

# A Discussion on Velocity Analysis Method of Shale Gas Exploration Area with Complex Wave Field

Yuan Du

Research Institution of Exploration and Development, East China Company, SINOPEC, Nanjing Jiangsu  
Email: 154178457@qq.com

Received: Jan. 8<sup>th</sup>, 2018; accepted: May 4<sup>th</sup>, 2018; published: Dec. 15<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The wave field of XC Shale Gas Exploration Area was complex, and the stacking velocity was difficult to obtain. The velocity analysis by superposition energy method could not meet the processing requirements. This paper combined the characteristics of seismic data in the XC Shale Gas Exploration Area, focused on the impact of factors such as low signal-to-noise ratio and near-surface anomalies on the quality of the velocity spectrum, the targeted processing techniques and methods were proposed, a set of methods for precise extraction of seismic stack velocity in XC Shale Gas Exploration Area were summarized. Firstly, the original data were purified and the noise was suppressed by multi-domain and multi-method combination, and the signal-to-noise ratio was improved. Secondly, various residual static correction methods were used for maximally reducing the problem of high frequency static correction and improving the quality of seismic data. Finally, the relevant characteristics of instantaneous phase and the statistical phase correlation method were used to calculate the velocity spectrum, improve the precision of calculating speed. Better imaging results are obtained; especially the quality of structural imaging in the middle and deep layers is obviously improved.

## Keywords

Complex Wave Field, Velocity Analysis, Phase Correlation, Velocity Spectrum

---

# 复杂波场页岩气探区速度分析方法探讨

杜园

中石化华东油气分公司勘探开发研究院, 江苏 南京

作者简介: 杜园(1985-), 女, 硕士, 工程师, 现主要从事地震资料处理工作。

Email: 154178457@qq.com

收稿日期: 2018年1月8日; 录用日期: 2018年5月4日; 发布日期: 2018年12月15日

## 摘要

XC页岩气探区波场复杂, 叠加速度求取困难, 采用叠加能量法进行速度分析不能满足处理要求。结合XC页岩气探区地震资料特点, 重点针对信噪比低、近地表异常等因素对速度谱质量的影响, 提出了针对性的技术, 总结出一套精确提取XC页岩气探区地震叠加速度的方法。首先, 对原始资料进行净化处理, 采用多域、多方法组合压制噪音, 提高信噪比; 其次, 应用多种剩余静校正法联合处理, 最大程度减少高频静校正问题的存在, 改善地震资料的品质; 最后, 利用瞬时相位的相关特性, 应用统计相位相关法计算速度谱, 提高速度求取的精度。该方法获得了较好的成像效果, 特别是中深层的构造成像质量有明显改善。

## 关键词

复杂波场, 速度分析, 相位相关, 速度谱

Copyright © 2018 by author, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

速度分析是地震资料处理中的关键环节[1][2], 速度参数不仅关系到地震资料处理中诸多环节的质量, 其本身也提供了关于地下构造和岩性的重要信息。因此, 获取准确可靠的速度参数是地震资料处理的中心问题。

目前, 我国页岩气资源调查与勘探开发还处于探索起步阶段, 至今尚未对其潜力进行全面估算, 页岩气资源有利目标区有待进一步落实, 勘探开发还处于“空白”状态。为此, 中石化在下扬子区页岩气[3]评价有利目标 I 类区, 即 XC 探区部署了二维地震。其主要勘探目的是落实寒武系(中深层)页岩空间展布特征, 确保获得寒武系及以上地层的反射波组, 且能够分辨大于 50 m 的厚页岩层。从已获得的资料来看, 页岩层埋深较深, 波场复杂, 且该区地表起伏剧烈, 地震资料信噪比低。因此, 地震资料处理中对速度拾取的精准度要求较高, 否则会影响叠加、成像的精度。

速度分析的方法有很多, 国内外很多学者对此进行了广泛而深入的研究。1969年 Turhan 和 Koehler [4] 首先提出了将基于相似系数的相干准则运用到速度分析中; 之后, De Vries 和 Berkhout [5] 提出了一种基于最小熵的速度分析方法, 对绕射能量较强的反射波地震数据可以进行准确的速度拾取; Biondi 和 Kostov

[6]提出了基于特征值运算的速度分析方法; Simon [7]提出了一种渐进的线性速度分析方法; 吴树初和罗国安[8]提出了计算复数道相关速度谱的方法, 可以增强相位的一致性; 林小竹[9]提出的利用协方差算法求取速度谱, 不但能提高速度谱的分辨率, 还可以减少速度分析的计算量; 另外, 还有其他学者[10]-[15]研究了 VTI 介质下的速度分析方法以及层速度反演的相关算法等。1996 年 Morozov 和 Smisthson [16]提出了基于相位相关速度分析方法, 该方法利用统计假设检验方法计算速度谱, 可以有效提高速度谱的分辨率; 后来王德利及何樵登等[17]对该方法进行过研究, 并取得了较好的效果; 张军华等[18]进一步发展了相位相关速度分析方法, 充分说明了该方法的优势。

## 2. 速度分析基本原理

常用求取叠加速度的方法有 2 种: 速度扫描和速度谱。一般来说, 速度扫描法的工作量大且繁琐, 而速度谱的求取方法相对更易实现, 在速度分析中应用速度谱求取叠加速度的方法更为广泛, 同时也对各波组的识别提出了更高的要求。该次研究主要对叠加能量法和统计相位相关法两种方法进行了对比。

### 2.1. 叠加能量法

叠加能量法是常用的常规速度分析法。固定零偏移距时间  $d_0$  进行速度扫描, 当扫描速度等于均方根速度时, 地震记录的反射信号相位相同, 对应最大叠加能量的速度就是要提取的速度。进行速度分析所用的判别准则为平均振幅准则, 当平均振幅  $A$  能够获得最大值时所对应的速度即为叠加速度。

平均振幅  $A$  可以定义为:

$$A = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^M \left( \sum_{i=1}^N f_{i,j+r_i} \right) \quad (1)$$

其中,  $M = T/\Delta t$ 。

式中:  $N$  为地震记录的总道数, 个;  $M$  为总采样点数, 个;  $T$  是总采样时间, ms;  $\Delta t$  是采样间隔, ms;  $r$  表示与动校正存在一定关系的延迟量, 1;  $r_i$  为第  $i$  道的延迟量, 1;  $f_{i,j}$  为第  $i$  道、第  $j$  个采样点的反射波振幅, dB;  $f_{i,j+r_i}$  为第  $i$  道、延迟后的第  $j$  个采样点的反射波振幅, dB。

### 2.2. 统计相位相关法

实践证明叠加能量法的抗噪性能较差[18], 在页岩气复杂构造区, 采用叠加能量法很难提供准确的速度。该次研究利用瞬时相位的相关特性, 采用统计相位相关法计算速度谱[17]。根据统计假设检验原理, 建立 2 个检验假设(设为  $R$  和  $W$ ), 再根据常规叠加能量的瞬时信息和能量函数计算速度谱。逐点计算速度谱, 可以避免与时窗有关的时间分辨率损失, 在提高时间分辨率方面明显优于叠加能量速度分析法。算法如下:

1) 设输入的道集为  $u_{ij}$ , 表示第  $i$  道、第  $j$  个采样点。设初始时间为  $t_0$ , 选定其对应的速度  $v$  进行动校正, 此时可以得到校正后的道集, 再应用 Hilbert 变换法求取  $u_{ij}$  的瞬时振幅  $A_{ij}$  和瞬时相位  $\mu_{ij}$ 。

2) 将整个道集分为若干部分, 即样点分布分为  $c$  组, 样点的相位表示为  $\mu_{is} (i = 1, 2, \dots, n_s; s = 1, 2, \dots, c)$ , 且  $\sum_{s=1}^c n_s = M$ , 求取统计量  $R$  和  $W$ :

$$R = \sqrt{\left( \sum_{s=1}^c U_s \right)^2 + \left( \sum_{s=1}^c W_s \right)^2} \quad (2)$$

$$W = 2 \left( \sum_{s=1}^c \frac{R_s^2}{n_s} - \frac{R^2}{M} \right) \quad (3)$$

其中,  $U_s = \sum_{i=1}^{n_s} \cos \mu_{is}$ ,  $W_s = \sum_{i=1}^{n_s} \sin \mu_{is}$ ,  $R_s = \sqrt{U_s^2 + W_s^2}$ 。

$R$  假设检验与  $W$  假设检验是判断  $t_0$  及所选定的  $v$  正确与否的标准。当  $R$  检验假设概率分布是单峰分布时，代表  $t_0$  及所选定的  $v$  正确；当  $W$  检验假设概率分布在不同偏移距范围内，且都是相同的单峰分布时，代表  $t_0$  及所选定的  $v$  正确。

3) 计算常规叠加能量的瞬时信息  $S_B(t, v)$ :

$$S_B(t, v) = \frac{\sum_{i=1}^M B \left[ \sum_{j=1}^N u_{ij}(t, v) \right]}{\sum_{i=1}^M L \left\{ \sum_{j=1}^N B \left[ u_{ij}(t, v) \right] \right\}} \quad (4)$$

式中： $u_{ij}(t, v)$ 为动校正后信号的振幅，dB； $t$ 为第*i*道、第*j*个采样点道集对应的采样时间，ms； $v$ 为第*i*道、第*j*个采样点道集对应的速度，m/s； $B$ 是瞬时振幅算子，1； $L$ 是低滤波因子，1。

4) 计算能量函数  $S_{RWB}$ :

$$S_{RWB} = \left( \frac{R}{W} \right) S_B \quad (5)$$

最后，根据第3)步和第4)步求得值，计算速度谱。

### 3. 应用实例效果分析

影响速度分析精度的因素很多[19] [20] [21] [22] [23]，如叠加次数、排列长度、信噪比和静校正等。XC 页岩气探区地震资料信噪比低、近地表异常都会对速度谱质量有影响，导致速度谱的分辨率过低，难以识别有效波组的能量团。为此，笔者进行了深入研究和分析，并提出了针对性的处理技术和方法。

#### 3.1. 速度分析的预处理

##### 3.1.1. 提高信噪比处理

信噪比低会降低速度谱的分辨率，不利于速度拾取，限制速度分析的精度。因此，为确保速度分析精度，需要进行地震资料的净化处理。

针对面波、异常振幅、线性进行多域、多方法组合进行压制，有效提高了地震资料信噪比，保护了目的层系的反射波组，最大限度地保留了有效波，确保无过度去噪现象。图 1 是 XC 页岩气探区某单炮去噪前、后对比图，可以看出，噪音得到了很好的压制，有效波同相轴清晰可见，反射层有效信息凸显出来，信噪比明显提高。图 2 为去噪前、后的叠加剖面对比图，可以看出，通过地震资料净化处理后，剖面同相轴连续性加强，信噪比显著改善。

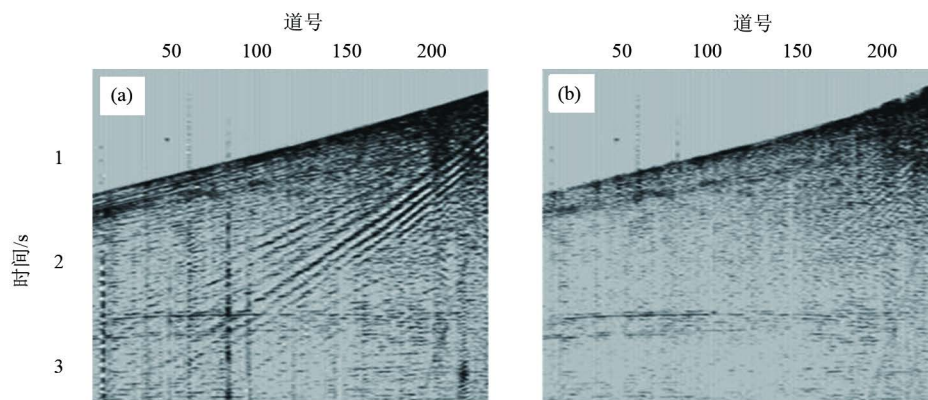
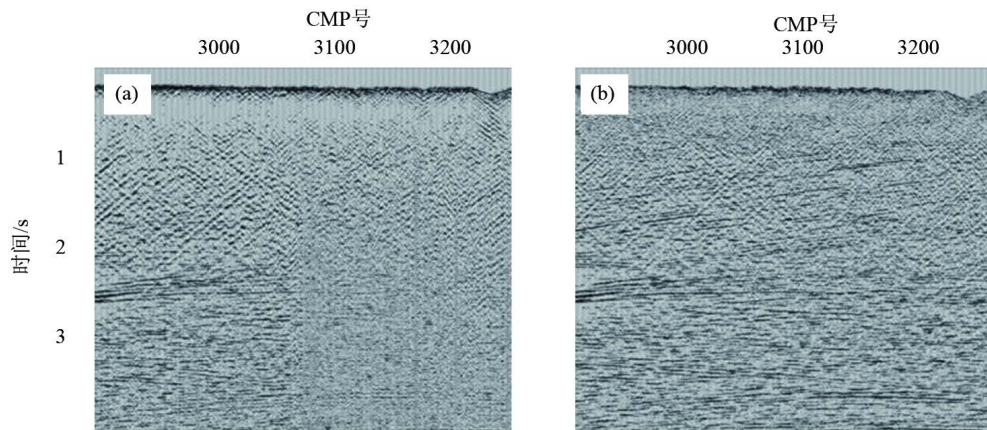


Figure 1. The single shot result before (a) and after (b) denoising  
图 1. 去噪前(a)、后(b)单炮记录



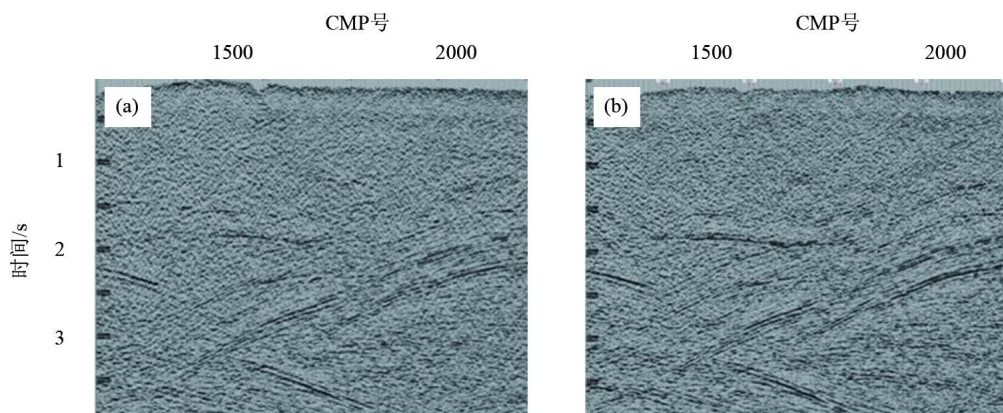
**Figure 2.** The profile correlation before (a) and after (b) denoising  
**图 2.** 去噪前(a)、后(b)剖面对比图

### 3.1.2. 剩余静校正处理

高频静校正量的存在可以导致 CMP 道集同相轴的扭曲, 相关特性变差, 影响计算能量函数, 从而影响速度分析精度, 导致求取的速度不准确。

高频静校正量的求取一般依赖多种剩余静校正方法联合解决。XC 页岩气探区地震地质条件非常复杂, 炮检点布设困难, 一定程度上存在炮检点位移现象, 且地下介质非均质性强, 地震波传播路径复杂。而地表一致性剩余静校正假设地层为水平层状介质, 不能满足实际处理的需要。所以实际资料处理中, 在采用地表一致性剩余静校正的基础上, 通过外部模型控制进行非地表一致性剩余静校正处理, 最大程度地减少了高频静校正问题的存在, 进一步消除了同一 CMP 道集内各道的残余时差, 改善了地震资料的品质。

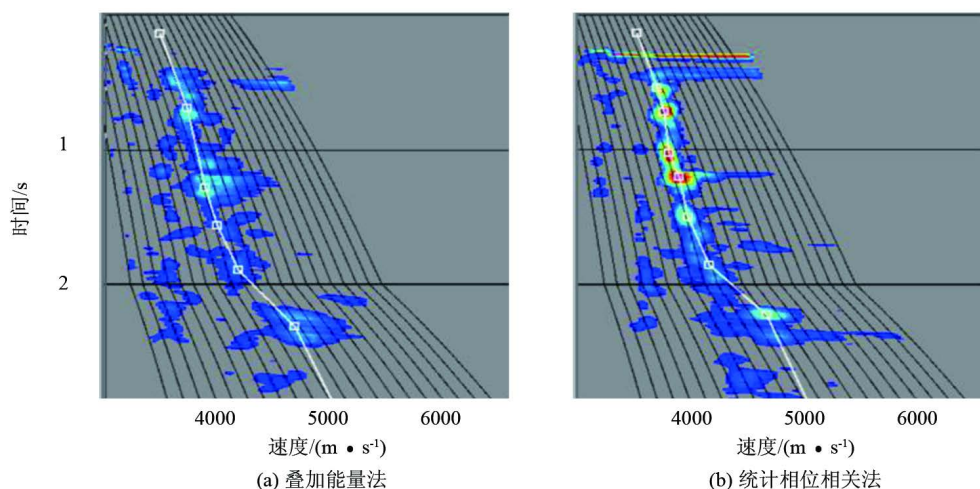
图 3 为剩余静校正前、后剖面对比图, 可以看出, 经过剩余静校正后, 叠加剖面上的反射波组更加清晰、连续, 同时信噪比得到了很大提高。



**Figure 3.** The profile correlation before (a) and after (b) residual static calibration  
**图 3.** 剩余静校正(a)、后(b)剖面对比图

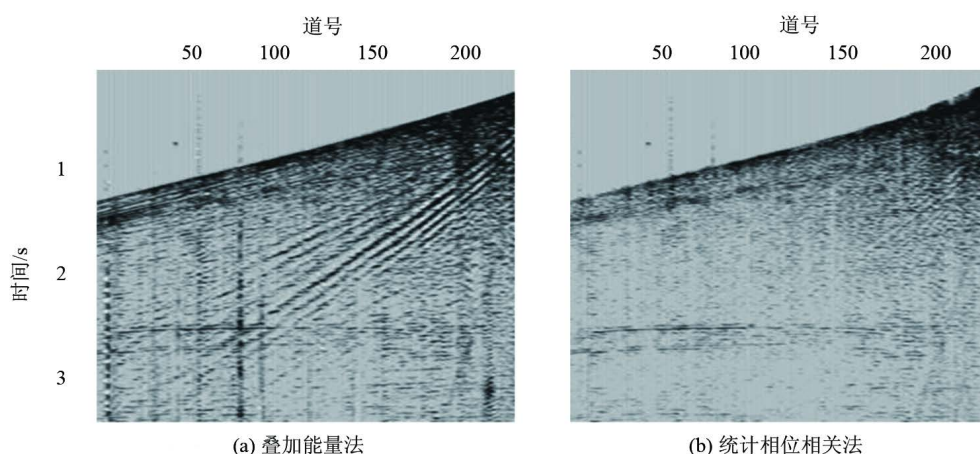
### 3.2. 统计相位相关法速度谱的求取

在做好常规处理的基础上, 采用上述两种方法进行速度谱求取。通过叠加能量法与统计相位相关法速度谱的对比分析(图 4)可知, 在统计相位相关法计算的速度谱中, 深层的速度能量聚焦性好, 能量团更集中, 速度趋势走向合理, 速度易于确定, 明显优于叠加能量法。



**Figure 4.** The velocity spectrums of different velocity analysis methods  
**图 4.** 不同速度分析方法的速度谱

图 5 是采用叠加能量法和统计相位相关法的叠加剖面对比图，通过对比可以看出，采用统计相位相关法的叠加剖面上，仍保持了相同的浅层地质特征，而中深层的构造成像质量明显改善，同相轴连续性增强，波组特征清楚，层间信息丰富。



**Figure 5.** The stack profiles of different velocity analysis methods  
**图 5.** 不同速度分析方法的叠加剖面

#### 4. 结语

通过对速度分析方法的研究分析，在近地表高差大、岩性差异大、页岩层埋深大、波场复杂的区域，统计相位相关法计算速度谱的效果较好。该方法利用相位信息，不但可以识别较弱波组，且计算过程中不受边界效应影响，纵向的时间分辨率和横向的速度分辨率均较高，抗噪性强，速度谱能量团易于区分，明显优于叠加能量法。应用统计相位相关法的最终成像效果好，中深层的波组成像质量得到了明显提高，满足了复杂波场页岩气探区的勘探要求，为类似探区勘探提供了借鉴。

#### 参考文献

- [1] 李振春, 张军华. 地震数据处理方法[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2004: 1-308.

- [2] 李庆忠. 走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 70-80.
- [3] 潘继平, 乔德武, 李世臻, 等. 下扬子地区古生界页岩气地质条件与勘探前景[J]. 地质通报, 2011, 30(2): 1671-2552.
- [4] Turhan, T.M. and Koehler, F. (1969) Velocity Spectra-Digital Computer Derivation and Applications of Velocity Functions. *Geophysics*, **34**, 859-881. <https://doi.org/10.1190/1.1440058>
- [5] De Vries, D. and Berkhout, A.J. (1984) Velocity Analysis Based on Minimum Entropy. *Geophysics*, **49**, 212-2142. <https://doi.org/10.1190/1.1441629>
- [6] Biondi, B.L. and Kostov, C. (1989) High-Resolution Velocity Spectra Using Eigenstruture Methods. *Geophysics*, **54**, 832-842. <https://doi.org/10.1190/1.1442712>
- [7] Simon, K. (1991) Asymptotically Linear Velocity Analysis with High Resolution in Time Domain. *Geophysics*, **56**, 1840-1848. <https://doi.org/10.1190/1.1442997>
- [8] 吴树初, 罗国安. 相关速度谱和复数道相关速度谱[J]. 石油地球物理勘探, 1990, 25(3): 333-341.
- [9] 林小竹. 协方差速度谱[J]. 石油地球物理勘探, 1993, 28(4): 403-410.
- [10] Byun, B.S., Corrigan, D. and Gaiser, J.E. (1989) Anisotropic Velocity Analysis for Lithology Discrimination. *Geophysics*, **54**, 1564-1574. <https://doi.org/10.1190/1.1442624>
- [11] Alkhalifah, T. (1997) Velocity Analysis Using Nonhyperbolic Moveout in Transversely Isotropic Media. *Geophysics*, **62**, 1839-1854. <https://doi.org/10.1190/1.1444285>
- [12] Huub, D. and Alexander, C. (2006) Nonhyperbolic Moveout Analysis in VTI Media. *Geophysics*, **71**, D59-D71. <https://doi.org/10.1190/1.2194901>
- [13] Brahim, A., Bjorn, U. and Didier, R. (2009) Automatic Nonhyperbolic Velocity Analysis. *Geophysics*, **74**, U1-U12.
- [14] Sergey, F. and Alexey, S. (2010) Generalized Nonhyperbolic Moveout Approximation. *Geophysics*, **75**, U9-U18. <https://doi.org/10.1190/1.3334323>
- [15] 徐翠娥, 郝晓红, 王影. 高密度双谱分析法在各向异性介质速度分析中的初步应用[J]. 海洋石油, 2008, 28(1): 1-5.
- [16] Morozov, L.B. and Smithson, S.B. (1996) High-Resolution Velocity Determination: Statistical Phase Correlation and Image Processing. *Geophysics*, **61**, 1115-1127. <https://doi.org/10.1190/1.1444032>
- [17] 王德利, 何樵登, 韩立国. 相位相关统计高分辨率速度分析[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(2): 198-204.
- [18] 张军华, 王静, 郑旭刚, 等. 关于几种速度分析方法的讨论及效果分析[J]. 石油物探, 2009, 48(4): 347-353.
- [19] 谭胜章, 杜惠平, 宋国良, 等. 高精度三维地震资料采集技术[J]. 石油物探, 2007, 47(1): 74-80.
- [20] 王西文, 赵邦六. 地震资料采集方式对地震处理的影响研究[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 840-852.
- [21] 胡英, 张研, 陈立康, 等. 速度建模的影响因素与技术对策[J]. 石油物探, 2006, 45(5): 503-507.
- [22] 郭树祥. 高分辨率地震资料处理中的优化速度分析方法[J]. 石油物探, 2004, 43(1): 80-82.
- [23] De Bazelaire, E. (1988) Nomudmoveou Revisited: Inhomogeneous Media and Curved Interfaces. *Geophysics*, **53**, 143-157. <https://doi.org/10.1190/1.1442449>

[编辑] 龚丹

**Hans** 汉斯**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2471-7185, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>期刊邮箱: [jogt@hanspub.org](mailto:jogt@hanspub.org)