

张元生,秦满忠,钟美娇,等.基于甘肃气枪主动源的“地下云图”构建[J].地震工程学报,2023,45(2):382-386.DOI:10.20000/j.1000-0844.20230202004

ZHANG Yuansheng, QIN Manzhong, ZHONG Meijiao, et al. Construction of "underground cloud maps" based on airgun active source of Gansu[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(2): 382-386. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230202004

基于甘肃气枪主动源的“地下云图”构建

张元生^{1,2}, 秦满忠^{1,2}, 钟美娇^{1,2}, 邹 锐^{1,2}, 张卫东^{1,2},
周 涛^{1,2}, 郭 晓^{1,2}, 刘旭宙^{1,2}, 李少华^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 在陆地气枪主动源技术系统不断发展的基础上,使用地震层析成像和计算机图像处理技术,把地震波物理参数(地震波速度和 v_P/v_S)演化过程以气象云图的形式表现出来,达到“看图识天气”的目的。利用地震波速“地下云图”的结果开展地震孕育过程和机理研究,深入了解强震发生前后震源区地震波速度和波速比的时空演化表征,总结提取具有普适性的地震学前兆参数及其指标,对进一步提高地震预测预报效能有着重要科学意义。

关键词: 气枪主动源; 地下云图; 地震孕育过程; 地震波速异常特征

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2023)02-0382-05

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230202004

Construction of "underground cloud maps" based on airgun active source of Gansu

ZHANG Yuansheng^{1,2}, QIN Manzhong^{1,2}, ZHONG Meijiao^{1,2}, ZOU Rui^{1,2}, ZHANG Weidong^{1,2},
ZHOU Tao^{1,2}, GUO Xiao^{1,2}, LIU Xuzhou^{1,2}, LI Shaohua^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;

(2. Gansu Lanzhou Geophysics National Observation and Research Station, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Based on the continuous development of the technical system of airgun active source on land, the evolution process of seismic waves' physical parameters (wave velocity and v_P/v_S) can be presented in the form of meteorological cloud map by using the techniques of seismic tomography and computer image display, so as to achieve the purpose of "reading cloud maps and recognizing weather underground". On the basis of the results of "underground cloud maps", we can study the seismogenic process and mechanism of earthquakes, deeply understand the temporal and spatial evolution characteristics of seismic wave velocity and v_P/v_S in epicentral area before and after strong earthquakes, and also summarize and extract universal seismic precursor parameters and indicators. The results of the study have important scientific significance for further im-

收稿日期: 2023-02-02

基金项目: 甘肃省科技重大专项(21ZD4FA011)

第一作者简介: 张元生,男,研究员,主要从事地球内部结构研究、主动源重复探测技术研究与应用。E-mail: zhangys@gsdzj.gov.cn。

proving the efficiency of earthquake prediction.

Keywords: airgun active source; underground cloud map; seismogenic process of earthquake; abnormal characteristic of seismic wave velocity

0 引言

“地下云图”是在实施国家地震科技创新工程“透明地壳”计划的基础上提出来的,这个概念最早可见于 2018 年《科技日报》^[1]、《文摘报》^[2]、《科普时报》^[3]等。类似于天气云图的生成方式,“地下云图”是利用震源和地震观测台网对地下结构进行的动态监测,是用地震 CT 原理构建的一张能够看见地下应力的动态演化图。“地下云图”类似于气象预报“看云识天气”的方式,可以每天、每周、每月、每年产出,目前主动源可以产出每周的地下介质地震波速度变化图,根据速度变化特征分析地下介质物性异常情况,从而为地震预测提供一种新途径。

至今,应用地震学方法,“地下云图”已取得了两方面进展:一是动态噪声成像技术工程。地脉动噪声作为地震观测的背景干扰,地震学家们希望通过地脉动记录来实时监测地壳介质变化。“红肿理论”^[4]认为在大震来临之前的一段时间,孕震区岩体破裂加剧,脉动水平增高,通过对脉动水平变化的监测,有可能认识到大地震的前兆特征。二是主动震源深部探测工程。进入 21 世纪以来,人工主动震源探测技术进展引人注目,主要技术有气枪震源^[5-7]、精控震源及人工爆破等。先后在云南宾川、新疆呼图壁、甘肃张掖(以下称祁连山主动源)和甘肃永靖(以下称刘家峡主动源)建成了陆地大容量水中气枪地震信号发射台。在甘肃主动源有效监测区内地震活动频繁,强震多发,断裂带构造活动强烈,台站密度不断得到提高,逐渐形成较密集的地震观测台网(图 1)。利用气枪震源的高度可重复性,可以将多次激发信号进行叠加来增强信噪比。实际观测记录表明,气枪震源激发信号可追踪到 200~300 km 范围,其中云南宾川主动源的激发信号可追踪到 240 km,新疆呼图壁主动源、甘肃祁连山主动源和甘肃刘家峡主动源的激发信号均可追踪到 300 km,探测深度可达到莫霍面。这些主动源的建成为监测各地区地下介质动态变化提供了宝贵的科学实验平台,因此,开展“地下云图”构建技术及其应用研究是必要的,也是可行的。

1 甘肃气枪主动源

甘肃主动源由甘肃祁连山主动源和甘肃刘家峡

主动源组成,分别位于甘肃省张掖市肃南县和甘肃省临夏州自治州永靖县(图 1)。祁连山主动源位于黑河西流水水库,距张掖市约 50 km,激发点常年水深为 45~65 m(年平均水深约为 55 m),观测台网由 40 个短周期野外观测台站、甘肃固定数字测震台网、青海固定数字测震台网和甘肃预警台网组成^[8],于 2015 年 7 月正式激发运行。刘家峡主动源位于刘家峡水库,邻近永靖县岷塬镇刘家村,距永靖县城约 15 km,常年激发点水深在 20~40 m,观测台网由 99 个固定台组成,其中甘肃境内 77 个、青海境内 12 个、宁夏境内 6 个、四川境内 4 个,于 2020 年 10 月正式运行。两个激发源都由 4 支气枪组成,每支气枪容量为 2 000 in³,工作压力为 2 000 PSI。祁连山主动源每周三夜间激发,刘家峡主动源每周一夜间激发,主动源观测台网的每个台站可以观测到主动源激发信号,各台站每周可获得一条多次叠加后的记录波形,观测区域半径约为 300 km。

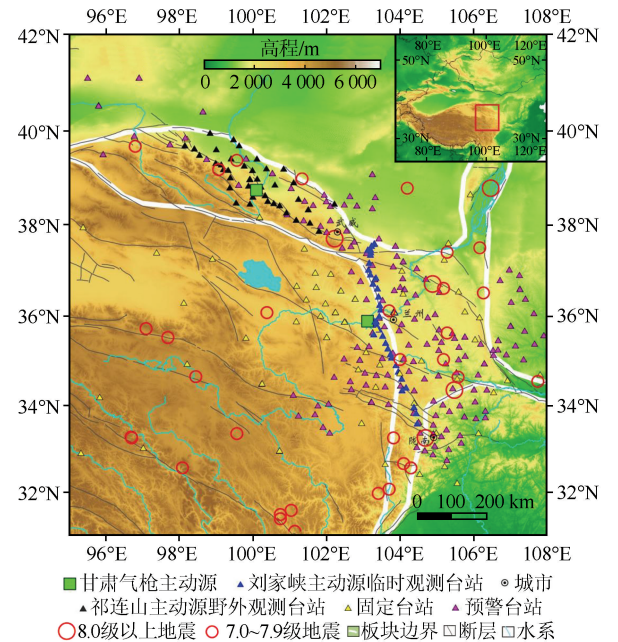


图 1 甘肃气枪主动源及观测台站分布图
Fig.1 Distribution of airgun active sources and observation stations in Gansu

2 “地下云图”构建方法

2.1 三维速度模型建立

应用地震层析成像方法可以获得地壳三维速度

结构,即三维速度模型^[9]。通过收集和整理相关地壳速度结构研究成果^[10-17],使用插值方法可以获得区域三维地壳模型。中国大陆地区地壳大致可以分为4层,分别为覆盖层、上地壳、中地壳和下地壳,各层厚度和速度为:覆盖层厚度为1~6 km,平均速度为5.1 km/s;上地壳厚度为15~19 km,速度为5.9~6.1 km/s;中地壳厚度为12~16 km,速度为6.2~6.3 km/s;下地壳厚度为11~13 km,速度为6.8 km/s。网格水平尺度大小可为30~80 km,实际大小与台网密度有关,台网密度小时网格尺度大,台网密度大时网格尺度小(图2),各网格尺度大小可以不等。

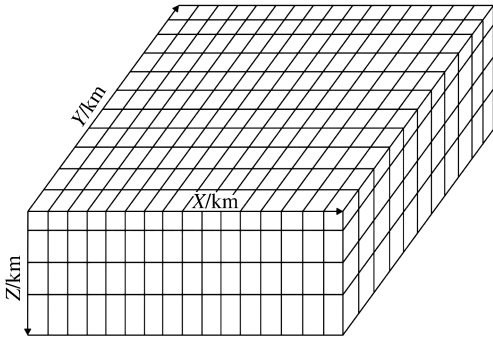


图2 网格划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of grid division

2.2 速度变化计算

(1) 平均走时计算

通过主动源激发时刻提取,以激发时间为准,对每一个台站的连续记录波形进行截取,获得激发记录波形,再对每一个台站的激发记录波形进行叠加,获得一次有效激发地震波记录。对每一个台站计算波形匹配模板,应用波形相关性计算,可准确获得震相走时和相对走时差 Δt 数据。可以使用如下公式计算目标时段的平均走时:

$$\bar{t}_i = \frac{d}{v} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_{ij} \quad (1)$$

式中: i 为台站; d 为地震波射线路径(km); v 为地震波传播速度(km/s); t_{ij} 为第 i 个台站 j 次叠加的地震波记录震相走时(s); N 为有效激发叠加的地震波记录统计总次数, $i=1,2,\dots,n$, n 为台站个数。

(2) 平均速度模型修正

根据式(1)计算得到的平均走时,其走时方程为:

$$\bar{t}_i = d_{ij} \bar{u}_j, i=1,2,3,\dots,n; j=1,2,3,\dots,m \quad (2)$$

式中: m 为射线穿过的模块总数; $\bar{u}_j$ 为慢度向量。把式(2)写成矩阵形式:

$$\bar{D} \bar{u} = \bar{t} \quad (3)$$

式中: $\bar{D}$ 为 $n \times m$ 的距离矩阵; $\bar{u}$ 为平均慢度向量的转置; $\bar{t}$ 为震相走时向量的转置。 $\bar{D}$ 矩阵一般情况下不为方阵,应用矩阵性质有:

$$\bar{u} = (\bar{D}^T \bar{D})^{-1} \bar{D}^T \bar{t}, \quad (4)$$

计算上式可获得平均慢度,根据 $\bar{u}_j = 1/\bar{v}_j$ 关系可修改三维速度模型。

(3) 速度变化值计算

根据走时公式有:

$$\Delta t_{ij} = \frac{d_i}{v_i} - \frac{d_i}{v_i + \Delta v_{ij}} = \frac{d_i}{v_i} - \frac{d_i}{v_{ij}} = \bar{t}_i - \frac{d_i}{v_{ij}} \quad (5)$$

式中: d_i 为第 i 个台站的地震波射线路径(km); $\bar{v}_i$ 为第 i 个台站的地震波传播平均速度(km/s); v_{ij} 第 i 个台站第 j 次叠加时段的地震速度(km/s); $v_{ij} = \bar{v}_i + \Delta v_{ij}$, Δv_{ij} 为第 i 个台站第 j 次叠加时段的地震速度扰动量(km/s)。把上式写成矩阵形式为:

$$\Delta t_j = \bar{D} \bar{u} - \bar{D} u'_j = \bar{D} (\bar{u} - u'_j) = \bar{D} \Delta u_j, \quad (6)$$

式中: j 次叠加记录时段的慢度 $u'_j = \bar{u} + \Delta u_j$,平均慢度 $\bar{u} = 1/\bar{v}$, $u'_j = 1/v'_j$; $\bar{D}$ 为距离矩阵; Δu_j 和 Δt_j 分别为 j 次叠加记录时段的变化慢度向量和震相走时差向量的转置。式(6)中 $\bar{D}$ 矩阵一般情况下不为方阵,应用矩阵性质有:

$$\begin{aligned} \bar{D}^T \bar{D} \Delta u_j &= \bar{D}^T \Delta t_j, \\ \Delta u_j &= (\bar{D}^T \bar{D})^{-1} \bar{D}^T \Delta t_j, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & d_{nm} \end{bmatrix}$$

式中: m 为射线穿过的模块总数; n 是射线数或台站数; d_{ik} 为第 i 个台站(射线)在第 k 个模型块中所走的路径长度(km); $\bar{D}$ 矩阵由射线追踪计算得到。

(4) $\bar{D}$ 矩阵计算

射线追踪方法通常有打靶法、弯曲法、扰动法及有限差分法等,这里使用的是逐次迭代射线追踪方法^[18]。逐次迭代射线追踪方法是固定震源点和接收点,连续3点满足 Snell 折射定律,对中间折射点进行修。每迭代一次,除2个端点外,其间的每一个点都要进行计算和修改,直到每个点都满足迭代精度为止。逐次迭代法的优点是收敛快、精度高。在实际射线追踪计算过程中,根据震源和台站的位置,在三维速度模型中垂直切割生成一个二维速度剖面,进行二维射线追踪。对每个台站的所有震相走时做理论计算,就获得了射线路径 $\bar{D}$ 矩阵。界面

滑行波(如 Pn 和 Sn 波)的射线路径可以直接被计算确定,不用迭代计算,但对于直达波和反射波的射线路径需要经过射线追踪迭代计算才能获得。

2.3 “云图”实现

对式(7) 进行计算得到变化慢度 Δu_j ,根据速度与慢度的关系,其变化速度和速度变化率的计算公式可写成为:

$$\Delta v_{ij} = \frac{-v_{ij}^2 \Delta u_{ij}}{1 + v_{ij} \Delta u_{ij}}, R_{ij} = \frac{\Delta v_{ij}}{v_{ij}} \times 100\%$$

(8)

式中: j 为三维模型的模块序号, $j = 1, 2, 3, \dots, m$; Δv_{ij} 为具有时间意义的第 i 次时段叠加波形震相走时所对应第 j 模型块的速度变化,对应的速度变化

率为 R_{ij} 。根据 P 波和 S 波震相走时数据可以获得各自对应的速度变化,在此基础上可以计算出波速比。波速比的计算公式为:

$$\gamma_{ij} = \frac{v_{ij}^p + \Delta v_{ij}^p}{v_{ij}^s + \Delta v_{ij}^s},$$

(9)

式(9)中的角标含义与式(8)相同。使用 VC 开发工具,应用 RGB 值分别对刘家峡主动源监测区地震台站每周观测到的速度变化率 R_{ij} (P 波或 S 波)和波速比 γ_{ij} (v_p/v_s)进行配置,可易实现数值图像处理(图 3)。根据理论分析和震例总结,在强震孕育过程中,波速比为低值异常(一般小于 1.6),速度变化率为高值异常(一般大于 0.2%)。

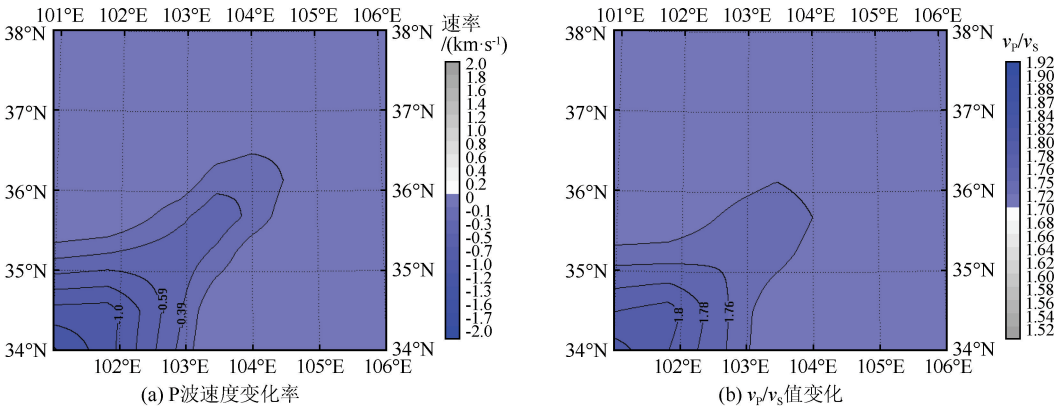


图 3 P 波速度变化率和 v_p/v_s 值变化图
Fig.3 Change rate of P-wave velocity and change of v_p/v_s ratio

3 讨论与结论

甘肃主动源监测区内曾发生过 2016 年 1 月 21 日门源 $M_s6.4$ 地震、2022 年 1 月 8 日门源 $M_s6.9$ 地震和 2019 年 9 月 16 日张掖 $M_s5.0$ 地震。经数据分析,在震前均观测到了较明显的走时异常变化。其中,距 2016 年门源 $M_s6.4$ 地震震中 25 km 的主动源台站(zdy38)观测到明显的走时变化异常^[19],其变化幅度达到 13 ms;距 2022 年门源 $M_s6.9$ 地震震中 66 km 的铔尖台(HJT)观测到的走时变化异常最大幅度达到 15 ms;zdy27 台(距震中 7 km)观测到 2019 年张掖 $M_s5.0$ 地震的走时变化异常最大幅度达到了 20 ms^[20]。实际观测结果显示,强震前地下介质物性改变引起的地震波速变化是可以观测到的,其地震波波速(走时)变化具体大小取决于震级和震中距等多方面因素。在目前的观测条件下,从几次震例来看,甘肃主动源可以观测到的强震前地震波走时变化幅度在 13 ~ 20 ms 之间。

使用地震波层析成像技术和计算机图像处理技术,把地下速度演化过程以人们熟知的气象云图的

形式表现出来,更好地研究地震的孕育过程中区域应力与速度变化的关系以及强震震源区速度演化表征。震例研究发现震前走时呈“V”字型变化^[19-21],对应速度应该呈“Δ”字型变化,区域应力可能为持续增加状态,这些特征还需在“地下云图”中进一步求证,可能会找到更具有普适性的特征。

参考文献(References)

[1] 四川省地震预警重点实验室宣布:将在四川、云南建设面向地震预报的我国首个地下云图网[N].科技日报,2018-05-08.
Sichuan Provincial Key Laboratory of Earthquake Early Warning announced that:China's first underground cloud map network for earthquake prediction will be built in Sichuan and Yunnan[N].Science and Technology Daily,2018-05-08.

[2] 地下云图:地震预报新尝试[N].文摘报,2018-05-22(7).
Underground cloud maps; new attempt in earthquake prediction[N].Abstract,2018-05-22(7).

[3] 陈会忠,蔡晋安,沈萍.“地下云图”预报地震可“看图说话”[N].科普时报,2018-07-27(2).
CHEN Huizhong, CAI Jinan, SHEN Ping. Predicting earthquakes can reach "looking at the picture and talk" by using 'underground cloud maps[N].Popular Science Times,2018-07-27(2).

- [4] 傅承义.地球十讲[M].北京:科学出版社,1976.
FU Chengyi. Ten lectures on the earth [M]. Beijing: Science Press, 1976.
- [5] 丘学林,陈颢,朱日祥,等.大容量气枪震源在海陆联测中的应用:南海北部试验结果分析[J].科学通报,2007,52(4):463-469.
QIU Xuelin, CHEN Yong, ZHU Rixiang, et al. Application of large-capacity air gun source in land-sea joint survey: analysis of test results in northern South China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(4): 463-469.
- [6] 陈颢,张先康,丘学林,等.陆地人工激发地震波的一种新方法[J].科学通报,2007,52(11):1317-1321.
CHEN Yong, ZHANG Xiankang, QIU Xuelin, et al. A new method of artificially exciting seismic waves on land [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(11): 1317-1321.
- [7] 陈颢,王宝善,姚华建.大陆地壳结构的气枪震源探测及其应用[J].中国科学:地球科学,2017,47(10):1153-1165.
CHEN Yong, WANG Baoshan, YAO Huajian. Seismic airgun exploration of continental crust structures [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2017, 47(10): 1153-1165.
- [8] 张元生,郭晓,秦满忠,等.甘肃祁连山主动源重复探测项目建设及震源重复性分析[J].中国地震,2016,32(2):209-215.
ZHANG Yuansheng, GUO Xiao, QIN Manzhong, et al. The construction of active source repeated monitoring in the Qilian Mountains of Gansu Province [J]. Earthquake Research in China, 2016, 32(2): 209-215.
- [9] 张元生,李清河,刘耀炜,等.地震层析成像软件[J].西北地震学报,2003,25(2):170-174.
ZHANG Yuansheng, LI Qinghe, LIU Yaowei, et al. The seismic tomography software [J]. Northwestern Seismological Journal, 2003, 25(2): 170-174.
- [10] 李清河,郭守年,吕德徽.鄂尔多斯西缘与西南缘深部结构与构造[M].北京:地震出版社,1999.
LI Qinghe, GUO Shounian, LÜ Dehui. Deep structure and structure in the western and southwestern margins of Ordos [M]. Beijing: Seismological Press, 1999.
- [11] 李清河,郭建康,周民都,等.成县—西吉剖面地壳速度结构[J].西北地震学报,1991,13(增刊 1):37-43.
LI Qinghe, GUO Jiankang, ZHOU Mindu, et al. The velocity structure of Chengxian—Xiji profile [J]. Northwestern Seismological Journal, 1991, 13(Suppl01): 37-43.
- [12] 丁志峰,何正勤,孙为国,等.青藏高原东部及其边缘地区的地壳上地幔三维速度结构[J].地球物理学报,1999,42(2):197-205.
DING Zhifeng, HE Zhengqin, SUN Weiguo, et al. 3D crust and upper mantle velocity structure in eastern Tibetan Plateau and its surrounding areas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(2): 197-205.
- [13] 李松林,张先康,张成科,等.玛沁—兰州—靖边地震测深剖面地壳速度结构的初步研究[J].地球物理学报,2002,45(2):210-217.
LI Songlin, ZHANG Xiankang, ZHANG Chengke, et al. A preliminary study on the crustal velocity structure of Maqin—Lanzhou—Jingbian by means of deep seismic sounding profile [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(2): 210-217.
- [14] 周民都,张元生,石雅鏐,等.青藏高原东北缘地壳三维速度结构[J].地球物理学进展,2006,21(1):127-134.
ZHOU Mindu, ZHANG Yuansheng, SHI Yaliu, et al. Three-dimensional crustal velocity structure in the northeastern margin of the Qinghai—Tibetan Plateau [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1): 127-134.
- [15] 杨晨爽,张元生,张波.1654 年甘肃礼县 8 级地震震源断裂研究[J].地震工程学报,2022,44(1):210-217,243.
YANG Chenshuang, ZHANG Yuansheng, ZHANG Bo. Seismogenic fault study of the 1654 M8 Lixian earthquake in Gansu Province [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(1): 210-217, 243.
- [16] 张元生,郑晓静,王兰民.青藏高原及周边 2001 年以来三次特大地震引起的形变场分布特征[J].地球物理学报,2016,59(10):3637-3645.
ZHANG Yuansheng, ZHENG Xiaojing, WANG Lanmin. The distribution characteristics of deformation field caused by three great earthquakes in the Qinghai—Tibet Plateau and its vicinity since 2001 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(10): 3637-3645.
- [17] 鞠慧超,张元生,刘旭宙.2019 年甘肃张掖 M5.0 地震余震序列重定位[J].地震工程学报,2019,41(6):1396-1401.
JU Huichao, ZHANG Yuansheng, LIU Xuzhou. Relocation of the aftershock sequence of the Zhangye M5.0 earthquake in Gansu Province in 2019 [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1396-1401.
- [18] 高尔根,徐果明,蒋先艺,等.三维结构下逐段迭代射线追踪方法[J].石油地球物理勘探,2002,37(1):11-16,98.
GAO Ergen, XU Guoming, JIANG Xianyi, et al. Department of iterative ray-tracing method segment by segment under 3-D construction [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37(1): 11-16, 98.
- [19] 张元生,王宝善,陈颢,等.两次强震发生前后主动源观测走时数据的变化[J].地球物理学报,2017,60(10):3815-3822.
ZHANG Yuansheng, WANG Baoshan, CHEN Yong, et al. Travel-time variations before and after two major earthquakes derived from active-source seismic data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 3815-3822.
- [20] 刘志国,张元生,邹锐,等.甘肃张掖 M5.0 地震前气枪信号走时变化研究[J].地震工程学报,2019,41(6):1402-1406.
LIU Zhiguo, ZHANG Yuansheng, ZOU Rui, et al. Travel time changes of the airgun signal before the Zhangye M5.0 earthquake in Gansu Province [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1402-1406.
- [21] 魏芸芸,王海涛,苏金波,等.新疆 2 次中强地震前气枪震源反射波震相走时异常变化初步研究[J].中国地震,2016,32(2):270-281.
WEI Yunyun, WANG Haitao, SU Jinbo, et al. The preliminary study on travel time abnormal variation of reflection wave phase of air-gun in Xinjiang before two earthquakes with $M_{\text{S}}5.0$ [J]. Earthquake Research in China, 2016, 32(2): 270-281.