

尉佳, 冯京, 杨睿, 等. 海洋地震垂直缆在自由状态下的照明情况[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(5): 33-40.

WEI Jia, FENG Jing, YANG Rui, et al. Illumination analysis of the marine seismic vertical cable in free state[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(5): 33-40.

海洋地震垂直缆在自由状态下的照明情况

尉佳^{1,2}, 冯京^{1,2*}, 杨睿^{1,2}, 孙军^{1,2}, 王威^{1,2}

(1 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237;

2 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237)

摘要:海洋垂直缆地震数据采集具有高分辨率、高精度真三维成像等特点。作为未来海洋立体观测系统的重要组成部分,有必要全面分析海洋垂直缆观测系统中影响照明的因素,并优选出最佳设计方案。在垂直缆存在倾角的情况下,分析激发点密度、接收点密度、离底高度、倾角变化以及地层倾斜对目标层照明情况的影响,发现激发点密度与接收点密度直接影响目标层的总覆盖次数,海洋垂直缆的倾角会影响低覆盖带的位置,海底坡度以及目标层的倾角使得照明聚光范围产生移动,地下隆起的目标层覆盖范围更大,照明强度更优。设计观测系统时,不仅考虑上述影响因素,而且垂直缆布设的位置也应当根据地层倾角以及垂直缆倾角,避开低覆盖带而选择高覆盖区域。

关键词:海洋垂直缆;海洋立体观测系统;照明分析;正演模拟

中图分类号:P715.1

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2021.099

0 引言

与传统的海洋拖缆三维地震采集方式不同,垂直缆通过锚系方式置于海底,极大降低了海面障碍物、恶劣海况等外界因素的影响。不拖带长排列电缆的情况下,震源激发方式可以更加灵活,工作效率也可以大大提高(图 1)。海洋垂直缆地震勘探属于高分辨率、高精度的真实三维勘探技术,不仅具有易于分离多次波与有效反射信号的特点,且对于存在倾角的地质构造,可以实现全方位角的三维成像^[1-3]。自 2009 年起,日本 JGI 公司利用垂直缆地震勘探技术进行硫化物矿藏调查,并掌握了相关数据处理技术,与传统三维地震方法相比,海洋垂直缆勘探方法在地下复杂结构成像方面具有显著优势,更适用于热液矿床、盐丘等地区的调查^[4];

KRAIL^[5-6]通过垂直缆采集数据,分析其靶区覆盖次数均匀性,并实现了对盐丘类地区的更加清晰成像;WANG 等^[7-9]将垂直缆地震数据中上下行波的分离后发现,数据完全满足成像和各向异性反演的要求,并基于此提出了一套有针对性的垂直缆地震数据处理方法;Rodriguez-Suarez 通过建立简单的 2.5D 模型,基于三维射线追踪方法分析了垂直缆观测系统的覆盖次数以及成像效果,认为应用单只垂直缆采集,目标层的覆盖效果很好^[10];国内关于垂直缆的研发起步较晚;1998 年,黄必铭等^[11]将垂直缆采集方法的可行性进行了翻译与介绍;2016 年在已证实的南海天然气水合物矿区,黄建宇等^[12]利用海底观测站(OBS)的串接,首次获取了三道的海洋垂直缆地震数据,成功证明地了超短基线技术用于定位垂直缆地震技术在海洋地震勘探的实用性;2017 年,中国海洋大学刘怀山教授团队自主研发、制造的海洋地震垂直缆在南海神狐海域完成实验,实验结果证明了中国自主研发的垂直缆能够采集到高品质的地震数据,为以后中国天然气水合物的探测提供了强大的技术支持^[13]。

地震勘探的观测系统设计,是影响成像效果优劣的重要因素^[14-16]。海洋垂直缆地震采集观测系

收稿日期:2021-04-15

资助项目:中国地质调查项目(DD20191003)

作者简介:尉佳(1985—),男,博士,助理研究员,主要从事地球物理调查技术与方法方面的研究工作。E-mail: chinwjia@163.com

* 通讯作者:冯京(1983—),男,硕士,高级工程师,主要从事地球物理调查与研究方面的工作。E-mail: fengjing200272@163.com

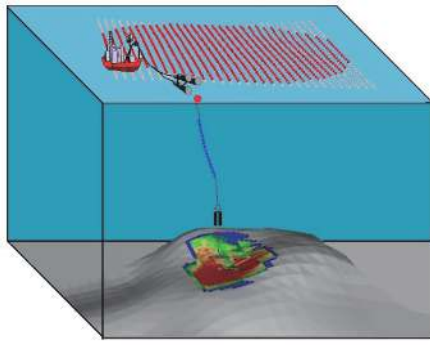
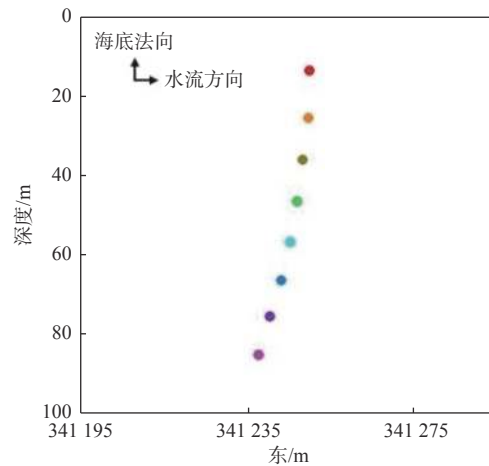


图1 海洋垂直缆示意图

Fig.1 Schematic diagram of marine vertical cable

统与常规海上三维观测系统有较大区别,何勇等^[14]采用基于不规则单元的双线性走时插值和快速波前扩展的射线追踪方法,分析并取得了垂直缆观测系统参数对目标层覆盖次数的影响规律。安振芳等^[17]通过正演模拟进行三维垂直缆观测系统的优化,分析了多层模型的波场特征以及平行或者小角度倾斜的目标层覆盖次数,认为在目标层下倾方向上增加激发线长度可以补偿照明损失,但通常假设垂直缆是垂直于海底的,不符合垂直缆的实际状态,垂直缆观测系统的设计,还需要考虑更多现实因素。无论是西北大西洋的边界底流^[18],还是中国浅海区域内高速底层海流^[19-20],海洋深层水动力环境对垂直缆姿态产生一定的影响。底端锚系在海底的垂直缆,受到底层海流的推力,与海底法向之间存在一个角度。ASAKAWA等^[4]应用多目标超短基线对海底法向上的垂直缆姿态进行测量后发现,垂直缆在水平方向上产生位移(图2),以大地坐标为基础计算出法向倾角约达到 11° 。邸泽鹏等^[21]则利用拟合曲面法尝试解决垂直缆初至波的二次定位问题。尉佳等^[13]利用海水平均声速对超短基线测得的垂直缆姿态的结果进行了二次修正,取得了良好的效果。针对不同属性的目标地层进行垂直缆地震勘探,观测系统应当结合地层属性以及区域地质条件设计观测系统参数^[22]。目标地层反射点的覆盖范围、覆盖次数以及方位角等3个方面是分析海洋观测系统优劣的重要参数^[23]。反射点覆盖范围反映系统对目标地层的照明范围,覆盖次数反映系统对目标地层的照明强度^[24],而方位角反映系统对目标地层照明能量的聚集方位^[25]。针对垂直缆布放的特殊性,本文不仅分析观测系统中炮间距、道间距、目标层特征等常规参数,而且结合垂直缆倾斜角度、检波点离底高度等参数对海洋垂直缆观测系统进行分析。

图2 海洋垂直缆各节点实际位置^[4]Fig.2 Actual position of marine vertical cable receivers^[4]

1 观测系统参数对比

本文以南海神狐天然气水合物测井数据为基础^[26],建立含天然气水合物的三维水平地层模型(图3),该模型海水深度为1 295 m,天然气水合物目标层深度为1 504 m,目标层上下各有一地层(表1)。水平层模型范围是边长100 000 m的正方形,单根海洋垂直缆位于中心(50 000, 50 000),垂直缆与海底法向呈 5° 夹角。激发点放炮高程为0 m,激发点范围东向48 000~50 000 m,北向为48 000~50 000 m。结合海上传统平行激发模式,分析激发点密度、接收点密度、垂直缆离底高度、垂直缆法向倾角以及倾斜地层等观测系统参数,对目标层覆盖范围、覆盖次数、以及方位角等因素的影响。

1.1 激发点密度

在一定的激发范围内,通过减小炮间距与炮线

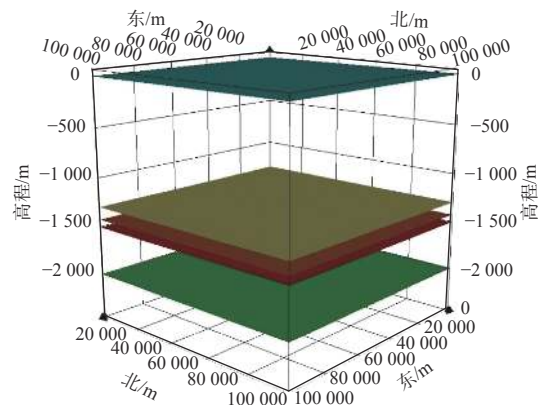


图3 三维地层介质模型

Fig.3 Three-dimension stratum medium model

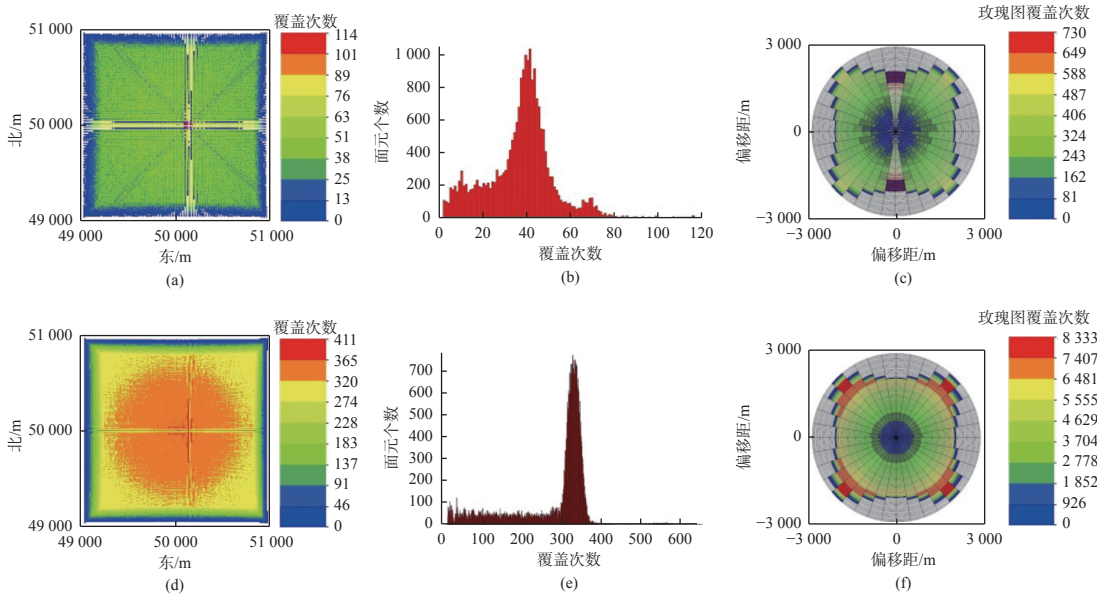
表 1 三维水平层速度模型

Table 1 Three-dimension horizontal layer velocity model

序号	高程/m	纵波速度/(m/s)	密度/(kg/m ³)
1	0	1 500	1 000
2	-1 295	1 700	1 600
3	-1 424	2 350	1 900
4	-1 504	1 700	2 000
5	-2 000	2 700	2 200

距, 增加激发范围内的激发点密度, 为突出对比效果, 同时增加炮线数与炮点数。对比方案 1 与方案

2(图 4), 模拟海洋垂直缆存在 5°法向倾角的情况下, 目标层的覆盖次数随着激发点密度的增大而增加(图 4a、4d)。当炮线数与炮点数均变为原来的 4 倍后, 主要覆盖面积内覆盖次数的提升超过原来的 8 倍(图 4b、4e)。当激发密度不足时, 在 0°与 180°方位角附近出现偏移距不均匀(图 4c); 当激发点密度增大后, 偏移距在全方位角度上分布均匀, 模拟结果恰恰说明海洋垂直缆能够实现全方位角照明(图 4f)。



(a)、(b)、(c) 分别为方案 1 的覆盖次数, 覆盖面元统计以及玫瑰图; (d)、(e)、(f) 分别为方案 2 的覆盖次数, 覆盖面元统计以及玫瑰图

图 4 激发点密度方案对比

Fig.4 Comparison of shot point density schemes

1.2 接收点密度

保持炮点数与炮线数不变, 增大道间距导致接收点密度降至初始值的一半, 对比方案 2 与方案 3(图 5), 目标层覆盖次数随着接收点密度降低而减少(图 5a、5d)。主要覆盖次数降至初始值的一半, 对应的覆盖面元数量有所增加(图 5b、5e)。偏移距在全方位角度上分布均匀, 但由于接收点密度的减少, 全方位角对应的偏移距个数减少, 这一变化说明, 海洋垂直缆的全方位角观测, 不受接收点密度的影响(图 5c、5f)。

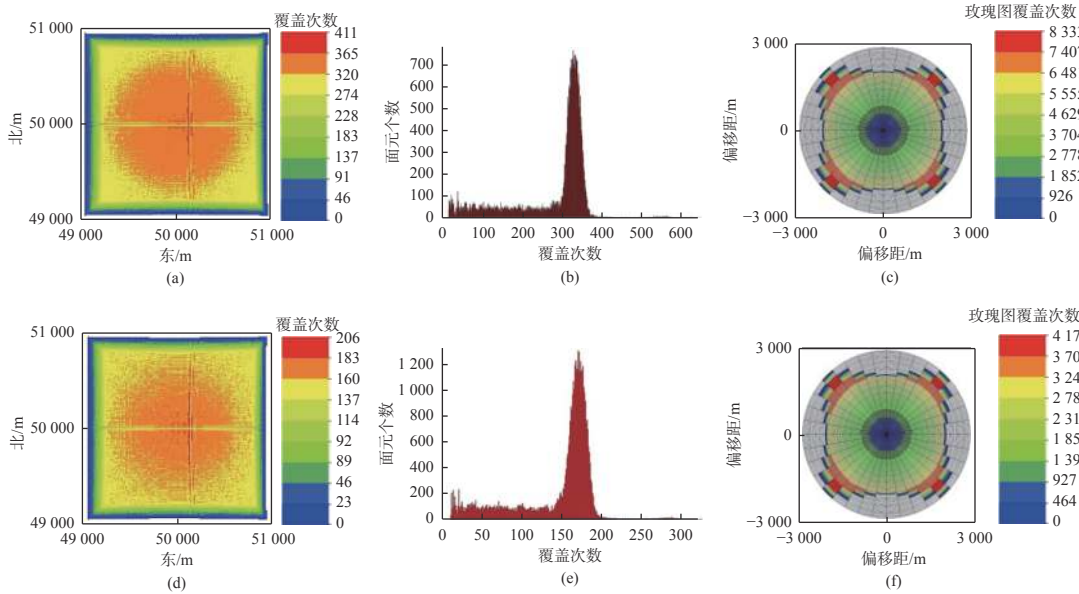
1.3 离底高度

现实条件下, 海水深度一般可视为常数。我们保持垂直缆观测系统参数不变, 垂直缆检波点离底高度会对反射空白区域范围影响。当调整缆的离

底距离, 即提高垂直缆近海面反射点的照明高度, 随着离底距离的增大, 垂直缆照明中心的覆盖次数降低(图 6a、6d), 主覆盖次数由原先的 350 次降低为 270 次左右, 但对应面元数则由 750 增加到 1 800 多, 即总体覆盖次数增大。从玫瑰图中可以看到, 垂直缆附近的极小偏移距范围随着离底高度的增加而增大, 即反射空白带增大, 而大偏移距对应的方位角覆盖略微有所变化。这说明离底高度影响垂直缆周围空白带范围大小, 造成近垂直缆的“聚光”程度减弱, 部分光束分散到中大偏移范围内。相比之下, 离底高度越小, “聚光”能力越高。

1.4 倾角变化

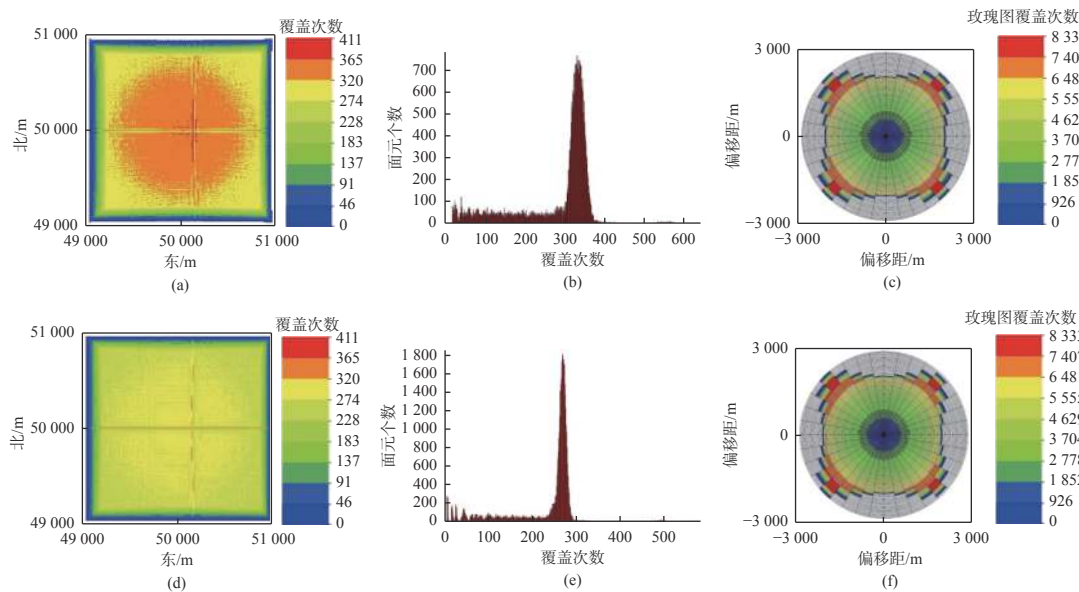
保持其他参数不变, 仅将垂直缆的法向倾角由初始值 5°E 调整为 10°N, 模拟结果显示, 覆盖范围以及覆盖次数变化不大, 偏移距与方位角的均匀性



(a)、(b)、(c) 分别为方案 2 的覆盖次数, 覆盖面元统计以及玫瑰图; (d)、(e)、(f) 分别为方案 3 的覆盖次数, 覆盖面元统计以及玫瑰图

图 5 接收点密度方案对比

Fig.5 Comparison of receiver point density schemes



(a)、(b)、(c) 分别为方案 2 的覆盖次数, 覆盖面元统计以及玫瑰图; (d)、(e)、(f) 分别为方案 4 的覆盖次数, 覆盖面元统计以及玫瑰图

图 6 离底高度方案对比

Fig.6 Comparison of height from the bottom schemes

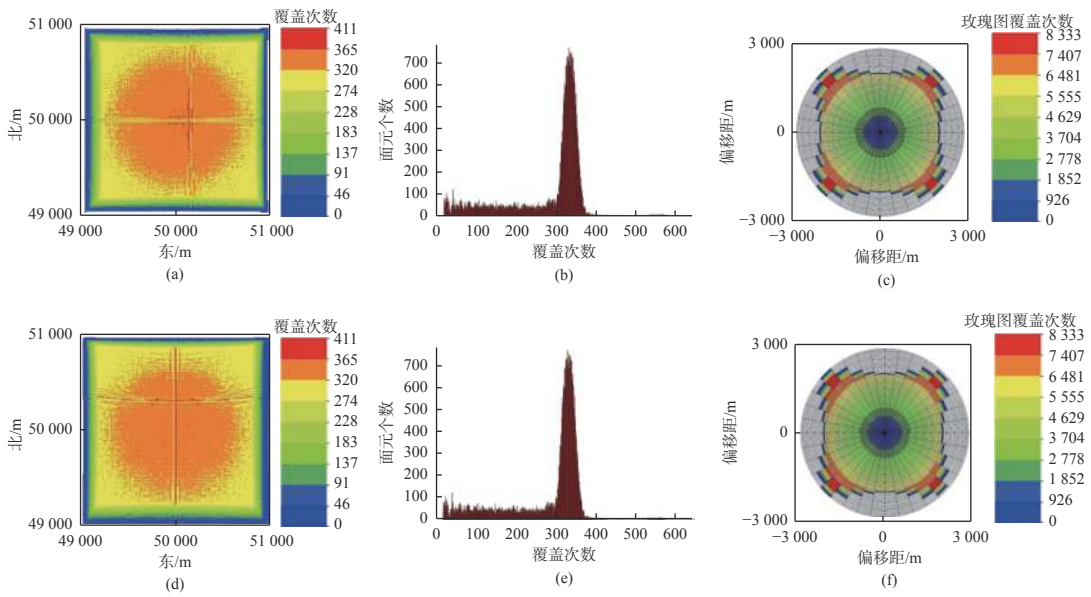
都没有改变。倾角大小与方向的变化使得覆盖范围对称中心向倾角一侧移动, 造成垂直缆的覆盖范围不对称(图 7)。

综上, 假设区内布设单条海洋垂直缆的条件下, 其照明情况为: ①激发点密度与接收点密度的变化, 影响覆盖次数、覆盖范围以及偏移距与方位角的均匀性, 具体可总结为——当激发点密度与接收点密度增大时, 覆盖次数增加且覆盖范围增大; 当激发点密度增加到一定程度时, 偏移距与方位角均匀性

到达全方位覆盖; ②垂直缆离底高度影响其照明“聚光”程度, 离底高度越小, “聚光”程度约集中; ③在垂直缆存在某个方向的倾角时, 照明覆盖范围的中心沿着倾角方向移动。

2 地层因素差异

前述分析了水平目标层的单条垂直缆照明情况, 当垂直缆无倾角时, 倾斜目标层的照明强度向



(a)、(b)、(c) 分别为方案 2 的覆盖次数, 覆盖面元统计以及玫瑰图; (d)、(e)、(f) 分别为方案 5 的覆盖次数, 覆盖面元统计以及玫瑰图

图 7 垂直缆倾角方案对比

Fig.7 Comparison of inclination angle schemes

表 2 观测系统参数对比方案

Table 2 Observation system parameter comparison scheme

方案	倾角/ $^{\circ}$	离底高度/m	道间距/m	道数	炮线距	炮线数	炮间距	炮点数
1	5	12.5	6.25	100	50	81	50	81
2	5	12.5	6.25	100	12.5	321	12.5	321
3	5	12.5	12.5	50	12.5	321	12.5	321
4	5	300	6.25	100	12.5	321	12.5	321
5	10	12.5	6.25	100	12.5	321	12.5	321

垂直缆位置聚焦, 同时需要增大激发面积才能补偿照明范围的损失^[14]。当海底倾角与底流方向存在夹角时, 倾斜垂直缆的相对位置同样影响目标层的照明情况。以南海陆坡为例, 南海深层流的方向是随地形、季节、温度和盐度等因素的影响而多变的^[27-29], 即深层流方向与地形倾斜方向存在夹角, 我们将夹角的情况分为爬坡流向、垂直流向以及下坡流向 3 种情况(图 8), 其他角度的海流可依据此 3 种情况进行分解。设定海底倾斜角度为 1° , 方位角分别为 90° 、 180° 、 270° , 垂直缆倾角为 10° , 方位角 180° , 观测系统参数选取表 2 中的方案 5。

2.1 水平目标层

根据海底倾斜角度建立模型(图 9), 海底倾角 1° , 目标层在 $-1\ 800\text{m}$ 的水平层, 垂直缆倾斜方向如图 8。覆盖次数的变化主要受到地形倾斜方向的影响, 高覆盖范围向海底下倾方向汇聚, 而垂直缆的倾斜角度只能影响覆盖次数的对称中心位置。3 种情况的覆盖面元统计变化不明显, 后续就不再讨论(图 10)。

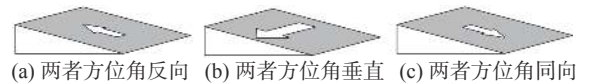


图 8 海底倾角与垂直缆倾角关系

Fig.8 The relationship between the inclination of the seabed and the inclination of the vertical cable

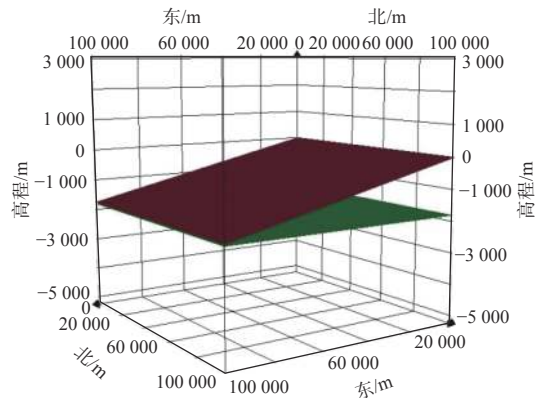
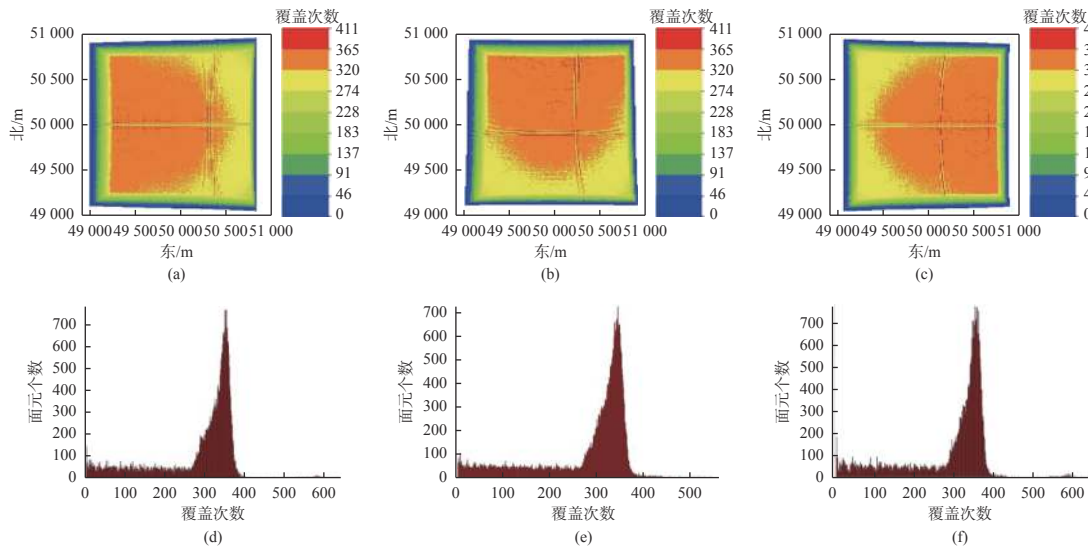


图 9 倾斜海底与水平目标层介质模型

Fig.9 Dipping seabed and horizontal target stratum medium model



(a)、(d) 为方位角反方向对应的覆盖次数与覆盖面元统计;(b)、(e) 为方位角垂直对应的覆盖次数与覆盖面元统计;
(c)、(f) 为方位角同方向对应的覆盖次数与覆盖面元统计

图 10 水平目标层

Fig.10 Horizontal target layer

2.2 倾斜目标层

调整目标层的倾角为 1°且方位与海底相同(图 11)。整体覆盖范围向海底的方位角方向移动,高覆盖面积减小且向目标层上倾方向移动,但垂直缆附近的覆盖次数增加,聚光度更好(图 12)。

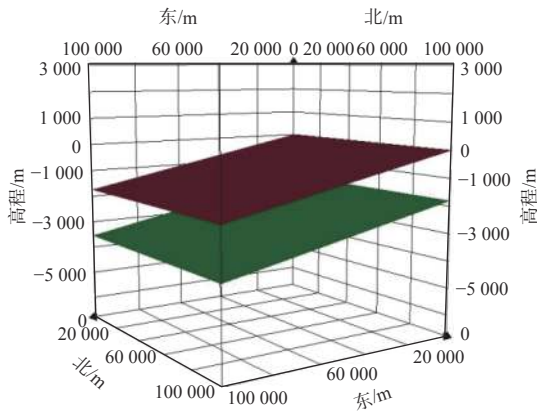


图 11 倾斜海底与倾斜目标层介质模型

Fig.11 Dipping seabed and inclined target stratum medium model

2.3 隆起目标层

为进一步论证垂直缆对地下目标层的照明问题,我们模拟地下盐丘体(图 13),建立四周均有坡度的隆起目标层,盐丘体底部高程为-1 800 m,盐丘体高 500 m。单条垂直缆对隆起目标层的照明范围更大,并且在海底倾斜方位角的方向上聚光程度更好,覆盖次数更高(图 14)。

3 结果与讨论

相比于传统的三维地震拖缆采集方法,固定于海底的垂直缆在全方位观测方面具有更大的优势。综合分析前述讨论的影响垂直缆照明范围的各项因素,有助于更好地设计针对目标层的观测系统。平行炮线激发方式在外业调查过程中具有定位精确,易于实施等特点,随着激发点密度的增大,观测系统方位角的逐渐完善至全方位覆盖(图 4)。在炮线方向及其垂直方向上,目标层存在 2 条低覆

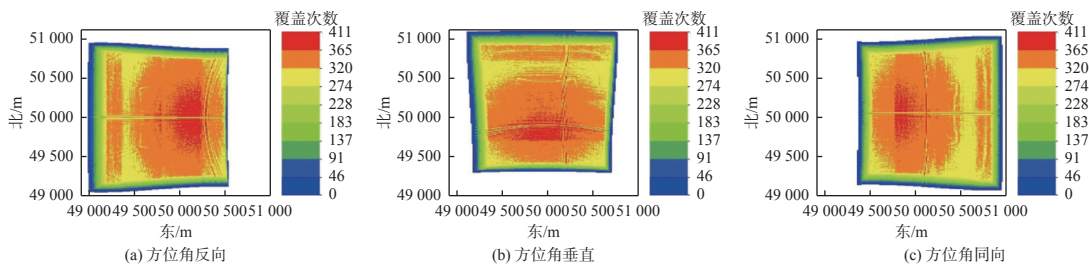


图 12 倾斜目标层

Fig.12 Slope target layer

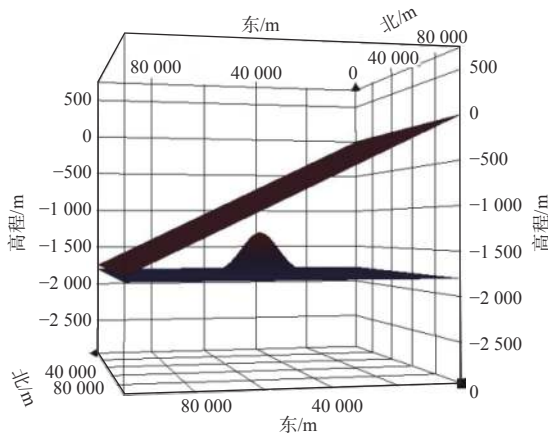


图 13 倾斜海底与隆起目标层介质模型

Fig.13 Dipping seabed and dome target stratum medium model

盖带, 并且低覆盖带的交点即垂直缆在海底的位置, 在海洋深层流的影响下, 垂直缆在海底并非垂

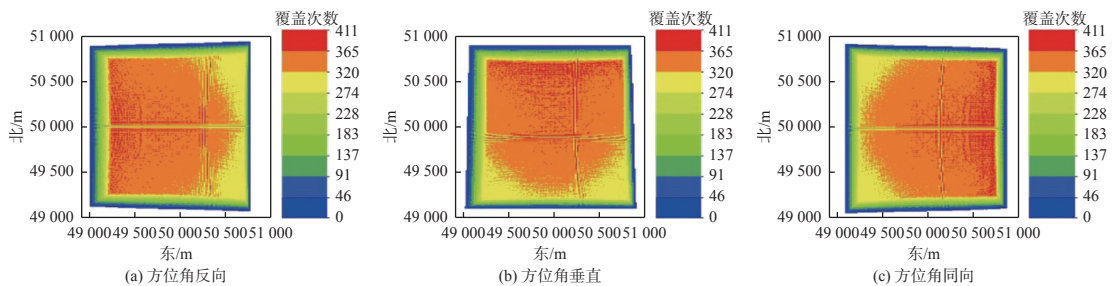


图 14 隆起目标层

Fig.14 Ridge target layer

4 结论

本文通过对激发点密度、接收点密度、离底高度、垂直缆法向倾角以及海底与目标层的倾斜情况的分析, 可以得到以下结论: ①激发点密度与接收点密度直接影响目标层的总覆盖次数; ②当采用足够密度的传统平行炮线激发系统时, 垂直缆观测系统对目标层能够实现全方位角采集; ③垂直缆与海底的法向倾角导致低覆盖带反向远离覆盖中心; ④海底坡度使目标层的照明聚光范围向下倾方向移动; ⑤垂直缆对地下隆起的目标层覆盖范围增大, 照明强度增大; ⑥垂直缆布设的位置应当根据海底倾角、垂直缆法向倾角以及目标层的倾角情况, 避开低覆盖带而选择高覆盖区域。

参考文献:

[1] 王祥春, 赵庆献, 伍忠良. 海洋垂直缆地震勘探技术[N]. 中国矿业报, 2018-09-28(008).
[2] 吴树梁, 刘怀山, 王春霖. 基于混合Radon变换在海洋垂直缆震

直, 垂直缆倾角的存在, 将上述的低覆盖区域向倾斜的反方向移动(图 7)。接收点密度越大, 覆盖次数越高, 而近海底接收时的照明程度优于远海底接收, 即满足设计需要的垂直缆应当尽可能的靠近海底。在陆坡以及高程变化较大的区域调查时, 水平目标层照明聚光范围向海底下倾方向移动, 即垂直缆观测位置应当设置在目标层的坡升方向(图 10)。当目标层具有倾角时, 覆盖范围会缩小并增加垂直缆附近范围的覆盖次数(图 12)。相比倾斜目标层, 隆起目标层的覆盖范围更大, 照明情况更好, 说明垂直缆对地下隆起的盐丘体成像更有优势(图 14)。综上所述, 在垂直缆照明地下目标层时, 应当充分考虑海底坡度、垂直缆法向倾角以及目标层倾斜角度。

料的噪声压制[C]//中国地球物理学会国家安全地球物理专业委员会、陕西省地球物理学会军事地球物理专业委员会. 国家安全地球物理丛书(十三): 军民融合与地球物理, 2017: 5.
[3] 张茗, 刘怀山. 天然气水合物立体观测系统分析[A]//中国地球物理学会国家安全地球物理专业委员会、陕西省地球物理学会军事地球物理专业委员会. 国家安全地球物理丛书(十一): 地球物理应用前沿, 2015: 6.53
[4] ASAKAWA E, SEKINO Y, OKAMOTO T, et al. Development of vertical cable seismic system for hydrothermal deposit survey[J]. Egu General Assembly, 2010, 64(4): 1993.
[5] KRAIL P M. Vertical cable as a subsalt imaging tool[J]. *Leading Edge*, 1994, 13(8): 885-887.
[6] KRAIL P M. Vertical cable marine seismic acquisition[C]//Offshore Technology Conference, 1997, 1(29): 347-355.
[7] WANG H, MACBETH C, LI X Y. Separation of up and down-going wave fields in vertical cable seismic[C]//61st EAGE Conference and Exhibition, 1999.
[8] WANG H. The impact of multiple suppression on vertical cable data imaging[C]//Seg Technical Program Expanded Abstracts, 2000, 19(1): 2484.
[9] WANG H. Seismic imaging and anisotropic inversion using vertical cable data [D]. Edinburgh: University of Edinburgh, 2003
[10] RODRIGUEZ-SUAREZ C, STEWART R R. Survey design for

- vertical cable seismic acquisition[J]. International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 1999, 10(6): 1-19.
- [11] JOHN A W, 黄必铭. 垂直电缆地震的价值[J]. 石油物探译丛, 1998(5): 81-85.
- [12] 黄建宇, 伍忠良, 王伟巍, 等. 天然气水合物垂直缆地震系统关键技术与试验[J]. 新能源进展, 2016, 4(3): 219-224.
- [13] 尉佳, 康宇璇, 冯京, 等. 利用海水平均声速进行海洋分布式垂直缆姿态校正[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(6): 57-63.
- [14] 何勇, 张建中. 海洋地震垂直缆观测系统的射线照明分析[J]. CT理论与应用研究, 2015, 24(5): 689-700.
- [15] 赵虎, 尹成, 李瑞, 等. 最优性价比的观测系统设计方法研究[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(5): 1692-1696.
- [16] 尹成, 吕公河, 田继东, 等. 三维观测系统属性分析与优化设计[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(5): 495-498, 509.
- [17] 安振芳, 张进, 张建中. 海洋三维VC观测系统优化设计[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(1): 271-284.
- [18] KENNETT J P. Marine Geology[M]. New Jersey: Prentice-Hall, Englewoods Cliffs, 1982: 1-813.
- [19] 张国祯, 曾瑞坚, 张学华. 东太平洋我国开辟区底层海流锚泊观测[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(3): 115-120.
- [20] 王刚, 乔方利, 候一筠, 等. 海南岛东部陆架近底层的强海流观测[J]. 自然科学进展, 2008, 18(5): 587-590.
- [21] 邸泽鹏, 童思友, 孙传禧. 基于网格自动搜索拟合曲面法垂直缆初至波二次定位[A]// 中国地球物理学会国家安全地球物理专业委员会、陕西省地球物理学会军事地球物理专业委员会. 国家安全地球物理丛书(十二)——地球物理与信息感知, 2016: 4.
- [22] 陈中山, 张昭, 孟红星, 等. 复杂地表条件下的三维观测系统优化设计[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(2): 591-595.
- [23] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 北京: 石油大学出版社, 1993: 95-106.
- [24] 曹雄伟, 许凤, 张学银, 等. 二维地震勘探满覆盖次数均匀性理论设计的研究[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(3): 321-328.
- [25] 吕晓春, 李鹏, 孙常新, 等. 海上多方位观测系统照明分析[J]. 石油物探, 2016, 55(3): 341-349.
- [26] 吴淑玉, 徐华宁, 刘俊, 等. 南海神狐海域非均质性天然气水合物储层的分频反演[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(6): 106-120.
- [27] HU J Y, KAWAMURA H, LI C Y, et al. Review on current and seawater volume transport through the Taiwan Strait[J]. Journal of Oceanography, 2010, 66(5): 591-610.
- [28] YUAN D L. A numerical study of the South China Sea deep circulation and its relation to the Luzon Strait transport[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 21(2): 187-202.
- [29] WANG G H, XIE S P, QU T D, et al. Deep South China Sea circulation[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(L05601).

Illumination analysis of the marine seismic vertical cable in free state

WEI Jia^{1,2}, FENG Jing^{1,2*}, YANG Rui^{1,2}, SUN Jun^{1,2}, WANG Wei^{1,2}

(1 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China; 2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: Marine vertical cable seismic data acquisition has the characteristics of high resolution and high precision true 3D imaging. As an important part of the future ocean stereoscopic observation system, it is necessary to comprehensively analyze the factors that affect the lighting in the ocean vertical cable observation system, and select the best design plan. Based on the actual situation, the paper analyzes the impact of shot point density, receiver point density, height from the bottom, inclination angle of vertical cable and stratum tilt on the illumination of the target layer, and found that the shot point density and receiver point density directly affect the total coverage of the target layer. The inclination of the vertical cable affects the position of the low coverage zone. The slope of the seabed and the inclination of the target layer make the lighting condensing range move. The underground ridge target layer has a larger coverage area and better lighting. When designing the observation system, not only the above-mentioned influencing factors should be considered, but the position of the vertical cable should also be laid in high coverage area according to the stratum slope and the vertical cable dip.

Key words: marine vertical cable; ocean stereoscopic observation system; illumination analysis; forward simulation