

# 基于染色算法的宽频带地震照明及分辨率分析\*

陈波<sup>1,3</sup>, 贾晓峰<sup>\*1</sup>, 谢小碧<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院地震与地球内部物理实验室, 合肥 230026; 2. 加州大学圣克鲁斯地球物理及行星物理研究所, 美国加州 95064; 3. 地球科学与地质工程学院, 中山大学, 广州 510275)

**摘要:** 偏移成像是将地下目标产生的地震数据归位到反射界面从而产生地下结构的像。但由于受到采集系统孔径、复杂上覆介质和成像目标倾角等因素的影响, 成像结果常常是地下结构的畸变了像。地震照明和分辨率分析为上述因素对地震成像结果的影响提供了定量的描述方法。点弥散函数中包含地震照明和分辨率分析的全部信息。染色算法建立地下某一特定结构与地震波场和地震数据之间的对应关系。本文利用染色算法计算点弥散函数并进一步获得角度域照明信息, 同时通过点弥散函数与原始成像结果反卷积的方法对成像结果予以校正。展示了SEG盐丘模型的相关计算结果。染色算法为点弥散函数的计算及进行宽频带地震照明与分辨率分析提供了一种高效的计算工具。

**关键词:** 染色算法, 点弥散函数, 采集倾角响应, 成像分辨率

## 引言

反射地震成像是当前用于探测地下结构, 指导油气勘探和生产的重要手段。偏移成像是地震资料处理中一项重要技术, 其将由地下目标产生的地震数据归位到反射界面从而产生地下结构的像。盐下区域蕴含丰富的油藏, 是地震成像的重点和难点。盐丘内外巨大的波阻抗差异对地震波能量起了一定的屏蔽作用: 一方面使得地震波穿过盐丘时发生强烈的扭曲和能量衰减; 另一方面经盐下结构反射的能量难以返回至地表被检波器接收, 导致盐下的不均匀照明和成像影区(Jackson et al., 1994; Muerdter and Ratcliff, 2001; Leveille et al., 2011; Liu et al., 2011)。由于受到采集系统孔

径、复杂上覆介质和成像目标倾角等因素的影响, 地震成像结果常常是地下结构畸变了像。地震照明和分辨率分析为上述因素如何影响地震成像结果提供了一个定量的描述方法。传统的地震照明和分辨率分析多基于射线理论(Gelius et al., 2002; Lecomte, 2008)。射线方法能描述地震波传播方向及沿该方向的能量强度, 计算光滑非均匀介质中与角度相关的照明信息(Bear et al., 2000, Muerdter and Ratcliff, 2001)。但这类方法建立在高频近似的基础上, 难以处理散射、衍射和散焦等波动现象。基于波动方程计算地震照明和分辨率的方法可分为单程波方程方法(Luo et al., 2004; Xie et al., 2005, 2006; Wu et al., 2003, 2006; Wu and Chen, 2006)和全波动方程方法(Xie and Yang,

收稿日期: 2016-04-07; 修改稿收到日期: 2016-05-30

\*基金项目: 本研究由国家自然科学基金(编号: 41374006和41274117)资助。

◆通讯作者: 贾晓峰 (Email: xjia@ustc.edu.cn)。

© 2016 应用地球物理编辑部, 保留所有版权

2008; Yang et al., 2008; Cao and Wu, 2009; Yan, et al., 2014)。利用波动方程计算波场并直接在空间各点对波场进行角度分解来计算局部角度域照明和分辨率信息。在模拟观测系统时, 需在所有炮点和检点位置将波场延拓至地下, 该类方法的计算成本极高, 实际计算中仅包含有限数量的炮点和检点位置且仅计算单频(通常是主频)的照明和分辨率信息。因此需要发展一种高效的宽频带照明和分辨率分析方法。

点弥散函数(point spreading function, PSF)是描述空间某点成像分辨率的函数, 其包含了影响照明和成像分辨率的所有信息, 为地震照明和分辨率分析提供了研究方法。Xie等(2005, 2006), Wu等(2006), Mao和Wu(2011)研究了PSF与波数域照明之间的关系。Cao(2013)提出了一种直接从深度域成像中计算点弥散函数并进一步将其转化为角度域照明信息的方法。Chen和Xie(2015)定量研究了镶嵌在模型中的散射点之间的高阶散射以适当减少其对成像的影响。Valenciano等(2015)将点弥散函数用于提高成像分辨率。Chen等(2016)利用点弥散函数研究近地表小尺度非均匀介质对地震数据和成像质量的影响。Chen和Jia(2014)借鉴了发育生物学中fate mapping的方法, 将其用于地震波场的处理并命名为“染色算法(staining algorithm)”。染色算法通过构建一个空间函数来实现对速度模型中某一特定结构的染色标记, 建立其与地震波场和地震数据之间的对应关系。染色算法用于地震模拟时, 可获得仅包含被标记目标的地震波场和反射数据; 当用于地震成像时, 可有效提高目标区域的成像信噪比同时实现对其独立成像。

本文利用染色算法, 基于时间域双程波波动方程计算来自单独散射点的数据。利用该数据通过对该散射点成像的方法直接计算点弥散函数。从点弥散函数的波数域振幅谱中可提取宽频带照明信息, 同时利用点弥散函数对原始成像进行反卷积处理实现对结果的校正。染色算法为点弥散函数的计算及进行宽频带地震照明与分辨率分析提供了一种高效的计算工具。

## 染色算法

发育生物学中fate mapping方法建立起发育后的成体细胞与分化前胚胎细胞的源头之间的联系。利用生物染料标记胚胎细胞的某一部分, 在分化发育后的成体细胞中, 如果某个器官中含有该染料, 则证明该器官由之前被标记的胚胎细胞发育而来(Dale and Slack, 1987; Gilbert, 2000; Ginhoux et al., 2010)。借鉴该思想, 染色算法在地震波传播中建立起模型中某一特定目标与其对应的波场和数据之间的联系。举个形象的例子, 公园的若干把长椅中有一把油漆未干, 当所有人离开长椅在公园内活动时, 坐过这把椅子的游人的身上将被染上颜色因而很容易被识别并追踪。类似地, 在地震波传播中, 如果将速度模型中关注的某区域“刷上油漆”, 那么经过该区域的地震波将被“染色”因而能够在传播中被识别与追踪。染色算法通过标记目标结构来标记与该结构相关的地震波能量, 在波场和数据中获得仅与目标结构的相关信息。

## 染色波场与染色数据

“染色波场”是指由被染色目标结构激发的波场。换言之, 染色波场是全波场中与染色区域相关的部分。在波传播的过程中, 只有当地震波能量到达被标记的目标位置时, 地震波才会被染色标记进而激发出与真实波场同步传播的染色波场。染色波场展示的是由目标区域激发的能量的传播, 对于研究复杂波场中与特定区域相关波场特征、动态地追踪与该区域相关的能量有重要意义。“染色数据”是指由被染色目标结构激发的反射数据。换言之, 染色数据是所有地震数据中与染色区域相关的部分。地震波传播至目标位置产生的反射将被标记, 被标记的能量传播至地表并被检波器接收形成染色数据。染色数据仅包含来自目标区域反射的地震波能量, 对研究模型中与特定区域相关的地震数据形态、在全部数据

中提取特定目标对应的信息具有重要意义。

染色波场(数据)仅包含与目标结构相关的信息,是常规波场(数据)的子集。图 1 所示为常规地震波场与染色波场。图 1a 为速度模型,三层速度大小分别为 2.5km/s, 3.5km/s 和 4.5km/s,其中位于深度 2.5km 的水平反射界面被染色标记。图 1b 和 1c 分别为 1.2s 时刻常规波场和染色波场的波场快照。如图所示,染色波场仅包含与目标层位相关的反射和透射。当波传播至倾斜层位时,常规波场产生反射和透射,而染色波场中由于该结构未被标记因而不产生任何响应,仿佛该结构是“透明的”。而当波传播至被染色的水平层位时,染色波场被激发并与常规波场同步传播。图 2 所示为常规地震数据与染色数据。图 2a 为常规地表接收到的数据,其包含直达波以及来自两个反射层的反射;图 2b 为染色数据,其仅包含来自被染色的水平层位的反射。在地震波传播到该层位之前,染色波场不被激

发,因此在染色数据上没有来自倾斜层位的反射。为进一步说明这一点,对这两组数据分别进行偏移成像,所得结果分别如图 2c 和图 2d 所示。由常规数据所得的成像结果包含两个反射层结构,而由染色数据所得的成像结果仅包含被染色的水平反射层。这表明利用染色算法对某一结构染色所得的染色数据仅包含与该结构相关的反射,对该染色数据进行偏移成像可得到只包含该结构的成像结果。

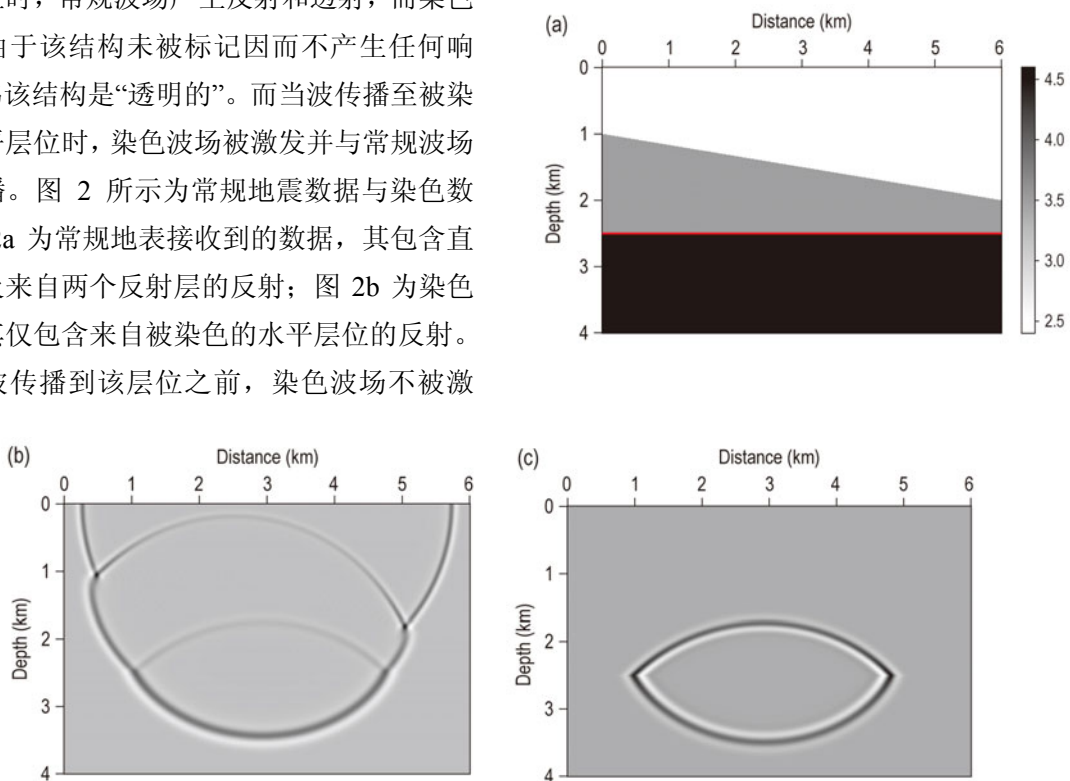
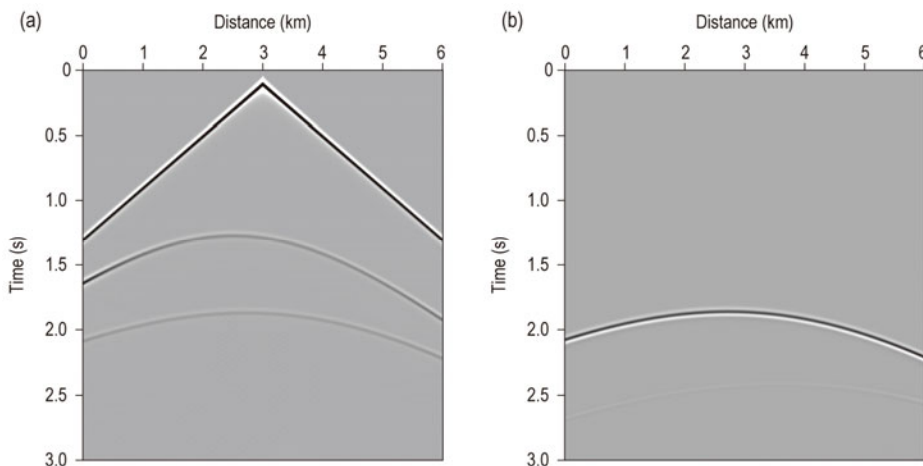


图 1 (a)层状速度模型。三层速度分别为2.5 km/s, 3.5 km/s和4.5 km/s, 其中位于深度2.5 km处的水平层位被染色。1.2 s时刻(b)常规波场和(c)染色波场的波场快照



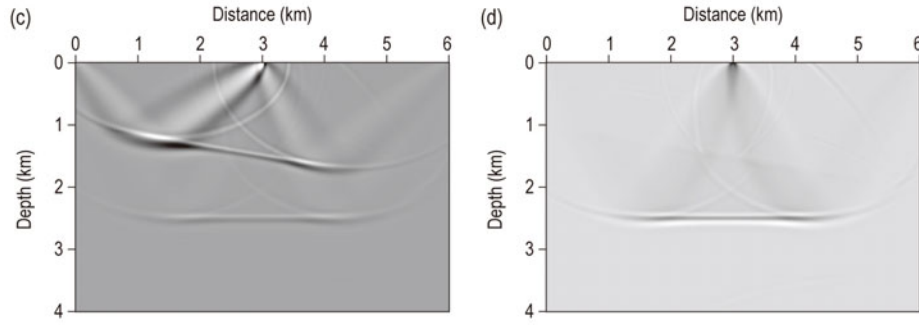


图 2 地表接收的(a)常规地震数据和(b)染色地震数据。震源为主频 15 Hz, 延时 0.1 s 的 Ricker 子波。震源位于地表 3.0 km 处, 检波器分布于地表所有格点。(c)常规数据的逆时偏移成像结果。(d)染色数据的逆时偏移成像结果

### 镶嵌散射点染色法

常密度声波方程 (Symes, 2008) 表示如下:

$$\left( \frac{1}{v^2(\mathbf{x})} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta \right) p(t, \mathbf{x}; \mathbf{x}_s) = f(t, \mathbf{x}_s) \quad (1)$$

其中  $p(t, \mathbf{x}; \mathbf{x}_s)$  为声波波场,  $v(\mathbf{x})$  为介质速度,  $f(t, \mathbf{x}_s)$  为位于  $\mathbf{x}_s$  的震源。为实现对目标区域染色进而获得染色波场和染色数据, 构建空间函数对模型中任意区域进行标记。Chen 和 Jia (2014) 使用了复空间速度 (complex domain velocity, CDV) 染色方法, 该方法将波动方程中波场与速度拓展到复数空间。复空间速度的实部为常规速度模型, 目标区域的速度虚部赋一个小值, 而非目标区域的虚部则置为零。计算得到的复空间波场的实部为常规波场, 虚部为染色波场。该方法将所有变量均拓展至复数空间, 因此计算成本约为常规实空间方法的 4 倍。本文采用镶嵌散射点 (embedded scattering point, ESP) 染色方法来实现对目标区域的染色并计算染色波场和染色数据。该方法在需要染色的目标区域镶嵌散射点, 即在染色位置上添加微小的速度扰动, 而非染色区域处的速度与原速度相同。散射点的分布为:

$$\delta v(\mathbf{x}) = \begin{cases} \alpha v(\mathbf{x}), & \text{target structure} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\delta v(\mathbf{x})$  表示速度扰动,  $\alpha$  为扰动系数, 被染

色的目标可为速度模型中任意结构。由镶嵌的散射点激发的染色波场  $\delta p(t, \mathbf{x}; \mathbf{x}_s)$  与原波场  $p(t, \mathbf{x}; \mathbf{x}_s)$  共同构成总场  $p(t, \mathbf{x}; \mathbf{x}_s) + \delta p(t, \mathbf{x}; \mathbf{x}_s)$ 。为表述简便, 略去各项中的时间和空间变量。将镶嵌有散射点的速度  $v + \delta v$  与总场  $p + \delta p$  带入到方程 1 中, 可得到总场的波动方程

$$\left( \frac{1}{(v + \delta v)^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta \right) (p + \delta p) = f \quad (3)$$

将方程 3 与方程 1 相减即可得到由被染色目标结构激发的染色波场。当速度扰动  $\alpha$  足够小 (计算中通常为 10% 以下) 时, 略去所有二阶小量项, 可得染色波场方程如下:

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \delta p}{\partial t^2} - \Delta \delta p = \frac{2\alpha}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (4)$$

对比方程 4 与方程 1, 两方程左侧具有相同形式。这说明被激发的染色波场与常规波场遵循相同的传播规律, 即染色波场与常规波场同步传播。方程 4 的右侧可视为激发染色波场的震源项, 其与染色目标的分布和常规波场相关。除震源项外两方程具有相同形式, 所不同的是, 常规波场由震源所激发, 而染色波场由常规波场与被染色的目标结构所激发。方程 4 表明, 染色波场具有如下特征: 只有当地震波传播至被染色标记的目标区域时染色波场才被激发, 且激发的染色波场与真实波场同步传播; 染色波场可认为是真实波场的一个子集, 其仅包含与目标结构相关的波场信息。类似地, 染色数据仅包含与被染色的

目标结构相关的反射数据。利用镶嵌散射点方法计算染色数据时需进行两次正演计算, 因此计算成本是常规模拟成本的两倍, 与复空间速度法相比, 效率提高了一倍。

## 地震照明与分辨率分析

### 点弥散函数

利用偏移方法计算得到的成像结果是对地下实际结构的近似描述。换言之, 像是具有一定畸变的结构。位于空间  $\mathbf{x}$  处的成像结果可表示为该点处点弥散函数与模型的卷积(Xie et al., 2005; Cao, 2013; Chen and Xie, 2015)

$$I(\mathbf{x}) = R(\mathbf{x}) * m(\mathbf{x}) \quad (5)$$

其中  $I(\mathbf{x})$  为偏移得到的局部化的成像结果,  $R(\mathbf{x})$  为成像系统的点弥散函数,  $m(\mathbf{x})$  为速度模型, “\*”表示空间卷积。若成像系统不存在任何误差, 则  $R(\mathbf{x})$  为  $\delta$  函数, 即理想情况下所成的像完全反映地下结构。然而由受观测系统孔径、复杂上覆介质及目标倾角等因素的影响, 实际的  $R(\mathbf{x})$  常表现为一个复杂分布, 从而造成成像分辨率降低并使像变得模糊或失真。方程 5 的波数域表达式为

$$I(\mathbf{k}) = R(\mathbf{k}) \cdot m(\mathbf{k}) \quad (6)$$

其中  $\mathbf{k}$  为空间波数。  $I(\mathbf{k})$ ,  $R(\mathbf{k})$ ,  $m(\mathbf{k})$  分别为  $I(\mathbf{x})$ ,  $R(\mathbf{x})$ ,  $m(\mathbf{x})$  在波数域的变换。如果用一个理想的点散射体, 即一个  $\delta$  函数, 来置换方程 5 中的速度扰动  $m(\mathbf{x})$ , 则有

$$I(\mathbf{x}) = R(\mathbf{x}) \quad (7)$$

即利用对一个点散射体成像, 可以获得在给定采集系统和宏观速度模型情况下的点弥散函数, 从而可以分析整个系统对该点成像分辨率的影响。

本文利用镶嵌散射点染色方法计算单个散射点的染色数据, 通过对单点染色数据进行逆时偏移成像获得该点的成像结果, 即该点处的点弥散函数。计算流程如下: 1) 在速度模型的目标位置镶嵌散射点, 其速度扰动为原始速度的

10%; 2) 利用镶嵌有散射点的速度模型计算得到数据  $D_1$ ; 3) 利用原始速度模型计算得到数据  $D_2$ ; 4) 将数据  $D_1$  与  $D_2$  做差即得到散射点的染色数据; 5) 利用染色数据在原始速度模型下进行偏移成像, 即得到镶嵌位置处的点弥散函数。

### 采集倾角响应

在点弥散函数的波数域振幅谱中提取沿某一角度分布的能量可得到该角度的采集倾角响应 (acquisition dip response, ADR)。空间  $\mathbf{x}$  处倾角为  $\theta$  的 ADR 表示为 (Chen and Xie, 2015)

$$D(\mathbf{x}, \theta) = \int_{\mathbf{k} \in c\hat{\mathbf{e}}_\theta} R(\mathbf{x}, \mathbf{k}) e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}} d\mathbf{k} \quad (8)$$

其中  $\hat{\mathbf{e}}_\theta$  为沿  $\theta$  方向的单位矢量,  $c$  为任意常数,  $R(\mathbf{x}, \mathbf{k})$  为点弥散函数在波数  $\mathbf{k}$  域的谱。ADR 是一个空间和角度的函数, 其物理含义是: 假设空间  $\mathbf{x}$  处存在一个倾角为  $\theta$  的界面, 在当前速度模型和采集系统下该界面所能被照明的程度 (能量覆盖程度)。其综合了速度模型、观测系统和目标结构三方面因素对地震照明的综合影响。若某角度的 ADR 图在某处存在一个影区 (弱照明区), 则在影区内该角度的界面将不能被较好照明, 因此该结构的成像质量差, 表现为成像振幅弱、信噪比低。利用 ADR 图可直观地展示和分析特定角度结构的照明情况, 为成像结果预估和通过照明补偿提升成像质量提供了工具。

图 3 展示了利用点弥散函数计算角度为  $\theta$  的 ADR 的过程。图 3a 为通过成像方法计算得到的某点处空间域点弥散函数, 假设在该点处存在一个倾角为  $\theta$  的界面 (图中黄线)。通过傅里叶变换将空间域点弥散函数变换到波数域, 得到其振幅谱如图 3b 所示, 图 3a 中倾角为  $\theta$  的界面对应的波数域谱为一条穿过波数原点的沿  $\theta$  角度分布的线脉冲 (图中黄线)。在振幅谱中提取沿该角度分布的能量 (如图 3c 所示), 将提取的能量积分即可得到该点处该角度的 ADR。在空间逐点重复以上流程, 可得到全模型中该角度的采集倾角响应图。由于地震照明是空间的慢变函

数, 实际计算不必在模型的逐点进行。可采用较为稀疏的网格获得格点所在位置的 ADR, 通过

插值即可获得模型中空间所有点的 ADR。

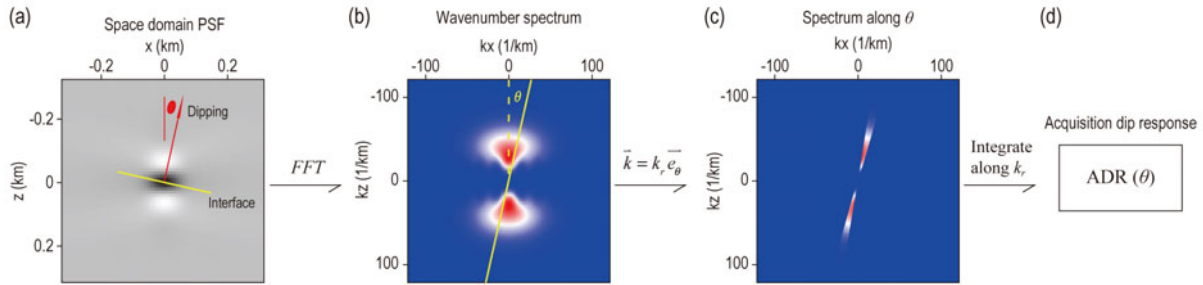


图3 利用点弥散函数计算采集倾角响应的流程。(a)空间域点弥散函数。(b)点弥散函数的波数域振幅谱。(c)沿倾角  $\theta$  提取的该角度照明能量分布。(d)对能量积分得到的该点处倾角为  $\theta$  的采集倾角响应

### 成像校正

成像结果是具有一定畸变的结构, 点弥散函数包含了所有导致像产生畸变的因素。若从成像结果中将点弥散函数去除, 则可实现对成像结果的校正, 从而使校正过的像更加接近于真实结构。原始成像结果是模型与点弥散函数的卷积, 通过将成像结果与点弥散函数进行反卷积处理, 可实现消除导致成像畸变的因素、校正成像结果的目的。空间域反卷积等价于其各自波数域谱的相除

$$I'(\mathbf{k}) = I(\mathbf{k})/R(\mathbf{k}) \quad (9)$$

其中  $I(\mathbf{k})$  和  $R(\mathbf{k})$  分别为原始成像结果和点弥散函数在波数域的谱,  $I'(\mathbf{k})$  为校正后的像在波数域的谱, 将  $I'(\mathbf{k})$  变换至空间域即得到校正后的成像结果。成像校正的流程如下: 1) 选择合适的窗函数对局部的原始成像结果和该点处对应的点弥散函数进行采样; 2) 分别将采样后的局部成像结果和点弥散函数变换到波数域, 对两波数域结果相除再变换到空间域, 即得到校正后的成像结果。3) 将该流程在全空间重复操作即可

实现对全局成像结果的校正。

### 数值算例

本数值实验中所使用的震源均为主频 15 Hz, 延时 0.1 s 的 Ricker 子波。

图 4 对比了利用 CDV 染色方法和 EPS 染色算法计算所得的单个散射点的染色数据。计算使用的模型为图 1a 的速度模型, 炮点位于地表 3.0 km 处, 检波器位于地表所有格点, 网格间距为 0.01 km, 散射点位于水平 3.0 km, 深度 2.0 km 处。图 4a 和 4b 分别为 CDV 和 EPS 染色方法计算所得的染色数据, 两方法所得到的数据具有相同的形态但不同的数量级。为进一步对比两组数据, 抽取 3.0 km 处的单道数据并分别将其归一化, 结果分别如图 4c 和 4d 所示。图 4e 为两道归一化的数据之差, 结果表明两种方法计算所得到的数据之差可忽略不计。因此可认为两种方法计算所得的染色数据除数量级外波形与走时信息相同, 两种方法在计算染色波场与染色数据时是等价的。

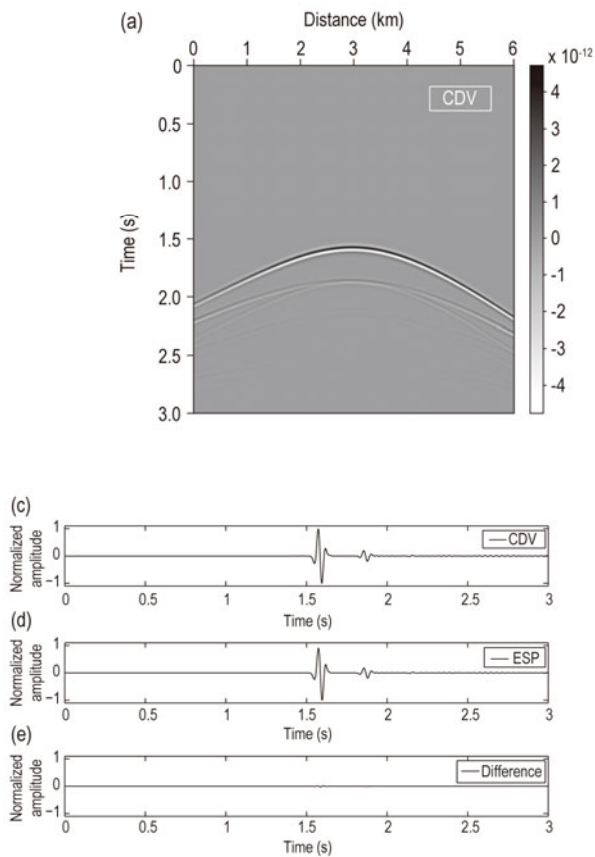
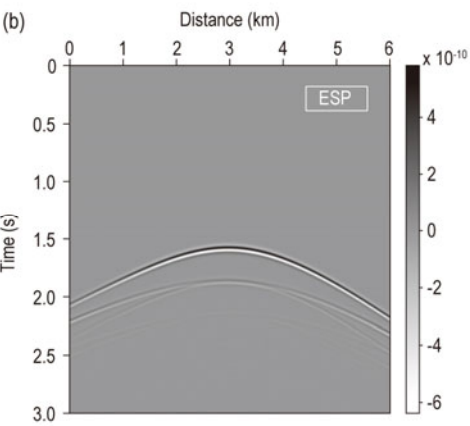
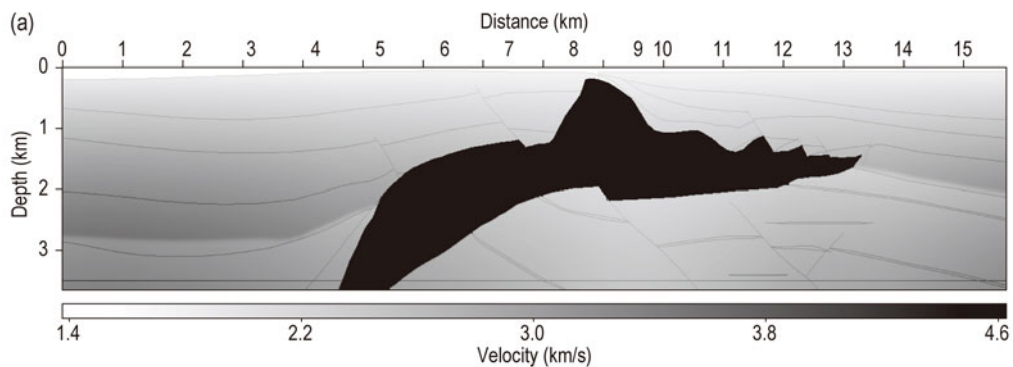


图4 利用(a)CDV染色方法和(b)ESP染色方法计算所得的点染色数据, 散射点位于图1(a)模型中的水平3.0 km, 深度2.0 km处。炮点位于地表3.0 km处, 检波器分布于地表所有格点。图(c)和图(d)为分别为图(a)和图(b)中地表3.0 km处归一化的单道数据记录。图(e)为图(c)和图(d)的差



器位于炮点左侧, 测线长度为 4.27 km, 检波器间隔为 0.024 km, 炮点间隔为 0.049 km。利用 EPS 染色方法计算散射点的染色数据, 散射点的镶嵌密度为 0.1 km × 0.1 km, 速度扰动为 10%。通过对染色数据成像计算得到的空间域 PSF 如图 5b 所示。为详细展示复杂模型下 PSF 的特征, 选取了几处有代表性位置的 PSF 的波数域振幅谱展示在结果下方。不同位置的 PSF 波数域振幅谱表现出不同的分布: 对于非盐下区域, 振幅谱有角度范围较广的分布, 这表明在该处各倾角方向的结构均能被较好照明; 而对于盐下区域, 振幅谱仅分布在较窄的角度范围内, 这表明在当前模型和观测系统下, 仅能对盐下倾角分布在一较小范围的结构有较好的照明, 且盐下不同位置的照明角度分布的范围也大不相同。

图 5 展示的是复杂模型下利用染色算法计算得到的点弥散函数。图 5a 为 SEG 盐丘模型, 其盐下成像质量一直是关注的重点和难点。检波



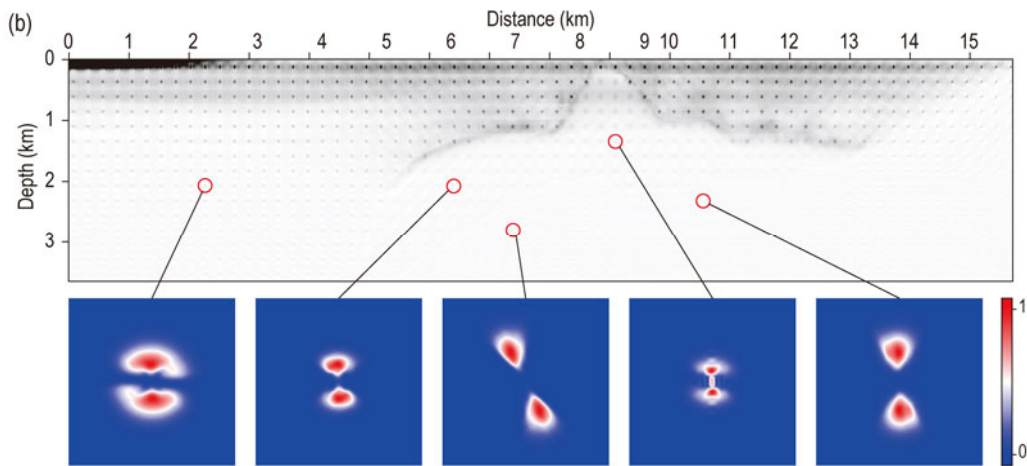


图5 (a)SEG盐丘模型。(b)上图为空间域点弥散函数, 点阵水平和垂直间隔均为0.1 km  
下图为所选位置点弥散函数对应的波数域振幅谱

图 6 展示了盐丘模型不同角度的采集倾角响应, 其反映的是在当前模型和观测系统下对倾角为不同角度的结构的照明情况。不同的角度有不同的照明强度分布: 在较为关注的盐下部分, 对于倾角为 $-15^\circ$ 的结构有较好的照明(如图 6a); 而对于倾角为 $45^\circ$ 的结构则存在明显的照明不足

(如图 6d)。这说明在该模型和观测系统下, 对于盐下倾角为 $-15^\circ$ 的结构有较好的“探测”能力而对倾角为 $45^\circ$ 的结构则探测能力较差。在模型中该位置的结构恰好是倾角约 $45^\circ$ 的断层结构, 这就是该结构成像质量之所以欠佳的原因。

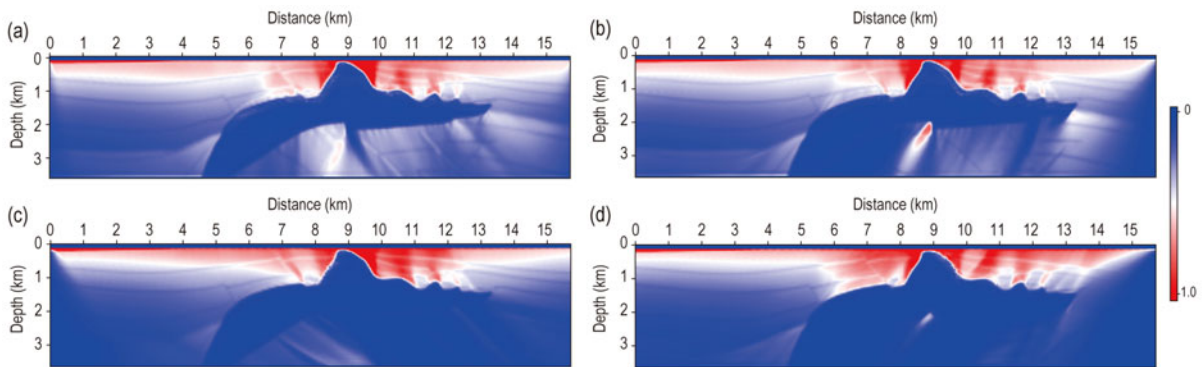


图6 SEG盐丘模型(a)  $-15^\circ$ , (b)  $15^\circ$ , (c)  $-45^\circ$ 和(d)  $45^\circ$ 的采集倾角响应。

图 7 为利用点弥散函数与原始成像结果反卷积进行成像校正的结果。图 7a 为盐丘模型的原始深度域成像结果, 红框为做局部成像校正的采样窗。图 7b 从左至右依次为采样后得到的局部原始成像结果、空间域点弥散函数、像的波数域振幅谱、点弥散函数的波数域振幅谱和校正后

的成像结果。图 7c 为该局部成像校正流程在全空间重复操作所得到的校正后的成像结果。结果表明, 校正后的成像结果各界面成像结果更加清晰, 盐下弱照明区域的像得到了校正, 整体成像质量有了较大的提升。



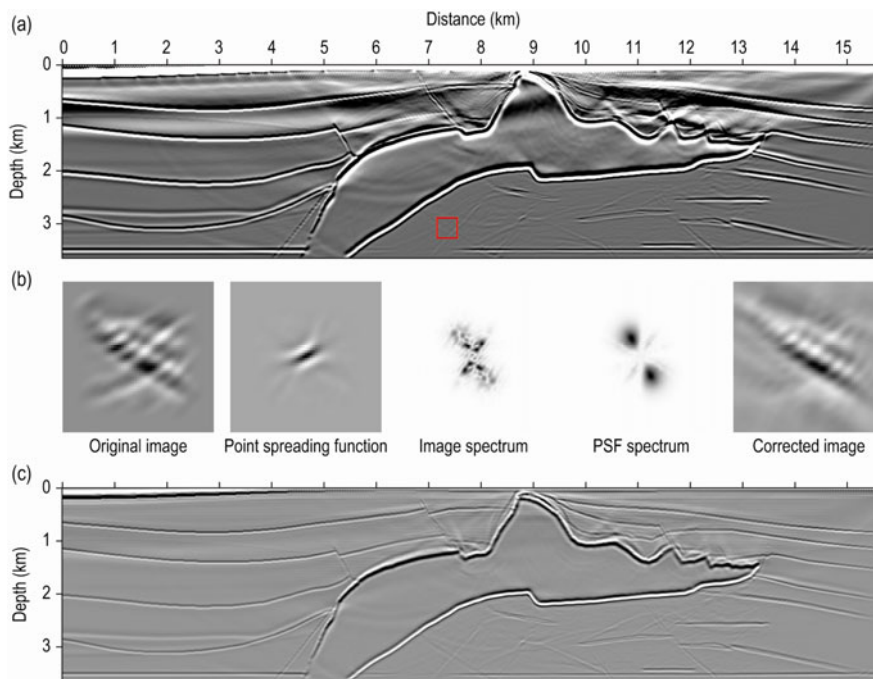


图7 (a) SEG盐丘模型深度域成像结果。(b)局部化成像校正流程, 从左至右依次为经红色方形窗采样的局部原始成像结果、空间域点弥散函数, 像的波数域振幅谱、点弥散函数的波数域振幅谱和校正后的成像结果。(c) 在空间各点重复图(b)所示流程所得的校正后的成像结果

图 8 进一步比较了校正前后像的谱分析结果。图中部展示的是 SEG 盐丘模型各反射界面的位置, 分别抽取了 5 处校正前后成像结果的垂直剖面叠加在反射层模型上, 其中红色为校正前的原始成像结果, 蓝色为反卷积校正后的成像结果。为避免近地表成像脚印对结果展示的影响, 地表至深度 0.24km 处的剖面值被置为 0。从结果可以看出, 校正之后的像中低波数噪音得到了较好的压制, 尤其是浅层沉积层 (如 11 km 处)。校正前的层位信息被淹没在低频噪音中, 而校正后的结果反射层得到了较好的呈现。图上部五幅图分别为五组垂直剖面的垂直波数域的振幅谱。从结果可以看出, 校正后的成像结果低波数能量得到了较好的压制同时高波数能量被有效提高,

总体上能量分布向高波数转移。为进一步对比较校正前后的成像结果及其各自的波数域谱能量分布, 在成像结果中选取了两个如图中绿色虚线框所示的区域, 其中左侧区域为简单水平层状结构, 右侧区域为包含带有复杂边界盐丘的区域。图下部两组图分别为成像结果中选取的两个区域的校正前后成像结果及其对应的二维波数域振幅谱。从结果可以看出, 校正后的成像结果中, 盐丘边界和盐丘上部各水平层更加清晰, 各界面从低波数噪音中被“剥离”出来, 这一点在二维波数域谱结果中更为明显。对比两区域的校正前后谱结果可以发现校正后的谱能量更多分布在高波数部分。因此, 一维和二维的谱分析结果均表明, 校正后的成像结果的成像分辨率有所提高。

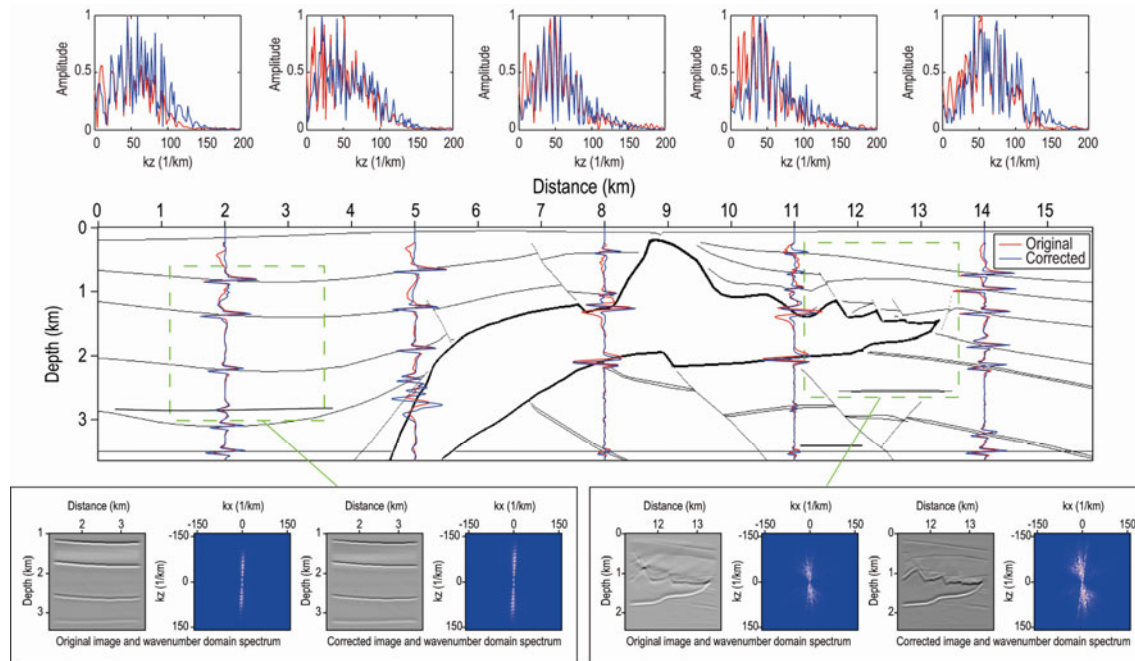


图 8 校正前后的成像结果及其对应波数域振幅谱的对比。中部为从原始和校正后的成像结果中提取的垂直剖面（红色为原始成像结果，蓝色为校正后的成像结果）。上部为各垂直剖面所对应的垂直波数振幅谱。下部分别对应绿色虚线方框区域的原始和校正后的成像结果及其各自对应的二维波数域振幅谱

## 结论

点弥散函数是描述模型中某点成像分辨率的函数，其包含影响照明和成像分辨率的所有信息。染色算法可对模型中的某一特定目标进行标记，用来研究与该结构相关的波场与数据特征及性质。本文利用镶嵌散射点染色方法计算得到单点的染色数据，利用该染色数据通过成像的方法计算该点处的点弥散函数并将其用于宽频带地震照明与分辨率分析，可得出以下结论：

1) 镶嵌散射点染色方法与复空间速度染色方法计算得到的归一化染色数据结果相同，前者计算效率比后者提高一倍。

2) 与频率域方法仅在主频上计算照明和分辨率信息相比，利用逆时偏移成像方法计算点弥散函数进而进行照明和分辨率分析，其结果包含了宽频带信息，更为全面地描述照明和分辨率特性。

3) 通过对点弥散函数波数域信息的提取与处理，可获得当前模型和采集系统下各角度的地

震照明信息。

4) 利用点弥散函数与原始深度域成像结果进行反卷积处理，可对原始成像结果予以校正，提高成像质量及成像分辨率。

## 致谢

作者由衷感谢胡锦涛和李启华卓有成效的讨论及对本文初稿提出的修改意见。感谢胡天跃教授，刘继承教授对本文的修改提出的宝贵意见。

## 参考文献

- Bear, G., Liu, C. P., Lu, R. et al., 2000, The construction of subsurface illumination and amplitude maps via ray tracing: The Leading Edge, **19**(7), 726–728.
- Cao, J., 2013, Resolution/illumination analysis and imaging compensation in 3D dip-azimuth domain: 83rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 3931–3936.
- Cao, J., and Wu, R. S., 2009, Full-wave directional

- illumination analysis in the frequency domain: *Geophysics*, **74**(4), S85–S93.
- Chen, B., and Jia, X., 2014, Staining algorithm for seismic modeling and migration: *Geophysics*, **79**(4), S121–S129.
- Chen, B., Ning, H., and Xie, X. B., 2016, Investigating the effect of shallow scatterings from small-scale near-surface heterogeneities to seismic imaging: A resolution analysis based method: *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, **59**(5), 1762–1775.
- Chen, B., and Xie, X. B., 2015, An efficient method for broadband seismic illumination and resolution analyses: 85th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 4227–4231.
- Dale, L., and Slack, J. M. W., 1987, Fate map for the 32-cell stage of *Xenopus laevis*: *Development*, **99**, 527–551.
- Gelius, L. J., Lecomte, I., and Tabti, H., 2002, Analysis of the resolution function in seismic prestack depth imaging: *Geophysical Prospecting*, **50**, 505–515.
- Gilbert, S. F., 2000, *Developmental Biology*: Sinauer Associates, Sunderland (MA), 265–268.
- Ginhoux, F., M., Greter, M., Leboeuf, S. et al., 2010, Fate mapping analysis reveals that adult microglia derive from primitive macrophages: *Science*, **330**, 841–845.
- Jackson, M. P. A., Vendeville, B. C., and Schultz-Ela, D. D., 1994, Salt-related structures in the Gulf of Mexico: A field guide for geophysicists: *The Leading Edge*, **13**, 837–842.
- Lecomte, I., 2008, Resolution and illumination analyses in PSDM: A ray-based approach: *The Leading Edge*, **27**, 650–663.
- Leveille, J., Jones, I., Zhou, Z., Wang, B., and Liu, F., 2011, Subsalt imaging for exploration, production, and development: A review: *Geophysics*, **76**(5), WB3–WB20.
- Liu, Y., Chang, X., Jin, D., He, R., Sun, H., and Zheng, Y., 2011, Reverse time migration of multiples for subsalt imaging: *Geophysics*, **76**(5), WB209–WB216.
- Luo, M., Cao, J., Xie, X. B. et al., 2004, Comparison of illumination analyses using one-way and full-wave propagator: 74th Annual International Meeting, SEG, Expanded abstract, 67–70.
- Mao, J., and Wu, R. S., 2011, Fast image decomposition in dip angle domain and its application for illumination compensation: 81st Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 3201–3204.
- Muerdter, D., and Ratcliff, D., 2001, Understanding subsalt illumination through ray-trace modeling, Part 1: Simple 2-D salt models: *The Leading Edge*, **20**(6), 578–594.
- Symes, W. W., 2008, Migration velocity analysis and waveform inversion: *Geophysical prospecting*, **56**(6), 765–790.
- Valenciano, A., Lu, S., Chemingui, N. et al., 2015, High resolution imaging by wave equation reflectivity inversion: 77th Annual International Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, We N103.
- Wu, R. S., and Chen, L., 2006, Directional illumination analysis using beamlet decomposition and propagation: *Geophysics*, **71**(4), S147–S159.
- Wu, R. S., Chen L., and Xie, X. B., 2003, Directional illumination and acquisition dip-response. 65th Conference and Technical Exhibition, EAGE, Expanded abstract, P147.
- Wu, R. S., Xie, X. B., Fehler, M., and Huang, L. J., 2006, Resolution analysis of seismic imaging: 68th Annual International Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, G048.
- Xie, X. B., Jin, S. W., and Wu, R. S., 2006, Wave-equation based seismic illumination analysis: *Geophysics*, **71**(5), S169–S177.
- Xie, X. B., Wu, R. S., Fehler, M., and Huang, L., 2005, Seismic resolution and illumination: A wave-equation based analysis: 75th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1862–1865.
- Xie, X. B., and Yang, H., 2008, A full-wave equation based seismic illumination analysis methods: 70th Annual International Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, P284.
- Yan, R., Guan, H., Xie, X. B., and Wu, R. S., 2014, Acquisition aperture correction in the angle domain toward true-reflection reverse time migration: *Geophysics*, **79**(6), S241–S250.
- Yang, H., Xie, X. B., Jin, S., and Luo, M., 2008, Target oriented full-wave equation based illumination analysis: 78th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2216–2220.

**陈波**, 中国科学技术大学地球和空间科学学院博士研究生, 2010年本科毕业于中国科学技术大学, 目前主要从事地震波传播与复杂介质成像研究。Email: chenbo6@mail.ustc.edu.cn

