

文章编号:1671-8585(2007)02-0111-08

# 三维地震采集观测系统设计技术 ——以柴达木盆地西部地区为例

尹吴海<sup>1,2</sup>, 甄文胜<sup>2</sup>, 魏国显<sup>2</sup>, 张立军<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东), 山东东营 257061; 2. 中国石油集团东方地球物理有限责任公司敦煌分院, 甘肃敦煌 736202)

**摘要:**在常规三维观测系统设计中,主要是利用二维地质模型进行射线追踪分析,在地质结构较为复杂的区域,仅仅依靠射线追踪方法进行三维观测系统参数论证,其结果往往不准确。以2005年柴达木盆地所实施的三维地震采集项目的观测系统设计为例,介绍通过波动方程正演、照明模拟和三维地质模型分析等多种技术手段的综合运用,进行基于目标地质体的三维观测系统优化设计。

**关键词:**观测系统设计;照明;波动方程正演;三维模型

**中图分类号:**P631.4

**文献标识码:**A

在面向地质目标体的野外观测系统设计中,主要是通过地震波的模拟和分析,更好地了解地震波在该模型结构下的传播规律,从而优化地震采集观测系统。

地震波场模拟技术是认识地震波传播规律和论证不同观测参数直接有效的工具<sup>[1]</sup>,目前较为常用的技术有地震波动方程正演以及照明技术。但是在以往三维观测系统设计中,这些方法在设计中很少被涉及,或者几乎不用,这对我们在构造复杂地区设计一套合理的采集观测系统是不利的。本文通过一个三维观测系统设计实例,介绍了如何运用多种观测系统设计技术,优化得到我们所期望的三维采集观测系统。

## 1 目标区地质概况及勘探难点

目标区块地下形态主要受控于一条走向为北西西向的高陡倾角逆掩大断裂,其断距自西向东由大变小,垂直断距为1 900~3 000 m,水平断距2 000~4 000 m,Ⅲ号和Ⅶ号断层分别位于该大断裂南北两侧,并与之形成一套左旋走滑性质的构造区域,在构造的主体部位次级断层非常发育,使得该区地下构造形态十分复杂(图1)。通过非地震调查发现,在下降盘逆掩覆盖区至少有3 km左右的地层被压在上盘地层之下,这一宽度与一般油气田的规模相当,证明该部位是非常有利的油气富集区带。

由于地下地震波反射路径非常复杂,并且逆掩断裂下盘的反射信息受到上盘基岩的屏蔽,反射能量较弱,因此资料获取相对困难。从以往三维地震

资料来看,逆掩下盘资料品质较差,几乎见不到有效的地震反射,无法落实其具体的构造细节(图2),所以此次二次三维观测系统设计的重点就是如何提高逆掩断裂下盘的成像效果。

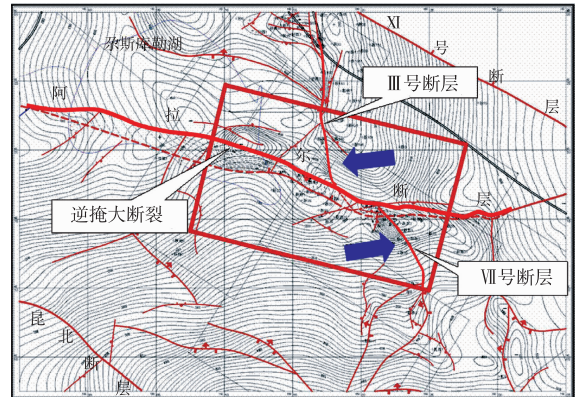


图1 目标区域构造

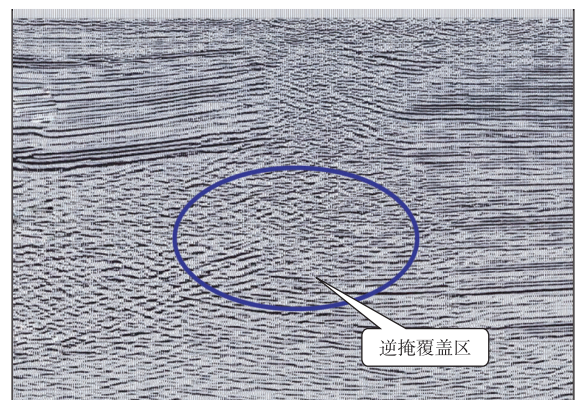


图2 该区老三维资料

收稿日期:2006-09-18;改回日期:2006-12-20。

第一作者简介:尹吴海(1977—),男,工程师,2000年毕业于西南石油学院,主要从事野外地震采集工作。

## 2 以往三维勘探观测系统简述

该区在1991—1992年进行了三维地震勘探工作,所采用的三维观测系统为4线×6炮束状观测系统,从其观测参数来看,当时采集的三维面元大小设计不合理(15 m×40 m),原始资料采集的排

列长度过短(纵向最大炮检距1 875 m),并且覆盖次数低(24次),致使深层及大倾角断面采集能量弱,给目的层的偏移成像带来困难。从1998年后,邻区开始采用6线×12炮束状观测系统进行三维采集,虽然接收线数和接收道数都有一定增加,但其面元属性仍然较差(图3),影响了资料品质。该区以往三维观测参数见表1。

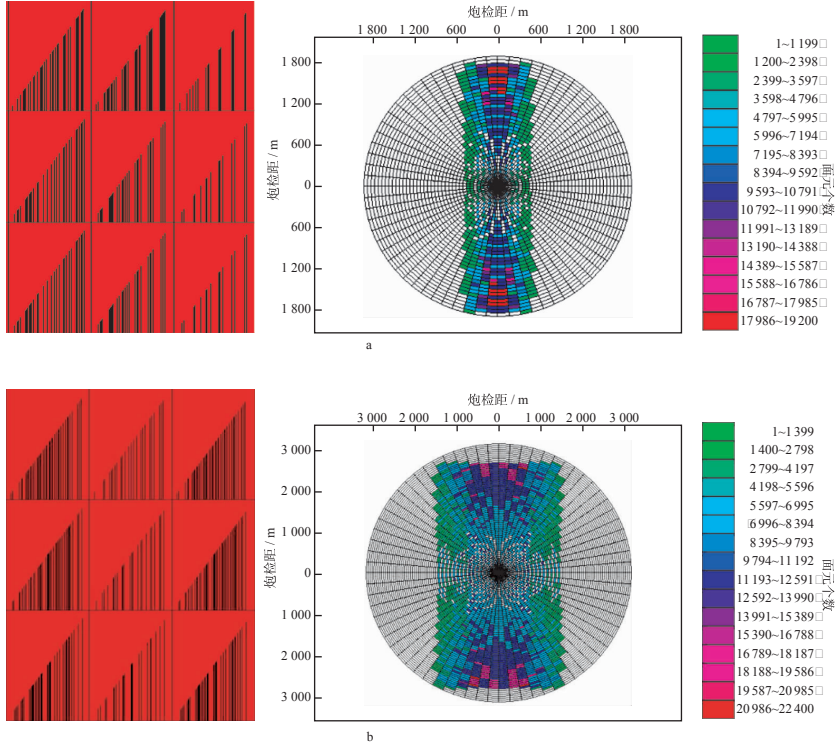


图3 以往三维观测系统面元属性分析

a 4线×6炮束状观测系统; b 6线×12炮束状观测系统

表1 该区以往三维观测系统参数表

施工年度	观测系统	覆盖次数	面元/m <sup>2</sup>	纵向 $X_{\max}$ /m	纵向炮距/ m	接收线距/ m	接收道数	道距/ m	横向炮距/ m
1991—1992年	4L6S	12×2=24	15×40	1 875	150	160	4×120=480	30	80
1998—1999年(邻区)	6L12S	15×3=45	25×50	3 050	200	400	6×120=720	50	100
2000—2001年(邻区)	6L12S	20×3=60	25×50	4 050	200	400	6×160=960	50	100

## 3 地球物理模型建立

三维地球物理模型的建立主要利用以往三维资料解释成果和测井、录井数据。三维模型以目标区逆掩断裂部位为中心,Ⅶ号断层位于东南部,Ⅲ号断层位于三维模型中北部位置(图4),同时在模型中部选择一条沿观测方向的二维测线作为波动方程正演和照明模拟的二维模型线,该线向北穿过Ⅲ号断层(图5)。

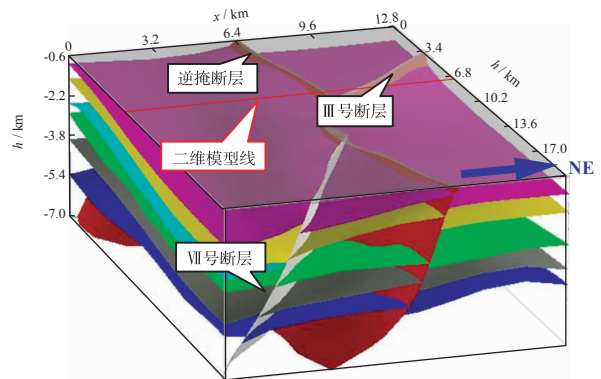


图4 三维地质模型

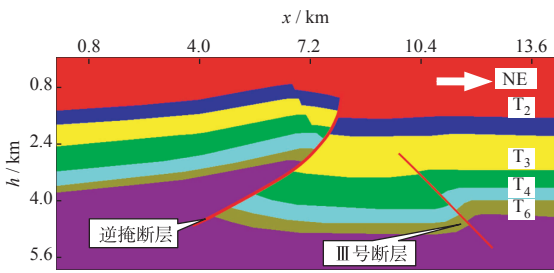


图5 二维地球物理模型线

## 4 正演模拟原理简述

地震波动方程正演模拟是面向地质目标的野外观测系统设计的最直观和最彻底的方法,地震波照明分析是在波动理论的框架下模拟地震波在模型中的传播<sup>[2]</sup>。判断一个好的面向目标的采集系统的标准是:震源激发的地震波,经过上覆地层后,在目标反射面上具有较大且均匀的照明强度,目标体的反射波经过上覆地层后,主要能量能够被适当长度的排列接收到<sup>[3]</sup>。此次波动方程模拟采用的是二维声波模拟方法,其方程为<sup>[4,5]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{1}{K} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + f(x, z, t) \delta(x - x_0, z - z_0) \quad (1)$$

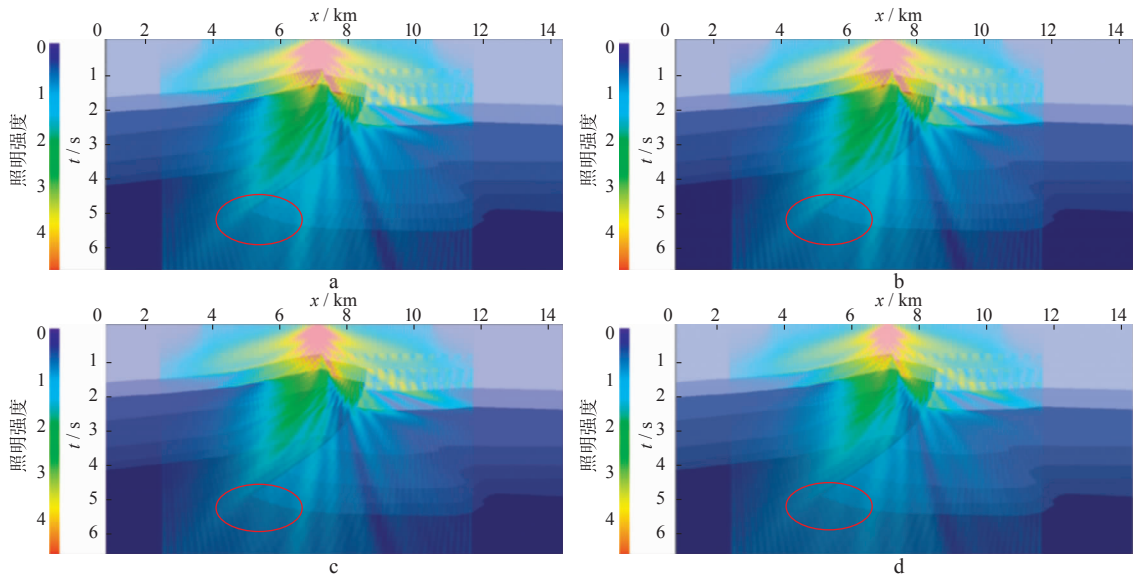


图6 不同道距单炮照明模拟

a 道距为 20 m; b 道距为 30 m; c 道距为 50 m; d 道距为 60 m

## 5.2 最大炮检距分析

在不同炮检距的单炮照明和正演分析中,为更好地分析不同炮检距对断裂带下盘目的层的成像效果,分别对 2 685, 3 585, 5 385, 6 285 m 不同炮检距进行了对比分析。激发点位置选择在断裂带处,

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + f(x, z, t) \delta(x - x_0, z - z_0) \quad (2)$$

式中: $p(x, y, z, t)$ 是声波压力函数; $v(x, y, z)$ 是速度; $K$ 为声学介质弹性常数; $\rho$ 为介质密度; $f(x, y, z, t) \delta(x - x_0, y - y_0, z - z_0)$ 是非齐次项。

## 5 正演模拟分析

### 5.1 道距分析

由于采用较小道距可以使目标地质体有更多的 CMP 点分布,有利于落实地下地质体特征,精确描述目标地质体的空间展布<sup>[6]</sup>。因此为了更好地分析不同道距对目的层的成像效果,我们分别对比了道距为 20, 30, 50, 60 m 情况下的单炮照明效果。图 6 中不同颜色表示地震波的照明强度,红色、黄色、绿色、蓝色表示地震波能量依次降低。从不同道距的单炮照明效果图看,道距 20 m 和道距 30 m 时,逆掩断裂下盘目的层照明强度较高,但两者之间区别不明显;道距为 50 m 时,其照明强度较道距为 20 m 和 30 m 时都低,而下盘目的层强度在道距 60 m 时最低。因此,该区采用 30 m 的道距较为合理。

采用 30 m 道距和中间对称接收的观测方式。从不同炮检距的单炮照明效果来看,炮检距为 6 285 m 时,逆掩断裂下盘目的层的照明强度相对最高,5 385 m 次之,而 2 685 m 和 3 585 m 目的层的照明强度相对最低(图 7)。

从声波正演波场快照上可以发现(图8),受逆掩断裂屏蔽作用的影响,逆掩覆盖区目的层的反射波能量弱,反射波上行透过逆掩断层时的透射系数

比较小,因此在断裂之上接收的目的层反射数据信噪比特别低,即采用过短接收排列不利于提高逆掩断裂覆盖区之下目的层的成像<sup>[7]</sup>。

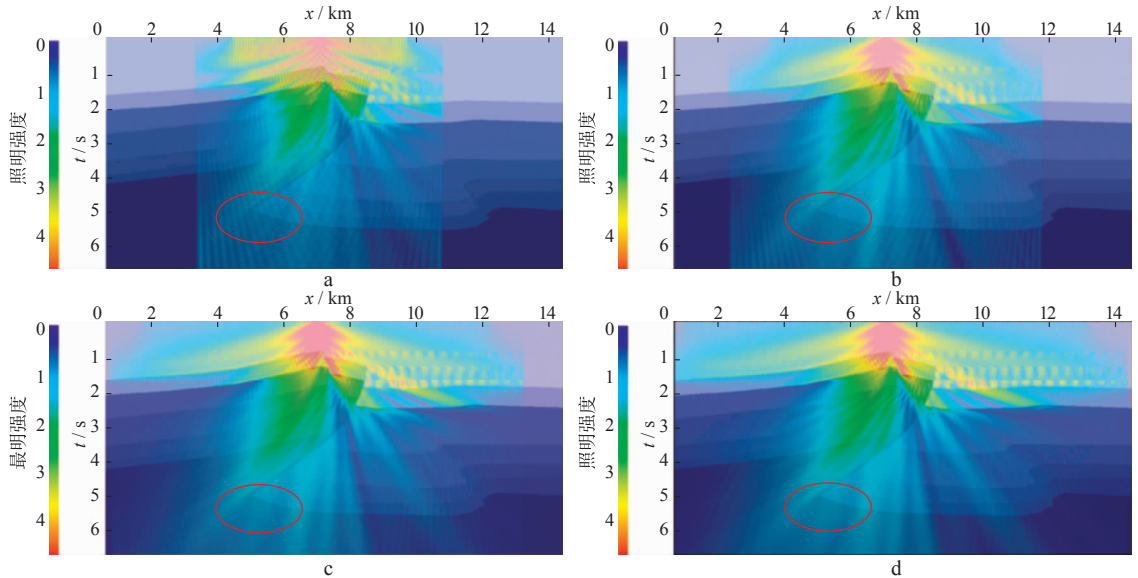


图7 不同炮检距单炮照明模拟

a 炮检距为 2 685 m; b 炮检距为 3 585 m; c 炮检距为 5 385 m; d 炮检距为 6 285 m

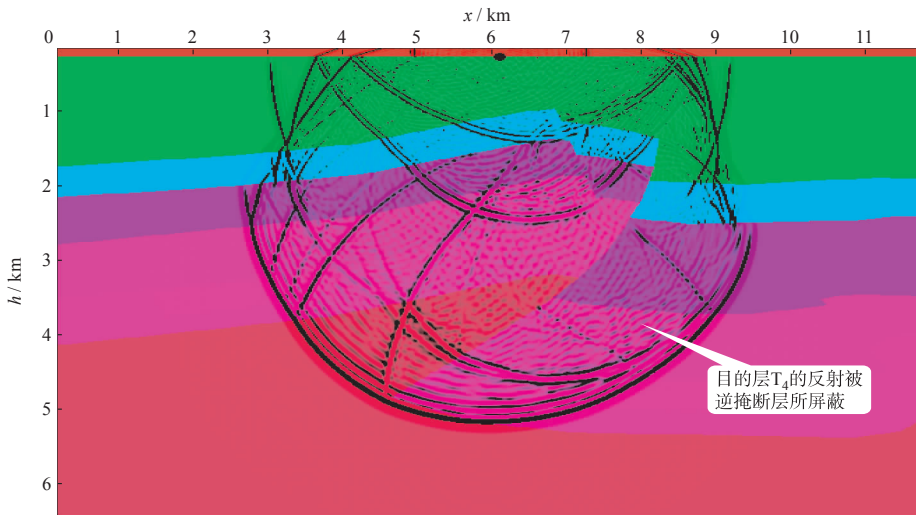


图8 声波正演 1.34 s 瞬时波场快照

从不同炮检距的正演波场快照以及模拟单炮记录上可以明显看出(图9~图12),在逆掩断裂之上接收不到来自下盘目的层的反射信息,其反射出现在排列远道。当纵向排列长度为 2 685 m 时,近排列无法接收到来自逆掩覆盖区的反射,仅在远道处见到  $T_6$  目的层反射的影子;当接收排列长度达到 5 385 m 时, $T_6$  目的层的反射信号越来越明显;当采用 6 285 m 的接收排列时,还能够获得来自 III 号断层的绕射信息。因此,在该区采用较长的接收排列,不但能够获得更多的来自逆掩断裂下盘目的层的反射信号,而且还能够接收到更多的断裂绕射信息,这对改善复杂断裂区的资料成像效果非常

有利<sup>[8]</sup>。

### 5.3 不同位置激发效果分析

为了分析在不同位置激发对逆掩覆盖区资料品质的影响,我们在上盘、断裂带及下盘 3 个不同区域进行了模拟单炮激发对比分析。从不同位置处的照明及单炮正演模拟记录上可以明显看出(图13~图15):在上盘激发时,逆掩覆盖区能得到较好的照明,从所对应的单炮正演模拟记录上也可以看出,覆盖区目的层反射能量强并且信噪比较高;当在断裂带激发时,其逆掩覆盖区的照明强度稍低,资料品质有所降低;当激发位置在断裂下盘位置时,逆掩覆盖区的照明强度最低,有效反射能量

相对上盘和断裂带处激发时较弱,资料品质最差<sup>[9,10]</sup>。综合以上分析结果,我们可以得出以下结

论:野外激发炮点的加密应尽量选择在上盘的部位,尽量避免在断裂下盘布设加密炮点。

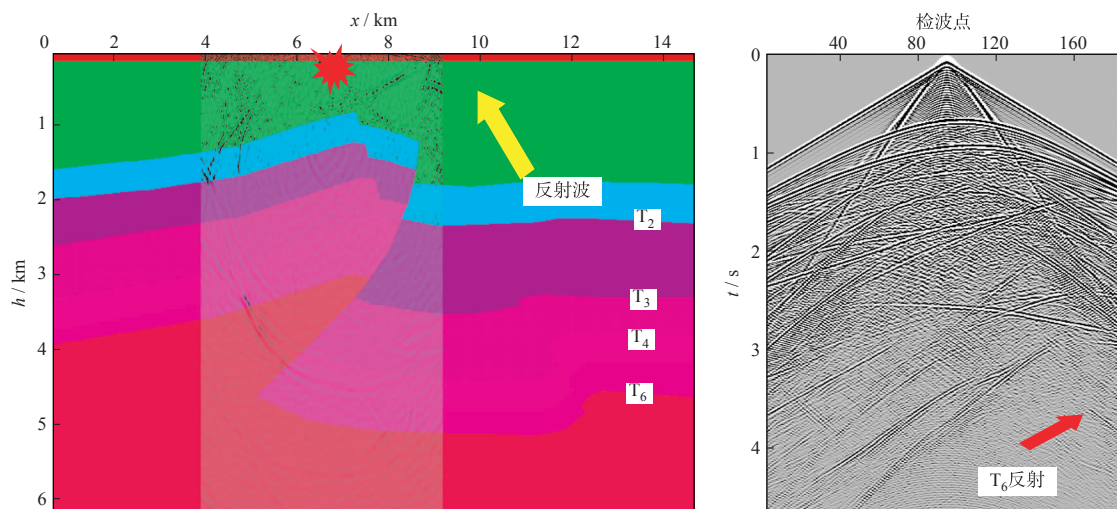


图 9 纵向最大炮检距 2 685 m 时,声波传播 2.74 s 瞬时快照与模拟单炮记录

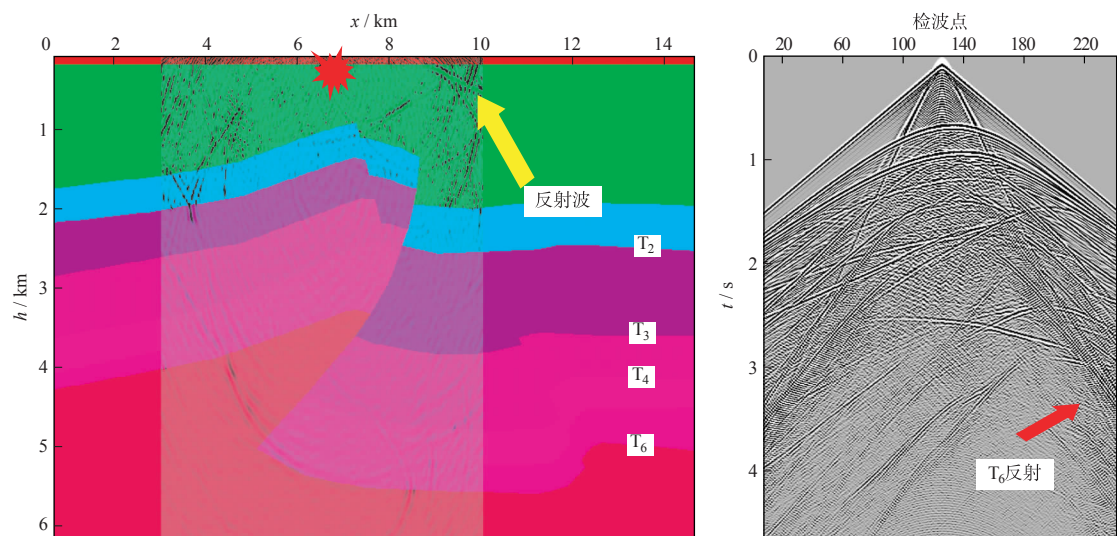


图 10 纵向最大炮检距 3 585 m 时,声波传播 2.84 s 瞬时快照与模拟单炮记录

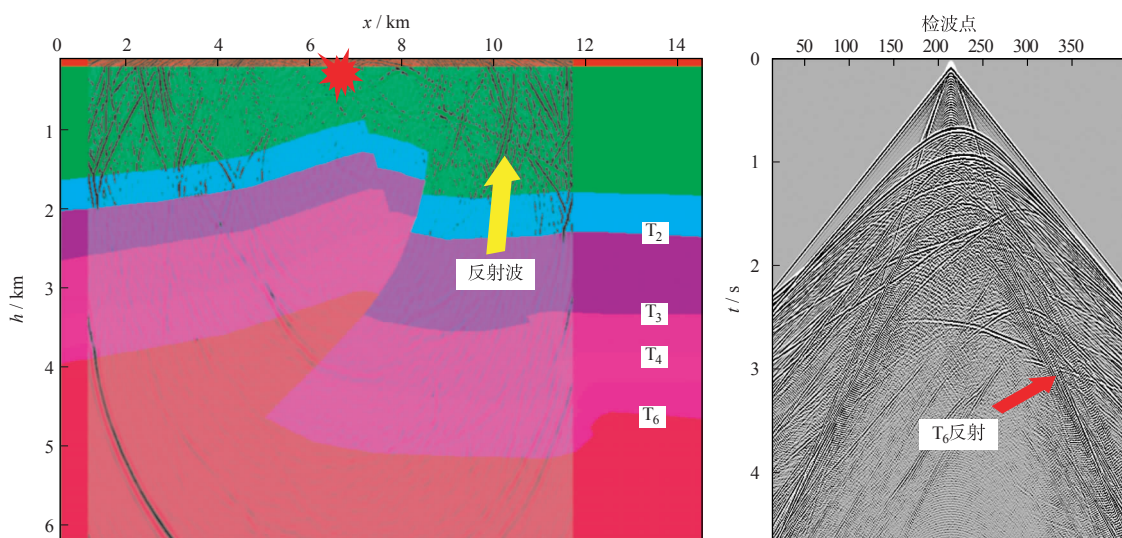


图 11 纵向最大炮检距 5 385 m 时,声波传播 2.64 s 瞬时快照与模拟单炮记录

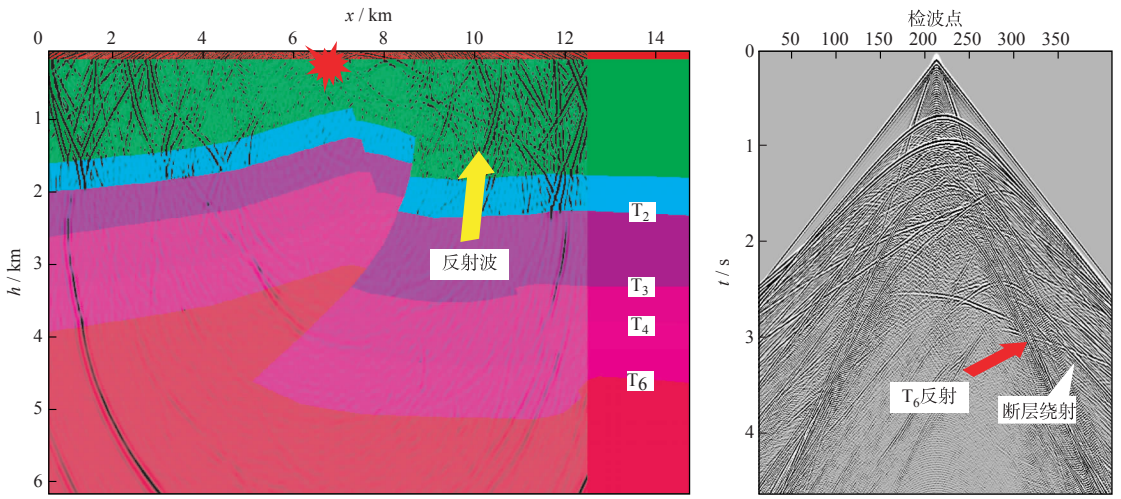


图 12 纵向最大炮检距 6 285 m 时, 声波传播 2.64 s 瞬时快照与模拟单炮记录

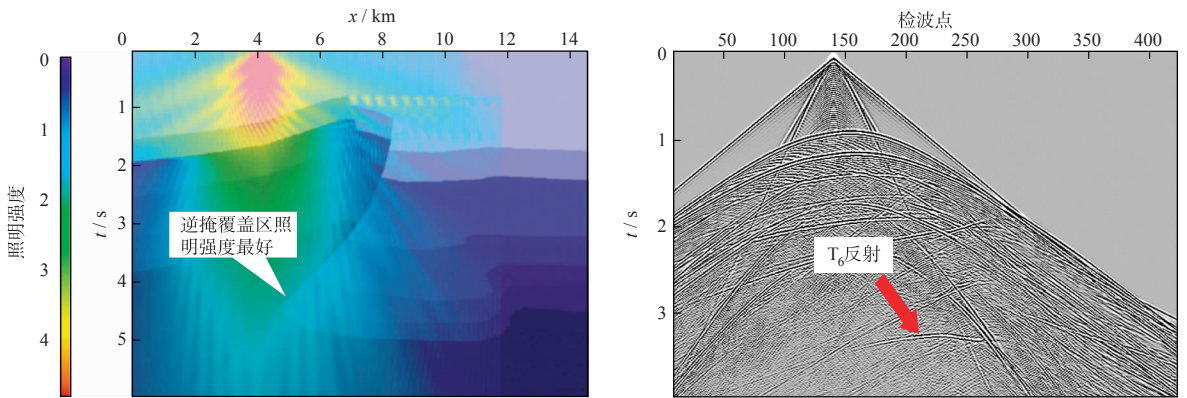


图 13 上盘位置激发的照明及单炮模拟

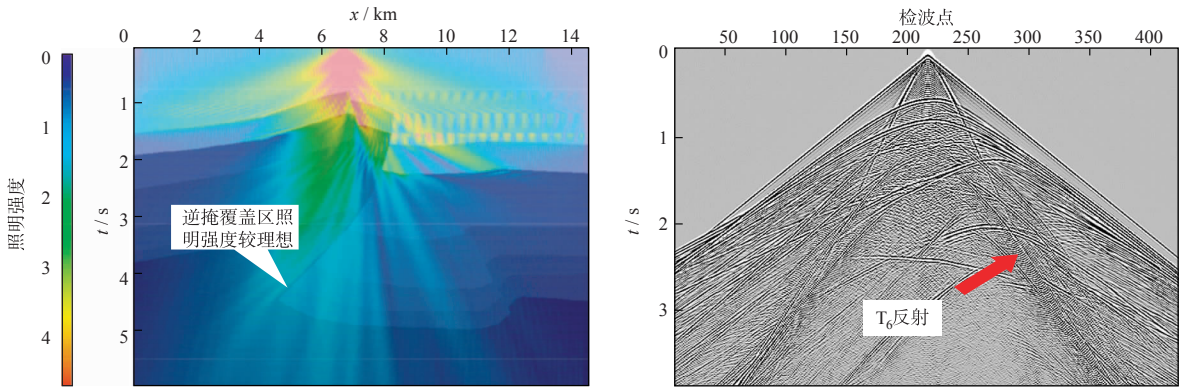


图 14 断裂带位置激发的照明及单炮模拟

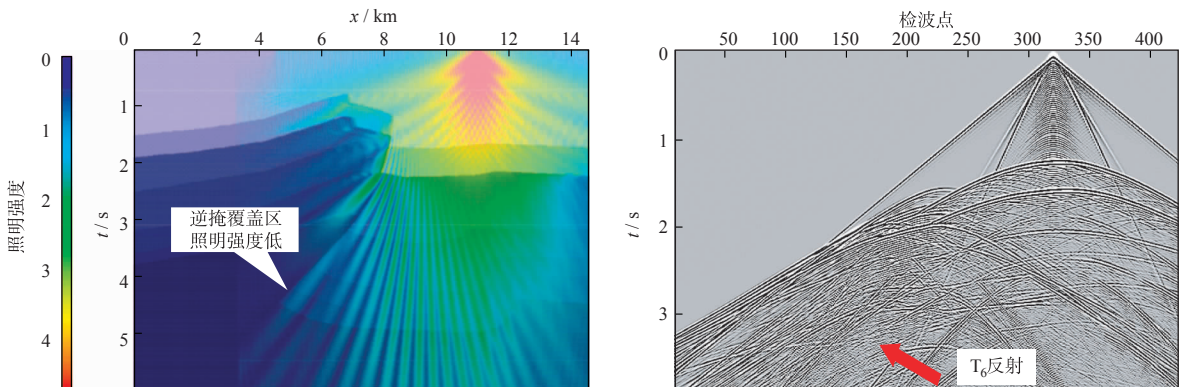


图 15 下盘位置激发的照明及单炮模拟

## 6 成像效果分析

为了更加直观地分析长排列在复杂断裂区对目的层成像的改善作用,我们也利用三维地质模型

分析了目的层的 CRP 覆盖次数(图 16),从分析结果来看,长排列对改善复杂断裂区的成像效果是非常有利的。因此,综合以上不同观测参数对地质目标体成像效果的分析结论,我们得出了该区三维地震采集观测系统的主要参数(表 2)。

表 2 该区新老观测系统主要参数对比

观测系统	道距/m	面元/m <sup>2</sup>	纵向 X <sub>max</sub> /m	覆盖次数
4L6S(老)	30	15×40	1 875	12×2=24
8L8S(新)	30	15×30	7 185	24×4=96

从图 17 中的新老资料对比可以看出,逆掩断裂覆盖区下盘目的层的成像取得了非常明显的效果,目的层的信噪比得到了大幅度的提高。从

1 200 ms 的时间切片上看(图 18),断裂展布更加清晰,其分布也趋于合理,并且局部细小构造格局显示得更加清楚。

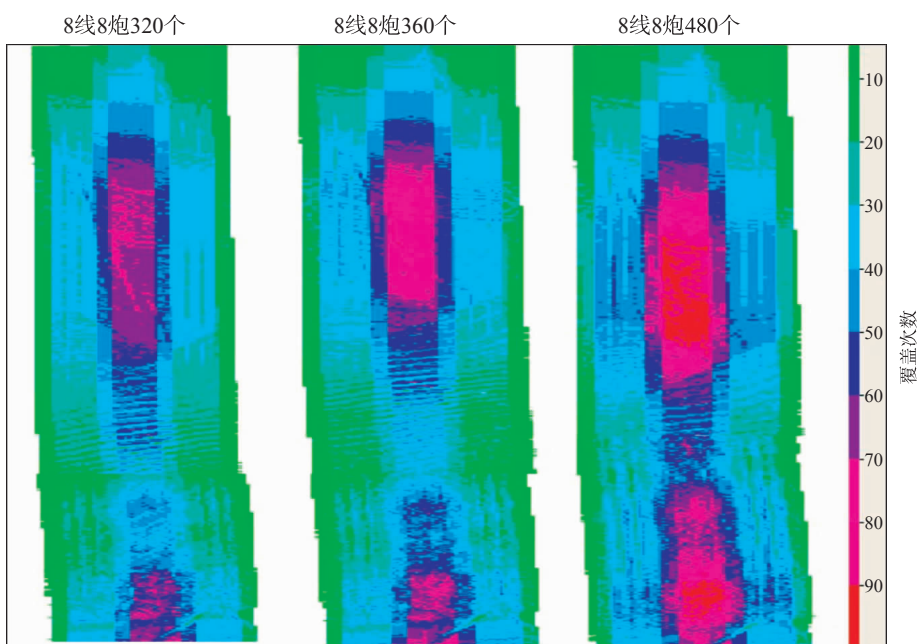


图 16 目的层 T<sub>6</sub> CRP 覆盖次数分布

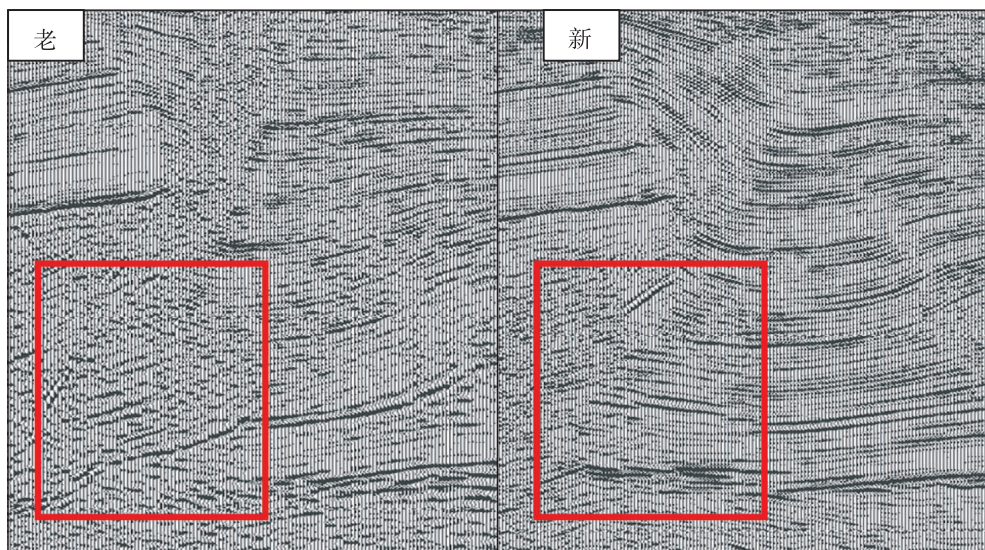


图 17 剖面效果

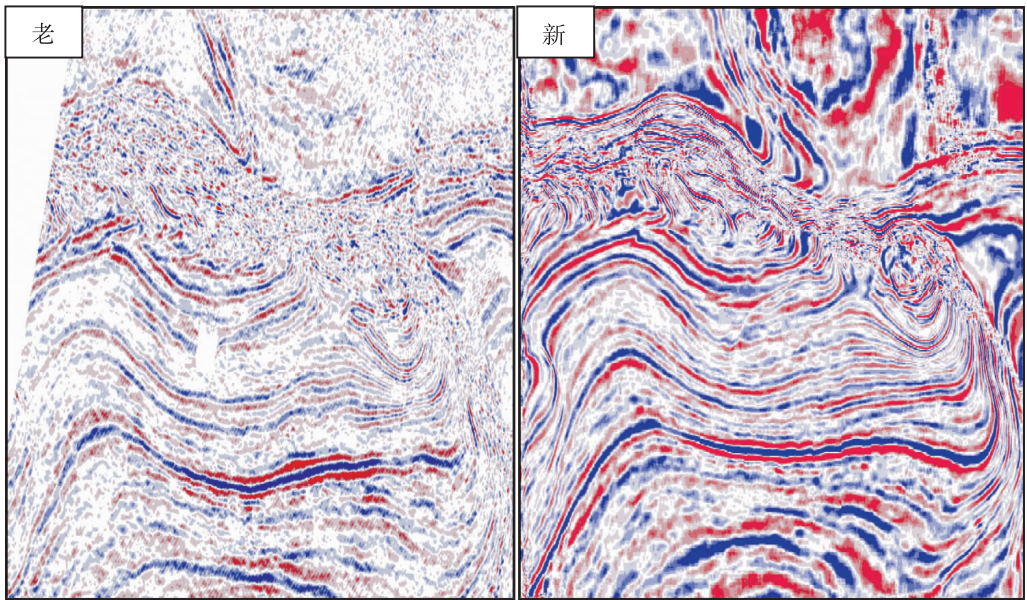


图 18 切片效果(1 200 ms)

## 7 结论

针对复杂地质目标体的观测系统设计,尤其是逆掩断裂下盘目的层有效成像的观测系统设计,是目前三维观测系统设计的难点。通过综合利用波动方程正演、照明模拟和三维模型分析等多种技术手段,较好地解决了该区三维观测系统的设计问题,也为类似区域的观测系统设计提供了成功经验和参考。

感谢中国石油集团东方地球物理勘探有限公司研究院敦煌分院提供剖面。

### 参 考 文 献

- 1 余德平. 波场数值模拟技术[J]. 勘探地球物理进展, 2004, 27(1): 19~24
- 2 张永刚. 地震波场数值模拟方法[J]. 石油物探, 2003, 42(2): 3~8
- 3 董良国, 吴晓东, 唐海忠等. 逆掩推覆构造的地震波照明与观测系统优化[J]. 石油物探, 2006, 45(1): 47~54
- 4 刘守伟, 耿建华, 冯伟. 控制照明于面向目标成像的观测系统设计(英文版)[J]. 应用地球物理, 2005(4): 14~19
- 5 李丕龙主编. 中国西部油气地质(第2卷)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006. 5~10
- 6 李仲远, 刘胜, 郭勇. 基于目标的三维观测系统设计——以百色盆地北部陡坡带实际应用为例[J]. 石油物探, 2006, 45(3): 104~108
- 7 董良国. 复杂地表条件下地震波传播数值模拟[J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(3): 45~52
- 8 谭绍泉. 基于模型分析的潜山断裂带优化观测系统参数设计[J]. 石油物探, 2004, 43(5): 7~14
- 9 吴博, 王玉珏, 吴有信等. 三维地震勘探在复杂逆掩断层地区的应用及效果[J]. 西部探矿工程, 2005, 17(S1): 161~163
- 10 赵殿栋, 吕公河, 张庆淮等. 高精度三维地震采集技术及应用效果[J]. 石油物探, 2001, 40(1): 1~8