

张浩浩, 李丽青, 张宝金, 等. 基于潮位预测的潮汐校正方法在高分辨率单道地震调查中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(10): 94-100.
ZHANG Haohao, LI Liqing, ZHANG Baojin, et al. Application of tidal correction method based on tide prediction in high resolution single-channel seismic survey[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(10): 94-100.

基于潮位预测的潮汐校正方法在高分辨率 单道地震调查中的应用

张浩浩¹, 李丽青^{1,2,3}, 张宝金^{1,2,3}, 荣骏召^{1,2,3}, 刘胜旋^{1,2}, 张冉⁴

(1 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760; 2 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;
3 天然气水合物勘察开发国家工程研究中心, 广州 511458; 4 河南省航空物探遥感中心, 郑州 450000)

摘要:单道地震探测技术在海洋勘探各领域应用广泛, 潮汐变化对高分辨率单道地震资料的质量有很大影响, 尤其是对采集时间跨度较大的资料, 在测线交点处存在严重的剖面不闭合现象。利用潮汐预测方法对高分辨率单道地震进行了潮汐校正, 经过校正后的资料品质明显得到提升。通过对比不同测线交点处的剖面情况, 剖面不闭合现象得到改善, 同相轴的对应关系更好。实际应用结果表明, 基于潮位预测的潮汐校正方法在高分辨率单道地震调查中的应用有效可靠。

关键词:高分辨率; 单道地震; 潮汐校正; 同相轴; 潮位预测

中图分类号:P736; P631.4 文献标识码:A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.195

0 引言

海洋蕴含丰富的矿产资源, 合理开发利用近海资源, 保护海洋环境是我国近几年尤为关注的领域^[1]。单道地震海洋地球物理探测技术以分辨率高、施工简单、工作效率高且施工费用低等特点在海洋勘探的各个领域得到广泛应用^[2-3]。在水合物勘探领域, 国内外广泛采用了单道地震调查的方法, 该方法在某些水合物地区可以更方便地获得地层反射系数, 更清楚地显示 BSR 的位置^[4-6]; 单道地震调查方法也可应用在湖泊、浅海以及陆架区域, 以查明不同环境下浅地层的沉积环境和演化历史^[7-8]。此外, 单道地震分辨率的提升使其得到了更好的应用。通过对高分辨率单道地震数据进行处理解释,

可以在地震剖面上识别出不同的沉积序列, 得到的地层剖面可以很好地辅助揭示地层的演化历史^[9]。单道地震广泛应用的基础是其相应处理手段的不断完善和成熟。对于单道地震中涌浪静校正问题, 相关专家学者针对不同的地形特征提出了不同的解决方案, 取得了良好的应用效果^[10-11]; 单道地震中压制噪声和多次波等处理技术也有相关学者进行了深入研究和分析^[12-14]; 对于高分辨率的单道地震, 在处理过程中需要加入特殊的技术, 以充分体现其高精度的数据特点, 李丽青等^[15]提出了高分辨率单道地震剖面上定标号的计算方法, 获得的位置精度较高, 结果可靠; 万芄等^[16]则详细介绍和分析了高分辨率单道地震技术在深海探测中的应用。

海上地震勘探受气候、勘探设备、物品补给等各种因素的影响^[17], 在大规模区域调查时, 需要分时段采集地震资料。由于采集时间不同, 海水环境存在很大差异, 包括海水温度、盐度、潮汐等环境因素都可能发生很大变化, 从而造成同一采集设备在不同时段采集的资料存在系统误差^[18]。地震勘探中潮汐是影响资料质量的主要因素, 对于高分辨率单道地震数据, 由于数据采样频率高, 其资料品质

收稿日期: 2021-07-25

资助项目: 国家重点研发计划《深海关键技术与装备》项目“天然气水合物高精度三维地震采集脚印压制技术”(2017YFC030740504); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项“南海深海盆地莫霍面地震反射空间分布研究”(GML2019ZD0207); 中国地质调查局项目“南海重点海域天然气水合物调查评价”(DD20221705)

作者简介: 张浩浩(1994—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事地震资料处理方面的研究工作。E-mail: geozhh@163.com

对潮差值尤为敏感。因此,对不同时段采集的高分辨率单道地震资料进行潮汐校正十分必要。本文通过利用潮位预测的潮汐校正方法对不同年份采集的高分辨率单道地震老资料进行潮汐校正,实际应用表明该方法准确可靠,应用效果良好。

1 基于潮位预测的潮汐校正方法

一般可以使用潮汐表或验潮仪的数据对地震资料进行潮汐校正,然而,由于潮汐数据观测位置通常与实际工区不一致,造成该方法的校正量存在误差,精度不高^[19],并且这些观测数据较难获得。应用水深数据进行潮汐校正的前提是海底地形比较平缓,在崎岖地形的应用效果并不显著^[20]。利用差分 GPS 数据进行潮汐校正精度高,应用效果显著,但是对于没有记录该数据的地震资料并不适用。基于潮位预测的潮汐校正方法是通过实际潮汐资料和常数编制的潮位预测软件对研究区潮位数据进行预测,然后利用预测的潮汐数据进行潮汐校正,该方法对勘探资料没有额外数据要求,适用性强,预测结果精度较高。

海洋潮汐运动是海水受到月球和太阳的引力作用而产生的一种周期性的海平面升降运动。潮汐分析是潮汐预测的前提,潮汐分析即对潮汐中调和分潮的频率、振幅、相位进行分析,常用的分析方法为调和分析法^[21]。调和分析法是潮汐预报技术的基础,其以潮汐静力学为基础,结合潮汐观测资料进行分析,计算潮汐调和常数,最终得到的调和模型可以实现对某个海洋区域任意时间的潮汐预报。

在潮汐理论中,将造成潮汐的引潮力按球面三角函数处理,并进一步用级数公式展开为许多余弦函数,每一个余弦函数都是一个分潮。潮位 $h(t)$ 可以表达为:

$$h(t) = A_0 + \sum_{i=1}^N f_j H_i \cos(\sigma_i t + V_i + u_i - g_i) \quad (1)$$

式中: A_0 为平均海平面高度, m;

t 为时间, s;

N 为分潮数量,无量纲;

f_j 为节点因子,无量纲;

V_i 为分潮初相角, (°);

σ_i 为分潮角速度, rad/s;

u_i 为天文相角的交角订正角, (°);

H_i 和 g_i 为调和常数,分别是各个分潮的振幅 (cm) 和迟角 (°)。迟角分 3 种,国际通用的是格林威治迟角。

潮位预测的方法就是基于上述潮位值的公式来对研究区目标点潮位进行预报。该方法前期需要收集大量历年实测的验潮站资料,通过对资料进行整理筛选,去除无效和不可靠的数据,然后基于所选资料计算得到潮汐调和常数,最后利用确定的潮汐调和常数带入潮位值计算公式得到目标区的天文潮位。通过该方法预测的潮位值,在渤海和南海区域经过实测资料精度验证,各区域在使用控制站实测资料的基础上,误差 ≤ 20 cm 数据的百分比均达到了 95% 以上^[22],在实际应用中满足精度要求。

2 研究区潮汐特征及资料采集

南海的潮波主要从西太平洋通过吕宋海峡进入,然后向西南沿途传播,潮能大部分在南海和各附属海湾消耗,潮汐振幅由深水区域向沿岸逐渐增大,潮汐具有复杂的季节性变化特征,南海大部分潮汐属于混合潮性质^[23-24]。以潮汐涨落周期为划分依据,每天出现一个潮汐循环称为全日潮,每天出现 2 个潮汐循环称为半日潮,介于两者之间称为混合潮。混合潮又可分为以半日潮为主的“不规则半日潮”和以全日潮为主的“不规则全日潮”。在南海北部陆架海域,潮汐类型以不规则全日潮为主^[25]。

本文研究区位于南海西北部某区域,海区是开阔的南海北部陆架及陆坡,以浅水海域为主。工区单道地震采集测线示意图如图 1 所示,由于工区范围较大,采集任务分为 2 年度采集,采集参数如表 1 所示。第 1 次采集时间段为 2013 年 3 月中旬至 4 月初,采集测线长度为 2 077.9 km;第 2 次采集时间段为 2014 年 7 月,采集测线长度为 3 094.3 km。2 次采集时间相差近 1 年,采集月份不同。根据该地区的潮汐规律,研究区潮汐类型属于不规则全日潮,潮汐振幅较大,2 个采集时段的潮位值存在较大差异。

为了对比 2 次采集过程中潮汐的变化情况,抽取了 2 次资料在采集过程中相同位置的潮位数据(如图 1 中红色方块所示测试点位置)。其中, P1 为 2014 年采集的测线交点, P2 和 P3 为不同年份采集测线的交点。图 2、图 3 所示为 2 次资料采集时期潮位值的变化图,其中横坐标为距采集开始当月

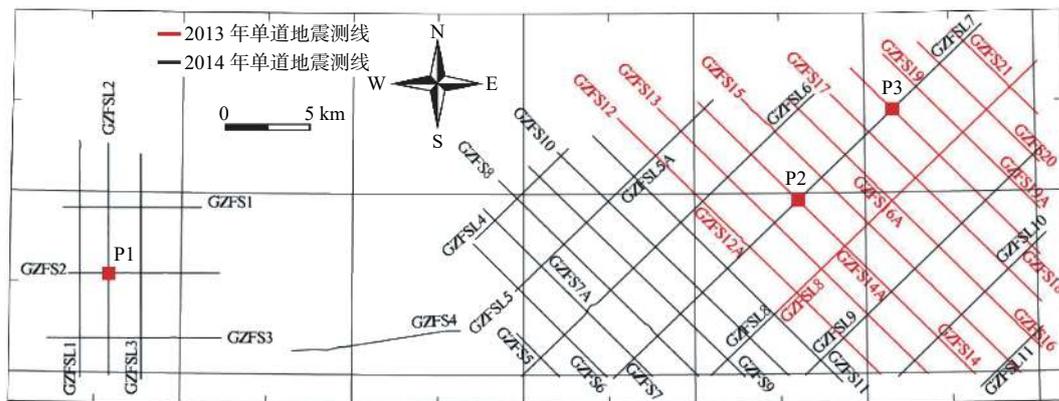


图1 单道地震测线示意图

Fig.1 The layout of single-channel seismic lines

表1 单道地震测量工作参数表

Table 1 Parameters of single-channel seismic survey

采集参数	2013年	2014年
施工船只	奋斗五号	奋斗五号
激发间隔/ms	1 500	1 500
船速/节	4~6	4~6
震源能量/J	1 000/1 300	1 000/1 300
记录长度/ms	1 000	1 000
采样频率/Hz	4 000	4 000
电极距离船尾/m	45	35
水听器中心距离船尾/m	43	35
电极与电缆接收中心间距/m	9	10
数据记录格式	SEG-Y	SEG-Y

1号0时0分的时长,纵坐标为潮位值。

通过对比分析2年度的潮汐预测值发现:①在同一位置同一时期,本研究区潮差值最大可>3 m,水速以1 500 m/s计算,3 m的潮差值在地震记录中大约有4 ms时差,工区地震数据采样率为0.25 ms,会造成大概16个采样点的时移误差,这样的误差会降低高分辨率地震数据的准确性,影响后续资料的处理和解释;②不同位置同一时期的潮汐规律有一定的相似性,潮位值变化范围相差最大约0.5 m;③同一时期一定范围内潮位值变化不大,不同时期的潮汐规律不同,潮位值变化明显。因此,如果对

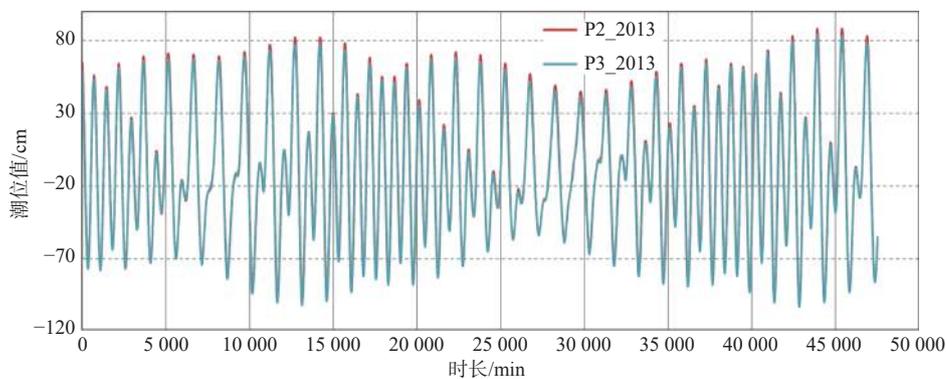


图2 2013年数据采集期间潮汐预测值

Fig.2 The tidal prediction values of collection data of year 2013

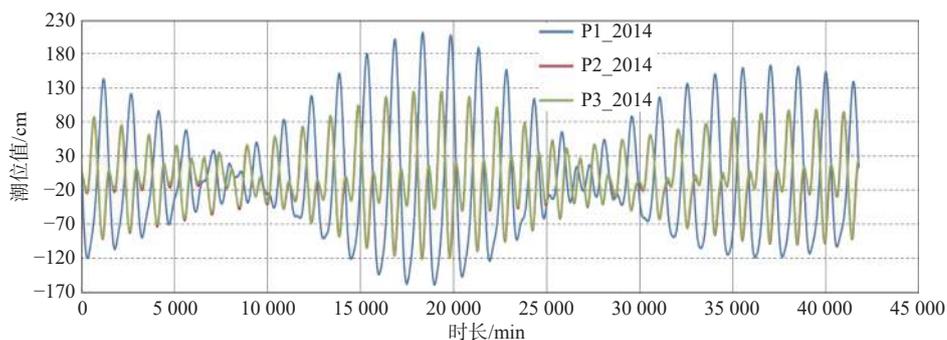


图3 2014年数据采集期间潮汐预测值

Fig.3 The tidal prediction values of collection data of year 2014

2 次采集的地震数据进行潮汐校正, 不能选取某个具体时间和位置的潮汐值作为全工区的校正量, 需要统计每条测线每道地震数据的潮汐值, 然后分别对每道数据进行潮汐校正。

3 应用效果分析

我们根据潮汐预测软件推算出研究区不同时间不同位置的潮汐数据。图 4 为研究区各测线位置的潮汐值。可以看到, 整个工区潮汐值差异较大, 如图 4 中 P1、P2 和 P3 交点处所示, 同一位置不同时间的潮汐值差异明显, 这就造成了地震剖面在测

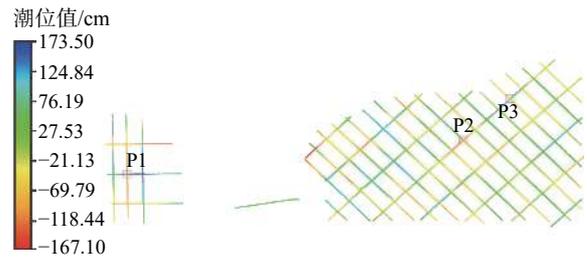
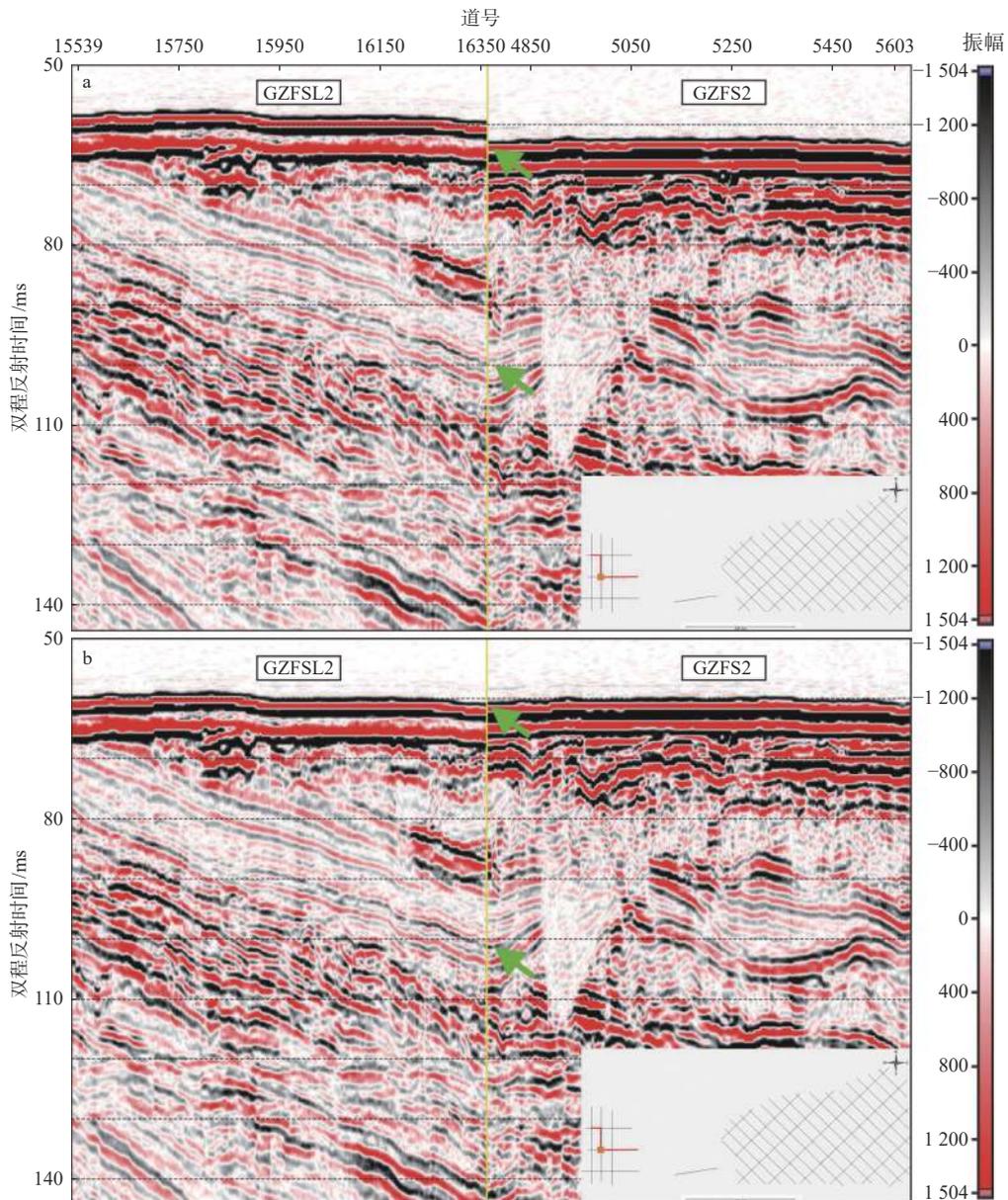


图 4 研究区各测线潮汐值

Fig.4 Tidal values of all survey lines in the study area
线交点处出现不能闭合的现象。

潮汐值数据显示 2013 年数据采集阶段潮汐的极大值为 0.74 m, 极小值为 -1.06 m; 2014 年数据采



(a)潮汐校正前;(b)潮汐校正后

图 5 潮汐校正前后 GZFSL2 (2014) 和 GZFS2 (2014) 测线交点剖面对比
Fig.5 Section comparison of GZFSL2 (2014) and GZFS2 (2014) intersection of survey lines before and after tidal correction

集阶段潮位的极大值为 1.74 m, 极小值为 -1.67 m, 潮汐基准面为当地平均海平面。根据潮汐数据, 通过提取地震数据道头的坐标和采集时间信息可以获得每个地震道的潮位值。由于地震数据道头没有记录具体年份和日期信息, 我们通过对班报记录, 采用通过手动编辑的方式对各测线每道的采集时间进行重置。然后, 通过位置、时间信息比对提取每道数据的潮位值。地震数据采集时每道采集时间通常间隔几秒钟, 而潮汐数据每隔半个小时统计一次, 经过统计我们发现, 潮汐数据在半小时内变化范围 < 5 cm, 换算为地震传播时间远小于采样

率的时间, 误差较小, 可以忽略, 因此, 我们可以将某个位置半小时内采集的地震道的潮汐校正量设为同一潮位值。获得潮汐数据后, 潮汐校正量 Δt_{tide} 可以由公式(2)计算得出:

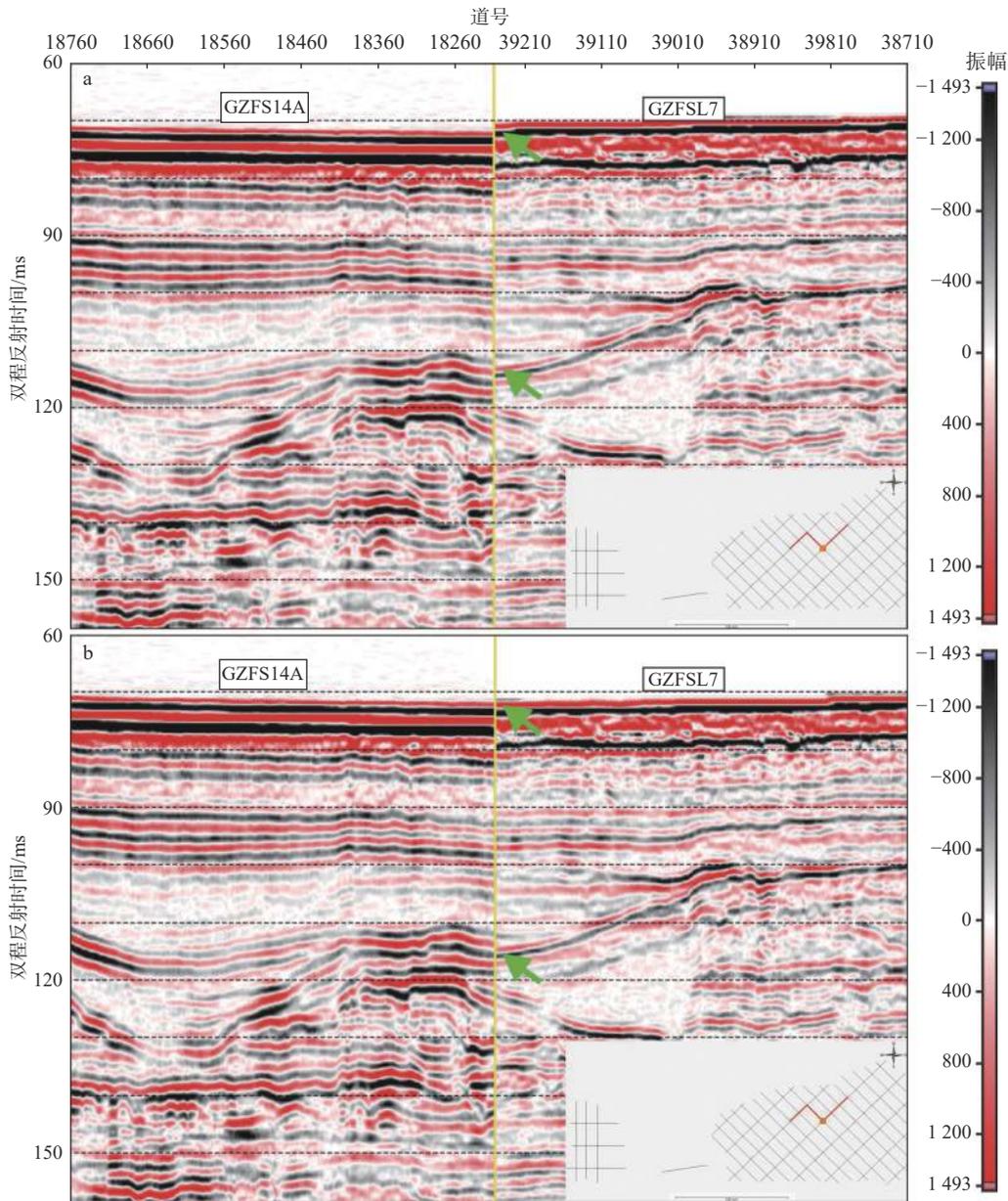
$$\Delta t_{\text{tide}} = 2d_{\text{tide}}/v_{\text{water}} \tag{2}$$

式中: d_{tide} 为潮位值;

v_{water} 为水速, 一般取 1 500 m/s。

对各道数据根据潮汐校正量进行时移, 得到校正后的数据。图 5 和图 6 为校正前后测线交点处剖面的对比图。

图 5 为测试点 P1 处的测线交点剖面图, 该测



(a)潮汐校正前; (b)潮汐校正后

图 6 潮汐校正前后 GZFS14A (2013) 和 GZFSL7 (2014) 测线交点剖面对比
Fig.6 Section comparison of GZFS14A (2013) and GZFSL7 (2014) intersection of survey lines before and after tidal correction

试点为同一年采集的测线交点。从校正前(图 5 上)的剖面我们可以看到交点处同相轴不闭合, 两测线的双程反射时间相差约 3.2 ms, 经过潮汐校正后(图 5 下), GZFSL2 测线向下时移约 1.2 ms, 而 GZFS2 测线向上时移约 2.1 ms, 2 条测线经过不同程度的时移, 双程反射时间基本一致, 交点处同相轴可以很好的闭合。图 6 为测试点 P2 处的测线交点剖面图, 该测试点为不同年份采集的测线交点。潮汐校正前相交测线的双程反射时间相差近 1.5 ms, 经过校正后, GZFS14A 测线向上时移约 0.3 ms, GZFSL7 测线向下时移约 1.2 ms, 交点处剖面中的同相轴得到闭合, 主要地层能较好匹配, 说明利用潮汐预测软件得到的潮位值是准确且有效的。另外, 潮汐校正不仅消除了测线交点不闭合问题, 利用潮位预测方法计算的潮位值参考的是同一基准面, 所以潮汐校正后 2 次资料的基准面也得到了统一, 更有利于后续地震资料的对比解释。综上所述, 利用潮位预测的方法对高分辨率单道地震进行潮汐校正效果显著, 校正后的地震剖面质量得到提升, 数据更加准确可靠。

4 结论

高分辨率单道地震资料受潮汐作用影响显著, 较小的潮差值即可对其地震剖面造成严重的时移误差, 对于不同时间段采集的资料如果不进行潮汐校正会出现测线交点处存在明显的剖面不闭合现象。针对部分老地震资料缺少潮汐数据的问题, 采用基于潮位预测的潮汐校正方法, 该方法预测结果准确, 并且不需要其他数据支持, 适用性强。本文通过应用潮汐预测的方法对高分辨率单道地震进行潮汐校正, 取得了良好的应用效果。处理后的地震剖面的时深关系得到校正, 测线交点处的地震剖面能得到很好匹配, 同相轴对应关系得到改善, 剖面不闭合的现象基本消除。实际应用结果表明, 基于潮位预测的潮汐校正方法在高分辨率单道地震调查中的应用有效可行。

参考文献:

- [1] 秦绪文, 石显耀, 杨胜雄, 等. 世界海洋地质调查发展历程与启示[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(1): 1-6.
- [2] 杨慧良, 陆凯, 褚宏宪. 海洋地质地球物理调查技术方法发展趋势探讨[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(9): 1-5.
- [3] 褚宏宪, 杨源, 张晓波, 等. 高分辨率单道地震调查数据采集技术方法[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(12): 70-74.
- [4] BOURIAK S, VOLKONSKAIA A, GALAKTIONOV V. "Split" strata-bounded gas hydrate BSR below deposits of the Storegga Slide and at the southern edge of the Voring Plateau[J]. *Marine Geology*, 2003, 195: 301-318.
- [5] 张光学, 黄永祥, 陈邦彦. 海域天然气水合物地震学[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.
- [6] 沙志彬, 许振强, 王平康, 等. 世界天然气水合物研究发展对我国加快推进其产业化的启示[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(8): 1-10.
- [7] BROOKS K, SCHOLZ C A, KING J W, et al. Late-Quaternary lowstands of lake Bosumtwi, Ghana: evidence from high-resolution seismic-reflection and sediment-core data[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2005, 216: 235-249.
- [8] BOSS S K, HOFFMAN C W, COOPER B. Influence of fluvial processes on the Quaternary geologic framework of the continental shelf, North Carolina, USA[J]. *Marine Geology*, 2002, 183: 45-65.
- [9] BART P J, ANDERSON J B, TRINCARDI F, et al. Seismic data from the Northern Basin, Ross Sea, record extreme expansions of the East Antarctic Ice Sheet during the late Neogene[J]. *Marine Geology*, 2000, 166: 31-50.
- [10] 李丽青, 徐华宁, 舒虎. 涌浪静校正技术在海洋单道地震资料处理中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(4): 339-343.
- [11] 罗进华, 潘国富, 丁维凤. 消除涌浪对海底声学地层剖面影响的处理技术研究[J]. 声学技术, 2009, 28(1): 21-24.
- [12] 李丽青, 陈泓君, 彭学超, 等. 海洋区域地质调查中的高分辨率单道地震资料关键处理技术[J]. 物探与化探, 2011, 35(1): 86-92.
- [13] 刘玉萍, 李丽青, 赵斌, 等. 海洋低信噪比单道地震资料特点及处理策略[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(7): 25-33.
- [14] 邢子浩, 陈靓, 杨德鹏, 等. 基于正则化非平稳回归技术的自适应匹配相减在单道地震多次波压制中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(2): 70-76.
- [15] 李丽青, 唐卫, 陈泓君, 等. 高分辨率单道地震剖面上定标号的计算方法[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(5): 1871-1880.
- [16] 万芑, 温明明, 吴衡, 等. 高分辨率单道地震技术在深海探测中的应用研究[J]. *地质装备*, 2014, 15(4): 33-41.
- [17] 方中华, 褚宏宪, 冯京, 等. 无人船艇在海洋地质调查中的应用及展望[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(3): 72-77.
- [18] 孙文博, 朱振宇, 张金森, 等. 海上时移地震中潮汐校正应用研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(6): 1084-4088.
- [19] 胡斐, 刘铮. 利用SkyFix XP高程对高分辨率三维地震资料进行潮汐校正的方法[J]. *中国海上油气*, 2007, 19(6): 377-380.
- [20] 陈华, 王征, 张亚斌. 海上地震资料潮汐校正技术的分析及应用[J]. *石油天然气学报*, 2011, 33(1): 90-93.
- [21] 蔡松, 柳林涛, 王国成. 标准时频变换的潮汐预测初探[J]. *测绘科学*, 2018, 43(7): 27-32.
- [22] 庄祖根, 姜华, 易淑昌, 等. 基于潮位预测的潮汐校正技术的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2013, 10(3): 286-290.
- [23] 丁文兰. 南海潮汐和潮流的分布特征[J]. *海洋与湖沼*, 1986, 17(6): 468-480.

- [24] 方国洪, 曹德明, 黄企洲. 南海潮汐潮流的数值模拟[J]. 海洋学报, 1994, 16(4): 1-12.
- [25] 蒋暑民, 戴德君, 乔方利, 等. 南海北部陆架海域内潮特征的观测研究[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(1): 1-11.

Application of tidal correction method based on tide prediction in high resolution single-channel seismic survey

ZHANG Haohao¹, LI Liqing^{1,2,3}, ZHANG Baojin^{1,2,3}, RONG Junzhao^{1,2,3}, LIU Shengxuan^{1,2}, ZHANG Ran⁴

(1 Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510760, China;

2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;

3 National Engineering Research Center for Gas Hydrate Exploration and Development, Guangzhou 511458, China;

4 Henan Geophysical Prospecting and Remote Sensing Center, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Single channel seismic detection technology is widely used in various fields of marine exploration. Tidal variation has a significant effect on the quality of high-resolution single-channel seismic data. Data with a large acquisition time span often have non-closure of profile at the intersection of survey line. A tide prediction method was used to correct high-resolution single-channel seismic data and the data quality were improved obviously. By comparing profiles at intersection of different survey lines, the non-closure problem was eliminated, and the corresponding events become more continuous. Real case application showed that the tidal correction method based on tide prediction was effective and reliable in high-resolution single-channel seismic survey.

Key words: high resolution; single-channel seismic; tidal correction; event; tide prediction