

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201504135

图像信息熵约束的浅地层层界划分方法

赵建虎¹, 冯 杰¹, 施 凤¹, 张红梅², 何林帮¹

(1. 武汉大学 测绘学院, 武汉 430079; 2. 武汉大学 动力与机械学院, 武汉 430072)

摘 要: 为实现快速、精确、自动化、智能化的海底浅地层层界提取, 克服传统浅地层层界在复杂海洋环境下提取时的低效、模糊、主观性等缺点, 提出一种基于图像信息熵约束的浅地层层界划分方法。首先, 将浅剖图像分割为不同区块; 然后, 在不同区块计算信息熵, 并结合钻孔数据, 建立信息熵与显著性参数关系模型; 最后, 据此模型对整个浅剖图像进行层界划分。研究表明, 该方法克服了现有方法的不足, 实现了浅地层剖面层界的自适应、准确划分, 试验中取得了与钻孔层界深度、厚度同量级的精度。由此可知采用图像信息熵约束进行层界提取, 可以实现浅地层层界提取的自动化与智能化。

关键词: 浅地层剖面图像; 浅地层层界及提取; 二维熵; 中误差系数; 自适应层界提取

中图分类号: P229

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)08-0165-06

Demarcation of the sub-bottom layers based on image information entropy constraint

ZHAO Jianhu¹, FENG Jie¹, SHI Feng¹, ZHANG Hongmei², HE Linbang¹

(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To address the issue of the sub-bottom profile layer extraction in complex circumstance, this paper proposes a new demarcating method based on constraint of image information entropy. Firstly, the image of sub-bottom is divided into different blocks; then, the information entropy in each block is calculated and a relation model of information entropy and significant parameters are established according to drilling data; finally, the whole sub-bottom profiling is demarcated according to the model. It is revealed that this method has overcome the shortcomings of existing methods, realized the self-adapting and exacted demarcation of sub-bottom layers. The experiment has gained the same accuracy as the depth and thickness of layers got by drilling data.

Keywords: sub-bottom profiling; sub-bottom layer and its extraction; 2-D entropy; coefficient of mean square error; self-adaption extraction

借助浅剖仪的换能器发射的声波在海底不同介质面发生的反射信号, 可以获得浅剖图像^[1-8]。但受复杂海底环境、多样性底质和声波在层界间多次反射造成的多次波干扰等影响, 清晰的浅剖图像难以得到, 基于一般的图像处理技术很难实现层界的准确、连续划分^[9]。为此, 本文结合浅剖 Ping (一个完整的声波发射—接收过程) 回波强度时序特点、多 Ping 构成的图像的复杂程度以及层界变化的连续性, 提出了一种顾及图像信息熵^[10-12]的浅地层层界划分方法, 以期消除诸因素影响, 实现层界的自适应、准确划分。

1 浅地层剖面图像生成及其预处理

1.1 图像生成

浅地层剖面仪 (浅剖) 测量中, 换能器接收到的

时序回波强度数据常以二进制的 SEG-Y 格式文件存储, 为获得浅地层数字图像, 需首先对其解码^[13-14]。由于接收信号常以相对发射声波振幅形式记录, 需借助 Hilbert 变换才能获得接收信号的实际振幅或强度^[15]。

为提高数据质量, 对 Hilbert 变换获得的声强进行截取有效声强、剔除无效数据、声强集中部分拉伸等处理。结合走航过程中每 Ping 的平面位置、测量中每个回波的深度, 在地理框架下即可得到浅地层剖面图像。

1.2 图像预处理

受海洋环境、声波传播机制等影响, 浅剖换能器接收到的回波数据中存在 Ping 丢失、噪声和多次波等干扰, 导致图像质量偏低, 为此需对原始图像开展如下预处理。

1) Ping 修复。基于底质结构变化的连续性, 根据丢失 Ping 前后 Ping 中的有效 Ping 数据, 采用均值内插或基于底质渐变原则的多项式模型内插, 实现丢失 Ping 修复。

收稿日期: 2015-04-30

基金项目: 国家自然科学基金 (41376109, 41176068, 41576107)

作者简介: 赵建虎 (1970—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 冯 杰, 1017587956@qq.com

2) 噪声抑制. 中值滤波具有不损失特征边缘、对噪声消除彻底等特点, 可用于抑制浅剖图像中的噪声, 提高图像质量.

3) 多次波压制. 利用多次波的周期性特征, 通过设计预测误差滤波器, 基于预测反褶积法削弱多次波影响^[16].

2 层界划分基本原理

2.1 基于 Ping 回波时序强度变化特点的层界峰谷划分方法

根据水声学原理, Ping 声信号在进入不同介质的层界面时会产生强反射, 在浅地层图像中则表现为灰度突变; 而在层界间, 由于底质近似, 回波强度接近, 图像中则表现为灰度均匀变化. 根据以上特点, 在每 Ping 形成的列灰度序列中定义一个由一定数量采样点的灰度值组合形成的统计窗口, 并给出如下 5 个层界划分原则.

1) 灰度陡变点为对应统计窗口内的峰值点.

2) 灰度陡变点有足够的显著性. 对于第 m 个检验点, 定义检验模型为

$$G(m) - \mu > k\sigma.$$

式中: $G(m)$ 为第 m 个检验点的灰度值, 统计窗口的范围为 $(m-10, m+10)$; k 为中误差系数; μ 、 σ 分别为统计窗口内灰度的均值、标准差.

3) 考虑声能随传播距离衰减, 后一个峰值点灰度值应小于前一个.

另外由于浅地层剖面测量时受到来自海洋、仪器、多次波等各类噪声的影响, 使得单 Ping 灰度曲线变化剧烈, 存在众多噪声点或伪层界. 为削弱这些影响, 达到提取真实层界的目的, 本文采用 N Ping 均值滤波方法, 即认为在 N Ping 变化范围内层界是连续的、结构近似一致. 在参与平均的 Ping 数选择时, 应遵循如下 2 个原则.

4) 涵盖的范围不能太大, 避免出现层界细部信息丢失.

5) 涵盖的范围不能太小, 否则不能达到噪声压制效果.

基于以上 5 个原则, 对每 Ping 开展层界划分, 将相邻 Ping 相同层界连接, 获得整个图像中的层界及其分布.

2.2 图像二维信息熵

以上层界峰谷划分法中, 中误差系数 k 及参与平均的 Ping 数 N 的确定问题需要解决. k 和 N 均与图像中灰度变化的复杂程度、噪声、层界图像的显著程度等密切相关. 为此引入图像二维信息熵, 以期实现上述 2 个参数的自适应确定.

2.3 N 、 k 与 V 关系建立

获得二维熵 V 后, 可以根据钻孔取芯数据提供的真实层界为参考, 结合对应层界的图像二维熵 V , 以及基于不同 N 和 k 下层界的划分结果, 构建彼此间的关系模型.

1) N 、 k 和 V 参数集确定. 为方便计算, 首先将整个图像根据钻孔位置划分成若干区块, 区块大小为 S , 并提取 S 对应图像的二维熵 V ; 然后在一个区块内, 不断改变 N 和 k , 借助层界峰谷划分法开展层界划分; 以钻孔数据为参考, 获得划分层界与实际层界一致时的 N 、 k 及 V ; 在不同区块开展上述工作, 最终形成 N 、 k 和 V 构成的集合. $\{N, k, V\}$ 集合的寻找过程如图 1 所示.

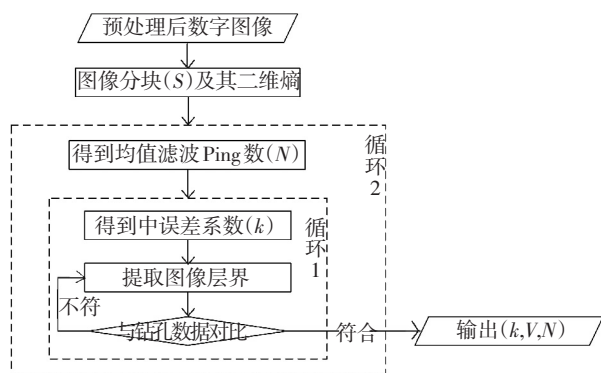


图 1 k 、 V 、 N 确定流程

Fig.1 Flow chart for determination of k , V and N

2) 利用 $\{N, k, V\}$ 集合绘制三维图, 根据 N 和 V 在三维图中的变化曲线, 发现变化拐点, 结合最大信息熵原则, 最终确定 N .

3) 根据输出的 $\{N, k, V\}$ 序列, 分析 k 随 N 的变化及成因.

考虑 k 、 V 变化特点, 采用高斯拟合函数建立 k - V 关系模型为

$$k = f(V) = a_1 e^{-\left(\frac{(V-b_1)}{c_1}\right)^2} + a_2 e^{-\left(\frac{(V-b_2)}{c_2}\right)^2} + \dots + a_8 e^{-\left(\frac{(V-b_8)}{c_8}\right)^2}, \quad (1)$$

式中, a_i 、 b_i 、 c_i ($i=1, 2, \dots, 8$) 分别为模型系数. 与传统的多项式拟合相比, 高斯拟合采用高斯函数系, 具有收敛快、拟合准确等特点. 根据实际拟合情况, 本文采用式(1)所示 8 项高斯叠加函数作为 k - V 关系模型.

基于式(1)给出的 k - V 关系模型及 N - V 关系, 在不同的子区, 根据对应的图像二维熵可得相应的 N 及 k 值, 据此借助层界峰谷划分法实现层界划分.

3 层界划分流程

根据以上原理, 基于图像二维信息熵约束的浅地层层界划分流程如下, 如图 2 所示.

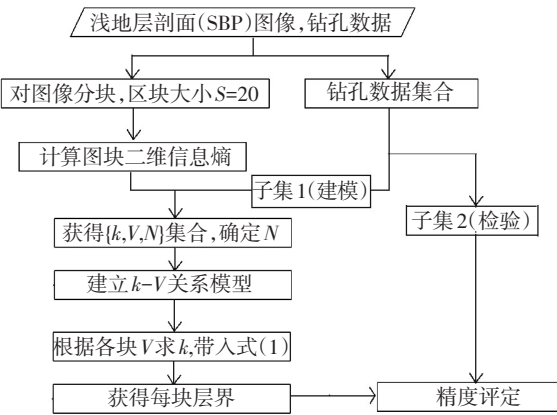


图 2 层界划分流程

Fig.2 Flow chart for demarcation of layers

4 实验与分析

为验证上述方法的正确性,在烟台某水域借助 C-Boom 浅地层剖面仪开展了 1 个航次的浅地层剖

面测量和钻孔取芯工作.测量中, C-Boom 的采样频率为 4 Hz,船速为 4~5 节, Ping 间隔约为 0.5 m. 走航断面平均设有 7 个钻孔点,经实验室分析得到所在位置的浅地层层界.

对浅地层剖面观测数据分别开展 SEG-Y 格式原始文件解码和转换,并开展 Ping 修复、消噪和多次波压制等图像预处理.预处理后的图像如图 3 所示.

选择 4 个代表性钻孔,在对应位置划分区块,根据各区块的 V 、 N 及 k 构建 $\{N, k, V\}$ 集合,并绘制如图 4 所示图形.可以看出:1)整体上 N 越大 V 越小.分析认为随着 N 变大,滤波所得图像细节信息损失,导致 V 减小.在 N 为 35~40 区间出现不一致现象.该现象主要是由于当 N 超过图像区块大小 S 时,方法将 S 放大进而造成 V 增大;2) V 越大 k 越大.主要由于 V 增大,层界提取时图像中的信息量就越大,只有选取较大的 k 才能界定峰点.

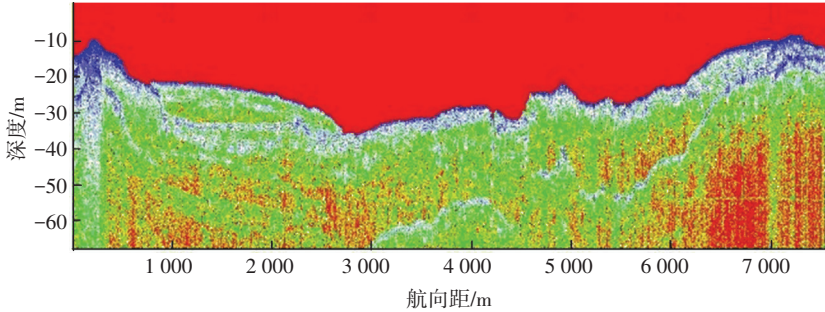


图 3 预处理后的浅地层剖面

Fig.3 Sub-bottom profile image after data preprocessing

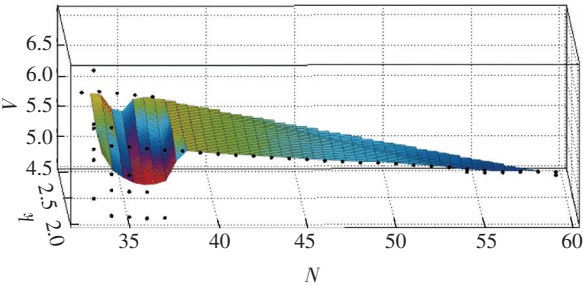


图 4 $\{k, V, N\}$ 集合三维分布

Fig.4 3-dimension distribution of $\{N, k, V\}$

以上仅定性分析了三者间关系,下面定量确定彼此间关系.考虑直接建立 N - k - V 关系模型比较复杂,为简化问题,首先确定 N ,然后构建 k - V 模型.

从图 4 可看出, $N \leq 35$ 时 N 增大 V 减小; N 在 36~37 区间时 N 增大 V 增大; $N > 37$ 时 N 增大 V 减小.因此,两者关系在 35~40 间存在两个拐点:35 和 37.考虑层界处图像灰度会产生突变,信息熵会较大,取 $N=37$,此处 V 最大,同时还兼顾了 N 与 V 之间的两个关系.

为验证上述结论,让 $k=2.5$,变化 N 从 2 到 60,

对不同 N 下所得平均 Ping 灰度序列,借助峰谷法提取层界,如图 5 所示.从图 5 可看出: N 越小,提取出的层界越不准确;随着 N 增大,层界变得越来越接近钻孔层界位置;但随 N 进一步增大,层界位置逐渐变得模糊,最终偏离实际.以上关系变换的拐点即在 $N=37$,与图 4 给出的结论一致.

N 确定后,提取出 $\{N, k, V\}$ 集中的 $\{k, V\}$ 集,将之绘制到图 6 中,并利用这些数据构建 k - V 关系模型,模型参数和模型曲线如表 1 和图 6 所示.可以看出,模型内符合精度较高, RMSE 达到 0.006 8;拟合曲线与实际非常吻合,表明确定的模型参数真实可靠.

计算其他 3 个未参与建模钻孔位置对应区块的 V ,依据上述模型得到各区块的 N 及 k .同样借助图 1 所示流程,得到这 3 个区块对应的 N_0 和 k_0 ,并将 V 对应的 k_0 绘制到图 7 中.从图 7 可以看出,基于模型得到 k - V 变化曲线与实际 k_0 取得了一致,同时 N - V 关系得到的 N 与 N_0 相同,进一步表明基于上述方法得到的 N - V 关系以及 k - V 关系模型适用于整个图像.

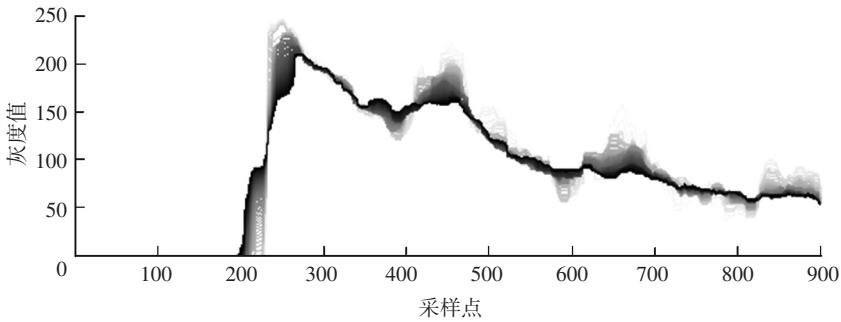


图 5 N 与层界划分准确性关系曲线

Fig.5 Relationship curve of N and sub-bottom layer division

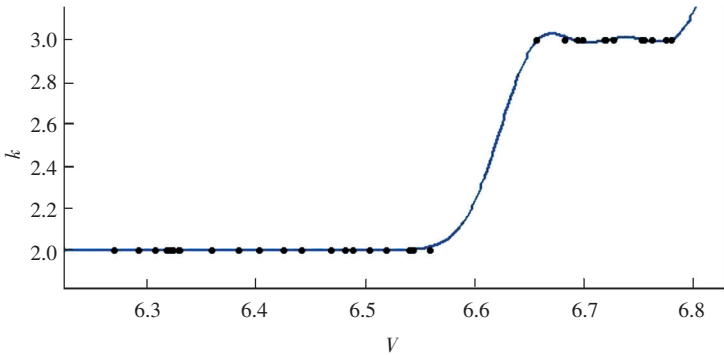


图 6 k - V 关系曲线

Fig.6 k - V relationship curve

表 1 确定的高斯模型参数及精度

Tab.1 Gauss model's coefficient and model accuracy

参数 类型	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶
a	-5.93	0.67	7.28	2.05	0	0	3 701.00	1.52
b	5.81	5.65	5.82	-369.20	4.56	4.61	4.78	5.03
c	0.08	0.05	0.10	2 442.00	0.02	0.06	0.03	0

注:模型精度 REMS=0.006 8.

得到可靠的 N - V 关系及 k - V 关系模型后,便可进行层界划分.首先进行分块, S 为平均 N 的 2 倍;然后计算不同区块的 V , N 和 k ;采用逐 Ping 遍历法,对每一 Ping 对应的灰度序列基于峰谷法开展层界提取,完成所有区块层界划分;最后,将相邻层界连接,获得整个层界.比较图 8 和图 3 可看出,相对原始图像,本文方法划分出的层界真实、清晰.

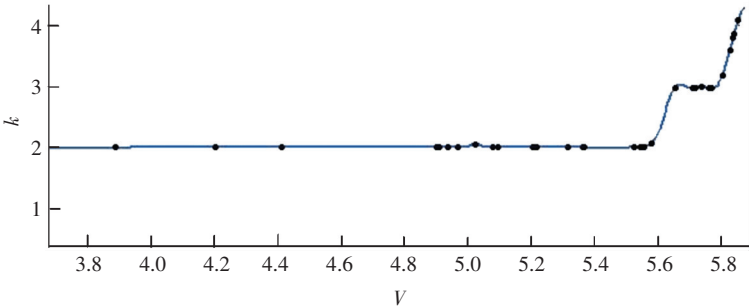


图 7 k - V 关系模型与 k_0 的比较

Fig.7 Comparison of the k_0 from k - V model and those from drilling data

为定量评估本文方法的正确性及精度,以钻孔给出的层界为参考,将上述划分层界与之比较(如图 9 所示),划分层界位置及层厚度偏差统计结果如表 2 所示.从图 9 可以看出,二者吻合较好;表 2 中的统计结果表明,二者的层界深度偏

差最大绝对值小于 20 cm,厚度偏差最大绝对值小于 30 cm,与钻孔数据的给出的层界精度(分米级)处同量级,表明本文给出的方法不但实现了层界的自适应划分,层界划分的精度也满足了工程需要.

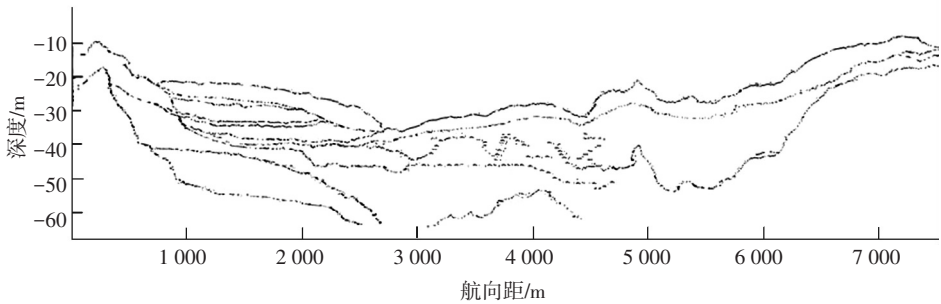


图 8 划分出的层界分布图

Fig.8 Distribution of sub-bottom layers

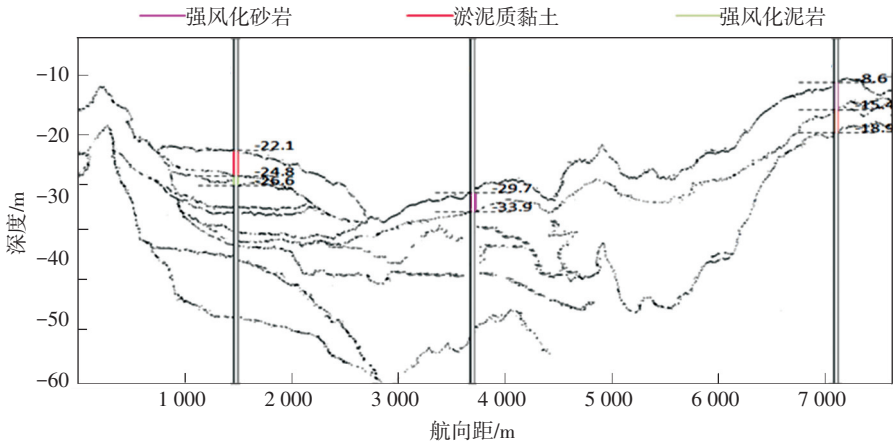


图 9 用于检验层界提取的钻孔位置

Fig.9 Sub-bottom layers and the 3 drilling locations for checking layer's extraction

表 2 划分层界深度及层厚度与钻孔资料的偏差

Tab.2 Biases of layer' position and thickness determined by layer extraction relative to the drilling data

钻孔	层界深度偏差/m			层厚度偏差/m	
	层 1	层 2	层 3	层 1-2	层 2-3
ZK2	-0.10	0.10	0.07	-0.20	0.02
ZK3	0.10	-0.20	—	0.30	—
ZK7	0.03	-0.15	0.15	0.18	-0.30

5 结 论

1) 浅剖图像的预处理(包括修复、去噪、压制多次波等),可提高图像信噪比,得到层界较清晰的浅剖图像.该环节得到的图像质量直接影响后续浅剖层界自动提取的效果.

2) 根据浅剖层界位置处,Ping 灰度值突变原理提取层界,实现了浅剖层界提取自动化.但该方法需要一个准确的显著性系数 k 来界定灰度突变点,以期实现浅剖层界的准确提取.

3) 采用二维图像信息熵作为约束,即根据不同区块的不同信息熵值设置显著性系数 k ,提高了浅剖层界提取的准确性,减少了图像细节信息的损失,避免了强噪声或伪层界造成的干扰,实现了智能化、

自动化提取真实层界的目的.

参考文献

[1] 李斌,杨文达,张异彪,等.海底管道的浅地层剖面图上反射特征与判读方法[J].海洋测绘,2010,30(5):56-58. DOI:10.3969/j.issn.1671-3044.2010.05.016.

LI Bin, YANG Wenda, ZHANG Yibiao, et al. Characteristics of the seabed pipeline's reflection in the sub-bottom profiling and interpretation[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2010, 30(5):56-58. DOI:10.3969/j.issn.1671-3044.2010.05.016.

[2] HONSHO C, URA T, ASADA A, et al. High-resolution acoustic mapping to understand the ore deposit in the Bayonnaise knoll caldera, Izu-Ogasawara arc[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(4):2070-2092. DOI: 10.1002/2014JB011569.

[3] 王方旗.浅地层剖面仪的应用及资料解译研究[D].青岛:国家海洋局第一海洋研究所,2010.

WANG Fangqi. The research of the application and data interpretation of sub-bottom profiler[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, SOA, 2010.

[4] MACLEAN B, BLASCO S, BENNETT R, et al. New marine evidence for a Late Wisconsinan ice stream in Amundsen Gulf, Arctic Canada[J]. Quaternary Science Reviews, 2015, 114:149-166. DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.02.003.

[5] PLETS R M K, DIX J K, ADAMS J R, et al. The use of a high-

- resolution 3D Chirp sub-bottom profiler for the reconstruction of the shallow water archaeological site of the Grace Dieu (1439), River Hamble, UK[J]. Journal of Archaeological Science, 2009, 36(2): 408–418. DOI: 10.1016/j.jas.2008.09.026.
- [6] CARLIN J A, DELLAPENNA T M, STROM K, et al. The influence of a salt wedge intrusion on fluvial suspended sediment and the implications for sediment transport to the adjacent coastal ocean; a study of the lower Brazos River TX, USA [J]. Marine Geology, 2015, 359: 134–147. DOI: 10.1016/j.margeo.2014.11.001.
- [7] BAETEN N J, LABERG J S, VANNESTE M, et al. Origin of shallow submarine mass movements and their glide planes—Sedimentological and geotechnical analyses from the continental slope off northern Norway [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2014, 119 (11): 2335–2360. DOI: 10.1002/2013JF003068.
- [8] HAO Yanjun, MCINTOSH K, MAGNANI MB. Long-lived deformation in the southern Mississippi Embayment revealed by high-resolution seismic reflection and sub-bottom profiler data [J]. Tectonics, 2015, 34(3): 555–570. DOI: 10.1002/2014TC003750.
- [9] 张恒超. 几种简单实用的多次波去除方法及其应用[J]. 内蒙古石油化工, 2011(21): 21–24. DOI: 10.3969/j.issn.1006–7981.2011.21.010.
- ZHANG Hengchao. Several practical methods of multiple waves suppression and their applications [J]. Inner mongolia petrochemical industry, 2011(21): 21–24. DOI: 10.3969/j.issn.1006–7981.2011.21.010.
- [10] 华长发, 范建平, 高传善, 等. 基于二维熵阈值的图像分割及其快速算法[J]. 模式识别与人工智能, 2000, 13(1): 42–46. DOI: 10.3969/j.issn.1003–6059.2000.01.009.
- HUA Changfa, FAN Jianpin, GAO Chuanshan, et al. Image segmentation based on 2d entropic thresholding and its fast algorithm [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2000, 13(1): 42–46. DOI: 10.3969/j.issn.1003–6059.2000.01.009.
- [11] 吴泽鹏, 郭玲玲, 朱明超, 等. 结合图像信息熵和特征点的图像配准方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2846–2852. DOI: 10.3969/j.issn.1007–2276.2013.10.046.
- WU Zepeng, GUO Lingling, ZHU Mingchao, et al. Improved image registration using feature points combined with image entropy [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2846–2852. DOI: 10.3969/j.issn.1007–2276.2013.10.046.
- [12] GABARDA S, CRISTOBAL G. The generalized Renyi image entropy as a noise indicator-art [C]// Proceedings of the SPIE 6603, Noise and Fluctuations in Photonics, Quantum Optics, and Communications. Florence: SPIE, 2007. DOI: 10.1117/12.725086.
- [13] 王增波, 李雁鸿, 赵剑, 等. SEG-Y 地震数据格式解析及转换方法[J]. 物探装备, 2012, 22(3): 177–182. DOI: 10.3969/j.issn.1671–0657.2012.03.010.
- WANG Zengbo, LI Yanhong, ZHAO Jian, et al. Analytical method and conversion method for SEG-Y data [J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2012, 22(3): 177–182. DOI: 10.3969/j.issn.1671–0657.2012.03.010.
- [14] 肖梅, 刘国华, 李庆春. 在 VC++ 环境下读取地震勘探 SEG-Y 格式数据及其应用[J]. 中国科技信息, 2005, (9): 17–17, 29. DOI: 10.3969/j.issn.1001–8972.2005.09.012.
- [15] 李枝文, 宋伟, 肖柏勋, 等. Hilbert 变换与小波变换在探地雷达资料处理中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(4): 428–432. DOI: 10.3969/j.issn.1672–7940.2012.04.011.
- LI Zhiwen, SONG Wei, XIAO Boxun, et al. Application of hilbert transform and wavelet transform to data processing of ground penetrating radar [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(4): 428–432. DOI: 10.3969/j.issn.1672–7940.2012.04.011.
- [16] 张军华, 缪彦舒, 郑旭刚, 等. 预测反褶积去多次波几个理论问题探讨[J]. 物探化探计算技术, 2009, 31(1): 6–10. DOI: 10.3969/j.issn.1001–1749.2009.01.003.
- ZHANG Junhua, MIAO Yanshu, ZHENG Xugang, et al. Discussion of several theoretical questions to remove seismic multiples using predictive deconvolution [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 31(1): 6–10. DOI: 10.3969/j.issn.1001–1749.2009.01.003.

(编辑 张 红)