

# 海域天然气水合物开采的4C-OBC时移地震动态监测模拟

朱贺<sup>1,2</sup> 何涛<sup>1,2,†</sup> 梁前勇<sup>3</sup> 吴学敏<sup>3</sup> 董一飞<sup>3</sup>

1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 北京天然气水合物国际研究中心, 北京 100871; 3. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760; † 通信作者, E-mail: taohe@pku.edu.cn

**摘要** 为了掌控海域天然气水合物开采过程中的地质和环境风险, 采用能够同时采集纵波信号和横波信号, 并且满足实时性和长期性要求的四分量海底震缆(4C-OBC)技术, 对天然气水合物储层进行时移地震动态监测。针对未来天然气水合物商业化开发时的水平井环境, 通过射线追踪方法进行正演模拟, 对地层模型进行地震照明分析, 得到合理的4C-OBC布设参数, 以期确保采集的地震数据具有良好的成像效果, 并对不同开发阶段的时移地震数据进行走时与振幅分析。结果显示, 差异走时与差异振幅均能很好地反映天然气水合物的开采程度, 其中转换横波的效果更显著。观测系统的误差分析结果表明, 震源船的定位误差不会对这套时移监测系统有明显的影响。总的来说, 采用4C-OBC时移地震对天然气水合物储层进行动态监测的方案是有效的。

**关键词** 四分量海底震缆(4C-OBC); 动态监测; 时移地震; 天然气水合物; 射线追踪

## Modeling for Dynamic Monitoring of Marine Gas Hydrate Exploitation Using 4C-OBC Time-lapse Seismic System

ZHU He<sup>1,2</sup>, HE Tao<sup>1,2,†</sup>, LIANG Qianyong<sup>3</sup>, WU Xuemin<sup>3</sup>, DONG Yifei<sup>3</sup>

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. Beijing International Center for Gas Hydrate, Beijing 100871; 3. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510760; † Corresponding author, E-mail: taohe@pku.edu.cn

**Abstract** In order to control the geological and environmental risks during the exploitation of marine gas hydrate, 4-component ocean bottom cable (4C-OBC) is considered to perform time-lapse seismic monitoring on hydrate reservoirs, which can collect P- and S-wave simultaneously, and satisfy the requirement of real-time and long-term monitoring. This paper uses ray tracing method to carry out forward simulation of 4C-OBC time-lapse seismic system for the horizontal well environment in the future commercial gas hydrate exploitation. Based on the seismic illumination of the formation model, the optimal OBC layout parameters is obtained to ensure that the acquired seismic data has good imaging effect. Then, the travel time and amplitude of the time-lapse seismic data in different exploitation stages is analyzed. The results show that both differential travel time and amplitude could reflect the exploitation degree of gas hydrate reservoir, especially significant for converted S-wave. The error analysis results of the observation system show that seismic source vessel's positioning error would not significantly affect the time-lapse monitoring system. In sum, it is effective to monitor dynamic process of marine gas hydrate reservoir using 4C-OBC time-lapse seismic system.

**Key words** 4-component ocean bottom cable (4C-OBC); dynamic monitoring; time-lapse seismic; natural gas hydrate; ray tracing

天然气水合物(俗称“可燃冰”)是在相对低温高压条件下,由天然气与水形成的具有包接笼状晶格结构的冰状固态物质,具有储量丰富、分布广泛、可再生性和清洁无污染等特性,是一种极具潜力的未来能源<sup>[1]</sup>。据统计,全球天然气水合物蕴含的有机碳总量约为煤炭、油气等传统资源总和的两倍,极具开采价值<sup>[2-3]</sup>。

海域天然气水合物埋藏浅,并且是地层的构成部分,因此在开采过程中必须考虑以下方面的环境风险:1)天然气水合物的分解可能造成储层弱化,发生垮塌,诱发海底滑坡、海啸等地质灾害<sup>[4]</sup>;2)如果天然气水合物分解产生的甲烷气体大量泄露到海水中,会导致海水缺氧,引发生态灾难<sup>[5]</sup>;3)甲烷气体的温室效应相当于同等体积CO<sub>2</sub>的25倍,一旦泄露到大气层,可能对全球气候造成很大的影响<sup>[4,6]</sup>。因此,在天然气水合物开采过程中,有必要对储层进行动态监测。

目前尚无成熟的方案对天然气水合物储层进行大范围的动态监测,广泛应用于常规油气储层监测的时移地震监测是一个可选项。郝召兵等<sup>[7]</sup>基于传统的水面拖缆,对天然气水合物开采的时移地震监测进行简要的可行性分析,结论是肯定的,但该研究的定量程度远不能满足实用需求。另外,当前针对天然气水合物开采监测的数值模拟通常假设使用垂直井进行开发<sup>[7]</sup>,很少有关于水平井的模拟。实际上,主要的天然气水合物储层都是渗透率较低的粉砂质,甚至泥质沉积物,垂直井方案的开采速率以及最终采收率都非常有限,不能满足商业开采的需求。因此,使用可以显著提高开采效率的水平井方案<sup>[8-9]</sup>是天然气水合物商业化开发的必然选择。

天然气水合物赋存区域通常存在游离甲烷气,生产过程中天然气水合物分解也会直接释放出游离甲烷气。传统的水面拖缆地震勘探中,纵波会受到游离气的严重影响。因此,能够同时记录横波信息的海底四分量地震仪对海域天然气水合物储层的动态监测非常重要。由于电池和数据回收等功能的限制,科学研究中常用的海底地震仪(ocean bottom seismometer, OBS)和油气行业常用的海底采集节点(ocean bottom node, OBN)不能满足天然气水合物商业化开采过程中储层动态监测的实时性和长期性要求。因此,何涛等<sup>[10]</sup>提出使用四分量海底地震缆(4-component ocean bottom cable, 4C-OBC)来组建时移监测系统。作为一种可以采集海底全波信号的

新技术,4C-OBC具有低噪声、长期稳定工作和数据实时传输等优势。一些针对天然气水合物的4C-OBC实验已取得良好的成果,最终得到的纵、横波图像均能展示丰富的地层细节<sup>[11]</sup>。

本研究基于水平井减压法开采天然气水合物的背景,对使用4C-OBC大规模监测天然气水合物储层动态变化的方案开展数值模拟,评估其有效性,并确定野外作业对系统的最低要求。

## 1 地层模型与监测方法

南海北部神狐海域存在丰富的天然气水合物矿藏,是我国2017年第一次天然气水合物试采区。杨胜雄等<sup>[12]</sup>和郭依群等<sup>[13]</sup>基于广州海洋地质调查局第3次海域天然气水合物钻探航次(the third gas hydrate drilling expedition of Guangzhou Marine Geological Survey, GMGS)天然气水合物钻探计划的测井勘察结果,详细地描述该区域的天然气水合物赋存状态和相应的测井特征。本文根据文献<sup>[12]</sup>和<sup>[13]</sup>中的测井声波数据和矿物组分随深度的变化,通过构建岩石物理模型的方式,生成一套能反映该区域典型地层(包括天然气水合物和游离甲烷气储层)特征的虚拟纵横波测井记录(图1)。

为了模拟时移地震监测天然气水合物开采过程中储层的动态变化,可以逐渐降低模型中天然气水合物和游离甲烷气的含量,表示开采工作的不断进行。我国开采天然气水合物的工艺流程是先将天然气水合物稳定底界BSR (bottom simulating reflector, 似海底反射界面)之下的游离甲烷气抽出,降低天然气水合物储层的压力,从而破坏天然气水合物相的稳定条件,再将天然气水合物分解释放的甲烷气抽出。因此,可以在生产过程中设置6个关键时间节点:T0对应初始未开采状态;T1对应游离甲烷气恰好被抽空,但天然气水合物尚未开始分解的状态;T2~T5分别对应天然气水合物储量剩余50%,30%,15%和5%的状态。采用相同的岩石物理模型,计算得出不同时间节点的地层纵、横波速度和泊松比(图1)。需要强调的是,图1中BSR之上的天然气水合物储层以及BSR之下的含游离甲烷气层都是开采的目标地层,原因是波速结构显示,无论是天然气水合物储层还是含游离甲烷气层,都是既包含天然气水合物,也包含游离甲烷气,区别仅在于含量的不同。

图1中,虚拟声波测井曲线在深度上是连续的,

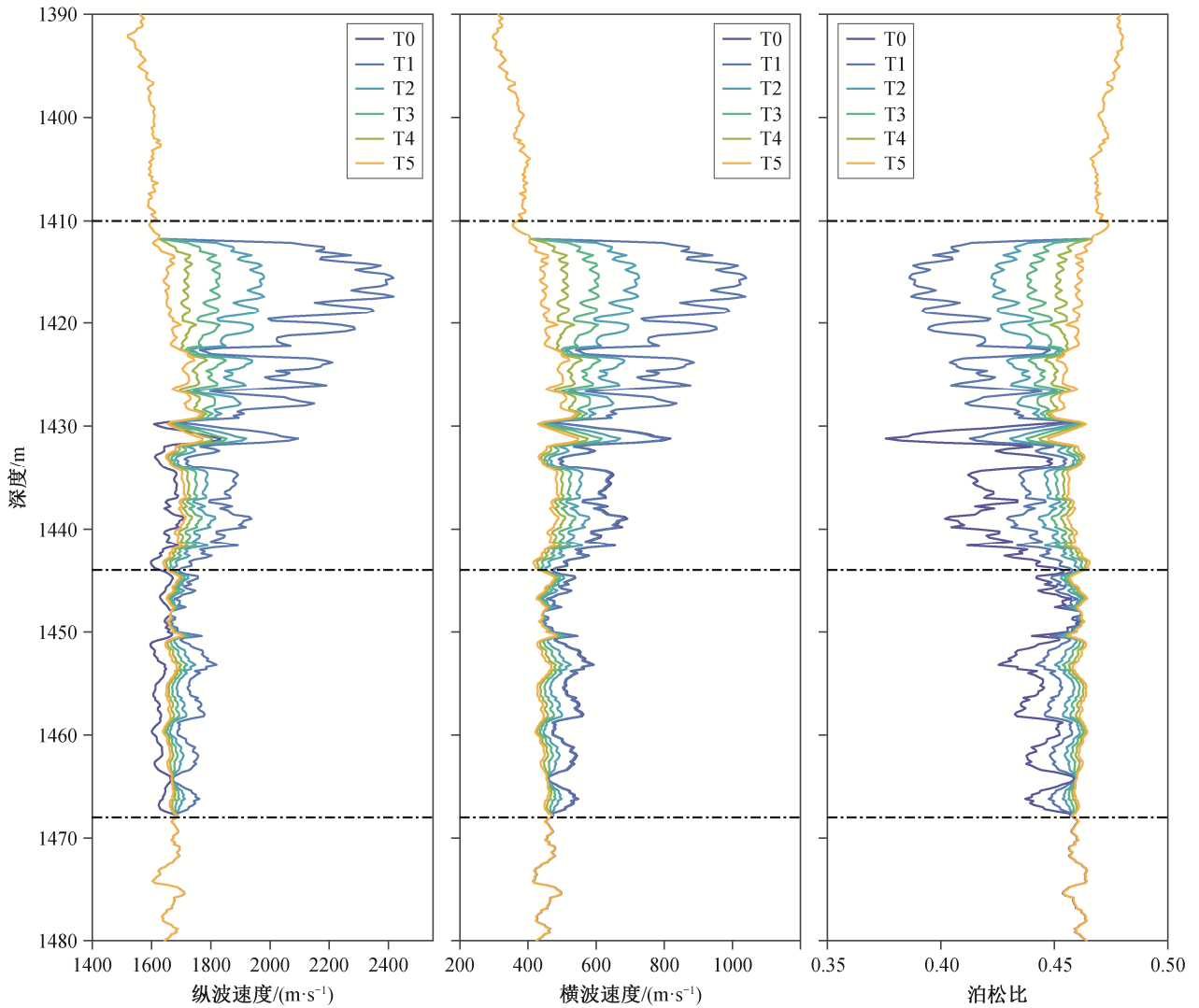


图1 天然气水合物开采过程中不同阶段的虚拟纵、横波测井速度记录  
 Fig. 1 Virtual well recordings of compressive and shear wave velocities at different exploitation stages of marine gas hydrate reservoir

过多的高频细节不能被低频的地震信号所反映,因此用于4C-OBC正演模拟的地层模型通常需要根据曲线变化特征,在深度轴上进行一定程度的归并和简化。根据对图1中曲线的观察,可将原始模型简化为5层,从上至下依次为海水、非储层、天然气水合物储层、含游离气层和非储层(图2(a))。

简化地层模型的横向范围无限制。水平井位于天然气水合物储层内部,长度设为400 m。因压力影响范围和流体流动性等因素的限制,一口水平井的开采范围是有限的。假设水平井的最远影响距离为50 m,由于天然气水合物储层和含气层的厚度很薄(共约60 m),垂直方向上能够完全开采其横向覆盖范围内的天然气水合物和游离甲烷气,再在两端

分别外延50 m,因此开采区域的整体宽度为500 m。在该地层模型中,各层的岩石物理参数可通过对原始模型各层内求平均值获得。为了进行定量计算,假设该地层模型满足理想条件:在天然气水合物开采过程中,仅开采区域内地层性质发生变化,两侧以及上下地层均不受影响。据此计算得出的模型中主要地层的波速结构如图2(b)所示,天然气水合物储层和含游离甲烷气层的岩石物理参数如见表1。

需要注意的是,在水平井两端向外延伸的50 m开采范围内,由于水平井未直接与地层接触,逐渐减小的压力和流动能力会导致该部分的天然气水合物无法完全开采。本文假设在该范围内天然气水合物的开采程度随延伸距离的增大而线性地降低,当

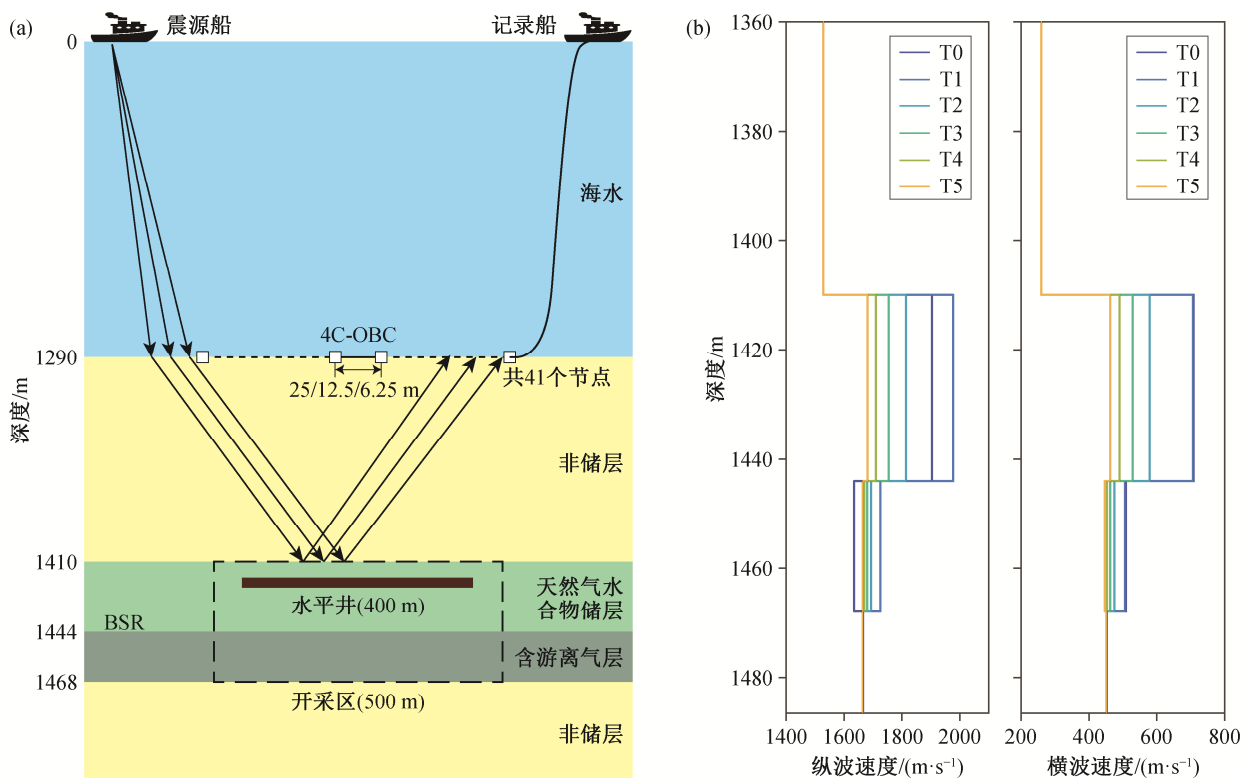


图 2 简化的地层模型(a)以及主要地层的波速在不同开采阶段的变化(b)

Fig. 2 Simplified strata model (a) and corresponding velocity variation at different exploitation stages (b)

表 1 天然气水合物储层与含游离甲烷气层在开采过程中各阶段的岩石物理参数

Table 1 Petrophysical parameters for gas hydrate reservoir and free gas layer at different exploitation stages

地层	阶段	甲烷饱和度/%	天然气水合物饱和度/%	纵波速度/(m·s <sup>-1</sup> )	横波速度/(m·s <sup>-1</sup> )	泊松比
天然气水合物储层	T0	3.03	27.93	1904	709	0.4195
	T1	0	27.93	1977	706	0.4268
	T2	0	13.96	1814	579	0.4430
	T3	0	8.38	1754	529	0.4498
	T4	0	4.19	1710	490	0.4552
	T5	0	1.40	1682	463	0.4590
含游离甲烷气层	T0	3.09	7.21	1635	509	0.4458
	T1	0	7.21	1725	506	0.4529
	T2	0	3.60	1693	475	0.4572
	T3	0	2.16	1680	463	0.4590
	T4	0	1.08	1671	453	0.4603
	T5	0	0.36	1664	446	0.4612

延伸到开采范围之外时降为零。这样处理的好处是，可以让模型的岩石物理性质在横向上保持连续，没有突变，防止参数跳变导致的计算错误。

我们设计的 4C-OBC 时移地震系统如图 2(a)所示，用于接收地震信号的 4C-OBC 海底震缆由专用的放线艇在定位仪的引导下沉放到海底，其检波器

节点等距地分布，形成阵列。海底震缆的一端连接到固定的记录船上，震源船则在四周沿着预设的测线放炮，激发地震波。地震波穿透海水，在海底之下的地层界面发生反射，海底震缆上的四分量检波器同时接收纵波和横波信号，并通过缆线实时传输到记录船。在实践中，根据需要，通常将 4C-OBC

的检波器节点间距设定为 25 m, 12.5 m 或 6.25 m。由于成本的约束, 4C-OBC 的节点数是有限的。本文模型中将 4C-OBC 节点数目限定为 41 个。一般情况下, 4C-OBC 的节点间距越小, 成像质量越好, 但成像范围越窄。本研究的目标之一就是通过对照明分析来权衡这两个因素, 为 4C-OBC 的铺设制定合理的参数, 在保证开采区域内数据质量的前提下降低系统的成本。

本文采用 RAYINVR 程序<sup>[14]</sup>对上述简化的地层模型进行 4C-OBC 地震正演模拟, 获得各层的反射地震成像, 并利用不同开采阶段走时和振幅等的差异, 开展时移地震监测的可行性和效果评估。

## 2 照明分析

在地质模型的基础上, 可以利用地震照明分析技术, 研究地震波在传播过程中受地下介质结构影响的能量分布特征, 用于指导观测系统的设计和调节振幅补偿强度, 提高野外工作效率和地震成像质量<sup>[15]</sup>。地震波照明分析方法主要分为射线追踪<sup>[16]</sup>和波动方程<sup>[17]</sup>两类, 在原理上分别与光的粒子学说和波动学说相对应。因具有简单、快速和准确的优点, 基于射线追踪的方法最先获得广泛的应用, 但这种方法有一个明显的缺点, 就是无法处理复杂的地层模型。基于波动方程的方法可以模拟整个波场, 因此对地层模型的复杂程度不敏感, 主要缺点是计算量较大。考虑到地层模型的结构比较简单, 本文采用射线追踪方法进行照明分析。

对于本文模型, 天然气水合物的开采仅影响储层和含气层, 因此在照明分析中只需考虑与此相关的 3 个反射事件(表 2)。照明分析的目标是获取反射点的分布情况(反映照明范围)以及单位面元上的射线覆盖频次(反映照明强度), 这两个指标决定成像的质量。理想的观测系统的照明应尽可能均匀, 且保证照明范围和照明强度均足够大。

表 2 照明分析中主要关注的地震事件及编号  
Table 2 Main seismic events for illumination analysis

编号	事件
2.2	第 2 层反射事件(天然气水合物储层顶部的反射)
3.2	第 3 层反射事件(天然气水合物储层底部(BSR)的反射)
4.2	第 4 层反射事件(含游离甲烷气层底部的反射)

说明: 事件编号遵循 RAYINVR 软件<sup>[14]</sup>的定义: 第一个数字代表地震事件在模型第几层(从上至下)发生, 第二个数字代表该地震事件的类型(2 代表反射事件)。

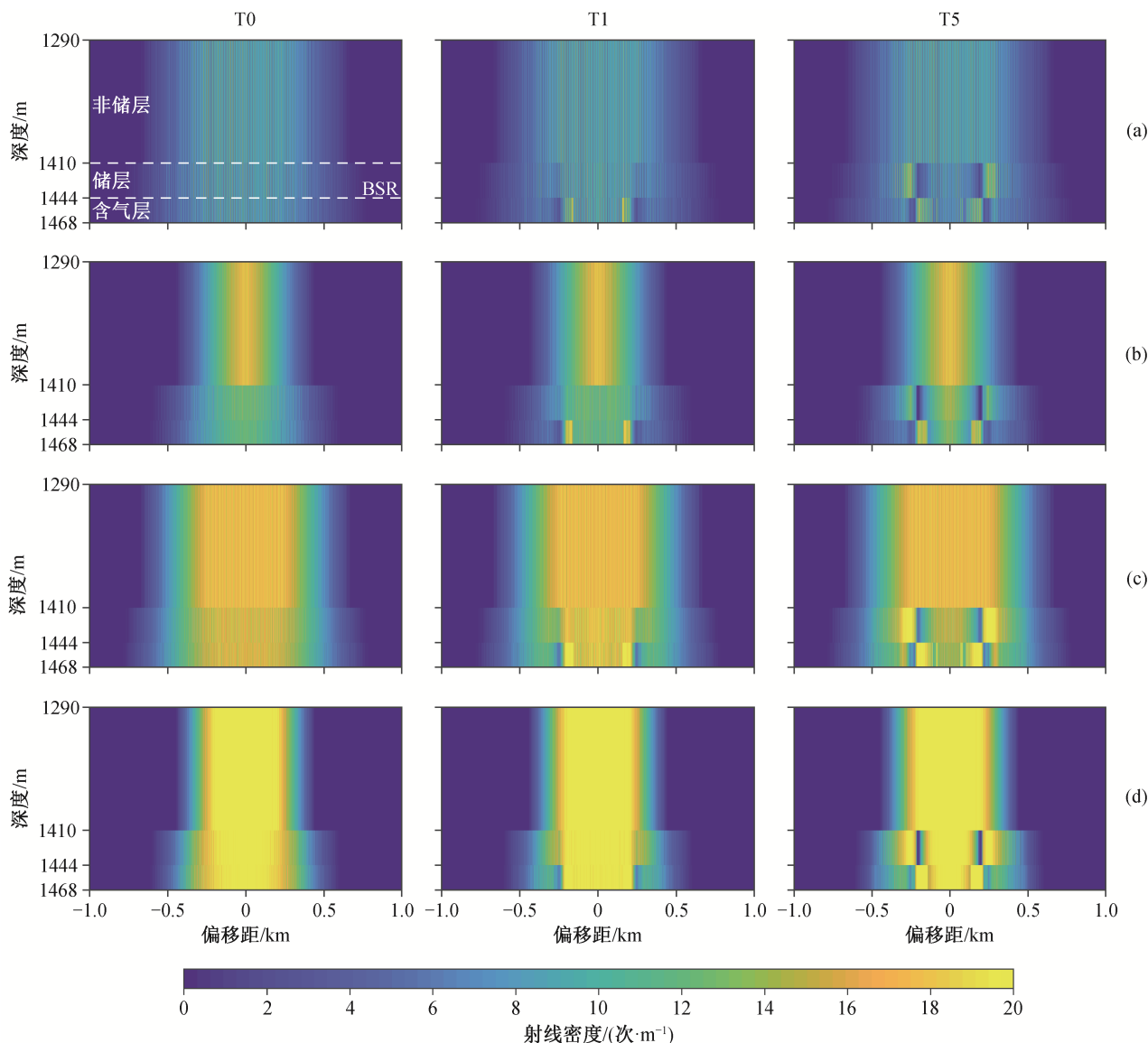
决定射线覆盖情况的 3 个主要因素是 4C-OBC 节点间距、炮点距和测线长度。由于测线长度对铺设 4C-OBC 的指导意义不大, 因此在计算过程中保持 5 km 不变。4C-OBC 节点间距或炮点距越大, 射线覆盖范围越广, 但射线密度越小。在实践中, 4C-OBC 节点间距与炮点距通常采用 25 m, 12.5 m 或 6.25 m 三档, 并可进行不同档位的搭配组合。关于照明强度的最低标准, 可以参考一般拖缆地震方法中采集共深度道集数据时的要求。通常认为, 一个道集内的射线覆盖次数要达到 10 次以上, 才能保证叠加后的降噪效果显著, 从而获得良好的成像。本文定义射线密度为单位长度(1 m)内的射线覆盖频次, 并认为射线密度大于 10 次/m 时成像良好。

图 3 显示纵波的照明分析结果。考虑到 T0~T1 阶段地层中的游离甲烷气被抽空, T1~T5 阶段天然气水合物被逐渐采尽, 仅展示 T0, T1 和 T5 这 3 个关键时间节点的纵波照明分析结果。

图 3(a)为油气勘探行业常规配置下的照明分析结果, 对应的 4C-OBC 节点间距和炮点距均为 25 m。此时, 41 个节点的 4C-OBC 展布范围为 1000 m, 在整条测线上, 气枪震源共激发 200 次。从图 3(a)中可以提取 3 个方面的重要信息。1) 照明均匀程度: 在 T0 时刻, 天然气水合物尚未开采, 3 个地层的照明都比较均匀; 而在 T1 和 T5 时刻, 由于储层与含气层不同程度的开采, 导致在水平井开采区(偏移距=-0.25~0.25 km)的边缘产生一定程度的加强效应和影区效应。2) 照明范围: 3 个地层的照明范围比较一致, 偏移距大体上在 -0.5~0.5 km 之间。3) 照明强度: 整体照明强度较弱, 即使在照明相对集中的中央区域(偏移距=-0.3~0.3 km), 射线密度也仅达到 9 次/m 左右, 达不到成像标准。

在图 3(a)的基础上, 图 3(b)中将 4C-OBC 节点间距减小一半, 照明强度明显提升, 开采区域内射线密度接近 10 次/m, 但照明强度的增强主要在于非储层, 对目标地层(储层和含气层)的贡献不明显。同时, 由于 4C-OBC 的展布范围缩小一半至 500 m, 模型的有效照明范围也相应地减小(偏移距=-0.4~0.4 km)。综上所述, 缩小 4C-OBC 节点间距对照明效果有一定程度的提升, 但仍然不够理想。

在图 3(a)的基础上, 图 3(c)中将炮点距缩小一半, 照明范围和照明强度均明显提升。照明范围扩大到偏移距=-0.6~0.6 km, 且在模型中央的主要区域(偏移距=-0.3~0.3 km), 射线密度的平均水平可达



(a) 4C-OBC 节点间距=25 m, 炮点距=25 m; (b) 4C-OBC 节点间距=12.5 m, 炮点距=25 m; (c) 4C-OBC 节点间距=25 m, 炮点距=12.5 m; (d) 4C-OBC 节点间距=12.5 m, 炮点距=12.5 m。图 4 同

图 3 纵波照明分析结果

Fig. 3 Results of illumination analysis for P-wave

15 次/m。虽然 T1 和 T5 时刻的影区效应仍然存在, 但影区内的射线密度也接近 10 次/m。总体而言, 这种方案的照明效果已经能够满足成像要求。

在图 3(a)的基础上, 图 3(d)中将 4C-OBC 的节点间距和炮点距都减小一半, 照明强度得到很好的加强, 在模型中央的主要区域(偏移距=-0.25~0.25 km), 射线密度超过 20 次/m。照明范围虽明显减小(偏移距=-0.29~0.29 km), 但仍然能够覆盖水平井 0.5 km 的开采区域。

图 4 显示横波的照明分析结果。与图 3(a)~(d) 进行对应的比较, 可见横波照明范围与纵波无明显

差异, 但照明强度普遍较弱, 图 4(a)~(c)中 3 种情况对应的照明强度明显不符合成像标准。此外, 图 4 显示横波的照明强度具有或强或弱的亮暗相间现象, 亮暗交替的周期数恰好等于 4C-OBC 节点的个数, 且 4C-OBC 节点间距越大就越明显, 反映 4C-OBC 节点间距过大会导致各节点照明空间的相互隔离。图 4(d)显示, 4C-OBC 节点间距和炮点距均为 12.5 m 时, 横波照明效果最好, 照明范围(偏移距=-0.26~0.26 km)足够覆盖水平井开采区域, 且照明强度和均匀性比图 4(a)~(c)有明显的改善, 射线密度在 20 次/m 左右, 远高于成像标准。

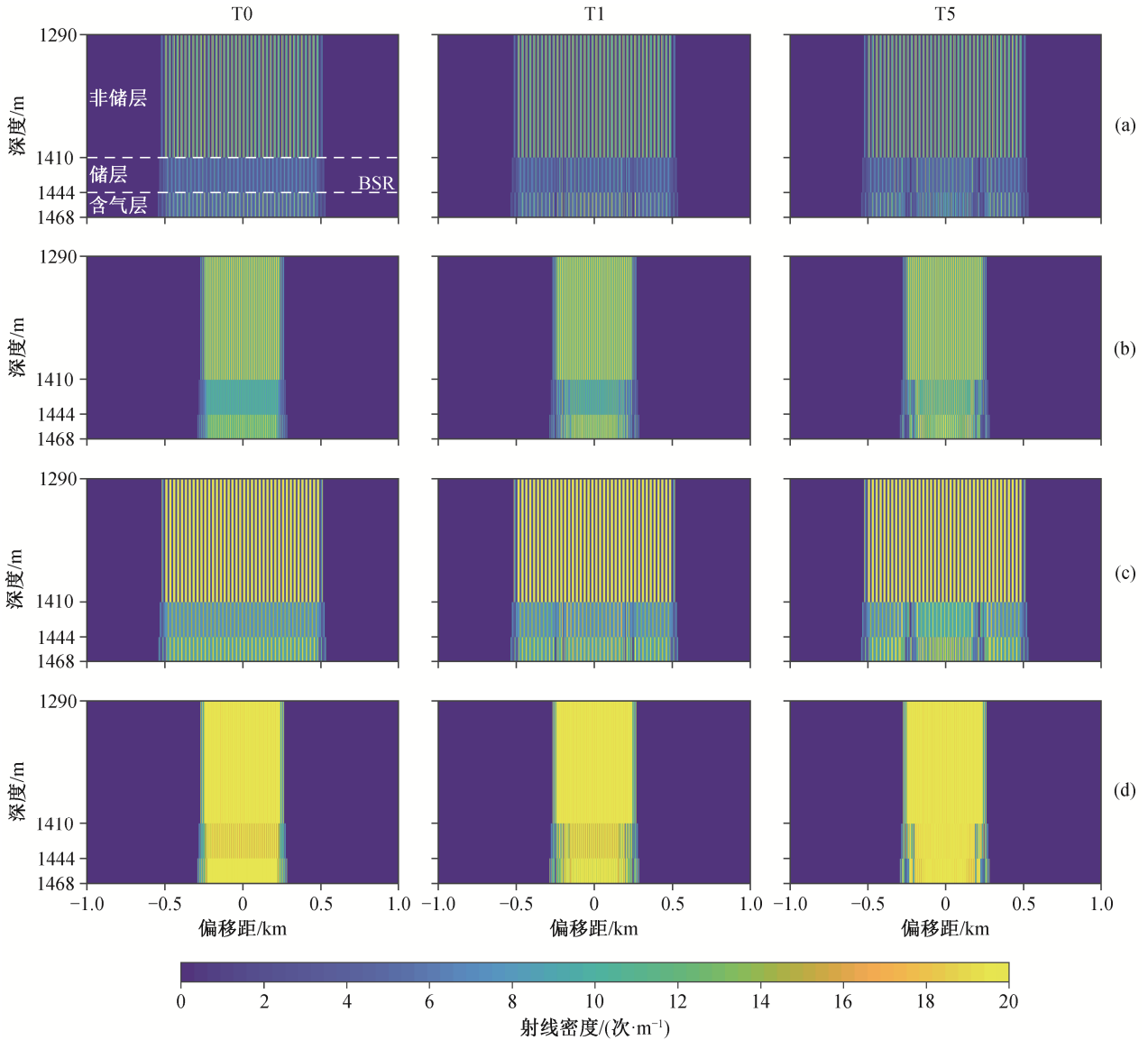


图 4 横波照明分析结果

Fig. 4 Results of illuminating analysis for S-wave

综上所述,纵波在4C-OBC节点间距与炮点距分别为25和12.5 m时即可满足成像标准,如果间距进一步减小,可以得到更好的成像质量,但横波要求两个间距均不超过12.5 m。模型要求采用纵横波联合监测,因此需要将4C-OBC节点间距和炮点距均设为12.5 m。

此外,在照明强度满足要求的情况下,照明范围是容易调控的。在实际监测中,如果需要进一步增大照明范围,只需增加4C-OBC的节点数目即可。下面的走时分析和振幅分析中,需要包括水平井开采范围和周围地层,以便合理地容纳射线,因此假设纵波和横波的有效照明范围均为偏移距

$=-0.5\sim 0.5$  km。

### 3 走时分析

本文用100 ms的雷克(Richter)子波来合成地震图。如果两个地震事件的间隔达到100 ms,它们的地震图就不会发生叠加,从而能够清晰地分辨两个独立的事件。在对时移地震的走时进行分析时,观测的目标是同一个地震事件在相邻两个时间节点之间的差异走时,并不要求前后两个事件在时域上完全分离,只需保证走时之差大于观测误差,因此分辨率更高,可识别2 ms以上的差异。

与传统的水面拖缆地震勘探不同,4C-OBC系

统的走时分析不仅要考虑纵波事件,还要重点考虑横波事件。与纵波相比,转换横波在纵向分辨率方面具有先天优势,原因是转换横波与纵波频率相同,波速只有纵波的 30%~40% (表 1),故相应的波长小很多,能够分辨更薄的地层,差异走时也更明显。

从事件 3.2 和 4.2 的纵波走时分析结果(偏移距均在有效照明范围内)可以得出以下结论。

1) 从图 5(a1), (a2), (b1)和(b2)可以看出,两个事件的走时变化规律一致。T0~T1 阶段,由于游离甲烷气被开采,地层纵波速度增大,导致走时减小;T1~T5 阶段,由于天然气水合物被开采,地层纵波速度减小,导致走时逐渐增大。

2) 图 5(c1)和(c2)进一步显示,虽然开采期间两个事件的走时均有一定程度的变化,但变化幅度很小(约 1~4 ms),最高累计差异走时(T5-T1)仅 6 ms。这样的差异走时从理论上是能够分辨的,但在实际地震图中,由于噪音和误差等因素的干扰,这样的差异走时程度并不理想。

3) 从图 5(c1)和(c2)看出,随着开采的进行,差异走时逐渐减小,表明越到后期,相邻阶段之间地震图的差异越小,原因是模型设定天然气水合物的剩余量随时间呈指数递减,越到后期开采越慢。

4) 对比不同偏移距的曲线可知,绝对走时与偏移距正相关(图 5(b1)和(b2)),然而差异走时基本上与偏移距无关(图 5(c1)和(c2))。事件 4.2 在 T5 时刻消失,是因为 T5 时刻含气层的天然气水合物被开采殆尽,与下方地层的波速差异消失。

图 6 显示事件 3.2 和 4.2 的横波走时分析结果,可以得出与纵波相同的结论,但需要特别注意以下两点: 1) T0~T1 阶段,横波事件的走时没有明显的增大或减小,而是基本上保持不变,原因是游离甲烷气被开采并不影响横波速度; 2) 图 5(c1)和(c2)显示,横波事件的差异走时(5~15 ms)明显比纵波更高,这种规模的差异走时即使在复杂的真实地震图中也非常容易分辨。

综上所述,横波的走时分析效果明显优于纵波,表明横波在时移地震监测中具有不可忽视的重要性(尤其是考虑到天然气水合物储层的纵波响应会受到与开发过程紧密伴随的游离气的严重影响)。

## 4 振幅分析

本文的射线追踪和正演计算采用 RAYINVR 程

序<sup>[14]</sup>。当追踪一条地震射线时, RAYINVR 采用如下方式计算接收点处的振幅<sup>[18]</sup>:

$$A=A_0q(-1)^\varepsilon/L,$$

其中,  $A$  为复振幅,  $A_0$  为射线的初始振幅;  $q$  描述射线在地层界面处的能量分配效应,由界面两侧的波阻抗以及界面上的 Zoeppritz 振幅系数决定;  $L$  表示射线传播过程中的几何扩散效应,与射线的展布范围和传播距离等有关;  $\varepsilon$  为射线传播过程中位移方向掉转的次数。RAYINVR 将  $A_0$  值设为 1,因此求得的振幅  $A$  为相对振幅。

在时移地震中,振幅分析的主要目标是研究同一个地震事件的振幅随时间的变化。在天然气水合物开采过程中,储层和含气层的纵、横波速度发生变化,进而引起 Zoeppritz 振幅系数的改变,最终导致接收点处振幅的相应变化。

事件 3.2 和 4.2 的纵波振幅分析结果见图 7。其中,相对差异振幅为两相邻时间节点之间的振幅之差与前一振幅的比值,能够反映后一时刻相对于前一时刻振幅的变化比例。从图 7 得出如下结论。

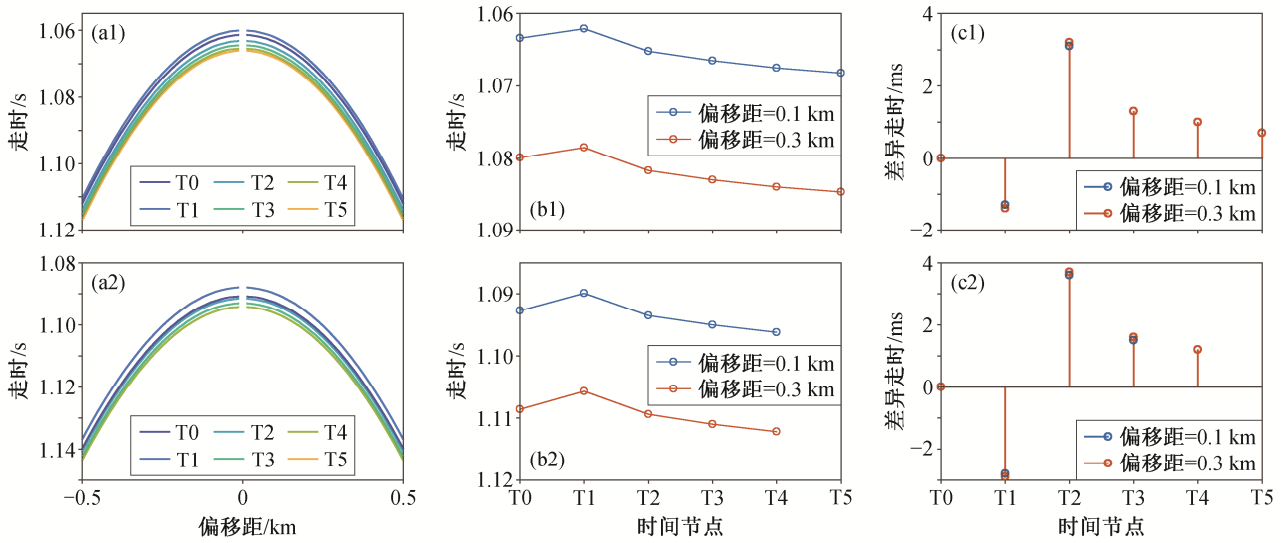
1) 从图 7(a1)和(a2)看出,在有效照明范围内,同一阶段的振幅随偏移距的增大而减小,符合界面反射系数的振幅-偏移距效应。

2) 从图 7(b1), (b2), (c1)和(c2)可知,在同一偏移距下,事件的振幅随时间节点的变化非常明显。在天然气水合物开采阶段(T1~T5)的相邻时间节点之间,事件 3.2 的振幅每次衰减 35%~50%,事件 4.2 的振幅每次衰减 50%左右。

3) 图 7(c1)和(c2)中,不同偏移距下的相对差异振幅差别极小,可见差异振幅随时间的变化规律基本上与偏移距无关。

图 8 显示横波的振幅分析结果。与纵波相比,横波事件的绝对振幅偏小。主要原因是模型中地层主要由松散沉积物构成,剪切模量较小,横波在其中传播时能量损耗非常大。尽管如此,根据 Dash 等<sup>[19]</sup>对 Cascadia 地区的研究,采用容量大于 90 in<sup>3</sup>的震源空气枪就能确保海底地震仪接收到明显的转换横波信号。关于振幅随时间的变化规律,横波与纵波基本上一致。最重要的是,横波的相对差异振幅也非常明显,甚至略大于纵波。

综上所述,在模拟时移地震中,纵波和横波的相对差异振幅都非常明显,可以很好地反映天然气水合物的开采程度。在实际监测中,可以将振幅分



(a1)和(a2)为不同开采阶段的绝对走时; (b1)和(b2)为给定偏移距时的绝对走时; (c1)和(c2)为对应(b1)和(b2)的差异走时; (a1)~(c1)为事件 3.2 (储层底部反射); (a2)~(c2)为事件 4.2 (含气层底部反射); 偏移距 0.1 km 和 0.3 km 分别代表开采区域的内部和外部。图 6 同

图 5 纵波事件的走时分析结果

Fig. 5 Results of travel time analysis for P-wave events

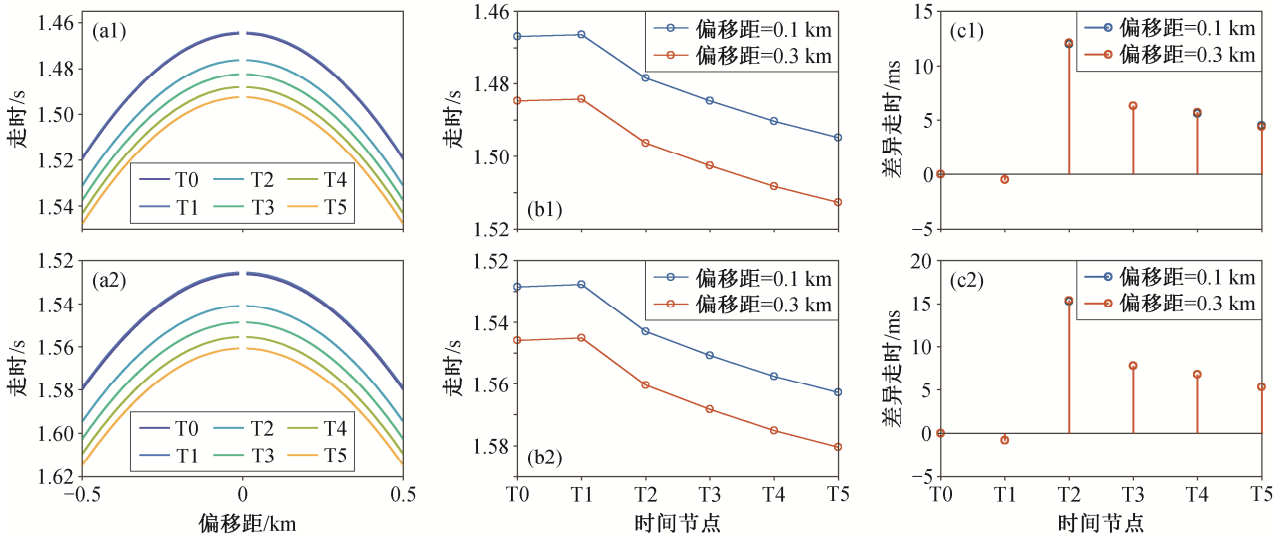


图 6 横波事件的走时分析结果

Fig. 6 Results of travel time analysis for S-wave events

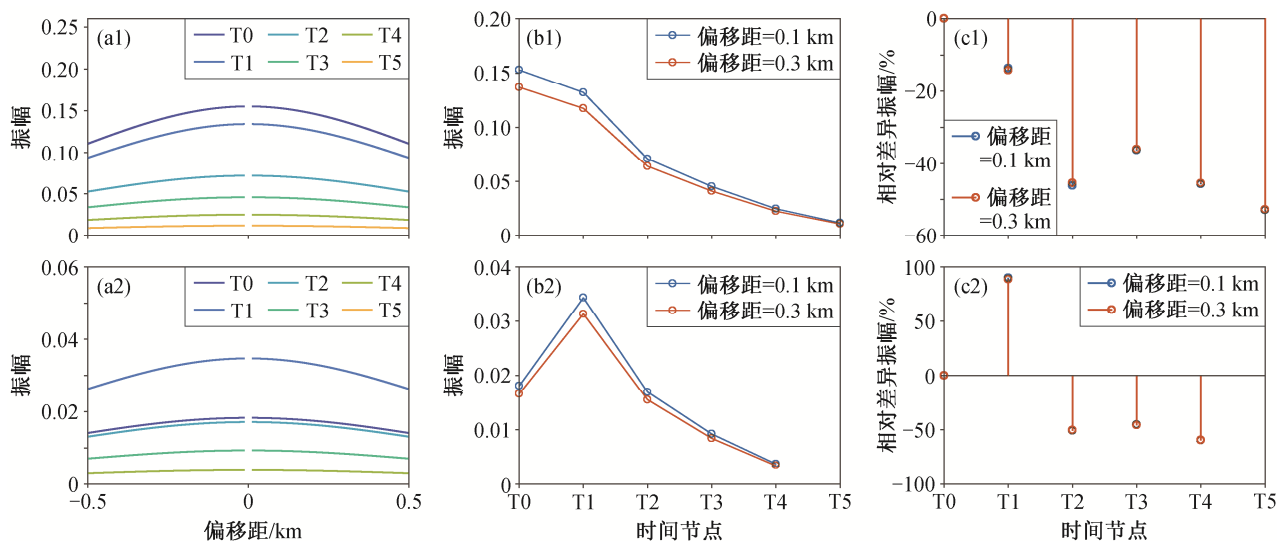
析与走时分析相结合, 以便得出更可靠的结论。

### 5 观测系统的误差分析

时移地震数据采集的质量控制主要在于尽量保持多次数据采集(基准采集和重复采集)条件的一致性、稳定性和可重复性, 尤其是保持炮点到检波器的方位角不变<sup>[20]</sup>。在本文模型中, 由于接收地震信号的 4C-OBC 震缆位置固定不变, 因此震源船的定位误差就成为最大的误差来源。对震源船的定位误差进行分析, 有助于评估上述基于模型的相关结论

(包括走时分析和振幅分析等)的有效性。

高精度地球物理勘探一般要求水平定位误差在  $\pm 3$  m 以内, 目前最先进的动力定位系统能够保证在较平静的海况下, 船体的水平波动范围约为  $\pm 1.5$  m<sup>[21-22]</sup>。为了使误差分析结果更具普适性, 假设震源船的定位误差可以大于 3 m, 但最大值不超过炮点距的一半(本文模型中为 6.25 m)。误差分析的具体方法为, 在炮点偏移距的理论值之上增加一个高斯随机噪声(满足  $2\sigma = \text{误差值}$ , 其中  $\sigma$  为正态分布标准差), 然后观察该噪声对走时分析和振幅分析结



(a1)和(a2)为不同开采阶段振幅随偏移距的变化; (b1)和(b2)为给定偏移距时振幅随时间节点的变化; (c1)和(c2)为对应(b1)和(b2)的差异振幅; (a1)~(c1)为事件 3.2 (储层底部反射); (a2)~(c2)为事件 4.2 (含气层底部反射); 偏移距 0.1 km 和 0.3 km 分别代表开采区域的内部和外部。图 8 同

图 7 纵波事件的振幅分析结果

Fig. 7 Results of amplitude analysis for P-wave events

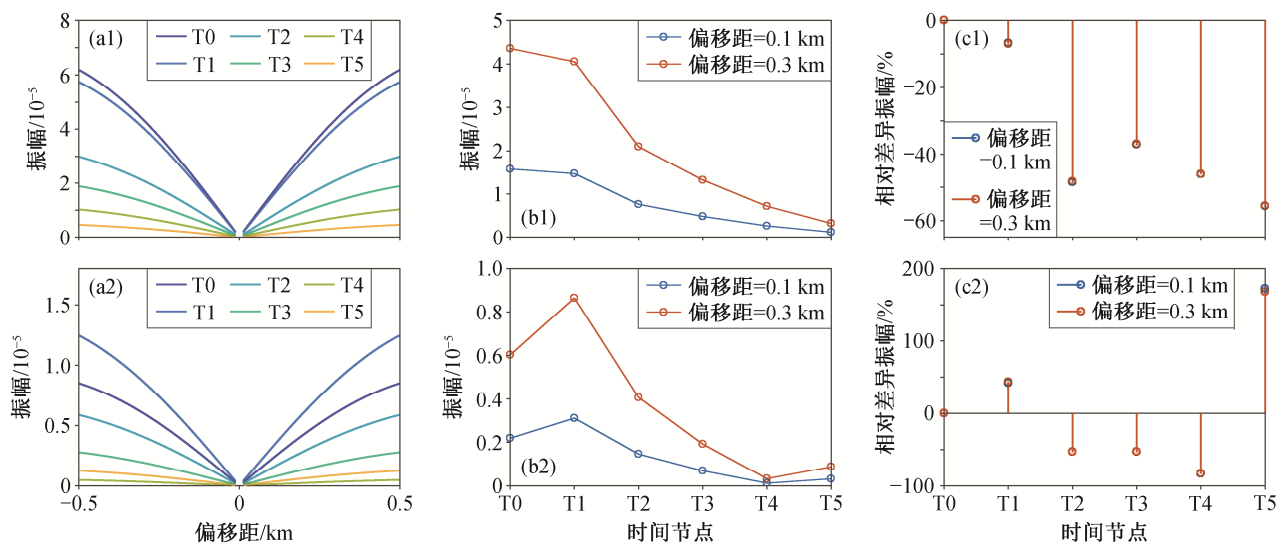


图 8 横波事件的振幅分析结果

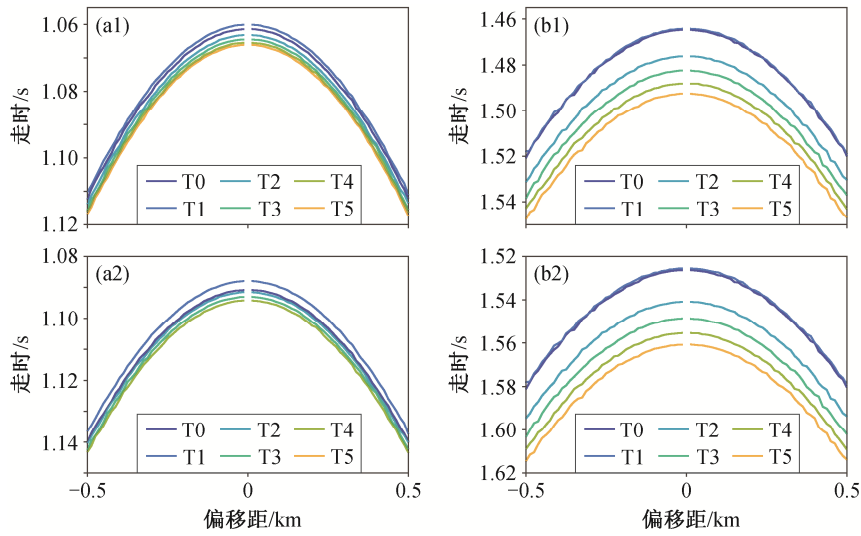
Fig. 8 Results of amplitude analysis for S-wave events

果的影响。不同时刻的走时曲线(或振幅曲线)之间是否出现交叉,是评判是否对定位误差造成严重影响的标准。以走时曲线为例,一旦出现交叉,即表明在地震图上拾取事件的误差超过相邻时间节点之间的差异走时,此时走时分析的结论无效。

仍然以事件 3.2 和 4.2 为例,震源船定位误差对纵波和横波走时分析的影响如图 9 所示。从图 9(a1)和(a2)可见,纵波的走时曲线因受震源船定位误差的影响而产生大量的局部不平滑现象,但在水平井

开采区域(-0.25~0.25 km),各走时曲线之间基本上没有出现交叉。因此,虽然震源船定位误差会对纵波的走时分析造成较大的干扰,但前面的走时分析结论基本上不受影响。相比之下,横波因较大的差异走时而对震源船定位误差有更高的耐受度。图 9 (b1)和(b2)显示,定位误差仅对横波的走时曲线造成微小的扰动,完全不影响对差异走时的计算。

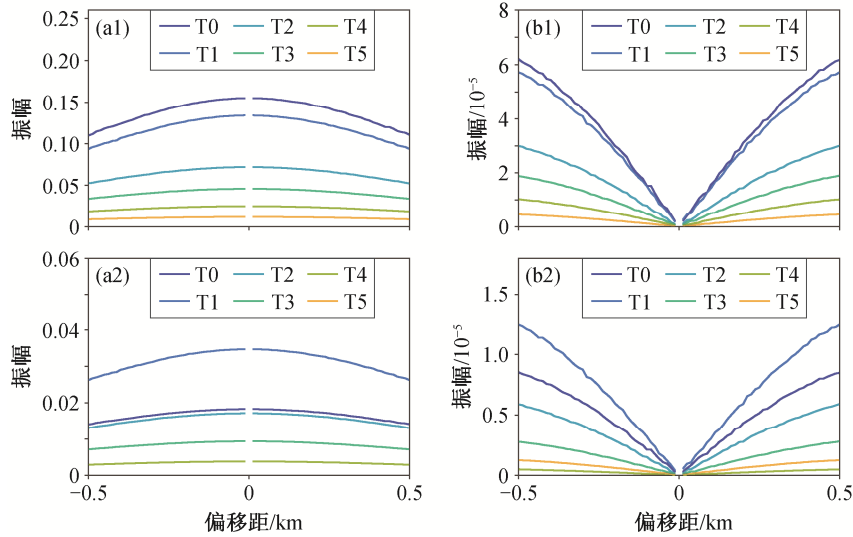
图 10 显示震源船定位误差对振幅分析结果的影响。可以看出,无论是纵波还是横波,其振幅曲



(a1)和(a2)为纵波事件, 对应  $2\sigma=3$  m; (b1)和(b2)为横波事件, 对应  $2\sigma=6.25$  m; (a1)和(b1)为事件 3.2 (储层底部反射); (a2)和(b2)为事件 4.2 (含气层底部反射)

图 9 震源船定位误差对纵波与横波走时分析的影响

Fig. 9 Effect of shot vessel's positioning error to travel time analysis for P-wave and S-wave



(a1)和(a2)为纵波事件, (b1)和(b2)为横波事件, 均对应  $2\sigma=6.25$  m。 (a1)和(b1)为事件 3.2 (储层底部反射); (a2)和(b2)为事件 4.2 (含气层底部反射)

图 10 震源船定位误差对纵波与横波振幅分析的影响

Fig. 10 Effect of shot vessel's positioning error to amplitude analysis for P-wave and S-wave

线在误差的影响下仅出现微小的波动。可见, 振幅曲线比走时曲线拥有更高的误差容忍程度, 基本上不会对前面的相关分析结论造成影响。

综上所述, 在水平井开采区域内, 不同开采阶段的走时曲线和振幅曲线均能在一定的误差范围内保持原有的趋势, 并且相互分离, 不出现交叉, 说明震源船定位误差对走时分析和振幅分析的结论没有明显的影响。

## 6 结论

本文对 4C-OBC 时移地震系统在天然气水合物储层动态监测中的有效性进行模型分析, 得到如下结论。

1) 为确保转换横波对天然气水合物储层和含游离气层均有良好的地震照明效果, 在铺设 4C-OBC 时应保证节点间距和炮点距都不超过 12.5 m。

2) 模拟时移地震走时分析结果表明, 纵波的差异走时(1~4 ms)能够从理论上反映天然气水合物的开采情况, 但在真实地震图中, 由于噪声的干扰, 可能难以识别。相比之下, 横波的差异走时(5~15 ms)非常明显, 容易分辨。这也表明对天然气水合物储层实施纵横波联合监测十分必要。

3) 振幅分析结果显示, 纵波和横波的相对差异振幅均能很好地反映天然气水合物的开采程度, 但由于转换横波在松散地层中衰减幅度较大, 在设计监测系统时需要保证气枪震源的容量不能太小。

4) 误差分析结果表明, 现代化的动力定位震源船的定位误差(3~6.25 m)不足以影响走时分析与振幅分析的结论。

综上所述, 采用4C-OBC时移地震系统对海域天然气水合物储层进行动态监测是有效的。

### 参考文献

- [1] Kvenvolden K A. Gas hydrates as a potential energy resource—a review of their methane content. USGS Professional Paper, 1993, 1570: 555–561
- [2] Collett T S. Energy resource potential of natural gas hydrates. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1971–1992
- [3] Milkov A V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there?. Earth-Science Reviews, 2004, 66(3): 183–197
- [4] Maslin M, Owen M, Day S, et al. Linking continental-slope failures and climate change: testing the clathrate gun hypothesis. Geology, 2004, 32(1): 53–56
- [5] Hesselbo S P, Gröcke D R, Jenkyns H C, et al. Massive dissociation of gas hydrate during a Jurassic oceanic anoxic event. Nature, 2000, 406: 392–395
- [6] Maslin M A, Thomas E. Balancing the deglacial global carbon budget: the hydrate factor. Quaternary Science Reviews, 2003, 22(15/16/17): 1729–1736
- [7] 郝召兵, 伍向阳, 秦静欣, 等. 时移地震监测天然气水合物开采可行性分析. 地球物理学报, 2010, 53(9): 2213–2221
- [8] Moridis G J, Reagan M T, Zhang K. The use of horizontal wells in gas production from hydrate accumulations // 6th International Conference on Gas Hydrates. Vancouver, 2008: Paper 5722
- [9] 冯景春, 李小森, 李刚, 等. 三维实验模拟垂直井和水平井降压开采水合物. 新能源进展, 2014(3): 216–220
- [10] 何涛, 卢海龙, 林进清, 等. 海域天然气水合物开发的地球物理监测. 地学前缘, 2017, 24(5): 368–382
- [11] Backus M M, Murray P E, Hardage B A, et al. High-resolution multicomponent seismic imaging of deep-water gas-hydrate systems. The Leading Edge, 2006, 25(5): 578–596
- [12] 杨胜雄, 梁金强, 陆敬安, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征及主控因素新认识. 地学前缘, 2017, 24(4): 1–14
- [13] 郭依群, 杨胜雄, 梁金强, 等. 南海北部神狐海域高饱和度天然气水合物分布特征. 地学前缘, 2017, 24(4): 24–31
- [14] Zelt C A, Smith R B. Seismic travelt ime inversion for 2-D crustal velocity structure. Geophysical Journal International, 1992, 108(1): 16–34
- [15] 何勇, 张建中. 海洋地震垂直缆观测系统的射线照明分析. CT理论与应用研究, 2015, 24(5): 689–700
- [16] Muerdter D, Ratcliff D. Understanding subsalt illumination through ray-trace modeling, part 1: simple 2-D salt models. The Leading Edge, 2001, 20(6): 578–594
- [17] Xie X, Jin S, Wu R. Wave-equation-based seismic illumination analysis. Geophysics, 2006, 71(5): S169–S177
- [18] Zelt C A, Ellis R M. Practical and efficient ray tracing in two-dimensional media for rapid travelt ime and amplitude forward modeling. Canadian Journal of Exploration Geophysics, 1988, 24(1): 16–31
- [19] Dash R, Spence G. P-wave and S-wave velocity structure of northern Cascadia margin gas hydrates. Geophysical Journal International, 2011, 187(3): 1363–1377
- [20] 赵改善. 油藏动态监测技术的发展现状与展望: 时延地震. 勘探地球物理进展, 2005, 28(3): 157–168
- [21] 国际船舶网. 七〇二所 DP3 动力定位系统完成第一阶段海试[EB/OL]. (2017) [2019–12–20]. [http://www.eworldship.com/html/2017/Manufacturer\\_0419/127108.html](http://www.eworldship.com/html/2017/Manufacturer_0419/127108.html)
- [22] 何进辉, 张海彬, 朱仁传, 等. 某深海钻井船 DP3 动力定位能力分析. 船舶, 2018, 29(5): 11–17