

基于随机各向同性背景的粘弹性单斜介质二维三分量正演模拟

唐启军¹, 韩立国¹, 王恩利^{1,2}, 刘前坤^{1,2}

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026;

2. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃 兰州 730020)

摘要:将 Von Karman 型的随机各向同性背景引入粘弹性单斜各向异性波动方程, 并应用交错网格技术进行模拟。结果表明在这种非均匀复合介质中波场特性既体现了规律性较强的粘弹性单斜各向异性性质, 又体现了介质的随机性特点。具体表现为: 胀缩、剪切品质因子造成了振幅的显著衰减; 相同方差条件下, 尺度越小随机介质干扰强度越大。为进一步研究裂隙型油气藏基本特征提供了有益的参考。

关键词: 随机介质; 粘弹性单斜介质; 尺度; 方差; 油气藏

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2009)01-0035-05

2-D Three-Component Seismic Modeling for Viscoelastic Monoclinic Media Based on Background of Random Isotropic Media

TANG Qi-jun¹, HAN Li-guo¹, WANG En-li^{1,2}, LIU Qian-kun^{1,2}

(1. College of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Northwest Institute (NWGI), Lanzhou 730020, China)

Abstract: The random isotropic background of Von Kraman pattern is introduced into wave equations of viscoelastic monoclinic anisotropic media. The snap-shots and synthetic seismograms in this nonhomogeneous complex media are simulated by staggered grid finite difference. The result shows following characteristics; wave field in this complex media embodies the characteristics of both monoclinic media and random media; dilatational and shear quality factors attenuate the amplitude obviously. In detail, the scale length became smaller, the disturbance caused by random media became the stronger for the case of same variance. This work should be helpful to understand the basic characteristics of the fracture oil reservoirs.

Key words: Random media; Viscoelastic monoclinic media; Scale; Variance; Oil reservoir

0 前言

随着全球裂隙型油气藏勘探工作的开展, 有必要对该类油气藏基本特征进行深入研究。裂隙型单斜介质与该类油气藏有着天然的联系, 且参数体系较为完备, 是理论研究工作的一个绝好的样本。

地层中由于定向应力而形成的自然裂隙常表现为定向排列、相互平行的垂直裂隙系统, 使得裂隙型储集层中弹性波的传播表现为方位各向异性。若各

向同性介质中的两组裂隙系统是斜交的, 介质便表现为等效的单斜各向异性^[1-3]。同时, 地下介质在水平及垂直方向上都具有很强的非均匀性, 如碳酸盐岩裂缝型油气藏。为能够更加准确地描述、探测和定位在空间随机分布的勘探目标, 学者们提出了随机介质的概念并建立了相关的波动理论基础, 如 Ikelle 等、Ergintav 和 Canitez 分别以指数型及高斯

收稿日期: 2008-11-03

作者简介: 唐启军(1977-), 男(汉族), 主要从事地震数据处理及正反演技术研究。

型自相关函数为例进行了二维随机介质模型的正演模拟^[4-5]; Mueller 和 Shapiro 利用散射理论中的常用技术,构造了初始平面波在随机声波介质中传播的格林函数,并以通过 Rytov 近似得到的平均对数波场属性来描述地震记录上的初至^[6]; Thomas 通过并行算法对 3-D 粘弹性随机各向同性介质进行正演模拟^[7],等等。国内如姚姚、奚先对随机介质正演模拟与波场特征分析方面也做了大量有价值的工作^[8-11]。

受到各向异性理论与随机介质理论的启发,本文以高阶交错网格为工具,应用一阶速度-应力方程,对随机各向同性背景下的粘弹性单斜介质理论模型进行 2-D 三分量地震记录模拟,分析介质的随机性与粘弹性各向异性对波场与地震记录的影响,为进一步认识裂隙型油气藏基本特征、支持勘探开发工作提供参考。

1 基础理论

1.1 单斜各向异性与波动方程 本文给出的单斜介质理论模型如图 1 所示。其中 α 为两组裂隙面法线方向的交角,图中有一组裂隙平行于 x_2 轴^[1]。该介质在均匀各向同性介质背景下,有两条垂直于层面但是又互不垂直的裂隙^[1]。在裂隙作用下弹性波在该介质中传播发生横波分裂现象,且不同的裂隙属性产生的波场特征不同^[2-3]。

波动方程是研究介质波场的基础。下面给出粘弹性单斜介质的二维三分量方程^[13]。假设“ x_2 ”作为第三维,可以在忽略体力的情况下应用 Martinez 采用的 3-D 速度-应力方程得到 2-D 三分量方程^[1](严格地说,在随机各向同性背景下,介质已为非均匀,弹性参数 c_{kl} 变成空间变量,但考虑到限于研究小尺度情况: $l=1$ m,与波长相比仍近似于准均匀,故取 c_{kl} 为常数以简化计算):

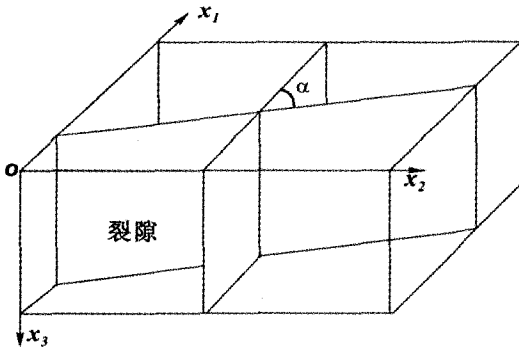


图 1 单斜各向异性介质模型

Fig. 1 Model of monoclinic anisotropic media.

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial v_1}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} \\ \rho \frac{\partial v_2}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_3} \\ \rho \frac{\partial v_3}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial t} &= c_{11} \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + c_{13} \frac{\partial v_3}{\partial x_3} + c_{16} \frac{\partial v_2}{\partial x_1} + \bar{k}e_1 + 2c_{55}e_2 \\ \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial t} &= c_{13} \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + c_{33} \frac{\partial v_3}{\partial x_3} + c_{36} \frac{\partial v_2}{\partial x_1} + \bar{k}e_1 - 2c_{55}e_2 \\ \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial t} &= c_{16} \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + c_{36} \frac{\partial v_3}{\partial x_3} + c_{66} \frac{\partial v_2}{\partial x_1} + c_{66}e_5 \\ \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial t} &= c_{55} \left(\frac{\partial v_3}{\partial x_1} + \frac{\partial v_1}{\partial x_3} \right) + c_{45} \frac{\partial v_2}{\partial x_3} + c_{55}e_3 \\ \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial t} &= c_{45} \left(\frac{\partial v_3}{\partial x_1} + \frac{\partial v_1}{\partial x_3} \right) + c_{44} \frac{\partial v_2}{\partial x_3} + c_{44}e_4 \end{aligned} \quad (2)$$

其中, ρ 是密度; t 是时间; σ_{ij} 、 v_i 和 x_i ($i, j=1, 2, 3$) 分别是应力分量、质点速度分量和空间坐标; c_{kl} ($k, l=1, 2, \dots, 6$) 为弹性参数,其计算可以参考文献^[2]。

e_1, e_2, e_3 为记忆变量,其偏微分表达式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial e_1}{\partial t} &= \frac{1}{\tau_e^{(1)}} \left[\left(\frac{\tau_e^{(1)}}{\tau_e^{(1)}} - 1 \right) \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right) - e_1 \right] \\ \frac{\partial e_2}{\partial t} &= \frac{1}{2\tau_e^{(2)}} \left[\left(\frac{\tau_e^{(2)}}{\tau_e^{(2)}} - 1 \right) \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} - \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right) - 2e_2 \right] \\ \frac{\partial e_3}{\partial t} &= \frac{1}{\tau_e^{(2)}} \left[\left(\frac{\tau_e^{(2)}}{\tau_e^{(2)}} - 1 \right) \left(\frac{\partial v_3}{\partial x_1} + \frac{\partial v_1}{\partial x_3} \right) - e_3 \right] \\ \frac{\partial e_4}{\partial t} &= \frac{1}{\tau_e^{(2)}} \left[\left(\frac{\tau_e^{(2)}}{\tau_e^{(2)}} - 1 \right) \frac{\partial v_2}{\partial x_3} - e_4 \right] \\ \frac{\partial e_5}{\partial t} &= \frac{1}{\tau_e^{(2)}} \left[\left(\frac{\tau_e^{(2)}}{\tau_e^{(2)}} - 1 \right) \frac{\partial v_2}{\partial x_1} - e_5 \right] \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\tau_e^{(v)} = \frac{\tau_0}{Q_{0v} (\sqrt{Q_{0v}^2 + 1} + 1)} \quad (4)$$

$$\tau_e^{(v)} = \frac{\tau_0}{Q_{0v} (\sqrt{Q_{0v}^2 + 1} - 1)} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \tau_0 &= 2\pi f, \quad k\% = \epsilon\% - c_{55} \\ \epsilon\% &= (c_{11} + c_{33})/2 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, f 为主频; v ($v=1, 2$) 依广义 Zener 模型,当 $v=1$ 时代表膨胀非弹性变形, $v=2$ 时代表剪切非弹性变形; Q_{0v} 为 v 机制下的品质因数; τ_0 为松弛时间; $\tau_e^{(v)}$ 、 $\tau_e^{(v)}$ 代表 v 机制下的粘弹性和弹性松弛时间。

1.2 随机介质模型的产生

随机介质模型往往由以下参数进行描述:空间自相关函数、相关长度、均值及标准差、粗糙因子、纵波速度与纵、横波速度比等。地震勘探中,随机介质

模型的自相关函数通常选择高斯型、指数型及 Von Karman 型函数。本文针对的是 Von Karman 型椭圆自相关函数条件下的随机介质,首先给出 Von Karman 型椭圆自相关函数表述式:

$$\varphi_K(x, z) = \epsilon^2 \cdot \frac{2^{1-n}}{\Gamma(n)} \left(\sqrt{\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2}} \right)^n \cdot K_n \left(\sqrt{\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2}} \right) \quad (7)$$

其中: a, c 分别是自相关函数对应的随机介质在 x, z 方向上的自相关长度; $\Gamma(n)$ 为 N 阶 gamma 函数; ϵ 为标准差; K_n 是 n 阶的第三类贝塞尔函数, $0 < n < 1$ 。

关于随机介质模型的产生,可以参考 Thomas 给出的论述^[7]。此外,本文还沿用了他采用的砂岩型随机模型参数,即在给定纵波速度 v_p 的前提下,横波速度 v_s 、介质密度 ρ 分别满足下面关系:

$$\begin{aligned} v_s &= -314.59 + 0.61 \times v_p \\ \rho &= 1498.0 + 0.22 \times v_p \end{aligned} \quad (8)$$

需要强调的是,本文仅对各向同性背景介质进行讨论,对有关裂隙参数,如裂隙分布密度、方位角以及纵横比,不做分析。

2 正演模拟

正演模拟是研究介质波场的重要手段。采用式(1)、(2)的二维三分量波动方程进行多分量记录模拟。在算法上,采用方便、快捷且精度较高的交错网格有限差分算法,结合 Cerjan 等的吸收边界条件^[12]对无限介质中的波场快照和水平、起伏地表地震记录分别进行模拟。

2.1 无限介质快照模拟

介质的随机性由许多参数决定,限于篇幅不可能针对每个参数的变化都进行快照模拟分析。本文仅对相同方差、粗糙因子条件下,不同尺度的模型进行快照分析。设定背景纵波速度 v_s 为 3 000 m/s;横波速度 v_p 与介质密度 ρ 满足式(8)关系;标准差 σ 为 1%;粗糙因子 r 为 0.5;尺度 l 分别为 50 m、20 m 和 1 m;两条裂隙参数:裂隙密度 ϵ 均为 0.1,方位角 φ 分别为 $0^\circ, 30^\circ$;纵横比 d 均为 0.000 1;裂隙填充物均为水,其纵、横波速度分别为 1 500 m/s、0 m/s。以 30 Hz 的雷克子波为爆炸震源,炮点位于介质中心点处,在 $250 \times 250, \Delta x = \Delta z = 5$ m 的网格区域进行模拟。模型的基本参数见表 1。经计算得到快照结果(图 2)。

由图 2 可见,方差导致了介质传播特性的全局性改变。方差为 1% 时,介质的非均匀性较弱,波场中高频干扰很弱,qP、qS 波波前基本呈现规则的椭

圆状,横波分裂现象也较为清楚;当方差变为较高的 5% 时,不仅高频干扰的能量得到了增强,而且各类波波前形状变得凹凸不平,横波分裂现象非常不规则。可以说介质的非均匀性导致了各向异性性质的不稳定。

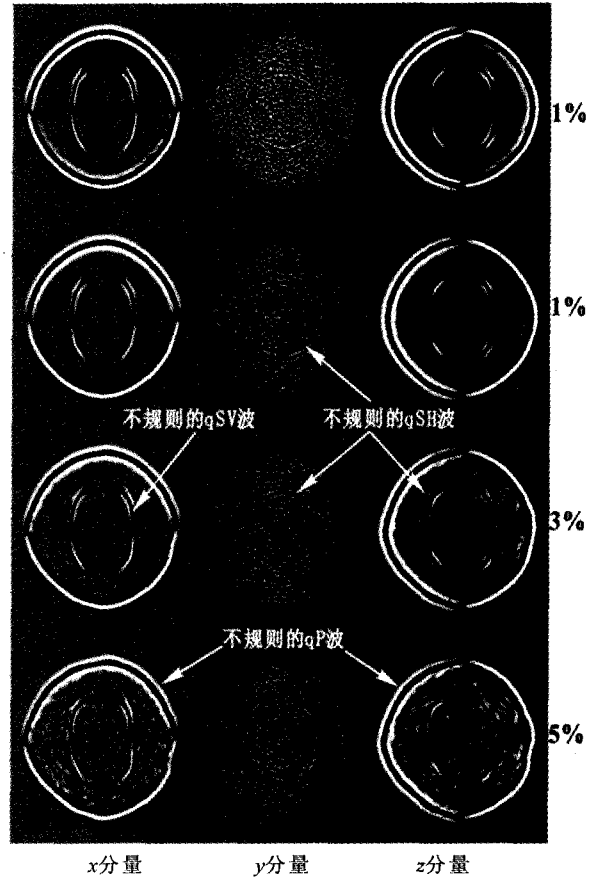


图 2 随机各向同性背景的单斜介质(含水裂隙)波场快照(其中 50 m、20 m、1 m 表示非均匀尺度,图中所示 y 分量是原始 y 分量数据放大 5.0×10^{14} 倍的结果。需要注意的是,第一个 1% 对应的弹性条件下的波场快照,而之后的 1%~5% 对应的粘弹性条件下的快照)

Fig. 2 Snap-shots of particle velocity in monoclinic media (water-saturated crack) with background of random isotropic media.

表 1 快照模型参数

介 质	$v_p /$ [km · s ⁻¹]	$v_s /$ [km · s ⁻¹]	$\rho /$ [g · cm ⁻³]	ϵ	d	$\varphi / ^\circ$	$\sigma / \%$	l /m	r
背景	3.0							1~5	50 0.5
裂隙 1	1.5	0	1.0	0.1	0.000 1	0			
裂隙 2	1.5	0	1.0	0.1	0.000 1	30			

不同类型的波所受介质扰动的影响存在差异。能量较强的 qP 波虽然受到介质扰动影响非常严

重,但是即使在方差取值较大时(5%)可以清晰的辨别其波前面所在位置与边界;而此时能量较弱的S波波前已经发生了严重偏离,其边界更难以准确分辨,如 z 分量。

对比弹性、粘弹性条件下,方差为1%时的快照可见,粘滞因子的作用使得波场中各类波振幅发生全面衰减,高频干扰被大幅度衰减,波前面也光滑得多。

表2 地面地震记录模型参数

介质	$v_p/[\text{km} \cdot \text{s}^{-1}]$	$v_s/[\text{km} \cdot \text{s}^{-1}]$	$\rho/[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	ϵ	d	$\varphi/^\circ$	$\sigma/\%$	l/m	r	Q_p	Q_s
第一层	3.0						1~5%	50	0.5	60	30
裂隙1	1.5	0	1.0	0.1	0.0001	0					
裂隙2	1.5	0	1.0	0.1	0.0001	30					
第二层	3.8	2.5	2.5								

2.2 地面地震记录模拟

在地面地震记录模拟过程中,在 250×400 、 $\Delta x = \Delta z = 5 \text{ m}$ 的网格区域内设计了两组模型阶梯型模型,见图3。以30 Hz的雷克子波为爆炸震源,炮点位置如图3中星形所示。其中反射界面到地表距离 h 为700 m(界面1)和450 m(界面2),下层厚度均为250 m。上层介质为随机各向同性背景的单斜层,背景纵波速度3 000 m/s,标准差为1%,尺度为1 m,粗糙因子为0.5;两条裂隙参数:裂隙密度均为0.1,方位角分别为 0° 、 30° ,纵横比为0.0001;填充物均为水,其纵、横波速度分别为1 500 m/s、0 m/s。下层为均匀各向同性层,纵波速度3 800 m/s,横波速度2 500 m/s,密度为 2.5 g/cm^3 。在“地面”以上,应用吸收边界条件进行处理。

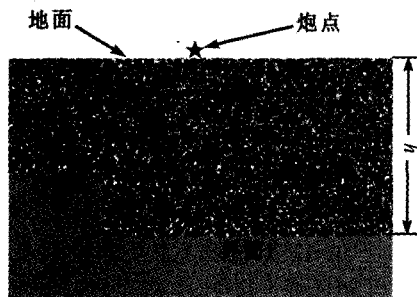


图3 正演模型

Fig. 3 Forward model.

对比图4所示记录并分析相应的模拟快照,可以看出:爆炸震源同时产生能量较强的直达波;裂隙发育引起的各向异性性质,在遇到反射界面时将会复杂化。经由阶梯模型界面反射、绕射,分别得到反射波 R_1qP 、 R_1qSV 与绕射波 F_1qP 、 F_2qP 、 F_2qSV ,如图4(a)所示。由方差引起介质的随机性使图像产生了大面积的散射区域,并对记录产生严重干扰,但主同相轴位置与均匀介质中情况基本吻合;但,由快照模拟可知,随着方差的继续增大,干扰信号将对记录造成颠覆性的影响,给同相轴的识别带来困难。

粘滞因子的存在,使全波场数据振幅发生强烈衰减,见图4(b),尤其是能量较弱的反射转换横波,能量损失殆尽。

3 结论

本文针对基于随机各向同性背景的裂隙型粘弹性单斜介质,运用交错网格有限差分进行模拟,所得波场既体现了粘弹性单斜介质的各向异性特征,又体现了理论随机介质的特性。该理论模型中:

(1) 背景介质的参数分布对单斜介质中波场传播特性起主导作用。

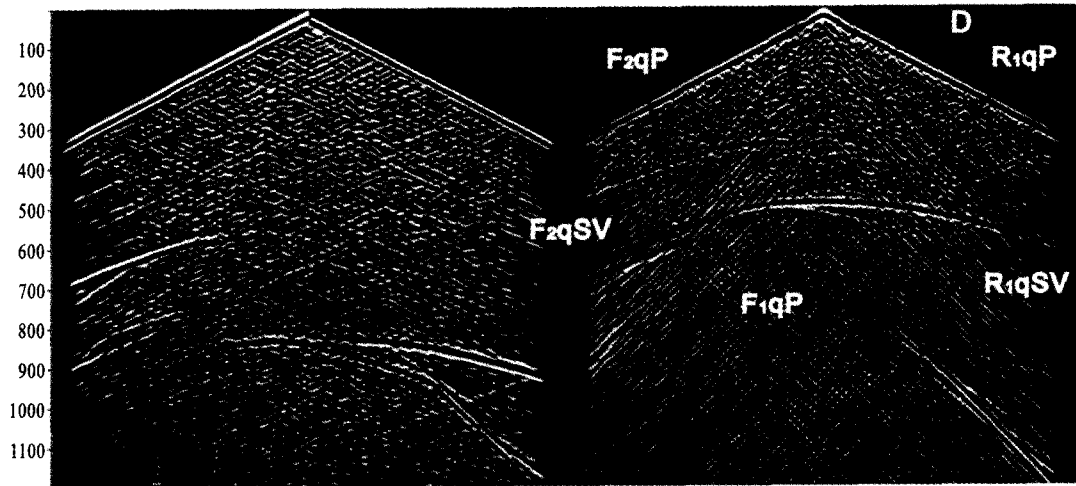
(2) 方差是影响介质中波场传播特性的重要因素。当方差较小时,在全场中产生微弱的高频干扰;当方差较大时,整个波场都将发生全局性的改变。可以想像当介质中存在复杂构造时,常规的对波场与记录的确定性分析手段将更加难以适应。

(3) 粘滞因子的引入造成了波场与记录数据特别是反射横波振幅的衰减,由此产生的数据假象增加了后续处理、解释工作的难度。

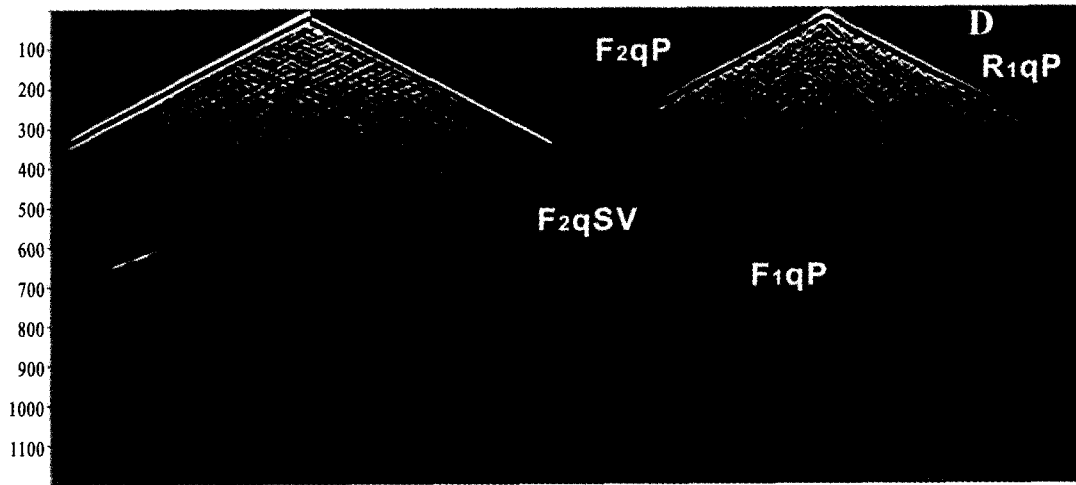
以上正演模拟工作,为我们更进一步研究实际地下介质,特别是裂隙型油气藏介质中波场的基本传播特征与地震响应特征提供了有益的参考。

[参考文献]

- [1] Martinez R J, Ortega A A, McMechan G A. 3-D seismic modeling for cracked media: shear-wave splitting at zero-offset[J]. *Geophysics*, 2000, 65 (1): 211-221.
- [2] 王德利,何樵登. 裂隙型单斜介质中弹性系数的计算及波的传播特性研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2002, 32(2): 181-186.
- [3] 王德利,何樵登,韩立国. 裂隙型单斜介质中多方位地面三分量记录模拟[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(2): 386-393.
- [4] Ikelle L, Yung S K, Daube F. 2-D random media with ellipsoidal autocorrelation function[J]. *Geophysics*, 1993, 58 (9): 1359-1372.
- [5] Ergintav S, Canitez N. Modeling of multi-scale media in dis-



(a) 弹性介质记录



(b) 粘弹性介质记录

注: 图中标注字母 D:直达波; R:反射波; F:绕射; qP:准纵波; qSV:准横波

图 4 基于随机各向同性介质的弹性、粘弹性单斜介质正演模拟(方差为 5%, 尺度为 1 m)

Fig. 4 modeling for elastic and viscoelastic monoclinic media based on random isotropic media.

crete form[J]. Journal of seismic exploration, 1997, 6(1): 77-96.

[6] M Shapiro S A. Green's function construction for 2D and 3D elastic random media[J]. Expanded of 69th Internat. Mtg. SEG, 1999; 1840-1844.

[7] Thomas B, Parallel. 3-D viscoelastic finite difference seismic modeling[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28: 887-899.

[8] 奚先, 姚姚. 二维随机介质及波动方程正演模拟[J]. 石油地球物理勘探. 2001, 36(5): 546-552.

[9] 奚先, 姚姚. 二维弹性随机介质中的波场特征[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(6): 679-685.

[10] 奚先, 姚姚. 二维弹性随机介质中的波场特征[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 147-154.

[11] 姚姚, 奚先. 随机介质模型正演模拟及其地震波场分析[J]. 石油物探, 2002, 41(1): 31-36.

[12] Cerjan C, Kosloff D, Kosloff R, et. al. A non-reflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations[J]. Geophysics, 1985, 50: 705-708.

[13] Wang Enli, Han Liguo, Wang Deli. Multi-azimuth three-component surface seismic modeling for viscoelastic cracked monoclinic media[J]. Applied Geophysics, 2007, 4(01): 16-24.

[14] 王德利, 雍运动, 韩立国, 等. 三维粘弹介质地震波场有限差分并行模拟[J]. 西北地震学报, 2007, 29(1): 30-34.