



王忠成, 葛大明, 秦宁, 等. 2026. 浅水环境 OBN 二次定位方法研究. 地球物理学进展, 41(1):0481-0490, doi:10.6038/pg2026JJ0058.

WANG ZhongCheng, GE DaMing, QIN Ning, et al. 2026. Research on OBN secondary location method in shallow water environment. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(1):0481-0490, doi:10.6038/pg2026JJ0058.

浅水环境 OBN 二次定位方法研究

Research on OBN secondary location method in shallow water environment

王忠成^{1,2}, 葛大明¹, 秦宁^{*}, 刘培体¹, 王敬阁¹

WANG ZhongCheng^{1,2}, GE DaMing¹, QIN Ning^{1*}, LIU PeiT¹, WANG JingGe¹

1. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司物探研究院, 东营 257022

2. 胜利石油管理局博士后科研工作站, 东营 257000

1. *Geophysical Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying 257022, China*

2. *Working Station for Postdoctoral Scientific Research, Shengli Oilfield, Dongying 257000, China*

摘要 准确的观测系统信息是高精度地震资料处理的基础, OBN 检波点由于无法使用常规的 GPS 定位, 通常需要专门的技术手段来确定检波点坐标. 常见的检波点二次定位方法包括最小二乘法、近正四面体法、搜索法、拟合曲面法、等效速度法、矢量合成法等, 但他们都基于直达波走时进行定位, 浅水海域 OBN 资料仅在很小的偏移距内有直达波, 因而难以适用; 另一种常用的二次定位方法为折射波二次定位, 因无法处理速度渐变、界面弯曲等情况, 定位精度不高. 针对浅水环境检波点定位不准的问题, 本文提出了一种基于初至走时拟合的二次定位方法: 首先在共检波点道集准确拾取初至时间, 然后用多项式拟合初至时间和偏移距之间的关系曲线, 用实际拾取走时和曲线上对应值的差对检波点坐标进行调整, 多次迭代直至收敛. 最后根据工区测量得到的水深值, 用检波点 X 、 Y 坐标投影获得相应的 Z 坐标, 即可获得准确的检波点三方向坐标. 把本文方法应用于模拟资料 and 实际 OBN 资料的二次定位中, 取得了理想效果.

关键词 海底节点; 共检波点; 初至走时; 二次定位

中图分类号 P631, P738

文献标识码 A

Abstract Accurate observation system information is the foundation of high-precision seismic data processing. Due to the inability to use conventional GPS positioning for OBN receiver points, specialized technical means are usually required to determine the coordinates of the receiver points. Common secondary positioning methods for receiver points include least squares method, approximate tetrahedron method, search method, fitting surface method, equivalent velocity method, vector synthesis method, etc. However, they are all based on direct wave travel time for positioning. Shallow water OBN data only has direct waves within a small offset distance, making those methods difficult to apply. Another commonly used secondary positioning method is refracted wave secondary positioning, which has low positioning accuracy due to its inability to handle speed gradients, interface bending, and other situations. In response to the problem of inaccurate positioning of receiver points in shallow water environments, this paper proposes a positioning method based on first arrival travel time fitting. Firstly, the first arrival time is accurately picked up from the common receiver point gather. Then, a polynomial is used to fit the relationship curve between the first arrival time and offset. The coordinates of the receiver points are adjusted by the difference between the actual picked travel time and the corresponding value on the curve, and multiple iterations are carried out until convergence. Finally, based on the water depth values measured in the survey, the corresponding Z coordinates can be obtained by projecting the X and Y coordinates of the receiver points, thus obtaining accurate three-dimensional coordinates of the receiver points. The method proposed in this article has been applied to both simulated and actual OBN data, achieving ideal results.

收稿日期 2025-04-30; 修回日期 2025-11-05.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 中石化股份公司科研攻关项目 (P24093 和 P22729)、山东省博士后创新项目 (SDCX-ZG-202400168) 和胜利石油管理局博士后课题 (YKB23113) 联合资助.

第一作者简介 王忠成, 男, 1993 年生, 博士后, 主要从事海洋地球物理方法研究. E-mail: wangzhongcheng7.slyt@sinopec.com

* 通讯作者 秦宁, 女, 1985 年生, 博士, 研究员, 主要从事地震资料处理、速度建模以及深度偏移等研究工作. E-mail: geoqin@163.com

doi:10. 6038/pg2026JJ0058
CSTR:32085.14.pg2026JJ0058

Keywords OBN; Common receiver point; First-arrival travel time; Secondary positioning

0 引言

随着地震数据采集技术的发展和地震数据处理方法的进步,海洋勘探逐步向复杂构造区和小目标勘探方向发展,传统的海面拖缆地震采集方式逐渐不能满足勘探需求,因此,随着技术的进步,逐步发展出了海底地震仪 (Ocean Bottom Seismograph, OBS) (韩立强和常稳,2003;李丽青等,2013;马德堂等,2013)、海底电缆 (Ocean Bottom Cable, OBC) (杨宝付等,2008;易昌华等,2008;邓元军等,2013)、海底节点 (Ocean Bottom Node, OBN) (王忠成等,2020,2021;马力等,2023)等地震采集方式. OBN地震观测方法能够采集多分量、全方位、高信噪比和高分辨率的数据,同时具有数据定位精度高、采集可重复性以及数据采集性价比高等优势,具有非常重要的应用前景. 但是,对于海面激发海底接收的地震采集方式,检波器需要部署在海底,由于海洋环境的复杂性,检波点的位置成了未知数,需要使用一定的技术手段来确定检波点的坐标,这一过程通常叫做二次定位. 检波点坐标位置不准会从两方面影响成像质量:一是导致偏移距计算错误,影响动校正时的校正量 (如图 1 所示),从而不能实现同相叠加;二是会把地震道分配到错误的面元上,从而降低叠加剖面的信噪比 (如图 2 所示).

地震勘探行业解决海底检波点二次定位问题主要有两类方法:第一类是声波定位方法 (曾湘轶和杨文艳,2001;邓元军等,2013),在检波器上额外安装声波应答器,在海面使用声波问答器测距,从而进行检波点的准确定位. 第二类方法是初至波定位方法 (高云等,2008;徐维秀等,2009;葛晓丹,2015;庞帅,2021),利用地震资料中的初至波走时信息计算检波点坐标. 声波二次定位方法精度较高,但由于需要额外的硬件设备,费用昂贵,且存在采收率的问题,所以初至波二次定位方法是最为经济可靠的方法. 关于初至波二次定位方法,又分为直达波二次定位和折射波二次定位. 直达波二次定位主要分为以下几种方法:(1)搜索法 (倪成洲等,2008),首先在检波点一次定位坐标附近划分网格,然后分别假设每个网格点为检波点真实坐标位置,对共检波点集地震数据做线性动校正,对比不同网格点线性动校

正效果,其初至波拉平效果最好的点作为最终检波点. (2)近正四面体法 (杨正华和张慧静,2013),按一定方法从众多的炮、检组合中优选出最接近正四面体组合进行计算,舍去偏离正四面体程度大的组合,将优选值再进行统计分析,能够有效地提高检波点定位精度. (3)等效速度法 (王忠成等,2020,2021),把海水速度当作变量加入检波点坐标求解方程组,根据共检波点道集多炮的用直达波走时进行求解. (4)矢量叠加法 (杨海申等,2021),在共检波点集构建每个炮检对的位置矢量,然后用速度计算出该矢量方向的检波点坐标的修正量,最后把每个矢量方向的修正量进行叠加,不断迭代直到修正量小于一定门槛值. 折射波二次定位方法是根据斯奈尔定律利用折射波走时同时反演检波点坐标、海水速度以及地层速度 (高云等,2008).

目前所发展出的二次定位方法均不适用于浅海环境 OBN 检波点的二次定位:对于直达波定位方法而言,由于水深较浅,直达波通常与反射波、折射波混合在一起,难以有效分离并加以利用;而折射波方法,由于方法原理的限制,难以处理地层速度渐变、界面弯曲等情况,而这些情况在实际工区中又比较常见,因此,需要发展针对浅水环境的二次定位方法. 本文的研究思路是首先在共检波点道集采用多项式拟合初至时间与偏移距之间的关系,然后利用实际拾取初至走时与曲线对应位置之差,进行检波点坐标的调整,迭代进行直至收敛,最终形成了浅海 OBN 二次定位方法. 模拟资料 and 实际资料应用表明,本方法具有较高的定位精度,能够有效解决浅海地区 OBN 地震勘探中的检波点二次定位问题,提升资料的成像质量.

1 技术方法

通常来说,对于海底地形较为平坦的区域,初至时间随偏移距地变化在共检波点道集呈现一定的相关性,借鉴于此,可用多项式对初至时间和偏移距进行拟合,并根据实际拾取的初至时间与拟合曲线相应位置的差来进行检波点坐标的调整,然后根据更新后的检波点坐标重新计算偏移距,循环进行直至收敛. 具体实现过程如下:

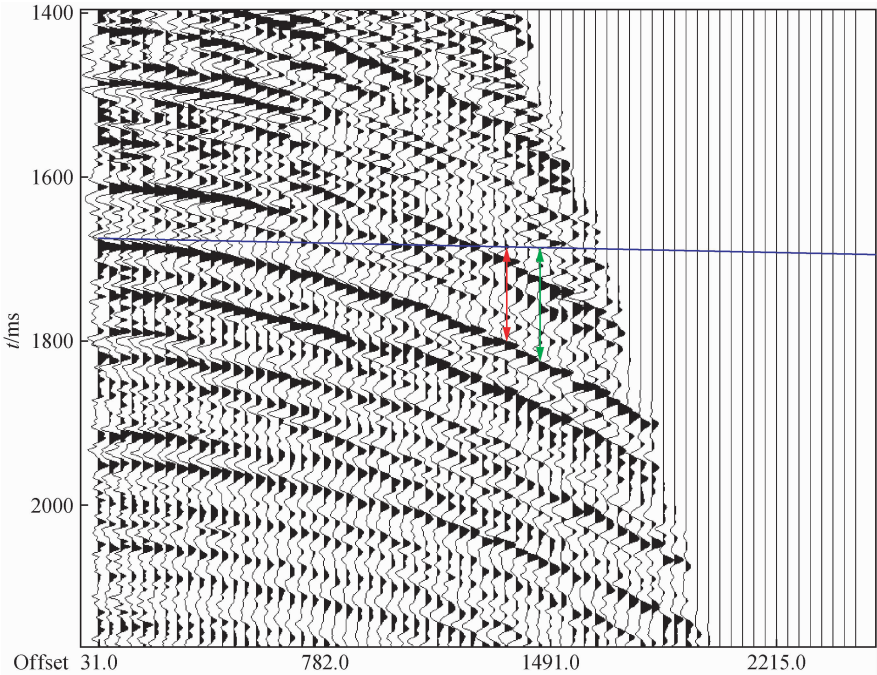


图1 检波点坐标不准时动校正量误差示意图

Fig.1 Schematic diagram of normal moveout correction error when the coordinates of the receiver point are incorrect

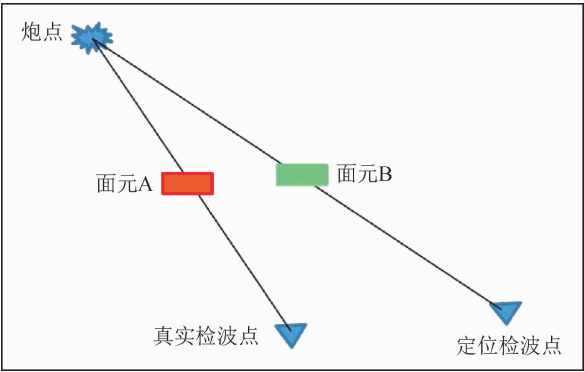


图2 检波点坐标不准时面元分配误差示意图

Fig.2 Schematic diagram of CMP point error when the coordinates of the receiver point are incorrect

- (1)在地震数据处理系统中拾取地震数据的初至走时.
- (2)在共检波点道集把初至时间按照偏移距从小到大排列,得到 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 、 $\cdots$ 、 (x_i, y_i) 、 $\cdots$ 、 (x_n, y_n) 组成的离散点,其中 n 为该检波点有效拾取到初至的炮数, (x_i, y_i) 为该检波点道集第 i 炮的偏移距和拾取到的初至时间.
- (3)用4次多项式拟合初至时间虽偏移距的变化关系曲线.多项式格式为 $f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4$,其中 x 表示偏移距, $f(x)$ 表示曲线在该

点的值.把 (x_i, y_i) 代入该多项式曲线,得到如下方程组:

$$\begin{cases} y_1 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + a_3x_1^3 + a_4x_1^4 \\ y_2 = a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + a_3x_2^3 + a_4x_2^4 \\ y_3 = a_0 + a_1x_3 + a_2x_3^2 + a_3x_3^3 + a_4x_3^4 \\ \vdots \\ y_i = a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + a_3x_i^3 + a_4x_i^4 \\ \vdots \\ y_n = a_0 + a_1x_n + a_2x_n^2 + a_3x_n^3 + a_4x_n^4 \end{cases}, \quad (1)$$

该方程组为超定线性方程组,采用高斯消元法即可得到多项式的系数 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 .

(4)计算共检波点集每一炮炮点到检波点的初至时差: $\Delta t_i = f(x_i) - y_i$,其中 i 为该共检波点道集的炮序号, x_i 为该炮的炮点到检波点的偏移距, $f(x_i)$ 为该偏移距在步骤(3)中拟合曲线上的值, y_i 为步骤(1)中该炮实际拾取的初至走时.

(5)计算共检波点道集每一炮在拟合曲线处的斜率: $w_i = a_1 + 2a_2x_i + 3a_3x_i^2 + 4a_4x_i^3$,从而求出每一炮对应的修正量: $\Delta s_i = \Delta t_i / w_i$,假设该炮点到检波点的连线与正东方向的夹角为 θ_i (逆时针旋转为正,顺时针旋转为负),则该炮在 X 方向的修正量为 $\Delta X_i = \Delta s_i \times \cos\theta_i$,在 Y 方向的修正量为 $\Delta Y_i = \Delta s_i \times \sin\theta_i$.

(6)求所有修正量的平均值 $\Delta X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i$, $\Delta Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta Y_i$, 并对检波点 X 坐标和 Y 坐标进行修正 $X = X_0 + \Delta X, Y = Y_0 + \Delta Y$.

(7)在共检波点道集用炮点坐标和重新计算后的检波点坐标重新计算偏移距,即炮点和检波点在水平方向的距离.

(8)重复(2)~(7),直到小于用户设定的门槛

$$Z = F(X, Y) = \begin{cases} \frac{\sum_{j=1}^N \frac{Z_i}{d_j}}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{d_j}} & \text{当}(X, Y) \neq (X_i, Y_i), i = 1, 2, 3, \cdots, N \text{ 时} \\ Z_i & \text{当}(X, Y) = (X_i, Y_i), i = 1, 2, 3, \cdots, N \text{ 时} \end{cases}, \tag{2}$$

如此便完成了检波点三个方向的二次定位计算.

(10)读取二次定位前 SPS 文件中的. R 文件,把经过二次定位计算后检波点坐标代替原先值写入新的. R 文件,用新的. R 文件以及原来的. S 和. X 文件重新在震数据处理系统中加载观测系统,即可完成二次定位计算.

2 应用实例

2.1 模拟资料试算

为了定量评价本方法的定位精度,首先用模拟资料对本文所述二次定位方法进行试算.如图3所示为胜利油田某海域 OBN 资料速度建模结果,图为该模型在南北方向上的速度剖面,模型东西方向保持不变.建立如图4所示的观测系统,炮点在南北方

值或者达到用户设定的最大迭代次数.

(9)根据前期多波束调查得到的区域水深数据,通过二维插值计算得到检波点的 Z 坐标.首先把水深数据整理成 $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2), (X_3, Y_3, Z_3), \cdots, (X_i, Y_i, Z_i), \cdots, (X_N, Y_N, Z_N)$ 的形式,其中 (X_i, Y_i, Z_i) 表示第 i 个水深测量点的 X 、 Y 和 Z 坐标,共有 N 个水深测量点.步骤(1)~(8)已经得到检波点坐标的 X 和 Y 坐标,则检波点深度求取方法为:

向上以 100 m 间隔放炮,在东西方向上以 50 m 间隔放炮,共放 $101 \times 201 = 20301$ 炮,检波点在 $X = 5000$ m 处排列成一条直线,在 Y 方向上在 $[1000, 9000]$ 范围内以 25 m 间隔排列,共计 321 个检波点,采用射线追踪的方法获得每一个检波点对应的所有炮的初至走时.如图5所示为第100个检波点对应的初至走时.在获得初至走时后,检波点初始坐标在 X 、 Y 、 Z 三个方向都给定 100 m 误差,用本文所述方法进行二次定位计算,如图6所示为第1个检波点第0次迭代、第10次迭代、第100次迭代后偏移距和初至时间散点图及其拟合曲线,由图可以看出随着迭代次数的增多,散点分布更加集中,曲线拟合程度更好.部分检波点二次定位结果如表1所示,可见经过二次定位后所有检波点的定位误差都在 1 m 以内,精度极高.

表 1 161~170 号检波点定位结果
Table 1 Repositioning results of receiver points 161~170

序号	检波点真实 x 坐标/m	检波点真实 y 坐标/m	检波点真实 z 坐标/m	检波点计算 x 坐标/m	检波点计算 y 坐标/m	检波点计算 z 坐标/m	x 坐标误差 /m	y 坐标误差 /m	z 坐标误差 /m
160	5000	4975	10	5000.001	4974.968	10.000	0.001	-0.032	0.000
161	5000	5000	10	5000.001	4999.993	10.000	0.001	-0.007	0.000
162	5000	5025	10	5000.001	5025.018	10.000	0.001	0.018	0.000
163	5000	5050	10	5000.001	5050.059	10.000	0.001	0.059	0.000
164	5000	5075	10	5000.001	5075.098	10.000	0.001	0.098	0.000
165	5000	5100	10	5000.001	5100.119	10.000	0.001	0.119	0.000
166	5000	5125	10	5000.001	5125.135	10.000	0.001	0.135	0.000
167	5000	5150	10	5000.001	5150.165	10.000	0.001	0.165	0.000
168	5000	5175	10	5000.001	5175.190	10.000	0.001	0.190	0.000
169	5000	5200	10	5000.001	5200.196	10.000	0.001	0.196	0.000

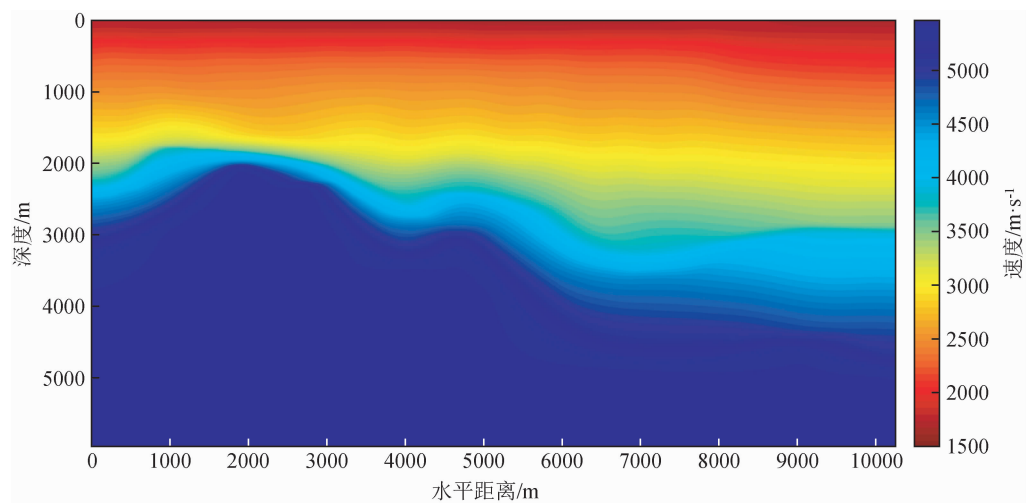


图 3 模拟所用速度模型
Fig.3 Velocity model used for simulation

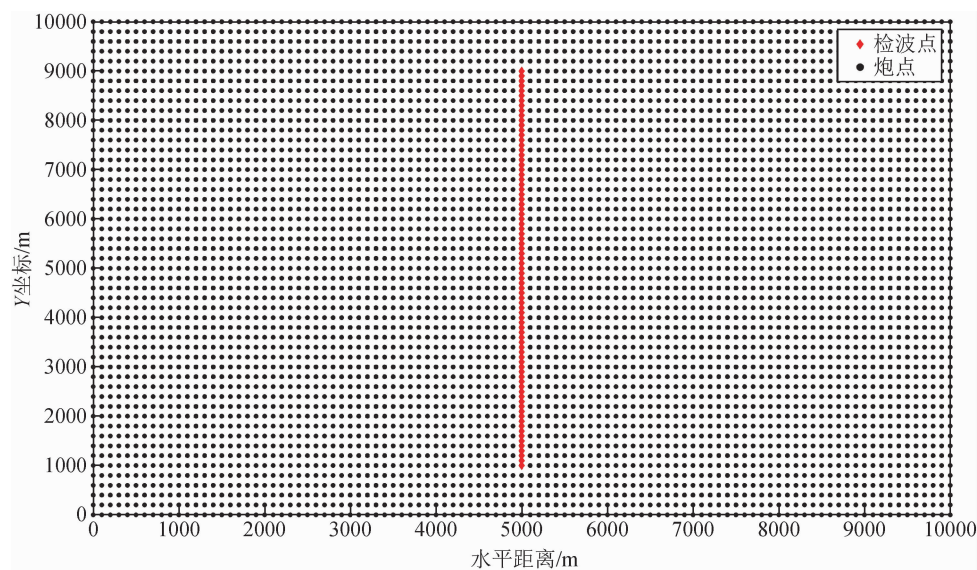


图 4 模拟所用炮点和检波点观测系统示意图
Fig.4 Schematic diagram of the geometry of shot points and receiver points used in the simulation

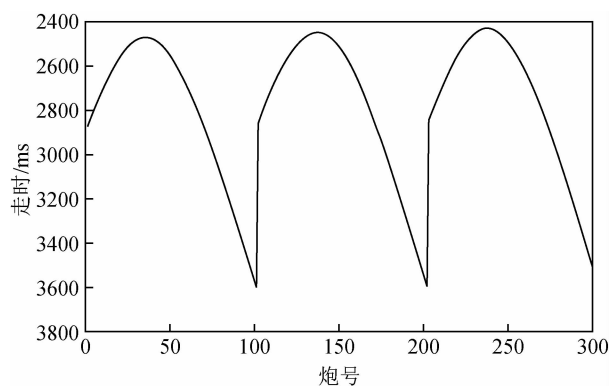


图 5 模拟所得走时
Fig.5 Simulated travel time

2.2 实际资料应用实例

为了验证本文方法在实际资料中的应用效果,选取了胜利油田某海域 OBN 资料一条接收线进行了试处理. 由于海底洋流、捕鱼活动等影响,同一个检波器在不同时间所处的位置可能不同,如图 7 红色方框部分所示,相同检波点不同时间采集的单炮初至形态发生了变化,说明这些检波点位置存在变动,因此需要分时段对检波点进行二次定位计算. 时间段的划分可参考以下几种方式:(1)根据潮汐表进行时间段的划分;(2)根据 OBN 仪器中的姿态传感器中姿态角是否发生变化进行划分;(3)根据单

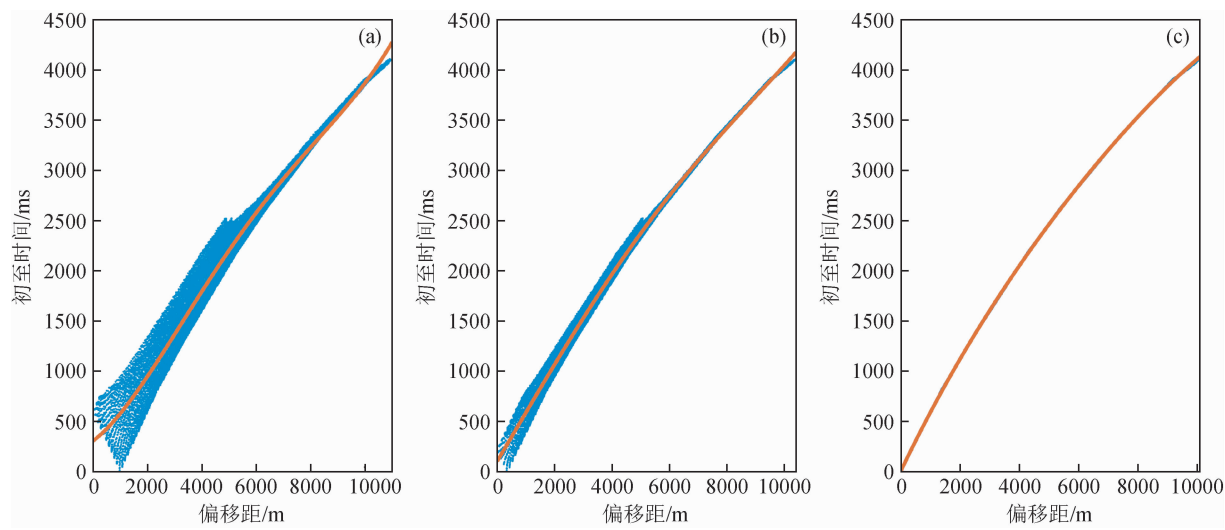


图 6 模拟资料不同迭代次数对应的走时拟合图
(a) 迭代 0 次; (b) 迭代 10 次; (c) 迭代 100 次.
Fig. 6 Travel time fitting graph for different iterations of simulated data
(a) 0 iteration; (b) 10 iterations; (c) 100 iterations.

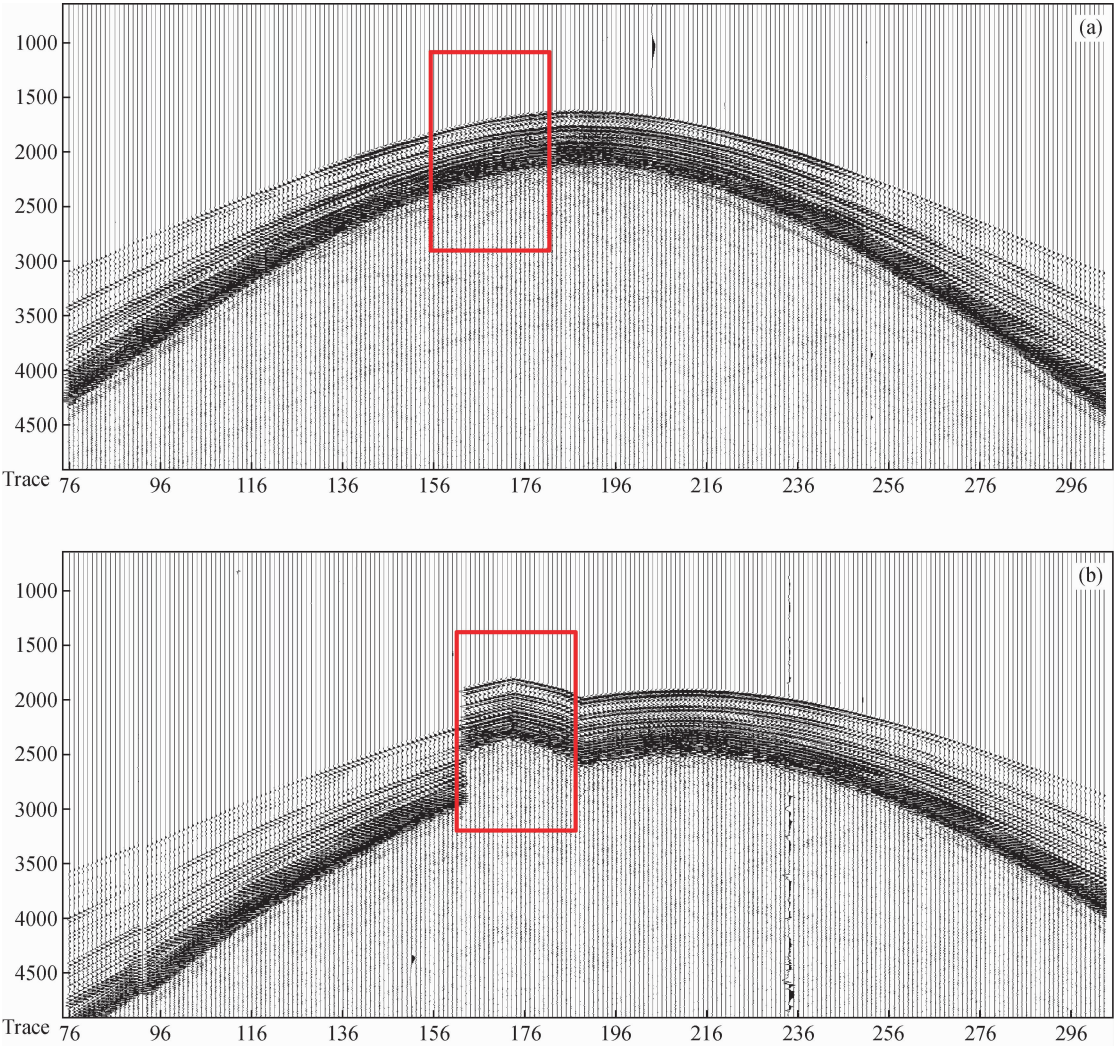


图 7 实际资料不同时间采集的单炮示意图
(a) 文件号 141650 单炮; (b) 文件号 140850 单炮.
Fig. 7 Single shot gather of field data collected at different times
(a) Single shot with document number 141650; (b) Single shot with document number 140850.

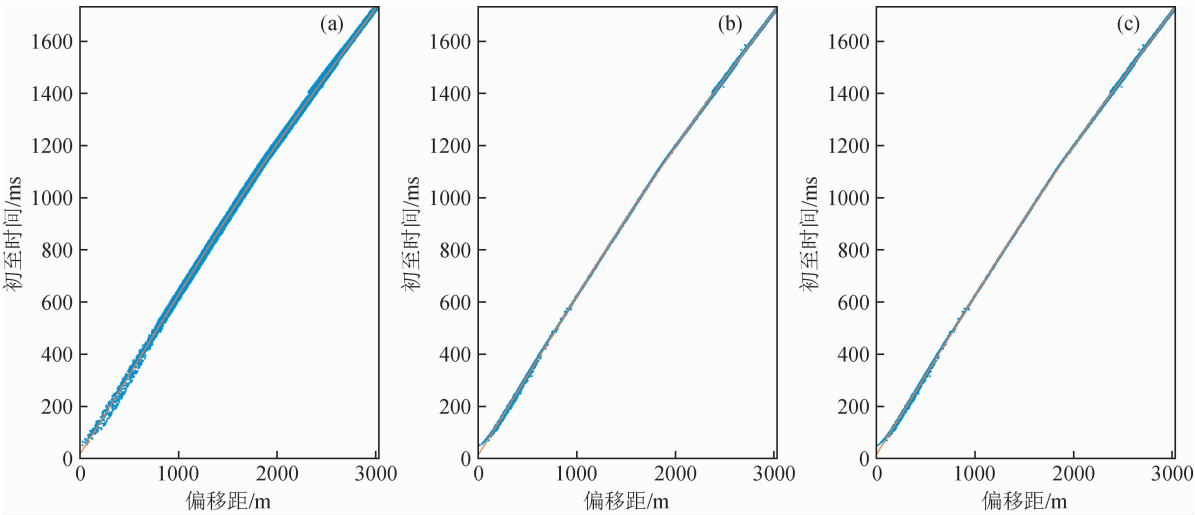


图 8 实际资料不同迭代次数对应的走时拟合图
(a) 迭代 0 次; (b) 迭代 10 次; (c) 迭代 100 次.

Fig. 8 Travel time fitting graph for different iterations of field data
(a) 0 iteration; (b) 10 iterations; (c) 100 iterations.

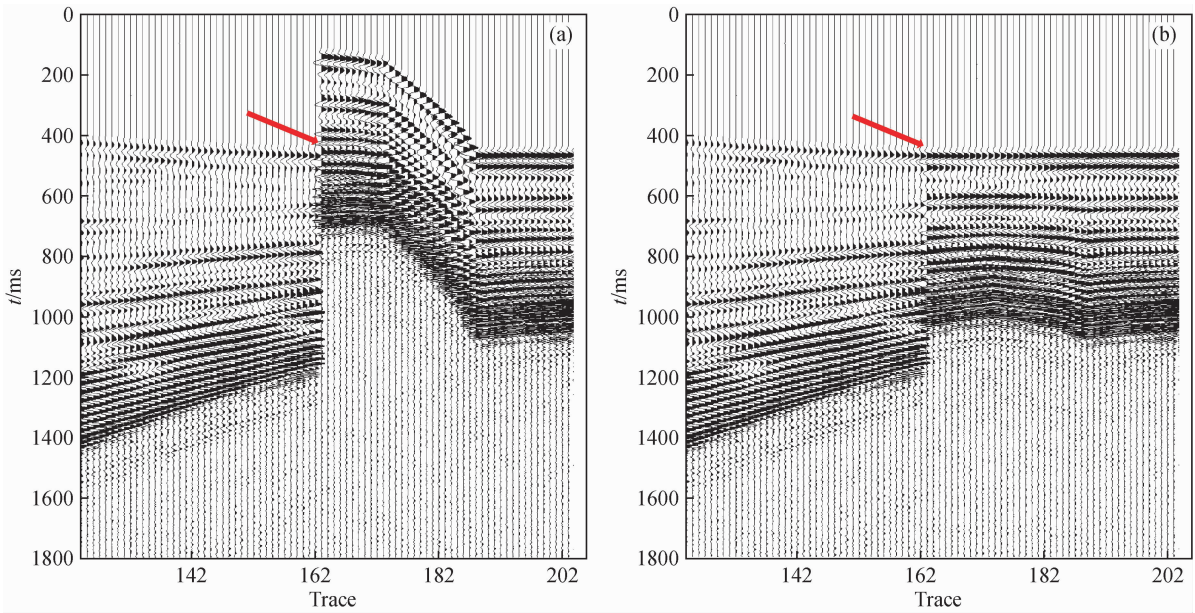


图 9 实际资料二次定位前 (a)、后 (b) 线性动校正道集对比图

Fig. 9 Comparison chart of linear normal moveout correction gather before (a) and after (b) repositioning of field data

炮分析的结果手动划分时间段.

在进行精细时间段划分之后,在地震数据处理系统中进行初至时间的精确拾取,然后用本文方法进行二次定位计算,如图 8 所示为第 7197 号检波点二次定位前、迭代 10 次和迭代 100 次时初至走时和偏移距关系的散点图及其拟合曲线,由图可以看到,随着迭代次数的增加,散点分布更加

集中,曲线拟合程度更好,变化趋势与模拟资料相同.同时采用行业内用来验证检波点坐标是否正确的线性动校正方法进行了验证,如图 9 所示为第 138218 炮二次定位前后共检波点道集线性动校正图,由图中红色箭头部分可以看出,经过二次定位,共检波点道集初至同相轴更加水平,与理论情况更加相符.图 10 为某一时间段内二次定位前后

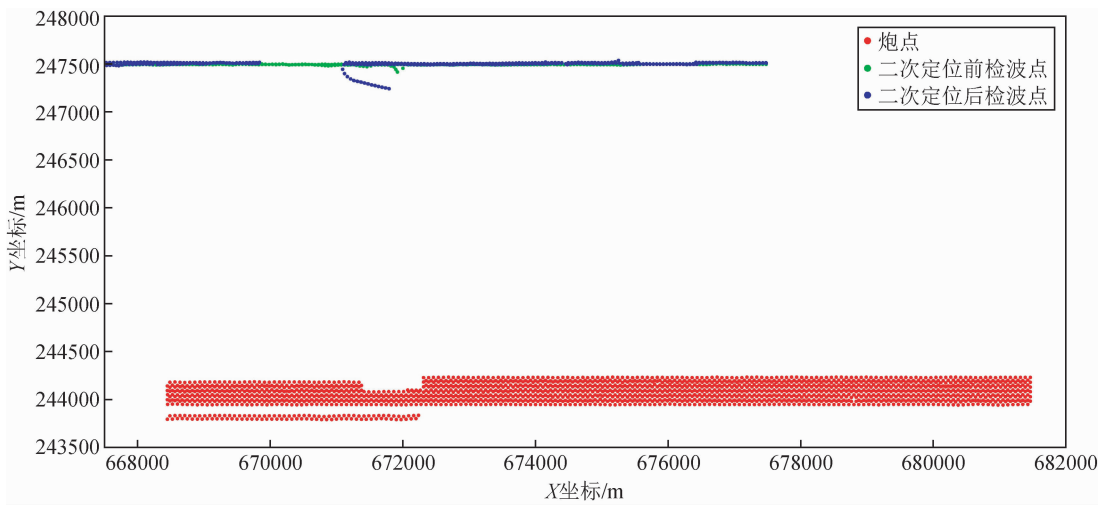


图 10 实际资料二次定位前后炮点和检波点位置图

Fig. 10 Position diagram of shot points and receiver points before and after secondary positioning of field data

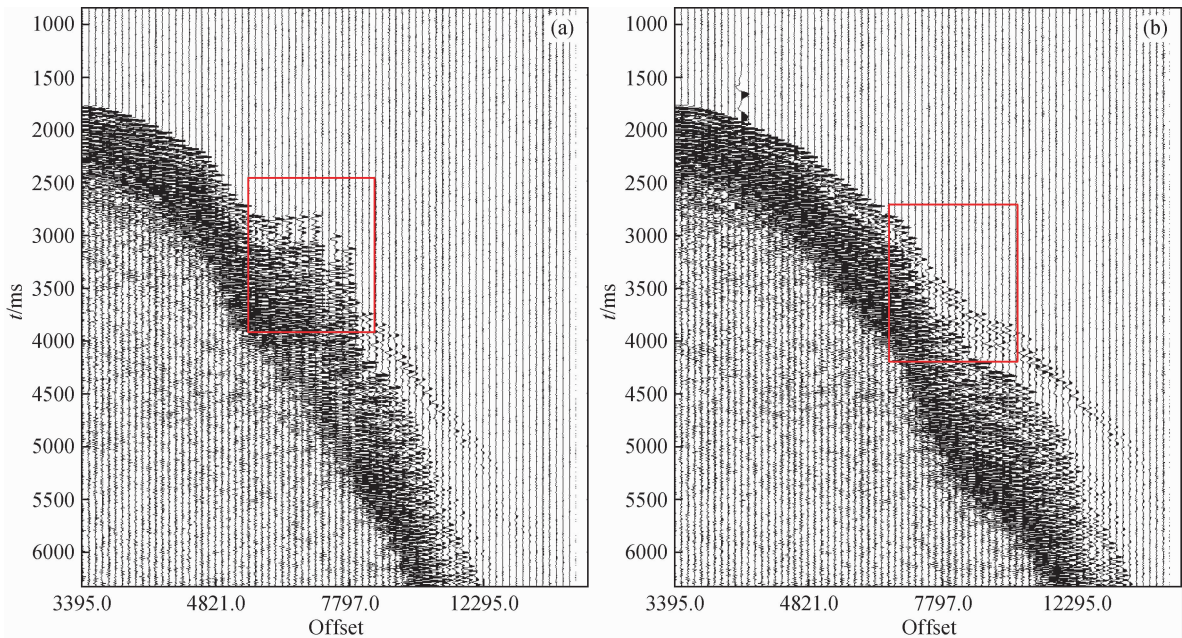


图 11 实际资料二次定位前(a)、后(b)CMP道集对比图

Fig. 11 Comparison of CMP gathers before(a) and after(b) secondary positioning of field data

炮点和检波点位置对比图,从图中可以看出,部分检波点可能由于渔网拖拽等原因发生了严重偏移,如果不进行准确定位势必对成像效果产生严重影响.图 11 为二次定位前后共检波点道集按照偏移距排序对比图,从图中可以看出,二次定位前由于部分检波点坐标误差较大,初至形态呈现参差不齐,而二次定位之后初至更加光滑,更符合实际情况.最后,对二次定位前后的地震数

据进行叠加成像,结果如图 12 所示,二者除了输入数据的检波点坐标不同之外,其他参数和流程完全相同.由图 12 可以看出,由于检波点坐标发生变化,二次定位前后同一条 CMP 剖面的覆盖次数发生变化,且经过二次定位后,资料信噪比增高,地震同相轴连续性更好,分辨率更高,说明准确的检波点坐标对地震成像精度有着非常重要的作用.

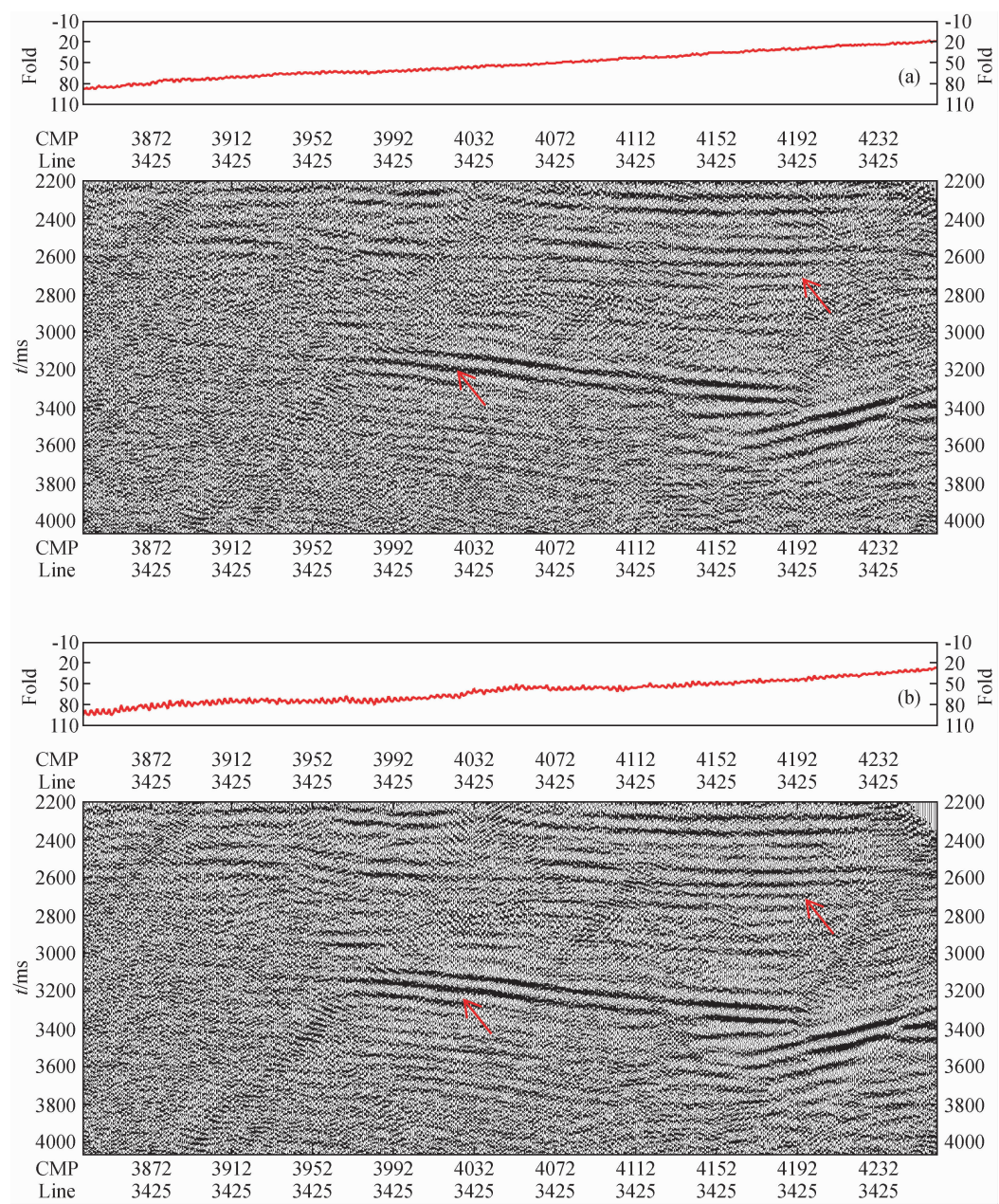


图 12 实际资料二次定位前(a)、后(b)覆盖次数和叠加剖面对比图

Fig. 12 Comparison chart of fold and stack section before(a) and after(b) secondary positioning of field data

3 结 论

针对常规的基于直达波走时二次定位方法不适用于浅水海域的问题,本文创新性提出了基于初至拟合的浅海检波点二次定位方法,通过曲线拟合初至与偏移距的关系作为理论走时,然后根据其与实际拾取走时之差作为检波点 X 、 Y 坐标调整依据,迭代进行直至收敛,最后以水深数据为约束计算检波点的 Z 坐标. 模拟和实际资料验证了

本文所提二次定位方法的精度,经过本文方法二次定位之后,共检波点道集线性动校正拉平效果更好,CMP 道集初至形态更加合理,叠加剖面同相轴连续性更强、信噪比更高,表明该方法具有较高的生产应用价值.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

- Deng Y J, Yang Z G, Zhang J F, *et al.* 2013. A new acoustic secondary positioning in the OBC seismic prospecting. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 28(5): 2718-2724, doi: 10.6038/pg20130555.
- Gao Y, Fan Z C, Wang M, *et al.* 2008. Application research on geophone re-location technology by refraction wave method. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 47(3): 285-289, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2008.03.013.
- Ge X D. 2015. A study on the second positioning technique for the first break in OBC seismic exploration of shallow sea [Master's thesis] (in Chinese). Qingdao: Ocean University of China.
- Han L Q, Chang W. 2003. Application of first break second positioning technique in OBC. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 42(4): 501-504, 512.
- Li L Q, Chen X, Wu Z L, *et al.* 2013. Technique for relocating OBS in deep water environment. *Marine Geology Frontiers* (in Chinese), 29(11): 54-61, doi: 10.16028/j.1009-2722.2013.11.013.
- Ma D T, Zhao H B, Wu Z L. 2013. An OBS positioning mixed method based on travel-time of direct wave. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 48(5): 677-681, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2013.05.009.
- Ma L, Li Q C, Ma J Q. 2023. OBN secondary positioning method jointly by first breaks of direct and refracted waves in shallow water based on dynamic penalty weighting. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 58(1): 75-82, 177, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2023.01.007.
- Ni C Z, Quan H Y, Chen G, *et al.* 2008. A new method for high-precision first break secondary positioning-search method. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 43(2): 131-133, 157, doi: 10.3321/j.issn:1000-7210.2008.02.002.
- Pang S. 2021. Application of a first-break wave secondary location technique to seismic exploration in the transitional zone of a shallow sea in West Africa. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 60(S1): 97-101.
- Wang Z C, Zhou H W, Tong S Y, *et al.* 2020. Secondary positioning of deep ocean bottom nodes. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 55(2): 242-247, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2020.02.002.
- Wang Z C, Tong S Y, Zhou H W, *et al.* 2021. Quality control method for secondary location of OBN data. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 56(4): 728-735, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2021.04.006.
- Xu W X, Duan W X, Liu Z H, *et al.* 2009. Discussion on the technology for improving the accuracy of secondary positioning with first break. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 48(3): 239-243.
- Yang B F, Song Q X, Liu Z F. 2008. Application of secondary positioning technique in OBC exploration operation. *Equipment for Geophysical Prospecting* (in Chinese), 18(1): 62-65, doi: 10.3969/j.issn.1671-0657.2008.01.014.
- Yang H S, Xu L J, Ma J, *et al.* 2021. First-break positioning and accuracy evaluation based on vector superposition. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 56(1): 49-56, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2021.01.005.
- Yang Z H, Zhang H J. 2013. An approximate tetrahedron method for the secondary positioning in OBC seismic survey. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 48(2): 163-170, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2013.02.001.
- Yi C H, Fang S C, Qin X B. 2008. Study on positioning algorithm of OBC secondary positioning system. *Equipment for Geophysical Prospecting* (in Chinese), 18(6): 351-353, 366, doi: 10.3969/j.issn.1671-0657.2008.06.001.
- Zeng X Y, Yang W Y. 2001. Brief analysis of secondary positioning system in seismic sea-bottom cable acquisition. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 36(2): 220-226, doi: 10.3321/j.issn:1000-7210.2001.02.012.

附中文参考文献

- 邓元军, 杨志国, 张建峰, 等. 2013. 新的声波二次定位技术在海底电缆地震勘探的应用. *地球物理学进展*, 28(5): 2718-2724, doi: 10.6038/pg20130555.
- 高云, 凡正才, 王民, 等. 2008. 折射波法检波器二次定位技术应用研究. *石油物探*, 47(3): 285-289, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2008.03.013.
- 葛晓丹. 2015. 浅海地震勘探海底电缆初至波二次定位方法研究 [硕士论文]. 青岛: 中国海洋大学.
- 韩立强, 常稳. 2003. 海底电缆初至波二次定位技术的应用. *石油物探*, 42(4): 501-504, 512.
- 李丽青, 陈玺, 伍宗良, 等. 2013. 深水环境下 OBS 的二次定位技术. *海洋地质前沿*, 29(11): 54-61, doi: 10.16028/j.1009-2722.2013.11.013.
- 马德堂, 赵会兵, 伍忠良. 2013. 基于直达波走时的 OBS 混合定位方法. *石油地球物理勘探*, 48(5): 677-681, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2013.05.009.
- 马力, 李庆春, 马见青. 2023. 基于动态惩罚加权的浅水 OBN 直达波与折射波初至联合二次定位方法. *石油地球物理勘探*, 58(1): 75-82, 177, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2023.01.007.
- 倪成洲, 全海燕, 陈刚, 等. 2008. 一种高精度初至波二次定位新方法——搜索法. *石油地球物理勘探*, 43(2): 131-133, 157, doi: 10.3321/j.issn:1000-7210.2008.02.002.
- 庞帅. 2021. 初至波二次定位技术在西非浅海过渡带地震勘探中的应用. *石油物探*, 60(S1): 97-101.
- 王忠成, 周华伟, 童思友, 等. 2020. 深水海底节点二次定位方法. *石油地球物理勘探*, 55(2): 242-247, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2020.02.002.
- 王忠成, 童思友, 周华伟, 等. 2021. OBN 资料二次定位质量监控方法. *石油地球物理勘探*, 56(4): 728-735, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2021.04.006.
- 徐维秀, 段卫星, 刘治红, 等. 2009. 提高初至波二次定位精度技术的探讨. *石油物探*, 48(3): 239-243.
- 杨宝付, 宋潜新, 刘子富. 2008. 二次定位技术在 OBC 勘探施工中的应用. *物探装备*, 18(1): 62-65, doi: 10.3969/j.issn.1671-0657.2008.01.014.
- 杨海申, 徐丽军, 马洁, 等. 2021. 矢量叠加初至波定位方法及精度评价. *石油地球物理勘探*, 56(1): 49-56, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2021.01.005.
- 杨正华, 张慧静. 2013. 海底电缆地震勘探中近正四面体法二次定位技术. *石油地球物理勘探*, 48(2): 163-170, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2013.02.001.
- 易昌华, 方守川, 秦学彬. 2008. OBC 二次定位系统定位算法研究. *物探装备*, 18(6): 351-353, 366, doi: 10.3969/j.issn.1671-0657.2008.06.001.
- 曾湘轶, 杨文艳. 2001. 浅析海底电缆地震采集作业二次定位系统. *石油地球物理勘探*, 36(2): 220-226, doi: 10.3321/j.issn:1000-7210.2001.02.012.