

· 处理技术 ·

波动方程地震定向照明分析

裴正林^{*①②}

(①中国石油大学(北京)物探重点实验室, 北京 102249; ②北京北方林泰石油科技有限公司, 北京 100192)

裴正林. 波动方程地震定向照明分析. 石油地球物理勘探, 2008, 43(6): 645~651

摘要 本文从地震波能量理论出发, 提出了基于玻印亭矢量的地震波场方向性分解方法和地震波定向照明度计算方法。根据声波方程高精度正演模拟, 计算出声波波场的能量密度矢量和能量传播方向, 并通过角域滤波器实现对波场的方向性分解; 进而基于方向性分解后的波场, 可以计算出震源定向照明度和源一检定向照明度。数值模型试验结果表明: 该法计算精度高且速度快, 具有非常良好的实用性; 定向照明可以用于定量分析地震采集参数对成像质量的影响; 目标层 CRP 点照明角分布可用于地震分辨率分析。

关键词 波动方程 地震 定向照明 正演模拟

1 引言

地震照明分析是复杂构造、复杂地区地震采集设计的有效手段^[1]。照明分析主要包括三个环节即地质建模、模型正演、照明分析。基于射线的地震波照明分析方法^[2~7]计算成本低, 也比较成熟。尽管基于射线理论的照明分析能够处理非规则采集以及横向速度变化模型, 但是高频近似和射线理论的本身缺陷(如射线盲区等)使得基于射线理论的照明分析在复杂目标区的精度很低^[8]。

近年来基于波动方程的地震照明分析尤其是基于单程波的地震照明分析成为研究热点, 它克服了射线照明方法的缺陷, 能适应横向强速度变化介质, 可对目标地质体进行有效的地震照明分析, 使得目标照明分析更加合理、准确。定向照明分析^[9~13]基于单程波传播算子和局部平面波分解算子(如余弦分解、小波变换分解)实现总照明和定向照明度计算。该类方法在每点的地震波场都要进行角度域分解, 计算量很大, 使得计算效率大大降低。

Ostmo 等^[14]提出了基于波动方程有限差分正演的地震照明分析方法。Luo 等^[15]对比分析了单程算子和双程算子(或全波方程)两种传播算子计算地震照明度的优缺点, 并指出与双程算子相比, 单程算子由于存在忽略散射损失、反射损失、散焦损失以

及广角反射近似等方面的不足, 所计算的地震照明度存在一定误差, 尤其在复杂区误差更大。

本文采用双程声波传播算子^[16]并基于波传播的玻印亭矢量计算地震波定向照明度, 旨在为地震波定向照明分析提供一种高精度、快速有效的计算方法。

2 波场方向性分解方法

根据弹性波本构方程以及运动方程, 可以得出能流密度与应力张量、位移(或速度)的关系^[17], 即

$$I_i = -\sigma_{ij} \partial_j u_i = -\sigma_{ij} v_i \quad (1)$$

式中 I_i ($i = x, y, z$) 为能流密度分量; σ_{ij} 为应力张量; u_i 为位移; v_i 为速度。能流密度表示单位面积上单位时间能量的传递, 其量纲是 W/m^2 。式(1)也称为玻印亭矢量(Poynting Vector)。根据式(1), 已知应力张量和质点速度, 可以计算弹性介质中波的能量密度矢量和能量传播方向。

同理, 声波的能流密度矢量可表示为

$$I_i = -\sigma_{ij} v_i = P \hat{\delta}_j v_i \quad i, j = x, y, z \quad (2)$$

式中: $\hat{\delta}$ 为 δ 函数; 应力与声压 P 之间的关系可表示为 $\sigma_{ij} = -P \hat{\delta}$ 。根据式(2), 已知声场压力和质点速度, 可以计算弹性介质中声波的能流密度矢量和能量传播方向。对于各向同性弹性介质, 能流密

*北京市北方林泰石油科技有限公司, 100192

本文于 2008 年 5 月 16 日收到, 修改稿于同年 8 月 29 日收到。

度矢量的方向与波传播的方向一致^[18]。

因此,只要确定波在某一点的能流密度各分量的值,就能确定出该点的能流密度矢量,从而确定该点的波的传播方向(或波的入射角)。因此,通过角域滤波器可以实现波场的方向性分解,即

$$u(x, z, \omega, \theta) = R(x, z, \theta)u(x, z, \omega) \quad (3)$$

式中 $R(x, z, \theta)$ 为二维定向滤波器,一般取为余弦窗函数, θ 为波的传播角。

3 波动方程地震定向照明度

3.1 震源定向照明度

根据入射波的能量和方向,第 i 个点源在二维模型空间点 (x, z) 处的定向照明度可定义为^[15]

$$D_i(x, z, \omega, \theta) = u(x, z, \omega, \theta)u(x, z, \omega, \theta) \quad (4)$$

式中 u 表示波场。

M 个点源在模型空间点 (x, z) 处的定向照明度为每个点源定向照明度的总和,即

$$D_s(x, z, \omega, \theta) = \sum_{i=1}^M D_i(x, z, \omega, \theta) \quad (5)$$

3.2 源—检定向照明度

根据震源—反射界面以及反射界面—检波器之间的互换关系,第 i 个震源与检波器对的定向双向照明度可定义为^[15]

$$D_{gs}^i(x, z, \omega, \theta_n, \theta_r) = \sqrt{D_s(x, z, \omega, \theta_s)D_g(x, z, \omega, \theta_g)} \quad (6)$$

式中: $D_s(x, z, \omega, \theta_s)$ 为震源定向照明度; $D_g(x, z, \omega, \theta_g)$ 为单一检波器源的定向照明度。

N 个源—检对在模型空间点 (x, z) 处的定向照明度为每个源—检对定向照明度的总和,即

$$D_{gs}(x, z, \omega, \theta_n, \theta_r) = \sum_{i=1}^N D_{gs}^i(x, z, \omega, \theta_n, \theta_r) \quad (7)$$

震源入射角 θ_s 和检波器源入射角 θ_g 与反射界面倾角 θ_n 和反射角(或散射角) θ_r 的关系^[12]如图1所示,其表达式为

$$\theta_r = \frac{\theta_s + \theta_g}{2} \quad (8)$$

$$\theta_n = \frac{\theta_s - \theta_g}{2}$$

其中 θ_n 为反射界面的法向 \hat{n} 与 z 轴的夹角,或者是 x 方向与反射界面之间的夹角(界面倾角)。可见定向照明不仅能分析地震波的角域照明分布,而且也能提供倾角域地震响应和反射角域地震响应^[12]。

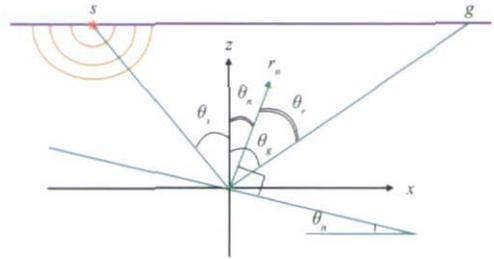


图1 震源入射角和检波器源入射角与反射界面倾角和反射角的几何关系

4 数值模型算例

4.1 波场的方向性分解

图2为均匀介质模型点源地震波传播角分布图。由图2可以看出,本文地震波传播角计算方法是正确有效的,不仅计算精度高,而且计算速度快。图3为四层速度模型声波波场方向性分解。由图3可以看出,本文地震波场方向性分解计算方法是正确的,同样具有计算精度高、速度快的特点。

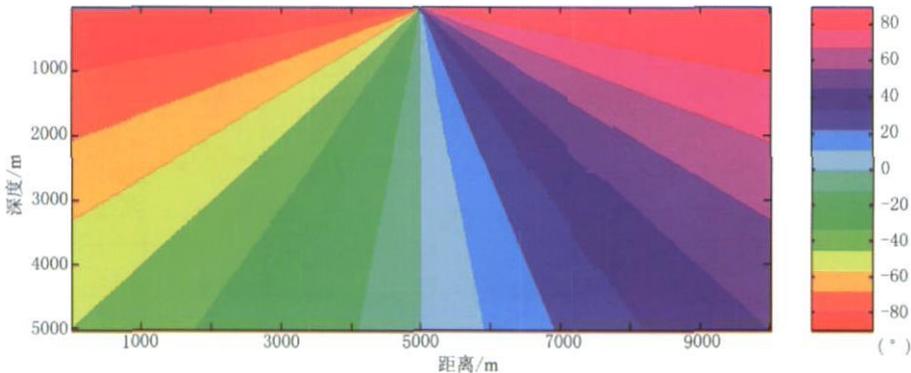


图2 均匀介质模型点源地震波传播角分布

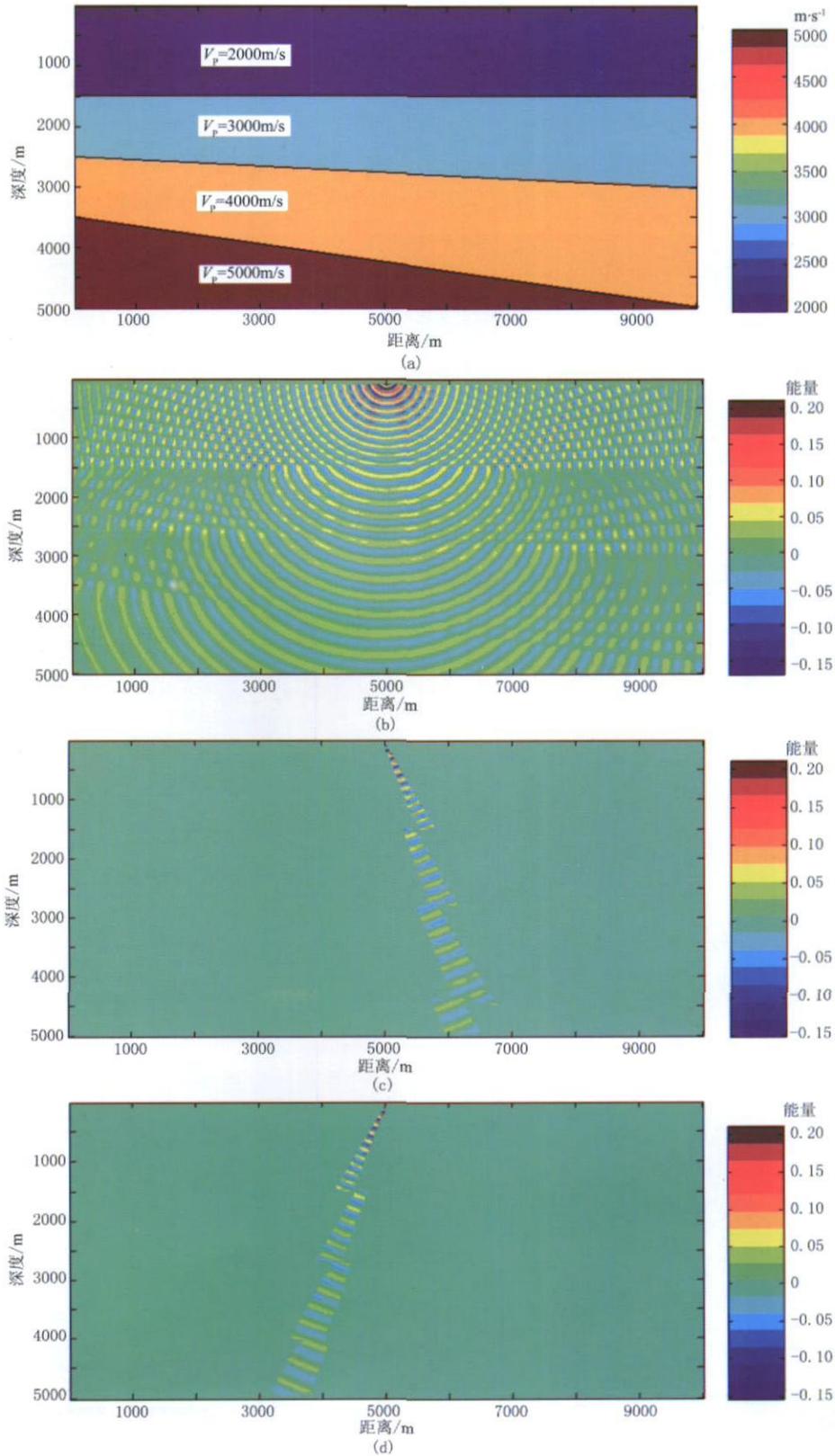


图 3 四层模型声波场方向性分解

(a) 四层速度模型; (b) 谐波点震源波场快照 ($t=2600\text{ms}$); (c) 传播角 $20^\circ \sim 30^\circ$ 的波场快照 ($t=2600\text{ms}$); (d) 传播角 $-30^\circ \sim -20^\circ$ 的波场快照 ($t=2600\text{ms}$)

4.2 震源定向照明度

图4为四层模型单炮总照明度和定向照明度,其中的照明度根据直达波场计算。由图4可以看出:①倾斜层界面明显影响着地震波照明方向以及能量强弱的分布(图4a);②定向照明清晰地反映了点震源照明的方向特性(图4b和图4c)。图5为四

层模型多炮总照明度和定向照明度,其炮点分布范围为3000~7000m,炮点距为200m,共21炮。由图5可以看出,当地表炮点均匀分布时,水平层的目标照明度均匀区正好对应于炮点范围的垂直投影区,而倾斜层的照明度均匀分布区则偏离炮点范围的垂直投影区,向斜层的上倾方向偏移,且倾角越

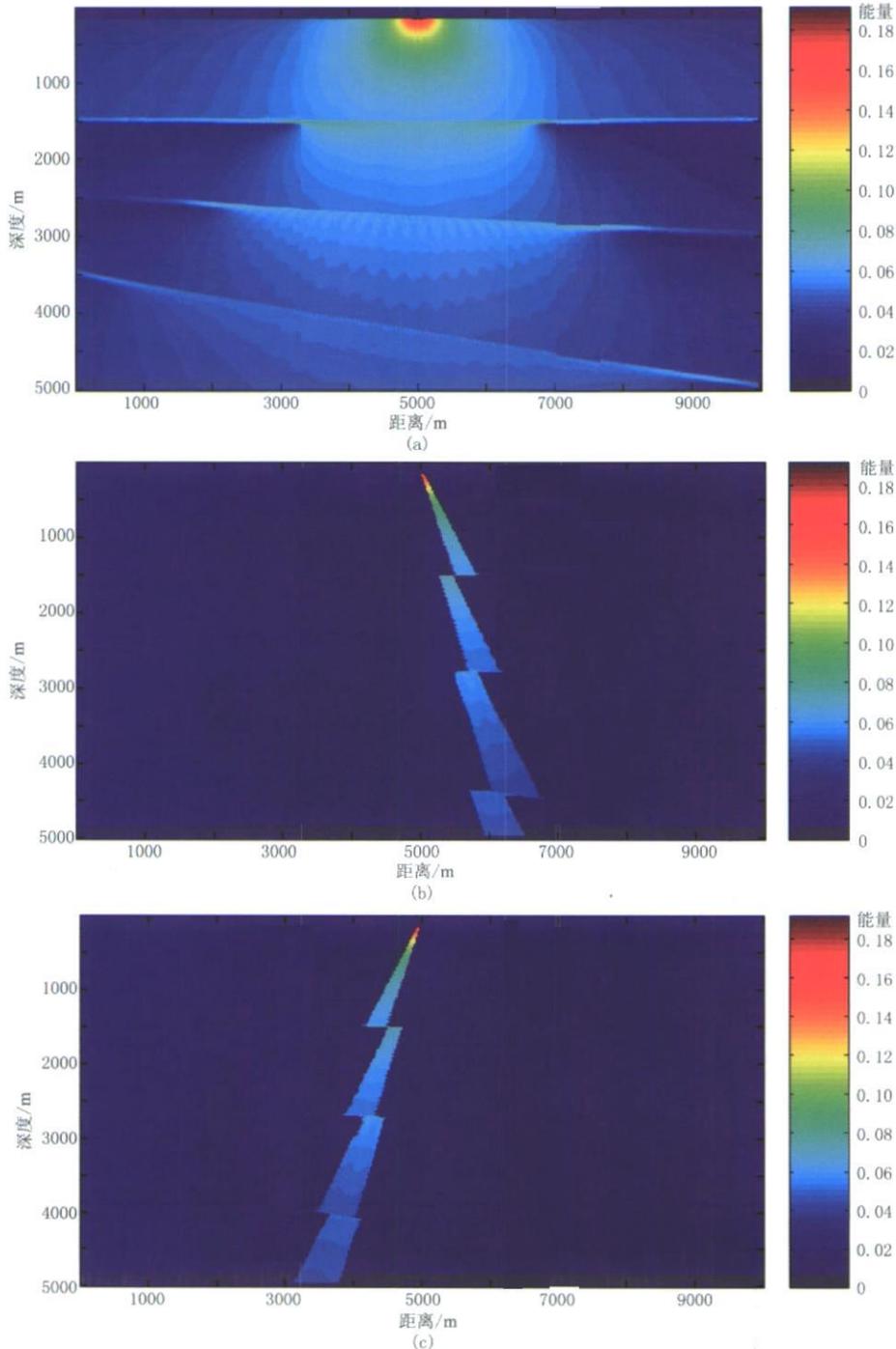


图4 四层模型单炮总照明度和定向照明度

(a)单炮总照明度;(b)单炮 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 定向照明度;(c)单炮 $30^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 定向照明度

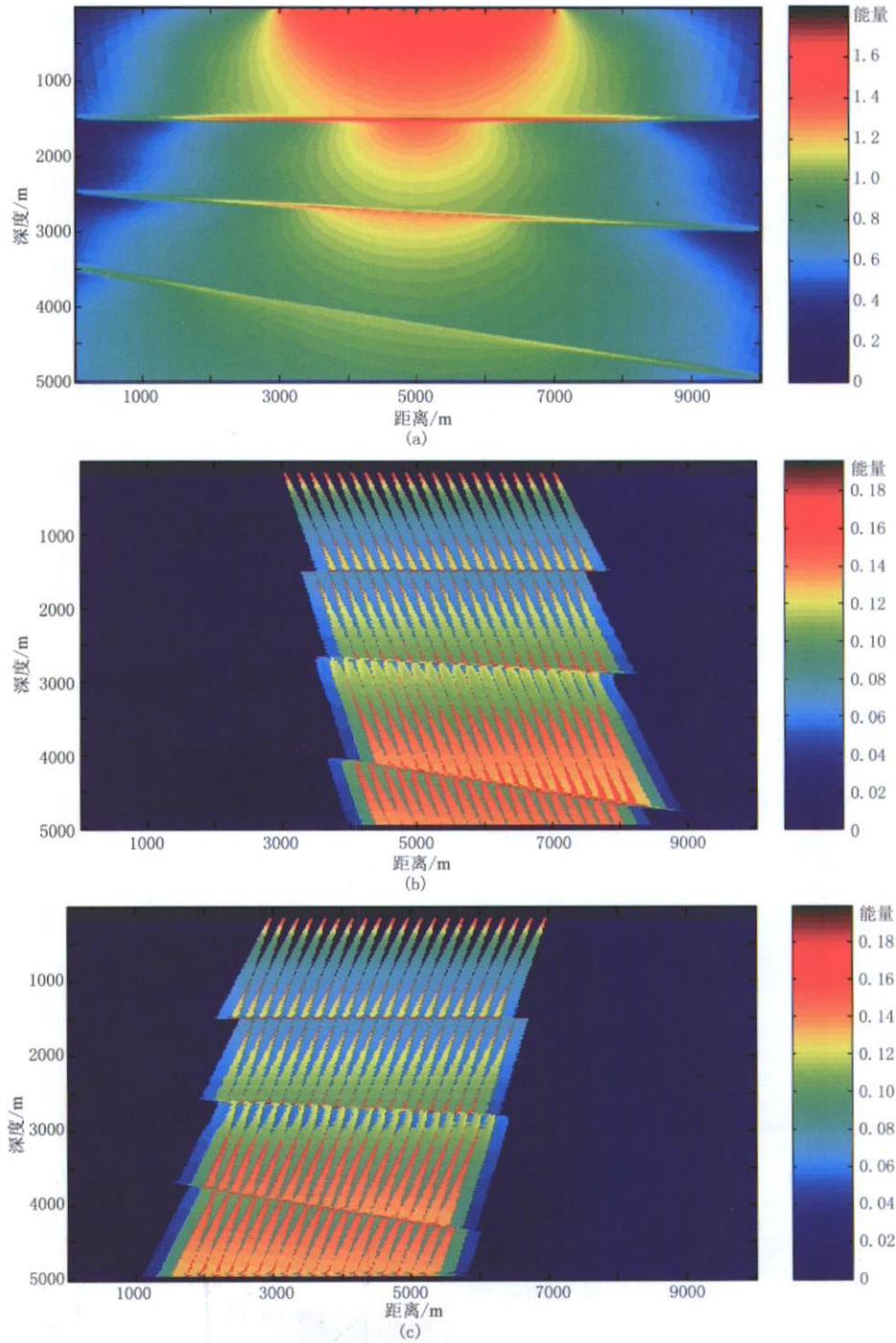


图 5 四层模型多炮总照明度和定向照明度

(a) 多炮总照明度; (b) 多炮 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 定向照明度; (c) 多炮 $-30^{\circ} \sim -20^{\circ}$ 定向照明度

大, 偏移量越大。定向照明可以定量分析不同照明角对目标层的照明贡献, 进而可以用于分析对成像质量的影响。

4.3 目标层 CRP 点照明角分布

根据前面 21 炮定向照明数据, 通过统计分析可以得出不同目标层上 CRP 点的照明角扇形分布图。

图 6 为四层模型中 3 个目标层, 5 个 CRP 点的 x 坐标分别为 (3000, 0)、(4000, 0)、(5000, 0)、(6000, 0) 和 (7000, 0) 的照明角扇形分布图。由图 6 可以看出, 水平目标层上照明角分布是均匀的; 而倾斜层上照明角分布是非均匀的, 且下倾方向上照明角覆盖范围变小; 随深度增加, 照明角扇形变小, 即照明角

覆盖范围变小。由此可见,目标层 CRP 点照明角分布可以用于地震分辨率分析^[15]。

4.4 源—检定向照明度

图 7 为四层模型多源—检总照明度和定向照明度。为简便起见,其中观测系统如下:炮点分布范围为 3000~7000m,炮距为 200m,共 21 炮;检波器排

列为 21 道,道距为 200m,其分布范围为 3000~7000m。观测时炮点移动而检波器排列不动。

由图 7 可以看出:地震采集中震源—检波器关系对震源照明度的影响(图 5 和图 7);与总照明相比,定向照明更能敏感地分析检波器间距、炮点分布以及炮检组合等参数变化对目标层地震能量的影

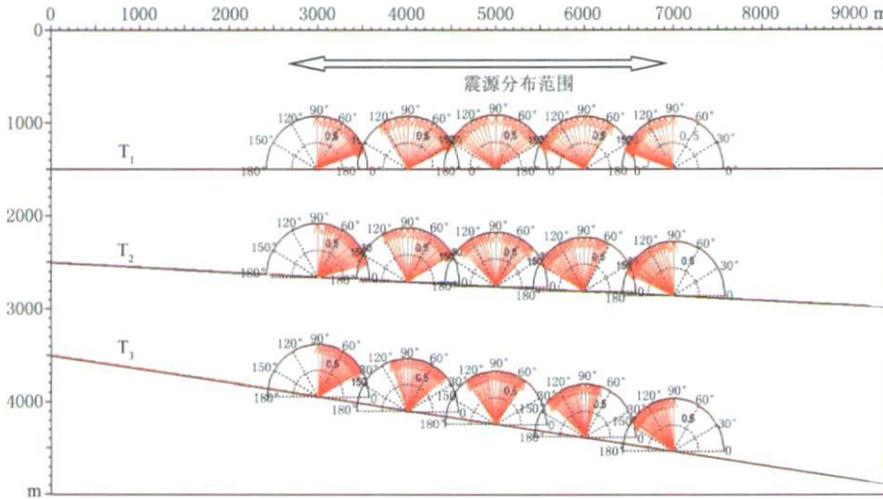


图 6 四层模型目标层 CRP 点照明角分布

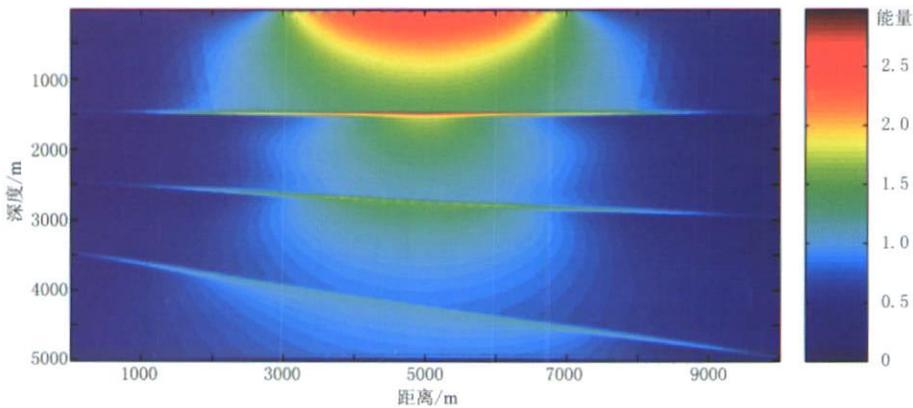


图 7a 四层模型多源—检总照明度

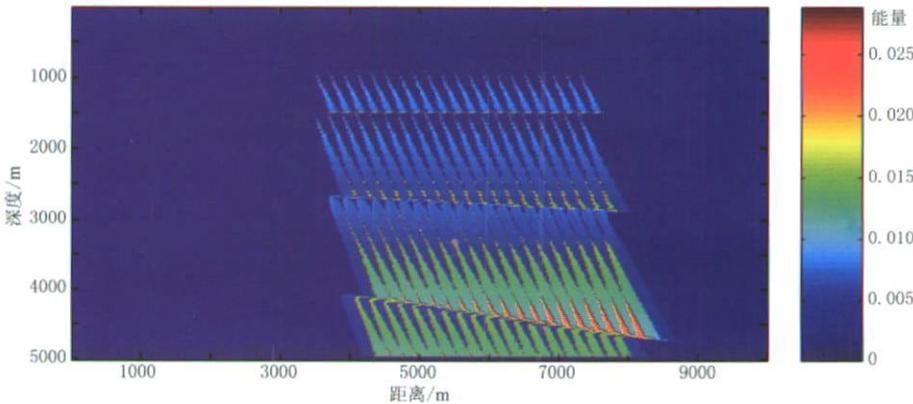


图 7b 四层模型多源—检 20°~30°定向照明度

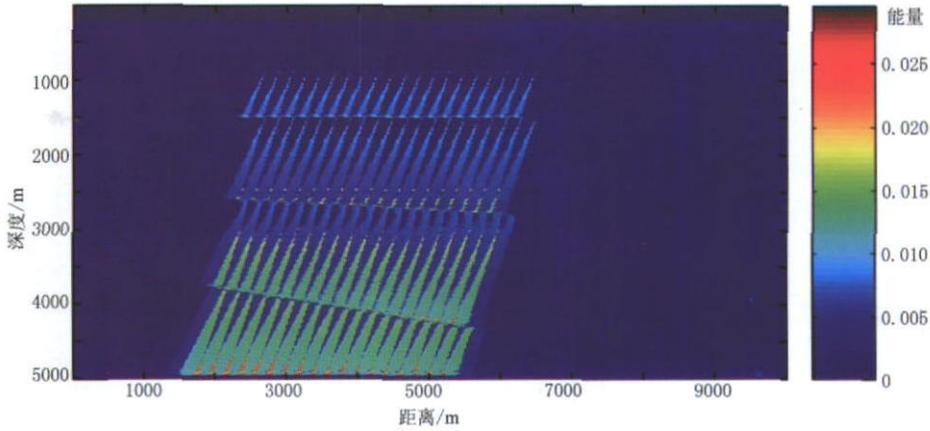


图 7c 四层模型多源—检— 30° ~ -20° 定向照明度

响, 换言之, 可以定量分析地震采集参数对成像质量的影响。

5 结论

通过数值模型试验可得出如下结论:

(1) 基于玻印亭矢量的地震波场方向性分解方法和地震定向照明度计算方法, 不仅计算精度高、计算速度快, 而且具有良好的实用性;

(2) 与总照明相比, 定向照明更能敏感地分析检波器间距、炮点分布以及炮检组合等参数变化对目标层地震能量的影响, 换言之, 可以用于定量分析地震采集参数对成像质量的影响;

(3) 目标层 CRP 点照明角分布可以用于地震分辨率分析。

参考文献

- [1] Laurain R et al. A review of 3D illumination studies. *Journal of Seismic Exploration*, 2004, (13): 17~37
- [2] Bear G et al. The construction of subsurface illumination and amplitude maps via ray tracing. *The Leading Edge*, 2000, 19: 726~728
- [3] Muerder D and Ratcliff D. Understanding subsalt illumination through ray-trace modeling, Part I: Simple 2-D salt models. *The Leading Edge*, 2001, 20: 578~594
- [4] Muerdter D and Ratcliff D. Understanding subsalt illumination through ray-tracing modeling, Part II: Dipping salt bodies salt peaks, and non reciprocity of subsalt amplitude response. *The Leading Edge*, 2001, 20(7): 688~697
- [5] Muerder D and Ratcliff D. Understanding subsalt illumination through ray-trace modeling, Part III: Salt

ridges and furrows, and the impact of acquisition orientation. *The Leading Edge*, 2001, 20: 803~816

- [6] Sassolas C et al. The benefits of 3D ray tracing in acquisition feasibility. *Expanded Abstracts of 69th SEG Mtg*, 1999, 629~632
- [7] Schneider W A and Winbow G A. Efficient and accurate modeling of 3-D seismic illumination. *Expanded Abstracts of 69th SEG Mtg*, 1999, 633~636
- [8] Hoffmann J. Illumination, resolution, and image quality of PP- and PS-waves for survey planning. *The Leading Edge*, 2001, 20: 1008~1014
- [9] Wu R S and Chen L. Mapping directional illumination and acquisition-aperture efficiency by beamlet propagators. *Expanded Abstracts of 72nd SEG Mtg*, 2002, 1352~1355
- [10] Wu R S et al. Directional illumination and acquisition dip-response. *Expanded Abstracts of EAGE 65th Conference and Technical Exhibition*, 2003, 147
- [11] Xie X B et al. Extracting angle domain information from migrated wavefield. *Expanded Abstracts of 72nd SEG Mtg*, 2002, 1360~1363
- [12] Xie X B et al. Three-dimensional illumination analysis using wave-equation based propagator. *Expanded Abstracts of 73rd SEG Mtg*, 2003, 989~992
- [13] Xie X B et al. Wave-equation-based seismic illumination analysis. *Geophysics*, 2006, 71(5): 169~177
- [14] Ostmo S and Maa F. Seismic illumination from finite-difference modeling. *Expanded Abstracts of 65th EAGE Conference & Technical Exhibition*, 2003, 146
- [15] Luo M et al. Comparison of illumination analysis using one-way and full-wave propagators. *Expanded Abstracts of 74th SEG Mtg*, 2004, 67~70
- [16] 牟永光, 裴正林. 三维复杂介质地震数值模拟. 北京: 石油工业出版社, 2005
- [17] 杜世通. 地震波动力学. 山东东营: 石油大学出版社, 1996
- [18] 牛滨华, 孙春岩编著. 半空间介质与地震波传播. 北京: 石油工业出版社, 2002

(本文编辑: 金文昱)