

川西龙门山复杂构造区精细模型构建和正演

黎书琴, 敬龙江, 罗仕迁, 杜均国, 何艳发, 张荣峰

中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司西南物探分公司, 四川 成都

收稿日期: 2024年1月19日; 录用日期: 2024年5月22日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

川西龙门山前带从推覆体下盘至前陆带, 构造成排成带发育, 勘探有利区进一步往西北拓展。目前红星1井首次钻穿推覆构造带, 栖霞组获得高产工业气流, 打开了龙门山山前带的勘探局面。但研究区为典型地震勘探双复杂地区, 地震资料信噪比低, 成像效果差, 逆掩推覆体下盘构造落实程度低, 严重影响圈闭落实。基于模型的观测关键参数测试分析能在较短时间以极低成本直观反应不同采集参数最终偏移成像结果, 有效指导川西北部龙门山前带观测方案设计与优化, 提高地震采集质量, 降低勘探风险。基于模型分析的关键部分是建模和正演, 因此, 依据深度剖面和近地表调查成果构建了川西北部龙门山地区逆掩推覆体构造2D高仿真地质模型, 实现了基于双复杂构造的精细建模。并通过二维波动方程正演得到了模拟单炮记录, 通过与野外采集单炮对比, 吻合度较高, 为下一步观测参数测试分析打下了基础。

关键词

龙门山前带, 精细建模, 波场特征分析, 吸收边界, 正演

Fine Model Construction and Forward Modeling of Complex Structural Areas in Longmen Mountain, Western Sichuan

Shuqin Li, Longjiang Jing, Shiqian Luo, Junguo Du, Yanfa He, Rongfeng Zhang

Southwest Geophysical Branch, BGP, CNPC, Chengdu Sichuan

Received: Jan. 19th, 2024; accepted: May 22nd, 2024; published: May 31st, 2024

Abstract

Longmen Mountain Foothill in western Sichuan is developed in a row of structures from the lower wall of the thrust block to the foreland zone, and the favorable exploration area is further expanding to the northwest. At present, the Hongxing 1 well has drilled through the thrust belt for

文章引用: 黎书琴, 敬龙江, 罗仕迁, 杜均国, 何艳发, 张荣峰. 川西龙门山复杂构造区精细模型构建和正演[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(5): 697-704. DOI: 10.12677/ag.2024.145064

the first time, and the Qixia Formation has obtained high-yield industrial gas flow, opening up the exploration situation in the front of the Longmen Mountain. However, the research area is a typical seismic exploration complex area, with low signal-to-noise ratio and poor imaging effect of seismic data. The degree of implementation of the lower wall structure of the overthrust nappe is low, which seriously affects the implementation of traps. Model based observation key parameter testing and analysis can intuitively reflect the final migration imaging results of different acquisition parameters in a very low cost and in a short period of time, effectively guiding the design and optimization of observation schemes in the front of Longmen Mountain in northwest Sichuan, improving the quality of seismic acquisition, and reducing exploration risks. The key parts of model analysis are modeling and forward modeling. Therefore, based on depth profiles and near surface survey results, a 2D high simulation geological model of the overthrust nappe structure in the Longmenshan area of northwest Sichuan was constructed, achieving elaborate modeling based on dual complex construction. And simulated single shot records were obtained through two-dimensional wave equation forward modeling. Compared with field collected single shot records, the agreement was high, laying a foundation for the next step of observation parameter testing and analysis.

Keywords

Longmen Mountain Foothill, Elaborate Modeling, Wave Field Characteristics Analysis, Absorption Boundary, Forward Modeling

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

龙门山位于松潘 - 甘孜褶皱带与扬子准地台的接合部位, 是青藏高原与四川盆地的分界带, 构成四川盆地西侧的高山区, 构造尤为复杂。川西龙门山山前带推覆体下盘发育大型构造, 构造成排成带发育, 共发育 8 排构造带, 其中山前带 2 排, 前陆带 6 排, 勘探有利区进一步往西北拓展。龙门山北段逆掩断层非常发育, 逆掩断层下盘隐伏构造油气资源十分丰富, 是四川盆地重要的战略油气接替区 [1] [2] [3] [4] [5]。

近年来地震勘探相关技术人员就复杂构造地震采集观测系统进行了大量研究 [6]-[13]。为了推进川西龙门山复杂构造区地震勘探的进程, 如何制定适合该地区的地震观测系统成为焦点问题。基于精细建模的关键参数测试分析技术作为重要的观测系统参数论证手段, 能在较短时间以极低成本直观反应不同采集参数最终偏移成像结果, 理所应当成为了解决这一问题的重要技术支撑。目前有少量研究是针对二维地震剖面进行龙门山前带构造恢复 [14]-[19], 但是并没有用测井数据进行约束, 无法准确反应地下构造和速度变化的复杂性, 也没有考虑到严重影响地震资料品质的近地表问题。为此, 本文提出了将钻测井数据、近地表调查成果等资料相结合的精细地质建模的方法, 首次建立了川西龙门山前带的高仿真地表二维地球物理模型, 并通过二维波动方程正演得到了模拟单炮记录, 通过与野外采集单炮对比, 吻合度较高。

2. 研究区地震地质特征

四川盆地西北部的龙门山复合造山带, 被誉为“地质百幕大”, 以发育典型的逆冲推覆构造而举世闻名。研究区地表岩性复杂, 从志留系到第四系地层均有出露, 地表大面积出露三叠系以老地层, 岩性

主要以灰岩、砂泥岩为主。研究区属于典型的高陡山地地貌，地形起伏大，局部相对海拔差最大可达 1500 m，低速层厚度变化大，静校正问题突出。

研究区具有以下地震地质特征：

(1) 研究区内断层众多，从东北向西南贯穿整个工区，断层深度达到 8000 m，穿透了寒武系至侏罗系等多个层系，发育多条铲式逆冲断层，以龙 1 号~马角坝等逆冲断层为基础，形成了龙门山推覆体；

(2) 研究区东南部属于山前带前陆盆地，地表主要侏罗系、白垩系地层，下伏地层沉积连续，各地层之间整合接触，地震资料的信噪比较高，成像效果好，且该区域有近年来刚采集的三维地震数据；

(3) 研究区中部为逆掩区，在构造应力作用地层明显抬升，褶皱核心区第四系至侏罗系地层被剥蚀，出露三叠系以老地层，逆冲断层上盘地层陡倾甚至倒转，断裂带下盘发育潜伏构造。该区域仅有二维地震资料，资料信噪比较低、成像效果差，尤其是断裂带下盘潜伏构造部位，地震反射同相轴难以连续追踪；

(4) 研究区西北部高山地区，为逆掩推覆构造上盘，主要出露较老的志留系、泥盆系及石炭系地层，上覆地层之间为不整合接触。二维地震剖面上深部反射同相轴难以连续追踪，区内三维地震资料少。

由于研究区近地表及地下构造“双复杂”的特点，构造主体区仅有的二维地震资料的品质不高，影响了该地区的油气勘探开发进程，也给三维地震地质模型建立带来了极大困难。

3. 高仿真精细模型构建

3.1. 建模思路

建立精细的构造-速度模型，需要经过如下图 1 所示的步骤：首先需要通过地震资料和测井资料进行精细层位标定，目标是保证圈闭层位的准确性，区带层位的统一性，其次依据钻井资料、野外考察的地质资料和断层褶皱理论进行构造建模，目标是建立逼近实际的构造模型，然后根据层速度、压实应用作用和微测井资料约束建立层速度平面图和纵向图，最后利用构造建模+精细速度建场建立逼近实际的构造-速度模型(图 2)。

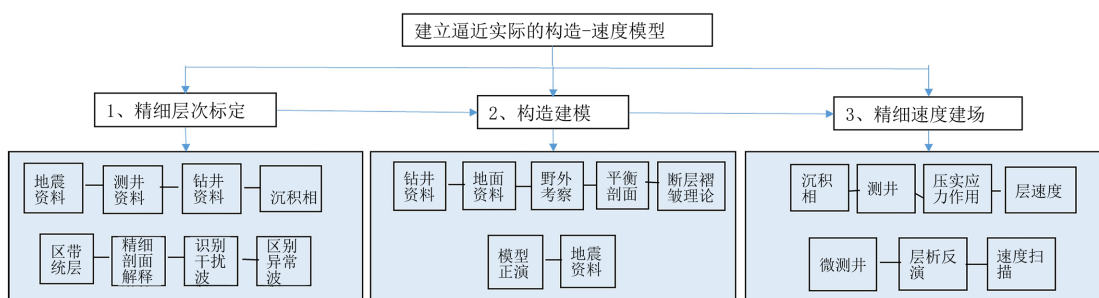


Figure 1. Construction-speed model establishment process

图 1. 构造-速度模型建立流程

地质模型层面包含地质层位、断面、地表面、低速层界面等，按照“断层→地层→地表面→低速层界面”的顺序依次构建，主要利用地表 DEM 高程数据、微测井解释数据、2D 深度域层位和断层解释数据等资料，以交互编辑和自动生成相结合的方式构建层面，再经过层面求交、块体追踪，形成地质模型。

3.2. 地腹精细建模

首先针对断层面和地层卖弄进行构建，针对构造主体部位区域性的逆冲断层，根据断层的空间分布特征，将多条二维剖面上解释的断层进行构建，即可完成主要断层面构建。同时，可采用 2D 地震解释

成果构建层面，并对二维地震层位解释数据进行数据编辑、剔除异常之后，根据断层的展布进行分片构建层面。并依据 A 井和 B 井的实钻地层结构及测井成果，对速度结构模型进行更新。

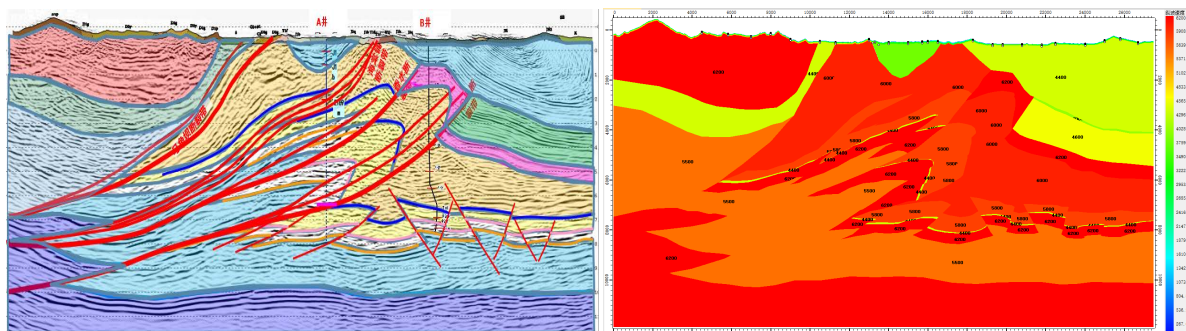


Figure 2. Speed model establishment and update
图 2. 速度模型建立及更新

3.3. 近地表精细融合建模

利用研究区内高精度的 DEM 数值高程即可实现起伏地表的构建；将研究区内所有微测井解释成果进行插值，很容易即可得到低速层界面数据。本文中导入川西北部的全部微测井点位进行优化，最后用到 23 个微测井点位对近地表模型进行了约束(图 3)，最后为了更加真实反映地层速度的变化，再通过速度压实曲线拟合使近地表结构实现了横纵向的速度渐变，并且较好地实现了地表和地腹构造的精细融合。

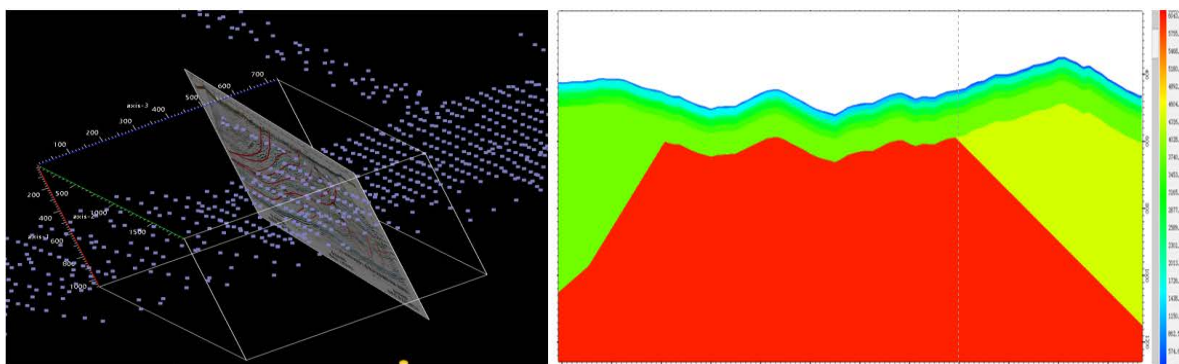


Figure 3. Construction of near surface model
图 3. 近地表模型构建

4. 正演和波场特征分析

Alterman 和 Karal (1968)首先研究了弹性波有限差分在层状介质中的传播，差分方法在地震勘探的实际应用中不断发展。1984 年，Virieux 发展了交错网格有限差分，跟常规网格有限差分相比，其精度提高了四倍，并且还有待提高，收敛速度也快了，还没有增加工作量和存储空间。为了减弱干扰波的产生，Jastram 和 Tessmer (1994)提出垂直可变网格弹性波模拟方法，紧接着 Hayash 等(2001)等对起伏地表采用可变网格进行弹性波模拟，后来又用三倍的精细网格实现了低速区的非规则网格模拟。Ruud 和 Hestholm (2001)推导了新的自由边界条公式，给出了解决数值计算和由于边界条件离散导致的系统不稳定(空间)的方法，并应用于粘弹性介质。本文采用高阶有限差分法，运用基于弹性波理论模拟波场的动力学特征，其优点是精度高，运算速度快，实现简单。通过网格测试→正演方法测试→边界测试→去噪测试融合形成了 2D 正演测试流程，优选了川西龙门山二维正演参数。

4.1. 基于精细模型的弹性波正演测试研究

进行弹性波模拟, 后来又用三倍的精细网格实现了低速区的非规则网格模拟。Ruud 和 Hestholm (2001)推导了新的自由边界条公式, 给出了解决数值计算和由于边界条件离散导致的系统不稳定(空间)的方法, 并应用于粘弹性介质。本文采用高阶有限差分法, 运用基于弹性波理论模拟波场的动力学特征, 其优点是精度高, 运算速度快, 实现简单。通过网格测试→正演方法测试→边界测试→去噪测试融合形成了 2D 正演测试流程, 优选了川西龙门山二维正演参数。

(1) 网格模型尺寸的影响: 如图 4 所示, 模型网格尺寸越小, 正演模拟记录的信噪比越高。5 m × 5 m 网格或获得正演记录信噪比优于 10 × 10 m 网格。

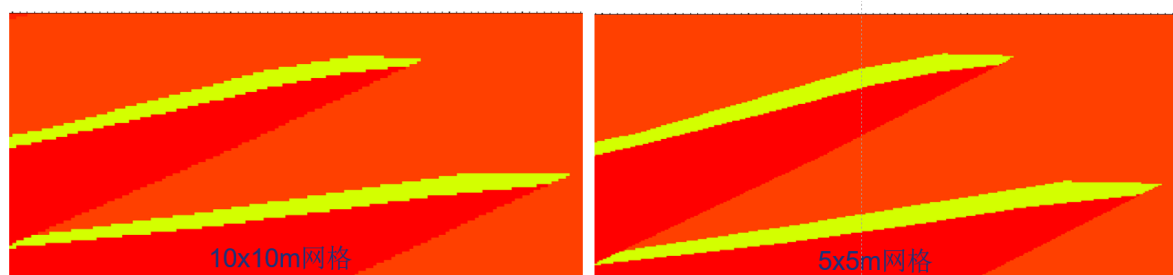


Figure 4. Comparison of grid model size testing

图 4. 网格模型尺寸测试对比

(2) 通过对比声波法和弹性波法吸收边界的模拟记录(图 5)可知, 弹性波法模拟地震记录与野外采集资料较一致, 而且能模拟更多的噪声信息, 因此选择弹性波法吸收边界进行模拟。

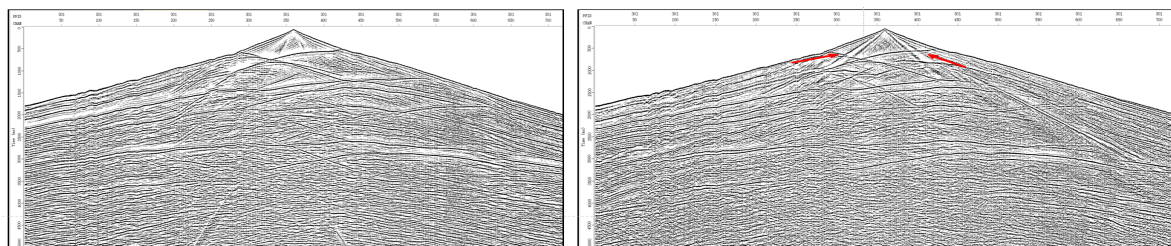


Figure 5. Comparison of absorption boundary simulation records (left: acoustic wave method; right: elastic wave method)

图 5. 吸收边界模拟记录对比(左: 声波法; 右: 弹性波法)

4.2. 正演模拟及波场特征分析

在大规模进行正演之前, 抽取不同位置激发进行正演后获得模拟单炮记录, 通过地震波场快照对单炮层位进行标注(图 6), 单炮层位标定的结果与叠加剖面吻合。图中记录中标注出了断层和地质体的对应位置, 因此可以验证正演单炮的准确性和合理性。

基于精细二维模型开展弹性波动方程数值模拟, 模拟所需的横波速度和密度模型通过纵波速度模型根据经验公式求得, 正演观测系统及正演参数如表 1 所示。

从正演地震记录(图 7(a)~(c))可以看出, 构造不同部位模拟单炮差异较大: 山体区地表起伏大, 初至严重变形, 反射同相轴严重抖动; 构造顶部断层发育, 地震波场比较复杂; 山前带近地表结构的复杂, 导致浅层面波和折射干扰较重。对比相同部位实际单炮记录和模拟记录可以看出, 二者的记录面貌基本相似, 主要反射波特征一致。

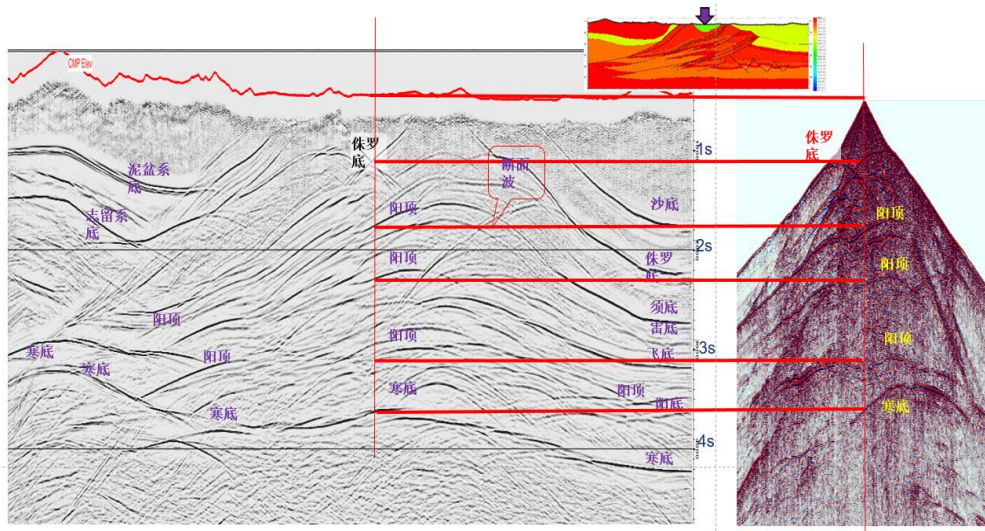


Figure 6. layer calibration of single shot
图 6. 单炮层位标定

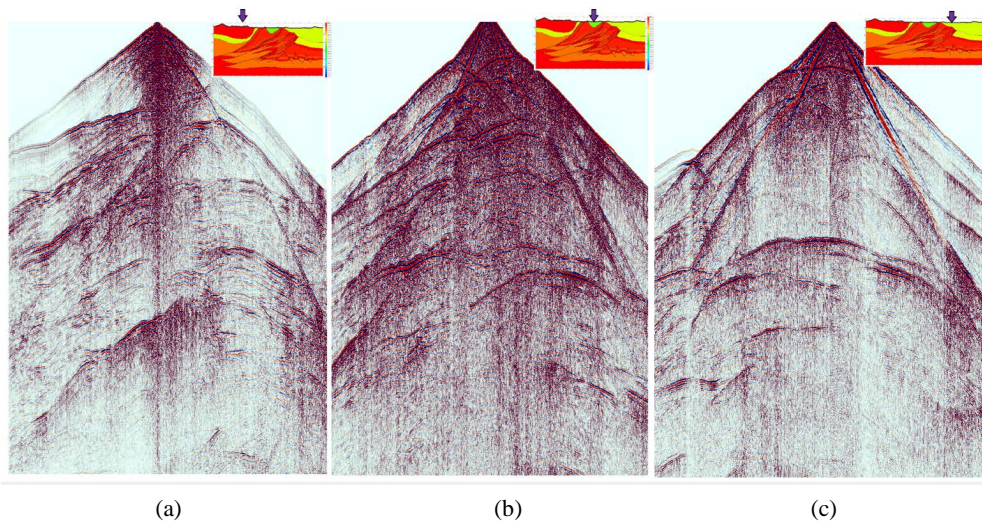


Figure 7. 2D Model forward single shot record (a) The hanging wall of the western overthrust nappe is triggered by the Devonian strata; (b) In the middle, the upper wall of the overthrust nappe is stimulated by the Jurassic strata; (c) In the eastern part of Longmen Mountain, the front zone of the mountain is stimulated by Jurassic strata

图 7. 二维模型正演单炮记录。(a) 西部逆掩推覆体上盘，泥盆纪地层激发；(b) 中部，逆掩推覆体上盘，侏罗纪地层激发；(c) 东部，龙门山山前带，侏罗纪地层激发

Table 1. Parameters of the two-dimensional observation system in the front zone of the mountain

表 1. 龙门山前带二维观测系统参数表

序号	参数	数值
1	接收道	880
2	覆盖次数	220
3	炮距(m)	50
4	道距(m)	25
5	最大炮检距(m)	11,000

续表

6	采样率(ms)	1
7	记录长度(s)	5
8	子波类型及主频	20 Hz 雷克子波
9	边界类型	吸收边界
10	正演网格大小(m)	5 × 5

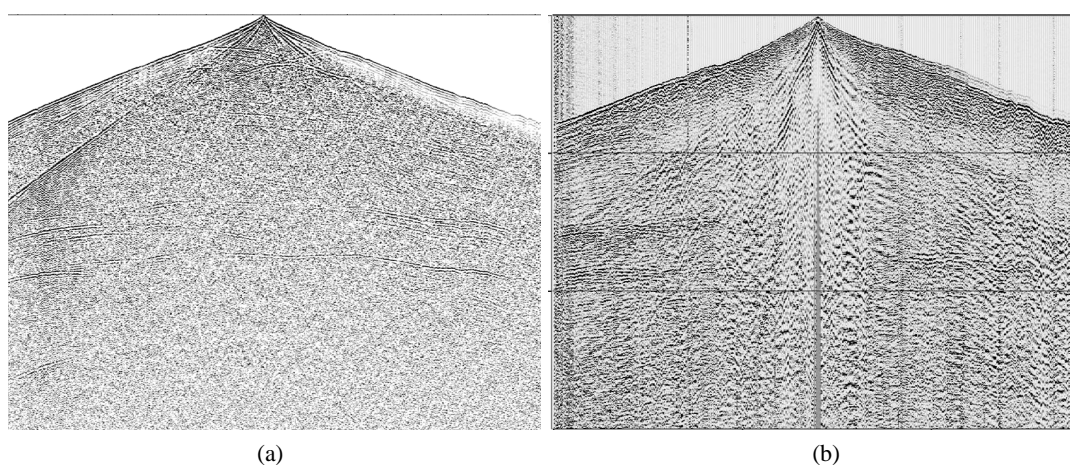


Figure 8. Comparison between actual single shot (b) and simulated single shot record after adding random noise (a)
图 8. 实际单炮(b)与加随机噪声后的模拟单炮记录(a)对比

4. 结论

(1) 依托高程数据和近地表调查成果, 建立高精度近地表模型, 依托地震解释成果和地质资料, 建立高精度地腹地质模型; 地表和地腹模型融合, 构建了川西北部龙门山地区逆掩推覆体构造 2D 高仿真地质模型;

(2) 在波动方程计算效率大幅提升时, 基于正演的观测系统优选能够在复杂构造区采集设计生产中发挥巨大作用;

(3) 在龙门山北段典型逆冲推覆构造的二维地球物理模型基础之上, 开展弹性波动方程数值模拟, 获得了与实际地震资料相似的模拟单炮记录(图 8), 为该区域开展基于三维模型正演的观测系统参数优选提供了逼近实际的构造-速度模型, 为经济技术一体化的地震采集方案设计奠定了基础, 对川西高陡构造区地震勘探的推进具有积极意义。

参考文献

- [1] 赵路子, 张光荣, 陈伟, 等. 深层复杂地质构造带地震勘探关键技术——以四川盆地龙门山断褶带北段为例[J]. 天然气工业, 2018, 38(1): 39-48.
- [2] 杨跃明, 陈聪, 文龙, 等. 四川盆地龙门山北段隐伏构造带特征及其油气勘探意义[J]. 天然气工业, 2018, 38(8): 8-15.
- [3] 王华忠. “两宽一高”油气地震勘探中的关键问题分析[J]. 石油物探, 2019, 58(3): 313-324.
- [4] 李智武, 刘树根, 陈洪德, 等. 龙门山构造带冲断带分段-分带性构造格局及其差异变形特征[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2008, 4(35): 440-454.
- [5] 梁霄, 刘树根, 莫倩雯, 等. 龙门山北段海相油气成藏特征及勘探前景[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2018, 45(1): 54-67.

-
- [6] 马义忠, 魏伟, 孙伟佳, 等. 南阳凹陷高精度三维地震采集观测系统设计[J]. 石油物探, 2008, 47(5): 498-504.
- [7] 崔庆辉, 尚新民, 滕厚华, 等. 高密度三维地震观测系统设计技术与应用[J]. 石油物探, 2020, 59(1): 12-22.
- [8] 刘斌, 宋智强, 段卫星, 等. 地震勘探观测系统成像效果量化分析[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(2): 207-212.
- [9] 屠世杰. 高精度三维地震勘探中的炮密度、道密度选择——YA 高精度三维勘探实例[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(6): 926-935.
- [10] 张宇生, 魏寿云, 李可恩. 南方碳酸盐岩裸露区地震采集观测系统优化及应用[J]. 中国石油勘探, 2012, 17(3): 32-36.
- [11] 李万万. 基于波动方程正演的地震观测系统设计[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(2): 134-141.
- [12] 王永明, 王彦春, 冯许魁, 等. 应用模型正演方法分析观测系统对复杂构造区成像的影响[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(4): 580-587.
- [13] 朱金平, 董良国, 陈玖兵. 基于地震照明、面向勘探目标的三维观测系统优化设计[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(3): 339-348.
- [14] 梁顺军, 段杰, 彭业君, 等. 逆冲断褶带大断层下盘层间褶皱特征及油气成藏——以库车克拉苏构造带和龙门山构造带北段油气勘探为例[J]. 复杂油气藏, 2021, 14(4): 1-8.
- [15] 梁瀚, 文龙, 冉崎, 等. 四川盆地龙门山前北段构造演化特征及其油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(3): 478-490.
- [16] 孙晓猛, 杜继宇, 单玄龙, 等. 龙门山冲断带北段前山带构造分带性及山前带变形特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(6): 1323-1332.
- [17] 邓佳良. 龙门山北段三堆地区构造研究与三维建模[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- [18] 张菊梅, 曹正林, 张道伟, 等. 柴达木盆地复杂构造带综合地质建模技术[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(S1): 151-154.
- [19] 成兴东, 夏时斌. GOCAD 在龙门山某剖面的三维地质建模应用研究[J]. 科技创新与应用, 2015, 44(32): 59-60.