

碳酸盐岩油气储层高精度成像方法研究

谷丙洛¹⁾, 韩建光²⁾, 陈军³⁾, 黄建平¹⁾, 李振春¹⁾

1) 中国石油大学(华东), 青岛, 266580; 2) 中国地质科学院, 北京, 100037;

3) 山东省地质科学研究所, 山东济南, 250013

内容提要:碳酸盐岩油气储层在世界油气储层中占据着重要的地位,其油气总量约占全球油气总量的70%,具有埋藏深、构造复杂、非均质性强等特点。如何获得碳酸盐岩油气储层在地下的准确位置及构造特征,是油气勘探急需解决的难题。叠前逆时偏移成像技术采用精确的地震波动理论,能够对任意复杂构造进行高精度成像。本文针对碳酸盐岩油气储层成像难的问题,研究各向异性叠前逆时偏移成像技术,并将其应用于碳酸盐岩油气储层勘探中。通过采用精确的频散关系,推导各向异性纯qP波方程,利用高精度有限差分进行纯qP波模拟,通过叠前逆时偏移方法对纯qP波进行叠前深度偏移成像。基于典型的碳酸盐岩油气储层实际地质条件,建立逼近真实地质情况的碳酸盐岩地球物理模型,对上述模型进行偏移成像试验,结果表明各向异性逆时偏移成像技术是一种有效的碳酸盐岩油气储层勘探方法。最后将该方法应用于典型碳酸盐岩靶区的实际地震资料,并获得了精确的成像结果,进一步验证了各向异性逆时偏移成像技术在碳酸盐岩油气储层勘探中的重要作用。

关键词:碳酸盐岩储层;地震勘探;各向异性;数值模拟;逆时偏移

碳酸盐岩油气储层在世界油储层中占据着重要的地位,在全球的1000多个大型油气田中,碳酸盐岩油气田占30%以上(Zhai Yansen, 2018)。碳酸盐岩油气总量约占全球油气总量的70%,探明可采储量约占50%,产量约占60%(Li Yang et al., 2018)。我国碳酸盐岩油气资源也十分丰富,近年来在鄂尔多斯盆地、塔里木盆地、渤海湾盆地、四川盆地碳酸盐岩储层中相继发现了大中型油气田,打出了高产井(Li Yang et al., 2018)。截至2015年底,我国累计探明碳酸盐岩石油储量 29.34×10^8 t、天然气储量 3.37×10^{12} m³ (MLR of the People's Republic of China, 2016)。随着我国经济的快速发展,油气需求量也逐年递增,而油气供给形势严峻。因此,加大对碳酸盐岩储层的勘探迫在眉睫。

碳酸盐岩缝洞体是一种典型碳酸盐岩储层,在我国塔里木盆地、四川盆地等地区发育广泛(Jia Chengzao, 1997; Lu Xinbian et al., 2015; Ma Naibai

et al., 2019; Ma Xinhua et al., 2019)。目前,已在塔里木盆地相继发现轮古、塔河、哈拉哈塘、塔中I号、轮古东等多个大中型油气田(Yang Haijun et al., 2020),在四川盆地发现了普光、元坝、大天池、安岳等大中型气田(Du Jinhu et al., 2014),碳酸盐岩储层已成为这些地区油气勘探开发的主要对象(Jin Yanlin and Qin Fei, 2019)。碳酸盐岩缝洞体是碳酸盐岩特有的一种圈闭类型(Wang Zhen et al., 2019),其发育受多期构造运动、沉积、成岩、古岩溶等多种作用的影响,储集类型多样,发育规模不均,空间形态及分布有巨大的差别(Qi Lixin and Yun Lu, 2010; Gao Houqiang et al., 2017),而且储层岩体厚度及形状变化大,物性参数纵横向变化剧烈(Gao Houqiang et al., 2017)。此外,古潜山也是我国碳酸盐岩油气藏勘探的重点领域,目前在渤海油田区域内已经相继发现了渤中427/428、曹妃甸18-1/2、渤中13-2、渤中19-6及垦利6-1等大中型油气

注:本文为重点研发计划项目(编号2019YFC0605503)、中石油重大科技项目(编号ZD2019-183-003)和国家自然科学基金项目(编号41922028, 41874149)联合资助。

收稿日期:2020-06-01; 改回日期:2020-06-21; 网络发表日期:2020-07-29; 责任编委:邱楠生; 责任编辑:李曼。

作者简介:谷丙洛,男,1988年生。博士,讲师,主要从事地震波传播及逆时偏移成像方法研究。Email: gubingluo@foxmail.com; 通讯作者:韩建光,男,1987年生。博士,助理研究员,主要从事地震波偏移成像及深部探测方法研究。Email: hanjianguang613@163.com。

引用本文: 谷丙洛, 韩建光, 陈军, 黄建平, 李振春. 2020. 碳酸盐岩油气储层高精度成像方法研究. 地质学报, 94(8): 2534~2544. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020182.
Gu Bingluo, Han Jianguang, Chen Jun, Huang Jianping, Li Zhenchun. 2020. Study on high-precision imaging method of carbonate reservoir. Acta Geologica Sinica, 94(8): 2534~2544.

田或含油构造,具有良好的油气资源前景(Guo Ying et al., 2017; Xue Yong'an et al., 2018; Zhang Zhen et al., 2019; Yang Haifeng et al., 2020)。对于碳酸盐岩古潜山,其主要发育在上、下构造层之间的古隆起区,岩溶储层勘探面积有限,但受小克拉通台地多旋回构造运动的控制,潜山内幕的暴露剥蚀和断裂系统多期次发育,大面积不规则分布,导致潜山类型多变,潜山内幕发育较多孔、洞以及裂缝,且大小多变、分布不均、填充物多样,造成古潜山碳酸盐岩储层具有非均质性极强、物性变化快等特征(Shen Anjiang et al., 2019; Zhang Zhen et al., 2019)。综上所述,地质构造的特殊性和复杂性,使得碳酸盐岩储层纵横向非均质性严重,各向异性极强,对碳酸盐岩油气储层的勘探带来了巨大的挑战。

三维地震勘探是获取碳酸盐岩储层精细构造的最有效技术之一(Dai Lei et al., 2020),但如何实现碳酸盐岩储层地震资料的高精度成像是目前研究的关键问题(Gao Houqiang et al., 2017)。碳酸盐岩储层的强非均质性和强各向异性使得其地震资料特征表现为信噪比低、有效信号弱、高频能量损失严重、绕射波大量发育(Li Zhenchun et al., 2017),造成碳酸盐岩缝洞体边界及空间位置难以准确识别(Jin Yanlin et al., 2019),潜山顶界面及其内部断裂系统刻画不清(Wu Tao et al., 2017)。为此,国内外诸多学者针对碳酸盐岩的特殊性,从多个角度对三维地震成像技术进行了研究。Gong Honglin et al. (2012)建立一套从静校正、速度建模、速度分析到叠前偏移的处理成像技术,提高了成像剖面的信噪比和分辨率。Ye Yueming et al. (2011)提出了单程波保幅的叠前偏移技术,对深层能量进行有效补偿,获得了较好的成像效果。

尽管上述方法能够在一定程度上改善碳酸盐岩储层的成像精度,但由于对地震波动方程的近似,使得这些方法对碳酸盐岩储层成像能力不足的问题日益突出。逆时偏移是一种适用于复杂构造成像的高精度地震偏移成像方法(Chang Wenfong et al., 1986; Kaelin Bruno et al., 2006),采用精确的双程波动方程,能够克服传统 Kirchhoff 偏移的焦散区和多路径问题以及单程波偏移的构造倾角和偏移孔径限制问题,可以适应纵横向速度变化剧烈的复杂地质状况。此外,逆时偏移也可以对回转波、多次波、棱柱波等特殊波型进行准确成像,是非常具有发展前景的一种高精度叠前深度偏移成像方法(Gu Bingluo et al., 2015)。Yang Jiangfeng et al. (2014)利用逆时偏移技术对塔西南地区的碳酸盐岩

进行了成像,提高了碳酸盐岩内幕断溶体的成像精度。Miao Qing et al. (2015)等采用各向同性逆时偏移成像技术对塔里木盆地塔北牙哈地区地震资料进行成像处理,提高了资料信噪比以及断层和构造的偏移精度。Gao Houqiang et al. (2017)利用低频速度场建立及更新、高分辨率速度建模、分层网格层析迭代等高精度速度建模关键技术,反演出塔里木盆地精确的背景速度场,进行逆时偏移成像,有效消除了火成岩引起的假构造,提高了缝洞成像精度,有效识别缝洞边界及空间位置。

碳酸盐岩储层的强非均质性和强各向异性使得地震波在该介质中的传播规律与均匀各向同性介质大相径庭。对于各向同性介质,地震波的传播规律同纵波(P波)相同,在不同方向上传播速度相同,因此通常采用P波对地下复杂构造进行成像。对于各向异性介质,地震波在不同方向上具有不同的传播速度,传统的P波成像方法无法描述这种波动特征,因此采用传统P波成像方法对各向异性复杂构造进行成像将导致构造位置成像不准、断裂系统刻画不清等问题。Quasi-P波(qP波)可以准确刻画各向异性介质中传播的地震波,通过各向异性参数的引入,qP波可以准确地表述地震波在不同方向上具有不同传播速度这一特征。采用qP波进行成像,地震波的传播路径及走时可以精确刻画,因此能够实现对各向异性复杂构造的准确成像。针对碳酸盐岩储层的强非均质性和强各向异性,本文提出一种基于纯qP波的各向异性逆时偏移成像技术,并将其应用到碳酸盐岩储层勘探中,通过采用精确的频散关系,推导各向异性纯qP波方程,利用高精度有限差分进行纯qP波模拟,通过叠前逆时偏移方法对纯qP波进行叠前深度偏移成像。利用国际上标准的BP速度分析数据集对本文各向异性逆时偏移方法的正确性进行验证;基于典型的碳酸盐岩油气储层的实际地质条件,建立逼近真实地质情况的碳酸盐岩地球物理模型,对建立的典型模型进行各向异性逆时偏移成像试验,验证本文方法对于碳酸盐岩油气储层精确成像的有效性;最后将该方法应用于典型碳酸盐岩靶区的实际地震资料,进一步验证所提出的各向异性逆时偏移成像技术在碳酸盐岩油气储层高精度成像中的实用性。

1 各向异性纯 qP 波逆时偏移理论

1.1 各向异性纯 qP 波方程

Tsvankin. (1997)提出VTI介质中qP波的频散关系为:

$$\frac{v^2(\theta)}{v_{p0}^2} = 1 + \epsilon \sin^2 \theta - \frac{f}{2} + \frac{f}{2} \sqrt{\left(1 + \frac{2\epsilon \sin^2 \theta}{f}\right)^2 - \frac{2(\epsilon - \delta) \sin^2 2\theta}{f}} \quad (1)$$

式中, $v(\theta)$ 代表各向异性介质中 qP 波相速度 (m/s), v_{p0} 代表各向异性介质中 qP 波沿着对称轴方向的速度 (m/s), ϵ 和 δ 为各向异性 Thomsen 参数 (Thomsen Leon, 1986), 表征介质各向异性强度的两个无量纲因子, 其中 ϵ 表征纵波在横向和垂向之间的各向异性程度, ϵ 越大, qP 的各向异性越强, ϵ 为 0 时, qP 表现为各向同性, δ 是连接 qP 波和 qSV 波垂向传播速度的过渡参数, θ 为沿着对称轴的相角, f 具体为:

$$f = 1 - \frac{v_{s0}^2}{v_{p0}^2} \quad (2)$$

式中, v_{s0} 代表各向异性介质中 qSV 波沿着对称轴方向的速度 (m/s)。

相速度频率及波数之间满足如下关系:

$$\begin{cases} \sin \theta = \frac{v(\theta)}{\omega} k_h \\ \cos \theta = \frac{v(\theta)}{\omega} k_z \\ v^2(\theta) = \frac{\omega^2}{k_h^2 + k_z^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$Q = \sqrt{\left(f \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (f + 2\epsilon) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)\right)^2 - 8f(\epsilon - \delta) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}} \quad (6)$$

若 $v_{s0} = 0$, 则 $f = 1$, 那么 VTI 介质纯 qP 波方程可简化为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{v_{p0}^2}{2} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (1 + 2\epsilon) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \right] S \quad (7)$$

式(7)中, 标量算子 S 具体为:

$$S = \left[1 + \sqrt{1 - \frac{8(\epsilon - \delta) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}}{\left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (1 + 2\epsilon) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)\right)^2}} \right] \quad (8)$$

标量算子 S 在方程中有重要的作用, 用来校正各向异性对波场相位及振幅的影响, 确保各向异性波场传播的准确性。对于 TTI 介质, 其纯 qP 波方程可以通过坐标系变换获取。三维坐标变换关系可以表示为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & -\sin \varphi & \sin \theta \cos \varphi \\ \cos \theta \sin \varphi & \cos \varphi & \sin \theta \sin \varphi \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中 φ 为方位角。将式(9)代入方程(7), 可得

式中, ω 为角频率, k_z 为垂直方向波数, k_h 为水平方向波数, $k_h^2 = k_x^2 + k_y^2$, k_x 为 x 水平方向波数, k_y 为 y 水平方向波数。将式(3)代入方程(1), 各向异性介质中 qP 波的频散关系可以转化为:

$$\omega^2 \tilde{u} = \frac{v_{p0}^2}{2} \left[(2 - f) k_z^2 \tilde{u} + (2 - f + 2\epsilon) k_h^2 \tilde{u} + (f k_z^2 \tilde{u} + (f + 2\epsilon) k_h^2 \tilde{u}) \sqrt{1 - \frac{8f(\epsilon - \delta) k_h^2 k_z^2 \tilde{u}^2}{(f k_z^2 \tilde{u} + (f + 2\epsilon) k_h^2 \tilde{u})^2}} \right] \quad (4)$$

式(4)中, $\tilde{u} = \tilde{u}(k_x, k_y, k_z, \omega)$ 表示频率-波数域的地震波场。利用傅里叶变换, 将式(4)变换至时间-空间域, 可得 VTI 介质中的纯 qP 波方程, 具体为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{v_{p0}^2}{2}$$

$$\left[(2 - f) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (2 - f + 2\epsilon) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) + Q \right] \quad (5)$$

式(5)中, $u = u(x, y, z, t)$ 表示时间-空间域的地震波场, 等式右端项 Q 具体为:

TTI 介质纯 qP 波方程, 具体为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{v_{p0}^2}{2} [H_1 u + (1 + 2\epsilon) H_2 u] S' \quad (10)$$

式(10)中, 标量算子 S' 具体为:

$$S' = \left[1 + \sqrt{1 - \frac{8(\epsilon - \delta) H_2 u H_1 u}{(H_1 u + (1 + 2\epsilon) H_2 u)^2}} \right] \quad (11)$$

在式(10)和(11)中, 偏微分算子 H_1 和 H_2 分别为:

$$H_1 = \sin^2 \theta \cos^2 \varphi \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \sin^2 \theta \sin^2 \varphi \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \cos^2 \theta \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \sin^2 \theta \sin 2\varphi \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + \sin 2\theta \sin \varphi \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} + \sin 2\theta \cos \varphi \frac{\partial^2}{\partial x \partial z}$$

$$H_2 = (1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi) \frac{\partial^2}{\partial x^2} + (1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi) \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \sin^2 \theta \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \sin^2 \theta \sin 2\varphi \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} - \sin 2\theta \sin \varphi \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} - \sin 2\theta \cos \varphi \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \quad (13)$$

地质构造的特殊性和复杂性, 使得碳酸盐岩储层纵横向非均质性严重, 在实际中表现出多种不同

的各向异性特征,除了常规的 VTI 和 TTI 各向异性之外,还包括正交各向异性。对于正交各向异性介质,其纯 qP 波方程可以利用本文的推导方式直接获得。

1.2 各向异性纯 qP 波方程数值模拟

在上述的各向异性介质 qP 波方程中涉及到了高阶偏导数的开方,直接求解上述方程是非常困难的。最常用的处理方式是引入中间变量,避开高阶偏导数的开方,如 Zhou Hongbo et al. (2006) 提出求解两个耦合的方程系统来实现各向异性介质地震波数值模拟。然而,这种做法会使 qP 波和 qSV 波耦合在一起,并不能直接获得纯 qP 波。为了能够直接求解上述各向异性介质纯 qP 波方程, Xu Sheng et al. (2014) 基于声学近似对各向异性介质纯 qP 波方程进行简化,通过将标量算子 S 的计算进行简化,大幅降低了数值模拟的难度和计算效率。本文通过分析 qP 波的偏振及传播方向之间的关系,获得了高效求解各向异性介质纯 qP 波方程的方法。

对于平面 P 波,其传播方向余弦 $(\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z)$ 可以表示为:

$$(\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z) = \left(\frac{k_x}{|\mathbf{k}|}, \frac{k_y}{|\mathbf{k}|}, \frac{k_z}{|\mathbf{k}|} \right) = \frac{\mathbf{k}}{|\mathbf{k}|} \quad (14)$$

式(14)中, $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$ 为波数矢量, $|\mathbf{k}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}$ 。由于 P 波波场的偏振方向平行于 P 波的传播方向,因此其传播方向余弦 $(\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z)$ 也可以表示为:

$$(\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z) = \left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} \right) / \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} = \frac{\nabla u}{|\nabla u|} \quad (15)$$

由式(14)和(15)可知,地震波场偏振方向(即梯度)与波数之间的定量关系如下:

$$(\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z) = \frac{\mathbf{k}}{|\mathbf{k}|} = \frac{\nabla u}{|\nabla u|} \quad (16)$$

基于式(16)及傅里叶变换的性质,VTI 介质纯 qP 波方程中标量算子 S 可以表示为:

$$S = \left[1 + \sqrt{1 - \frac{8(\epsilon - \delta)(\gamma_x^2 + \gamma_z^2)\gamma_z^2}{(\gamma_z^2 + (1 + 2\epsilon)(\gamma_x^2 + \gamma_z^2))^2}} \right] \quad (17)$$

利用地震波场梯度计算即可实现高效求解标量算子 S ,进而求解 VTI 介质纯 qP 波方程。同理,TTI 介质纯 qP 波方程亦可实现高效求解。在利用地震波场梯度求解标量算子 S 时,梯度为零将造成

计算的不稳定,为此解决此问题,将式子(16)修改为:

$$(\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z) = \frac{\nabla u}{|\nabla u| + \alpha} \quad (18)$$

其中, α 为一个非常小的数,通常取梯度最大值的千分之一。

在地震波场数值模拟中,由于模型大小的限制,地震波传播需局限于一个给定的空间大小,因此需要通过人工的吸收边界条件来压制由于模型截断所造成的虚假发射。在诸多吸收边界条件方法中,完美匹配层吸收边界条件是应用最为广泛的一种 (Berenger Jean-Pierre, 1994)。对于各向异性介质,传统的完美匹配层吸收边界条件将出现吸收效果不佳、稳定性差的问题。本文采用多轴完美匹配层吸收边界条件 (Meza-Fajardo et al., 2008),该边界条件是对传统完美匹配层吸收边界条件的一种拓展,传统完美匹配层吸收边界条件在 x, y, z 方向边界区域内,吸收系数 d 满足如下关系:

$$\begin{aligned} d_x^x &= d_x^x(x), & d_x^y &= 0, & d_x^z &= 0 \\ d_x^y &= 0, & d_y^y &= d_y^y(y), & d_y^z &= 0 \\ d_x^z &= 0, & d_y^z &= 0, & d_z^z &= d_z^z(z) \end{aligned} \quad (19)$$

式中,上角标字母代吸收边界所在区域,下角标字母代表吸收波场方向。对于多轴完美匹配层吸收边界条件,其吸收系数 d 满足如下关系:

$$\begin{aligned} d_x^x &= d_x^x(x), & d_y^x &= p^{(y/x)} d_x^x(x), & d_z^x &= p^{(z/x)} d_x^x(x) \\ d_x^y &= p^{(x/y)} d_y^y(y), & d_y^y &= d_y^y(y), & d_y^z &= p^{(z/y)} d_y^y(y) \\ d_x^z &= p^{(x/z)} d_z^z(z), & d_y^z &= p^{(y/z)} d_z^z(z), & d_z^z &= d_z^z(z) \end{aligned} \quad (20)$$

式中, p 代表了不同方向衰减因子的比例系数,通过调整比例系数可以达到改善吸收效果和稳定性的目的。实际中,根据介质各向异性的强弱选取 p 的值,各向异性越强, p 的值越接近于 1,各向异性越弱, p 得值越接近于 0。

1.3 各向异性纯 qP 波逆时偏移

逆时偏移成像的理论基础是时间一致性原理,即反射面存在于地层内下行波波至时间与某一上行波波至时间相一致之处。Claerbout (1971) 给出了利用时间一致性原理进行偏移的成像条件,用下式表示

$$R(x, y, z, t; s) = \frac{U(x, y, z, t; s)}{D(x, y, z, t; s)} \quad (21)$$

式中, R 、 U 和 D 分别表示成像剖面、检波点波场(上行波场)和震源波场(下行波场), (x, y, z) 表示空间网格点位置, s 和 t 分别表示震源和波至时

间。在非界面位置处,(21)式中分母会非常小,甚至为零,这将导致该成像条件出现不稳定。为此,Claerbout(1971)对(21)式进行了近似,通过上下行波的零延迟互相关来获得成像剖面,如下式所示

$$R(x,y,z,t;s) = \iint U(x,y,z,t;s)D(x,y,z,t;s)dt ds \quad (22)$$

式(22)表示的成像条件对于逆时偏移同样适用,需要同时将震源波场和检波点波场进行波场外推,并利用该成像条件进行成像。

基于上述时间一致性原理,逆时偏移具体包含三个步骤(Chang Wenfong et al., 1986):①震源波场正向延拓;②检波点波场逆向延拓;③应用成像条件。震源波场正向延拓本质上就是地震波场数值模拟,检波点波场逆向延拓本质上是求解一个波动方程的边值问题,以VTI介质纯qP波方程为例,给出该边值问题的表述:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{v_{p0}^2}{2} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (1 + 2\epsilon) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right] S \\ u(x,y,z,t) &= 0 \quad t > T \\ u(x,y,z,t) \Big|_{x=x_R, y=y_R, z=z_R} &= \text{seismograms} \quad 0 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (23)$$

式(23)中, (x_R, y_R, z_R) 表示检波点的位置, *seismograms* 表示地震记录。检波点波场逆时延拓是从最大记录时刻 T 开始,沿着逆时方向求解式(23),直到 $t=0$ 为止。尽管检波点波场逆向延拓是边值问题,但它的核心依然是求解波动方程。由逆时偏移的三个步骤可以看出,成像条件对成像质量有着至关重要的作用。归一化互相关成像条件是目前应用最广泛的一种成像条件,具有稳定性好、精度高等优点,具体可以用下式表示

$$I(x,y,z) = \frac{\iint U(x,y,z,t;s)D(x,y,z,t;s)dt ds}{\iint D(x,y,z,t;s)D(x,y,z,t;s)dt ds + \beta} \quad (24)$$

式中, I 表示叠加的偏移剖面, β 为一个非常小的数,作为稳定性因子,避免方程(24)分母为零所带来的计算不稳定,通常震源波场能量最大值的千分之一。归一化互相关成像条件所获得的成像振幅与反射系数具有相同的量纲、尺度和符号,可以作为真振幅叠前深度偏移的成像条件。基于上述的逆时偏移基本原理,即可实现各向异性介质纯qP波逆时偏移成像。

2 数值算例分析

为了验证各向异性逆时偏移成像方法的正确

性,本文通过一个国际标准的BP速度分析数据集进行偏移试验。图1给出了标准BP模型对应的速度及各向异性参数。该模型深度为11.25 km,横向宽度为94.05 km。偏移所用空间网格大小为12.5 m,共计1641炮,起始炮点位于模型起点位置,炮间隔为50 m,单边放炮,每炮均为800道接收,最小偏移距37.5 m,最大偏移距10025 m,道间距12.5 m,记录时间长度9.2 s,时间步长2 ms,采用主频为20 Hz的雷克子波作为震源时间函数。图2为偏移成像剖面,其中(a)为各向同性P波逆时偏移剖面,(b)为各向异性qP波逆时偏移剖面。由图2可知,本文的各向异性qP波逆时偏移方法是正确的。此外,相比于各向同性P波逆时偏移,各向异性qP波逆时偏移方法能够更好地对地下复杂构造成像,绕射波能量收敛更加充分,假象更少。

根据我国碳酸盐岩储层的实际地质状况,建立一个典型的碳酸盐岩储层复杂模型,如图3所示。该模型浅层包含近似水平层状介质,用来模拟沉积地层;模型中部包含逆冲断层,用于刻画地下复杂构造;模型5000 m以下包含不同尺度不同倾角的多组裂缝以及多个不规则的溶孔、溶洞,其中充填油气、水和岩层碎屑物等,用来刻画典型的碳酸盐岩储层的地质和地球物理情况。通过此模型测试,验证本文各向异性逆时偏移成像方法在复杂碳酸盐岩储层成像中的有效性。模型深度为9 km,横向宽度为20.8 km。偏移所用空间网格大小为10 m,共计139炮,起始炮点位于模型50 m处,炮点置于地表,炮间隔为150 m,中间放炮,两边接收,每炮均为901道接收,最小偏移距0 m,最大偏移距9000 m,道间距10 m,记录时间长度6.0 s,时间步长1 ms,采用主频为30 Hz的雷克子波作为震源时间函数。

图4为两个时刻的地震波场快照,其中(a)和(b)分别为1.5 s和2.25 s时刻的各向同性地震波场快照,(c)和(d)分别为1.5 s和2.25 s时刻的各向异性地震波场快照。由图4多组地震波场快照对比可知,本文的各向异性纯qP波方程相比于各向同性P波方程,可以更加精确地模拟地震波在各向异性介质中的传播特征,其振幅和相位属性均符合地震波的传播规律。此外,从图中也可以看出,在各向异性强的缝洞处,绕射波发育明显,波场紊乱,这些现象也与实际情况一致,表明了本文各向异性qP波方程的正确性和有效性。

图5为典型碳酸盐岩储层模型的偏移剖面,其中(a)为各向同性P波逆时偏移剖面,(b)为各向异

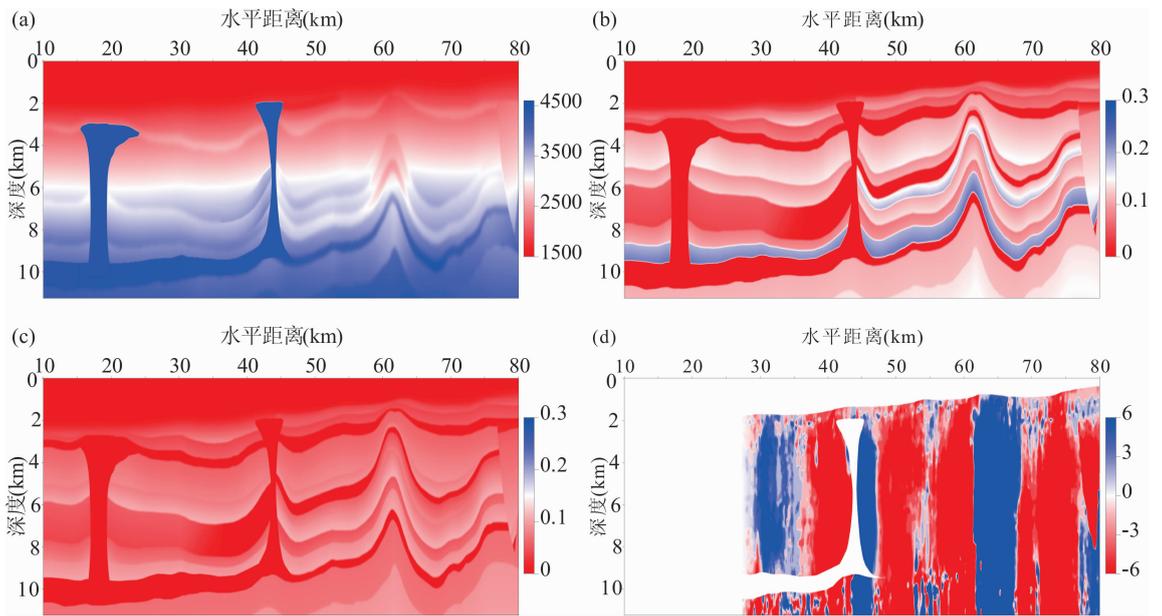


图 1 标准 BP 模型

Fig. 1 Standard BP model

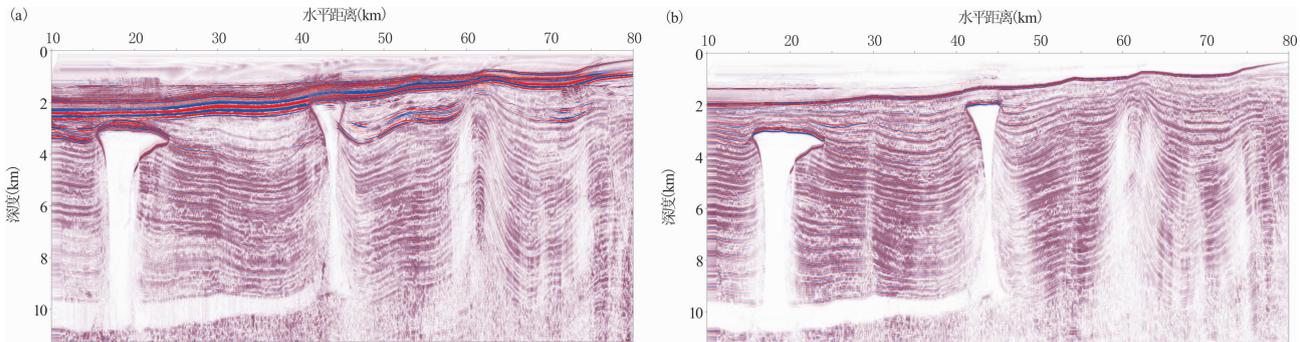
(a) — v_{p0} 模型; (b) — ϵ 模型; (c) — δ 模型; (d) — θ 模型(a) — v_{p0} model; (b) — ϵ model; (c) — δ model; (d) — θ model

图 2 标准 BP 模型偏移剖面

Fig. 2 Migration profile of the standard BP model

(a) — 各向同性 P 波逆时偏移; (b) — 各向异性纯 qP 波逆时偏移

(a) — Isotropic P-wave reverse time migration; (b) — anisotropic qP-wave reverse time migration

性 qP 波逆时偏移剖面。由图 5 可知,本文的各向异性 qP 波逆时偏移可以更好的对地下缝洞等复杂构造进行准确成像,对于不同尺度的缝洞,其顶底界面可以清晰刻画,而且断层的断面清晰,断点位置准确,绕射能量收敛较好,偏移假象较少。该典型碳酸盐岩储层模型的试算结果表明,本文的各向异性纯 qP 波逆时偏移方法对于碳酸盐岩储层的精确成像是有效的。

3 实际资料应用

为了进一步验证本文方法的实用性,对我国西部某盆地的典型靶区实际资料进行各向异性纯 qP

波逆时偏移成像。该地区溶洞大规模发育,地层非均质和各向异性特征均比较明显。偏移所用的各向异性参数模型如图 6 所示。图 7 为两条不同 inline 测线的偏移成像剖面,图 8 为两条不同 crossline 测线的偏移成像剖面。从成像剖面可以看出,该靶区地下 6~8 km 之间发育大量的溶孔、溶洞以及裂缝体系,本文提出的各向异性 qP 波逆时偏移方法可以很好地对这些复杂地质构造进行成像,而且本文方法可以获得精确的地下缝洞体位置信息。为了进一步验证本文成像方法的实用性,对该靶区的实际绕射波资料进行了各向异性纯 qP 波逆时偏移成像。图 9 给出了两条不同 inline 测线的偏移成像剖

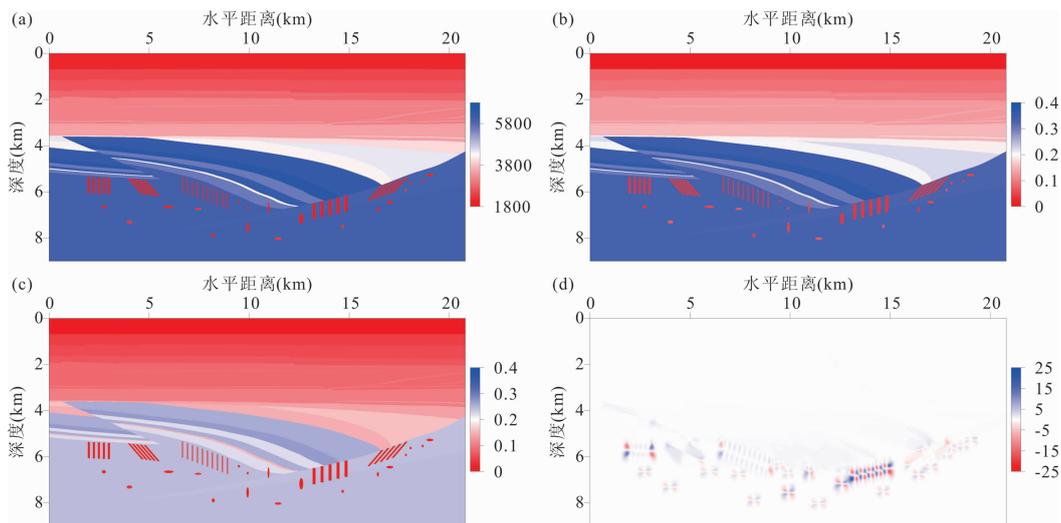


图 3 典型碳酸盐岩储层模型

Fig. 3 Typical carbonate reservoir model

(a) — v_{p0} 模型; (b) — ϵ 模型; (c) — δ 模型; (d) — θ 模型

(a) — v_{p0} model; (b) — ϵ model; (c) — δ model; (d) — θ model

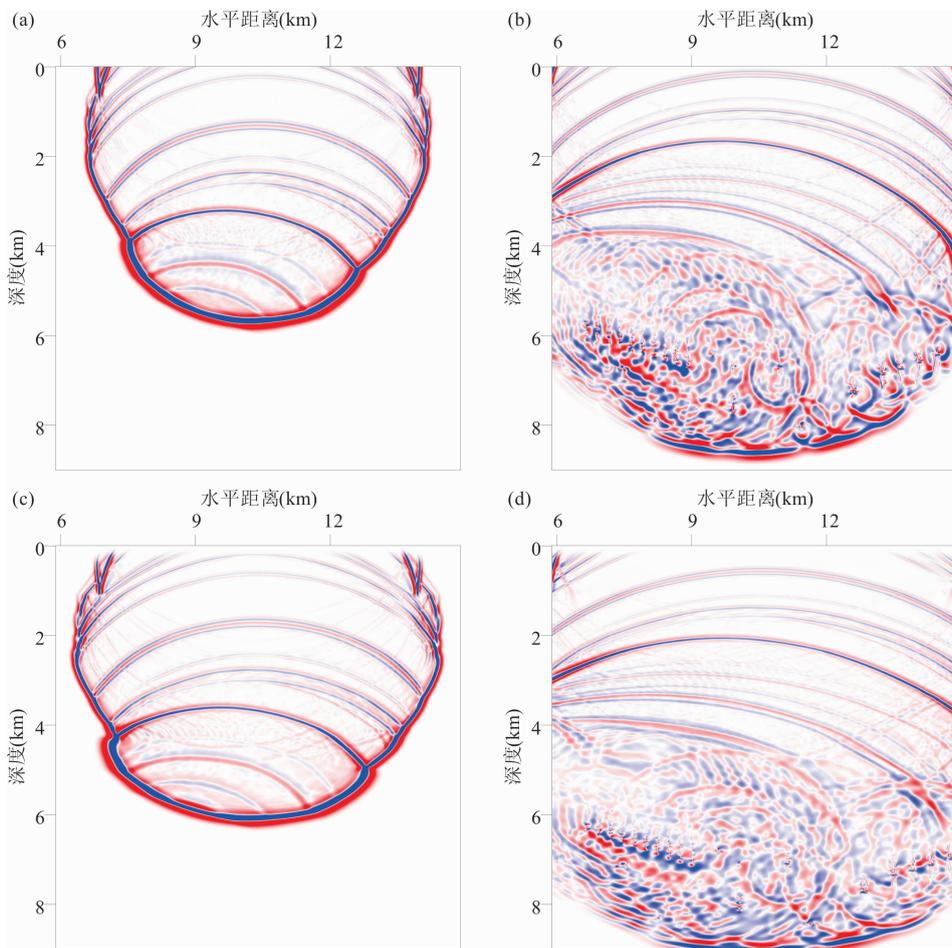


图 4 典型碳酸盐岩储层模型波场快照

Fig. 4 Snapshot of the typical carbonate reservoir model

(a)—1.5 s 各向同性波场快照; (b)—2.25 s 各向同性波场快照; (c)—1.5 s 各向异性波场快照; (d)—2.25 s 各向异性波场快照

(a)—1.5 snapshot of isotropic wavefield; (b)—2.25 s snapshot of isotropic wavefield;

(c)—1.5 s snapshot of anisotropic wavefield; (d)—2.25 s snapshot of anisotropic wavefield

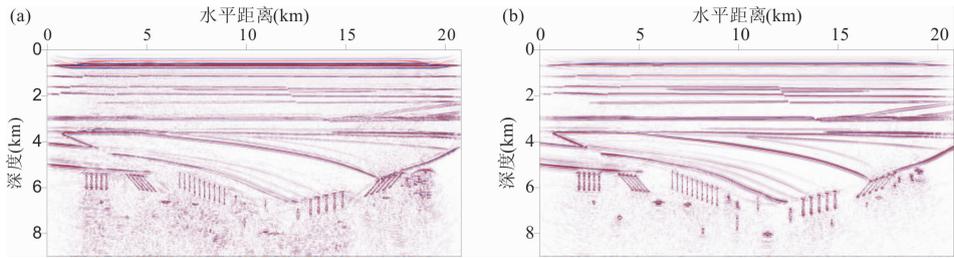


图 5 典型碳酸盐岩储层模型偏移剖面

Fig. 5 Migration profile of the typical carbonate reservoir model

(a)—各向同性 P 波逆时偏移; (b)—各向异性纯 qP 波逆时偏移

(a)—Isotropic P-wave reverse time migration; (b)—anisotropic qP-wave reverse time migration

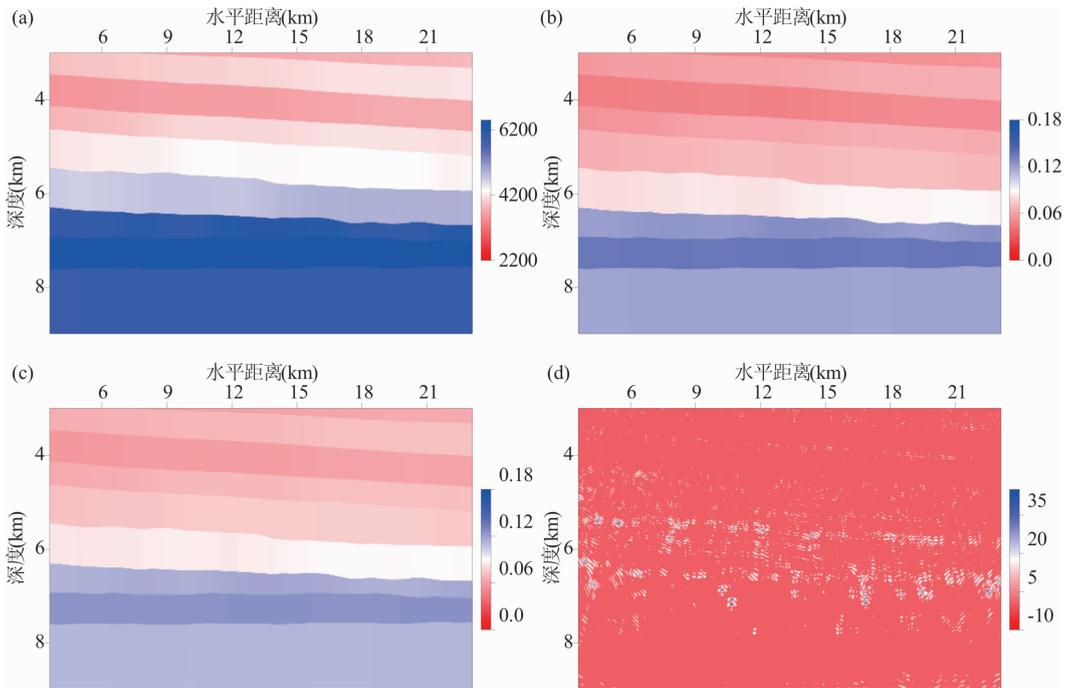


图 6 典型靶区各项异性参数模型

Fig. 6 Anisotropic model of typical target area

(a)— v_{p0} 模型; (b)— ϵ 模型; (c)— δ 模型; (d)— θ 模型

(a)— v_{p0} model; (b)— ϵ model; (c)— δ model; (d)— θ model

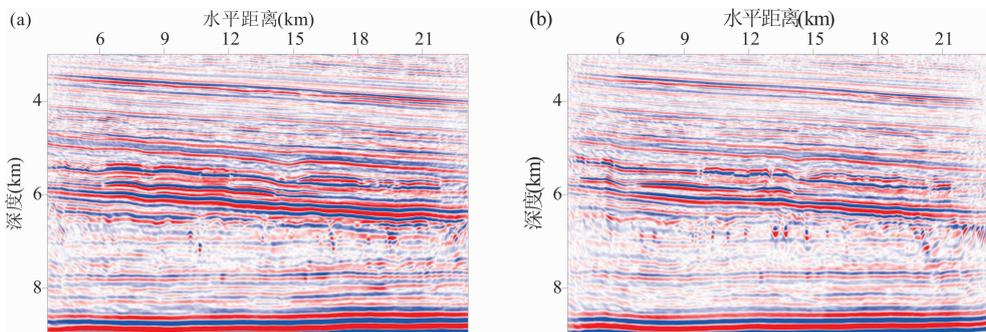


图 7 各向异性 qP 波逆时偏移剖面

Fig. 7 Anisotropic reverse time migration profile of qP wave

(a)—inline-250 测线; (b)—inline-300 测线

(a)—inline-250; (b)—inline-300

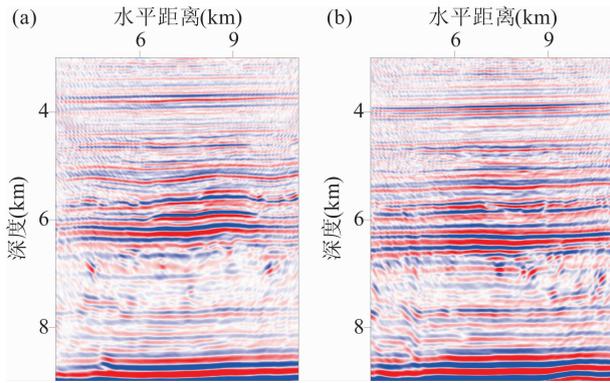


图8 各向异性 qP 波逆时偏移剖面

Fig. 8 Anisotropic reverse time migration profile of qP wave
(a)—crossline-450 测线; (b)—crossline-650 测线
(a)—crossline-450; (b)—crossline-650

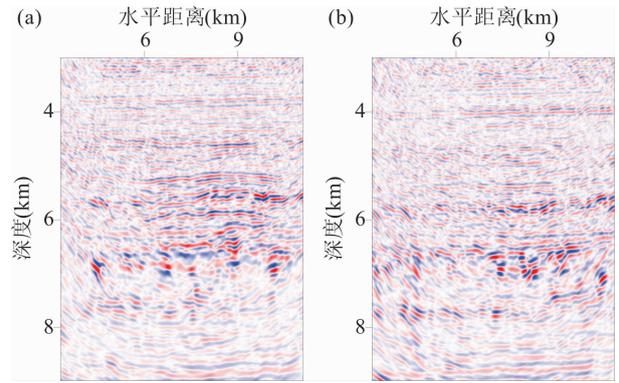


图10 基于绕射波的各向异性 qP 波逆时偏移剖面

Fig. 10 Anisotropic reverse time migration profile of qP wave with diffraction wave
(a)—crossline-450 测线; (b)—crossline-650 测线
(a)—crossline-450; (b)—crossline-650

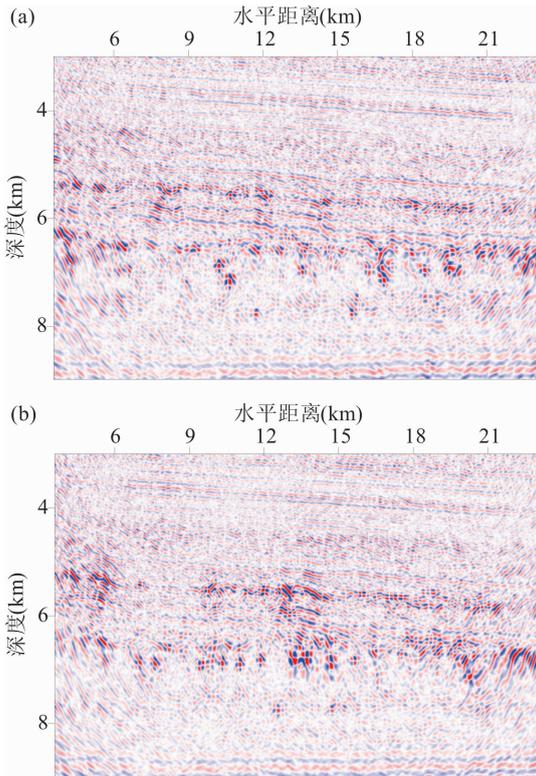


图9 基于绕射波的各向异性 qP 波逆时偏移剖面

Fig. 9 Anisotropic reverse time migration profile of qP wave with diffraction wave
(a)—inline-250 测线; (b)—inline-300 测线
(a)—inline-250; (b)—inline-300

面,图 10 给出了两条不同 crossline 测线的偏移成像剖面。其中,图 9 给出的 inline 测线位置与图 7 相同,图 10 给出的 crossline 测线位置与图 8 相同。由绕射波成像剖面可以更加清晰的看到该靶区发育大量缝洞体,对比反射波的偏移剖面,进一步验证了本文各向异性 qP 波逆时偏移方法对于复杂碳酸盐岩储层是一种实用有效的高精度成像方法。

4 结论

(1)各向异性逆时偏移技术是一种有效的复杂碳酸盐岩储层高精度成像方法,通过利用纯 qP 波方程,该方法可以实现对复杂构造进行高精度成像。与传统各向异性逆时偏移方法相比,本文方法不受伪横波的干扰,纵横波间的串扰假象可以被消除。此外,本文采用的方程形式简单,其计算量和存储量是传统各向异性逆时偏移方法的一半,计算效率高。再者,本文方法能够适用于 $\epsilon < \delta$ 的介质,稳定性好。

(2)基于实际地质资料,建立了碳酸盐岩缝洞体模型,通过对该模型的地震波数值模拟可以看出,本文提出的纯 qP 波方程能够正确描述地震波在各向异性介质中的传播规律,此外偏移试算结果也表明了本文的各向异性逆时偏移技术可以对碳酸盐岩储层内的缝洞体进行有效的成像,缝洞位置及边界刻画清晰。通过对实际地震资料进行偏移成像,进一步验证了本文方法在实际碳酸盐岩储层高精度成像中的实用性。

(3)本文通过数值算例及典型碳酸盐岩靶区实际资料的成像处理,验证了各向异性逆时偏移成像技术对复杂碳酸盐岩储层勘探的有效性和优越性,为我国碳酸盐岩油气储层精细勘探提供了良好的理论依据和技术支撑。

References

- Berenger Jean-Pierre. 1994. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic wave. *Journal of Computational Physics*, 114(2): 185~200.
- Chang Wenfong, McMechan George A. 1986. Reverse-time migration of offset vertical seismic profiling data using the

- excitation-time imaging condition. *Geophysics*, 51(1): 67~84.
- Clairbout Jon F. 1971. Toward a unified theory of reflector mapping. *Geophysics*, 36(3), 467~481.
- Dai Lei, Qiu Qinglun, Li Xinhe, Li Zhongming, Wang Chao, Yuan Qingsong. 2020. Application of 3D high-precision seismic technology of shale gas exploration in Zhongmu block. *Petroleum Geology and Engineering*, 34(02): 44~48+53 (in Chinese with English abstract).
- Du Jinhu, Zou Caineng, Xu Chunchun, et al. 2014. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan basin. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 267~277 (in Chinese with English abstract).
- Gao Houqiang, Xu Ying, Shao Wenchao, Mu Jie, Jiang Bo, Chen Zhe. 2017. Application of reverse-time migration technology in imaging of fractures and cavities in carbonate reservoirs. *China Petroleum Exploration*, 22(1): 99~105 (in Chinese with English abstract).
- GuBingluo, Liu Youshan, Ma Xiaona, Li Zhiyuan, Liang Guanghe. 2015. A modified excitation amplitude imaging condition for prestack reverse time migration. *Exploration Geophysics*, 46(4): 359~370.
- Guo Ying, Wang Yuechuan, Wei Ajuan, Wu Haoming, Ye Tao, Gao Kunshun, Zeng Jinchang. 2017. Characteristics and controlling factors of buried-hill inner volcanic reservoir: an example from the Cretaceous in Qinhuangdao 30A Area, offshore Bohai Sea, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(2): 343~355 (in Chinese with English abstract).
- Gong Honglin, Yuan Gang, Tian Yancan, et al. 2012. Accurate imaging way of carbonate fracture-cave type's reservoir in Tazhong. *Progress in Geophysics*, 27(2): 0555~0561 (in Chinese with English abstract).
- Kaelin Bruno, Guitton Antoine. 2006. Imaging condition for reverse time migration. 76th Annual International Meeting and Exposition, SEG, Expanded Abstracts, 2594~2598.
- Li Yang, Kang Zhijiang, Xue Zhaojie, Zheng Songqing. 2018. Theories and practices of carbonate reservoirs development in China. *Petroleum Exploration & Development*, 45(4): 669~678 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhenchun, Zhou Liying, Huang Jianping, Xu Kai, Li Qingyang. 2017. Application of least square reverse time migration in the imaging of fractured-type carbonate reservoirs. *Progress in Geophysics*, 32(2): 664~671 (in Chinese with English abstract).
- Lu Xinbian, Hu Wenge, Wang Yan, et al. 2015. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim basin. *Oil & Gas Geology*, 36(3): 347~355 (in Chinese with English abstract).
- Jia Chengzao. 1997. *Tectonic Characteristics and Oil and Gas in the Tarim Basin, China*. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Jin Yanlin, Qin Fei. 2019. Analyzing of correspondences between the weak seismic reflection characteristics and reservoir of Tahe Fault solution reservoir. *Petrochemical Industry Technology*, 10: 156~157 (in Chinese with English abstract).
- Ma Naibai, Jin Shenglin, Yang Ruizhao, Meng Lingbin, Wang Li, Hu Yongzhen. 2019. Seismic response characteristics and identification of fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim basin. *Oil Geophysical Prospecting*, 54(2): 398~403 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xinhua, Yang Yu, Wen Long, Luo Bing. 2019. Distribution and exploration direction of medium-and large-sized marine carbonate gas fields in Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration & Development*, 46(1): 1~13.
- Meza-Fajardo Kristel C., Papageorgiou Apostolos S. 2008. A nonconvolutional, split-filed, perfectly matched layer for wave propagation in isotropic and anisotropic elastic media; stability analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(4): 1811~1836.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. 2016. *National Oil and Gas Mineral Reserves (2015)*. Beijing: MLR of the People's Republic of China (in Chinese).
- Qi Lixin, Yun Lu. 2010. Development characteristics and maincontrolling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe oilfield. *Oil & Gas Geology*, 31(1): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Shen Anjiang, Chen Yana, Meng Shaoxing, Zheng Jianfeng, Qiao Zhanfeng, Ni Xinfeng, Zhang Jianyong, Wu Xingning. 2019. The research progress of marine carbonate reservoirs in China and its significance for oil and gas exploration. *Marine Origin Petroleum Geology*, 24(04): 1~14 (in Chinese with English abstract).
- Thomsen Leon. 1986. Weak elastic anisotropy. *Geophysics*, 51(10): 1954~1966.
- Wang Zhen, Wen Huan, Deng Guangxiao, Ding Wei, Wang Xin. 2019. Fault-karst characterization technology in the Tahe Oilfield, China. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 58(1): 149~154 (in Chinese with English abstract).
- Wu Tao, Hu Jinkuan, Zhou Xinghai, Shi Fengfeng, Ye Qiuyan, Li Chenghai, Xu Zhenwang. 2017. Application of reverse-time migration technique in imaging of Hejian buried-hill inside. *China Petroleum Exploration*, 22(2): 110~115 (in Chinese with English abstract).
- Xu Sheng, Zhou Hongbo. 2014. Accurate simulations of pure quasi-P-waves in complex anisotropic media. *Geophysics*, 79(6): 341~348.
- Xue Yong'an, Li Huiyong. 2018. Large condensate gas filed in deep Archean metamorphic buried hill in Bohai Sea: discovery and geological significance. *China Offshore Oil and Gas*, 30(3): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Yang Haifeng, Niu Chengmin, Liu Yongjun, Gao Yangfei, Zhang Zhongqiao, Xie Xiang, Wang Liliang. 2020. Discovery and key exploration technology of KL6-1 large lithologic oil reservoir of Neogene in the Bohai basin. *China Petroleum Exploration*, 25(3): 24~32 (in Chinese with English abstract).
- Yang Haijun, Li Shiyin, Deng Xingliang, Yin Guoqing, Zhang Chengsen, Yang Fengying. 2020. Key technologies for the exploration and development of deep fractured-vuggy carbonate condensate gas reservoirs: a case study of the Tazhong I gas field in the Tarim basin. *Natural Gas Industry*, 40(2): 83~89 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jiangfeng, Liu Dingjin, Zhu Wenbin, Guan Da, Hu Zhongping, Wang Ruzhen, et al. 2014. Technique and application of reverse time migration of fractured-vuggy carbonate reservoir. *Geological Journal of China Universities*, 20(2): 303~308 (in Chinese with English abstract).
- Ye Yueming, Li Zhengchun, Zhuang Xijin, et al. 2011. Prestack one-way wave equationdepth migration in carbonate area. *Oil Geophysical Prospecting*, 46(5): 715~719 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Yansen. 2018. The review of the diffraction wave field about fractured-vuggy carbonate reservoir. Master's thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- Zhang Zhen, Zhang Xintao, Xu Chunqiang, Wu Qingxun, Li Long. 2019. Tectonic evolution and its controlling on hydrocarbon accumulation of 428 Buried Hill in Bohai Sea. *Journal of Northeast Petroleum University*, 43(4): 69~77 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Hongbo, Zhang Guanquan, Bloor Robert. 2006. An anisotropic acoustic wave equation for VTI media. 68th Annual Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, H033.

参 考 文 献

- 代磊, 邱庆伦, 李昕荷, 李中明, 汪超, 袁青松. 2020. 高精度三维地震技术在中牟区块页岩气勘探中的应用. *石油地质与工程*, 34(02): 44~48+53.
- 杜金虎, 邹才能, 徐春春, 等. 2014. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新. *石油勘探与开发*, 41(3): 267~277.

高厚强, 徐颖, 邵文潮, 穆洁, 蒋波, 陈哲. 2017. 逆时偏移技术在碳酸盐岩缝洞体成像中的应用. 中国石油勘探, 22(1): 99~105.

郭颖, 王粤川, 韦阿娟, 吴昊明, 叶涛, 高坤顺, 曾金昌. 2017. 潜山内幕火山岩储层特征及控制因素. 沉积学报, 35(2): 343~355.

龚洪林, 袁刚, 田彦灿, 等. 2012. 塔中碳酸盐岩缝洞型储集体精细成像. 地球物理学进展, 27(2): 555~561.

李阳, 康志江, 薛兆杰, 郑松青. 2018. 中国碳酸盐岩油气藏开发理论与实践. 石油勘探与开发, 45(4): 669~678.

李振春, 周丽颖, 黄建平, 徐凯, 李庆阳. 2017. 最小二乘逆时偏移在碳酸盐岩缝洞型储层成像中的应用. 地球物理学进展, 32(2): 664~671.

鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 2015. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践. 石油与天然气地质, 36(3): 347~355.

贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社.

金燕林, 秦飞. 2019. 塔河断溶体油藏地震弱反射特征及储层对应性分析. 石化技术, 10: 156~157.

马乃拜, 金圣林, 杨瑞召, 孟令彬, 王力, 胡永葵. 2019. 塔里木盆地顺北地区断溶体地震反射特征与识别. 石油地球物理勘探, 54(2): 398~403.

马新华, 杨雨, 文龙, 罗冰. 2019. 四川盆地海相碳酸盐岩大中型气田分布规律及勘探方向. 石油勘探与开发, 46(1): 1~13.

漆立新, 云露. 2010. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶发育特征与主控因素. 石油与天然气地质, 31(1): 1~12.

沈安江, 陈娅娜, 蒙绍兴, 郑剑锋, 乔占峰, 倪新锋, 张建勇, 吴兴

宁. 2019. 中国海相碳酸盐岩储层研究进展及油气勘探意义. 海相油气地质, 24(04): 1~14.

王震, 文欢, 邓光校, 丁维, 王鑫. 2019. 塔河油田碳酸盐岩断溶体刻画技术研究与应用. 石油物探, 58(1): 149~154.

吴涛, 胡金宽, 周兴海, 时逢峰, 叶秋焱, 李成海, 徐振旺. 2017. 逆时偏移技术在河间潜山内幕成像中的应用. 中国石油勘探, 22(2): 110~115.

薛永安, 李慧勇. 渤海海域深层太古界变质岩潜山大型凝析气田的发现及其地质意义. 2018. 中国海上油气, 30(3): 1~9.

杨海风, 牛成名, 柳永军, 高雁飞, 张中巧, 谢祥, 王利良. 2020. 渤海垦利6-1新近系大型岩性油藏勘探发现及关键技术. 中国石油勘探, 25(3): 24~32.

杨海军, 李世银, 邓兴梁, 尹国庆, 张承森, 杨凤英. 2020. 深层缝洞型碳酸盐岩凝析气藏勘探开发关键技术—以塔里木盆地塔中I号气田为例. 天然气工业, 40(02): 83~89.

杨江峰, 刘定进, 朱文斌, 关达, 胡中平, 王汝珍, 等. 2014. 逆时偏移技术在碳酸盐岩缝洞储层成像中应用. 高校地质学报, 20(2): 303~308.

叶月明, 李振春, 庄锡进, 等. 2011. 碳酸盐岩区单程波方程保幅叠前深度偏移. 石油地球物理勘探, 46(5): 715~719.

翟焱森. 2018. 碳酸盐岩缝洞型储层绕射波成像研究. 中国地质大学(北京)硕士学位论文.

张震, 张新涛, 徐春强, 吴庆勋, 李龙. 2019. 渤海海域428潜山构造演化及对油气成藏的控制. 东北石油大学学报, 43(4): 69~77.

中华人民共和国国土资源部. 2016. 全国油气矿产储量通报(2015年). 北京: 中华人民共和国国土资源部.

Study on high-precision imaging method of carbonate reservoir

GU Bingluo¹⁾, HAN Jianguang^{* 2)}, CHEN Jun³⁾, HUANG Jianping¹⁾, LI Zhenchun¹⁾

1) China University of Petroleum (East China), Qingdao, 266580;

2) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

3) Shandong Institute of Geological Sciences, Shandong Jinan, 250013

* Corresponding author: hanjianguang613@163.com

Abstract

Carbonate oil and gas reservoirs occupy an important position in the world's oil and gas reservoirs. The quantity of oil and gas in the carbonate reservoir accounts for about 70% of the total quantity of oil and gas in the world. The characteristics of carbonate reservoir are deep burial, strong heterogeneity and complex structure. It is an urgent issue to obtain the exact location and structural characteristics of carbonate reservoir in oil and gas exploration. Accurate seismic wave theory is applied in prestack reverse time migration, which can image any complex structure in high precision theoretically. To address the difficulty of carbonate reservoir imaging, the anisotropic prestack reverse time migration is studied and applied to the exploration of carbonate reservoir in this paper. First, the pure qP wave equation in anisotropic media is derived by using the accurate dispersion relation. The pure qP wave in anisotropic media is then simulated by using the high-precision finite difference method, and the pure qP wave is imaged using the anisotropic prestack reverse time migration method. Based on the actual geological conditions of typical carbonate reservoirs, a geophysical model of carbonate rock is established, which is close to the real geological conditions. The numerical results of the above model show that the anisotropic prestack reverse time migration is an effective exploration technique for carbonate reservoirs. The field data results further verify the important role of the anisotropic prestack reverse time migration in carbonate reservoir exploration.

Key words: carbonate reservoir; seismic exploration; anisotropic; numerical simulation; reverse time migration