, principle and application of seismic waveform indication inversion[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)

[47] 谢春临, 李永义, 陈志德, 等. 波形指示模拟在致密油水平井钻探中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(3): 564-573.
XIE C L, LI Y Y, CHEN Z D, et al. Seismic motion simulation for horizontal well drilling in Fuyu reservoirs[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(3): 564-573. (in Chinese with English abstract)

[48] 张双杰, 李晓红, 李思源. 波形指示反演在吉木萨尔芦草沟组页岩油甜点预测中的应用 [C]//佚名. 2020 年中国地球科学联合学术年会论文集. [出版地不详]: [出版者不详], 2020: 250-253.
ZHANG S J, LI X H, LI S Y. The application of waveform indicator inversion in the prediction of shale oil desserts in the Lucaogou Formation in Jimsar[C]//Anon. Proceedings of the 2020 China Earth Science Joint Academic Annual Meeting. [S. 1.]: [s. n.], 2020: 250-253. (in Chinese)

[49] 毛永强, 李宁, 曹开芳, 等. 松南地区陆相泥页岩 TOC 定量预测技术 [J]. 断块油气田, 2020, 27(3): 313-317.
MAO Y Q, LI N, CAO K F, et al. Quantitative prediction technology of TOC of continental mud shale in Songnan area[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2020, 27(3): 313-317. (in Chinese with English abstract)

[50] 顾雯, 印兴耀, 巫芙蓉, 等. 波形驱动下多参数约束高分辨率反演方法: 以四川盆地渝西地区龙马溪组页岩气为例 [J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(6): 1311-1321.
GU W, YIN X Y, WU F R, et al. Multi-parameter constrained high-resolution inversion method driven by waveform: A case study of Longmaxi Formation shale gas in western Chongqing, Sichuan Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(6): 1311-1321. (in Chinese with English abstract)

Summary for “海陆过渡相页岩层系总有机碳含量地震定量预测：以鄂尔多斯盆地大宁–吉县区块为例”

TOC content seismic quantitative prediction of marine-continental transitional shale stratum: Taking the Daning-Jixian Block in the Ordos Basin as an example

WU Yong[1*]，WANG Xuxu[2]，ZHOU Lu[1]，LI Shuxin[3]，LI Yongzhou[3]，WU Feng[1]

1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China；
2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi’an 710018, China；
3. PetroChina Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing 100028, China

* Corresponding author， E-mail：wycan_112@126.com

Abstract：[**Objective**] Marine-continental transitional shale gas is a vital alternative resource for unconventional oil and gas exploration. Accurately characterizing the spatial distribution of total organic carbon content (TOC) is vital for predicting shale gas “sweet spots”. [**Methods**] Due to the absence of an effective relationship between TOC content and rock elastic parameters in marine-continental transitional shale, conventional TOC content prediction methods based on elastic parameters, commonly used in marine shale gas evaluations, are difficult to apply. To overcome this limitation, we propose a waveform indication simulation seismic prediction method driven by facies control, which is performed after TOC content evaluation through a logging parameter fitting technique. This approach enables the spatial prediction of TOC content within transitional shale strata. [**Results**] The marine-continental transitional shale exhibits features such as thin monolayer thickness, high organic matter content, and irregular longitudinal distribution. High-frequency waveform simulation based on reservoir characteristic parameters effectively predicts TOC content in the transitional shale. The inversion results demonstrate relatively high vertical and horizontal resolutions and show a strong correlation with the TOC content curves obtained from logging parameter modeling. The coincidence rate reaches 84.4%, effectively reflecting the spatial variation of TOC content within the shale reservoir. [**Conclusion**] This method effectively addresses the challenge that the key evaluation parameter (TOC content) for identifying shale gas “sweet spots” in transitional facies cannot be quantitatively predicted solely from rock elastic parameters. It provides technical support for the exploration and development of transitional shale gas.

Key words: Ordos Basin；marine-continental transitional facies；shale gas；total organic carbon (TOC) content；waveform indication simulation；seismic quantitative prediction

Received：2025-01-09；Revised：2025-06-09；Accepted：2025-06-13

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20250019