

文章编号: 1000-0747(2018)02-0265-10 DOI: 10.11698/PED.2018.02.09

多滑脱构造分析及深层背斜判识

陈竹新, 雷永良, 胡英, 王丽宁, 杨庚

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05003-001); 中国石油天然气股份有限公司科技重大专项(2016B-0501, 2016E-0601)

摘要: 基于滑脱褶皱正演模型的分析, 提出在时间域地震剖面中开展多滑脱构造分析和深层背斜真实性判识的方法, 主要包括利用均匀速度场对时间偏移地震剖面进行时深转换、对获得的伪深度域剖面进行构造解释和测量、利用测量的构造起伏面积和深度开展分段相关关系分析。基于构造起伏面积-深度相关关系可开展构造层划分、滑脱面和构造缩短量厘定以及深层构造真假判识。构造起伏面积-深度的分段性是多滑脱构造的典型特征, 而面积-深度的线性不相关可指示地层未褶皱变形或存在假背斜构造。在不考虑面积-深度不确定性的情况下, 分段的斜率可指示各滑脱构造层的差异缩短量; 相邻分段的交点指示了滑脱面与参考面的间距, 进而厘定原始时间域剖面中的滑脱面位置。该方法的提出有助于深入挖掘和利用时间域地震资料、明确复杂构造区的地质结构和评估深层勘探目标风险等, 在准噶尔盆地南缘和川东褶皱带应用后效果较好。图 14 参 30

关键词: 多滑脱构造; 背斜; 时间域地震剖面; 面积-深度法; 复杂构造区; 准噶尔盆地南缘; 川东褶皱带

中图分类号: TE121.2

文献标识码: A

Structural analysis of multi-level detachments and identification of deep-seated anticline

CHEN Zhuxin, LEI Yongliang, HU Ying, WANG Lining, YANG Geng

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on forward modeling of detachment fold, this study presents a method to analyze multi-level detachment structures and identify the authenticity of deep-seated anticlines using time-domain seismic section. The steps include the conversion of the time-migrated seismic image into depth domain image using a constant velocity field, structural interpretation of the depth seismic image, measurement of each structural relief area and each height above reference level, plotting of area-height relationship chart with piecewise fitting etc. The area-depth correlation can help the division of structural sequences, the definition of detachment levels, the calculation of the tectonic shortening, and the identification of deep-seated structure. The segment area-height relationship is a feature of multi-level detachment structures, while little or no linear correlation between area and height is an indicator of non-deformation or pseudo-anticline. Regardless of the uncertainty of area-height relationship, the segment slopes will correspond to the differential shortenings of multi-level detachments, the intersection between adjacent segments will give the height of detachment surface above reference level and then help define the detachment level in original time-domain seismic section. This method can make use of time-domain seismic data to determine the geologic structure of complicated structure areas and assess risks of deep exploration targets. It has achieved good results in southern Junggar and eastern Sichuan areas.

Key words: multi-level detachments; anticline; time-domain seismic section; area-height relationship; complicated structure area; southern Junggar Basin; eastern Sichuan fold belt

引用: 陈竹新, 雷永良, 胡英, 等. 多滑脱构造分析及深层背斜判识[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 265-274.

CHEN Zhuxin, LEI Yongliang, HU Ying, et al. Structural analysis of multi-level detachments and identification of deep-seated anticline[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(2): 265-274.

0 引言

地震和钻井资料是研究和认识复杂构造区地下地质结构的关键。勘探上获得的人工反射剖面通常是时间域地震资料, 利用精细速度模型进行时深转换, 可以将它转变为深度域地震资料, 进而逼近真实的地质结构, 认识地下的构造圈闭。但在复杂挤压构造区,

深层地质结构的分析至少存在 3 方面的影响: ①构造变形往往受滑脱层控制, 可能存在深、浅层的结构差异和多套变形层在垂向上的叠置; ②深、浅层地震波速纵、横向变化大, 可能导致深层地震反射成像异常, 如浅构造层的强烈褶皱抬升或者异常地质体(如盐聚集)的发育会造成深层地震反射在时间域剖面上被异常拉升, 形成构造假象^[1-4]; ③地震波的时深关系通常

难以精确厘定,速度模型的差异和多解性对地质结构的解释成果有着直接的影响^[5-6]。构造的叠置、异常地质体的发育、地震资料的异常以及处理的多解性等因素制约着复杂构造区深层地质结构的认识,同时也给油气圈闭的落实带来风险。

滑脱层对中国中西部地区褶皱冲断带地质结构的影响较为显著。例如淮南冲断带^[7-10]、库车冲断带^[11-15]、川西冲断带^[16-18]、川东褶皱带^[19-20]等,在这些构造带的建模中,对滑脱层的分析通常是认识深层结构的切入点。但从以往的研究来看,多数是结合区域地质条件来分析单滑脱变形,或者利用“面积-深度”法^[21-22]来定量厘定深度域地震资料中的滑脱面^[23-27],很少对多滑脱构造的分析方法开展研究,并对时间域资料上深层构造的真实性(如存在假背斜)进行判断。其中,一方面可能归因于可靠的深度域地震资料难以获得,另一方面可能受制于深层地震资料信噪比低、成像差。

鉴于复杂构造区精确的深度域地震资料难以获得,探讨利用时间域地震资料开展构造分析是本文研究的出发点。本文基于一个双层滑脱结构模型,结合时深转换模型和地震处理模型结果来分析滑脱褶皱的面积-深度法在时间域地震资料中的适用性,提出多滑脱构造的构造层划分、构造缩短量厘定、滑脱面位置计算和深层背斜判识的方法,并开展相关的剖面案例分析。

1 双滑脱结构模型

预设一个双滑脱结构模型,用以检验多层次滑脱构造中褶皱的面积-深度关系。模型厚 12 km,垂向上分 3 个构造层:上构造层(层编号为①—⑩)的挤压缩短量为 3 km,中构造层(层编号为⑪—⑲)的挤压缩短量为 1 km,下构造层(层编号为 B₁—B₄)未变形,滑脱面置于海拔-5.5 km 和-10.0 km(见图 1)。模型的变形结构由构造正演模拟获得,保持各层面积、厚度与层长等参数基本不变(各层面积误差均小于 0.3%),模型暂不考虑构造层内部的层间剪切作用^[28-29]。

对变形结构中各小层顶面的构造起伏面积(S_t)和层面到预设(任意)参考面(H_t)的距离 H_t (见图 1)进行测量^[21-22]。模型中参考面 H_t 的位置为海拔-12 km。尽管滑脱面深度已知,但为了通过相关关系计算来厘定滑脱面的深度,因此忽略滑脱面附近分层的测量(如图 1 中分层⑩—⑲和⑲,下文同)。

从 S_t - H_t 关系来看(见图 2),二者的线性关系与模型的 3 个构造层分别对应,呈分段特征。上构造层和中构造层的线性拟合斜率分别约为 3 和 1,与模型预设的

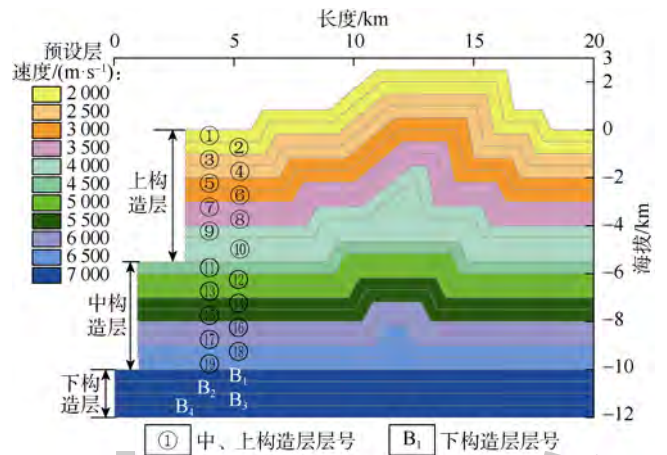


图 1 双滑脱变形结构模型

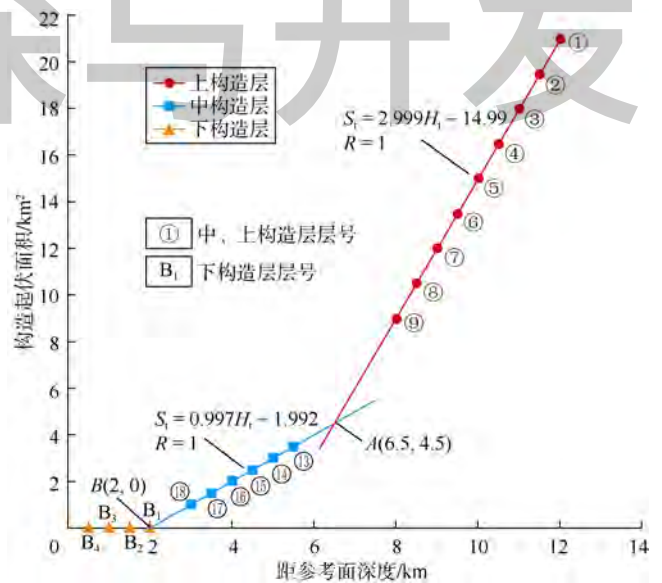


图 2 双滑脱模型的 S_t - H_t 关系

分层缩短量 3 km 和 1 km 一致。下构造层由于未变形,表现为线性不相关和斜率为 0。

此外,从相邻构造层拟合线的交点坐标所对应的深度和面积来看,交点 A 指示上构造层底部滑脱面位于参考面之上 6.5 km,受中构造层叠置影响的面积为 4.5 km²;交点 B 指示中构造层底部滑脱面位于参考面之上 2 km,构造起伏面积不受下构造层影响。由此,可计算出两个滑脱面的位置分别为海拔-5.5 km 和-10.0 km。

分析表明,多滑脱结构模型的 S_t - H_t 关系呈分段性。理想情况下,在不考虑层间剪切作用的变形构造层中, S_t - H_t 关系通常表现为高度线性相关,拟合的线性斜率可指示构造缩短量;在未变形层中表现为线性不相关,其拟合相关系数和斜率为 0。

2 时深转换双滑脱模型

基于图 1 的地层结构模型和预设层速度,采用自

激自收方式地震正演模拟获得时间域剖面(见图3a)。其中,上、中、下3个构造层均出现褶皱构造的形态,尤其是中构造层和下构造层几乎为同步的褶皱变形。与图1模型相比较,图3a反映出在多层构造叠置的情况下时间域剖面有可能存在构造假象。如果没有准确的速度场资料,很难将这一时间域畸变恢复到真实的结构状态或者消除构造假象。因此,在时间域剖面中分析滑脱面深度和判识深层背斜的真假极为必要。

为了对时间域数据开展面积-深度分析,需要取得相应的深度数据。基于均匀速度场和构造层速度场的时深转换均是可行的。利用构造层速度场开展时深转

换会加大深度刻度和时间刻度之间相互换算的难度,因此,利用均匀速度场进行时深转换是最简单、最有效的模式。经过简单时深转换后的深度域剖面是一种伪深度剖面,其与时间域剖面的结构形态基本一致,仅垂向比例发生了变化,并不能反映真实的地下地质结构。这种均匀速度场时深转换的意义在于方便深度刻度和时间刻度之间的相互换算,最终可以将分析结果标定回时间域剖面中。

应用4000 m/s的均匀速度场,将时深转换获得的时间域剖面模型(见图3a)转换为伪深度域剖面结构(见图3b),参考面海拔 H_r 为-14.92 km(见图3b),并开展 S_t 、 H_t 测量和统计分析(见图4)。

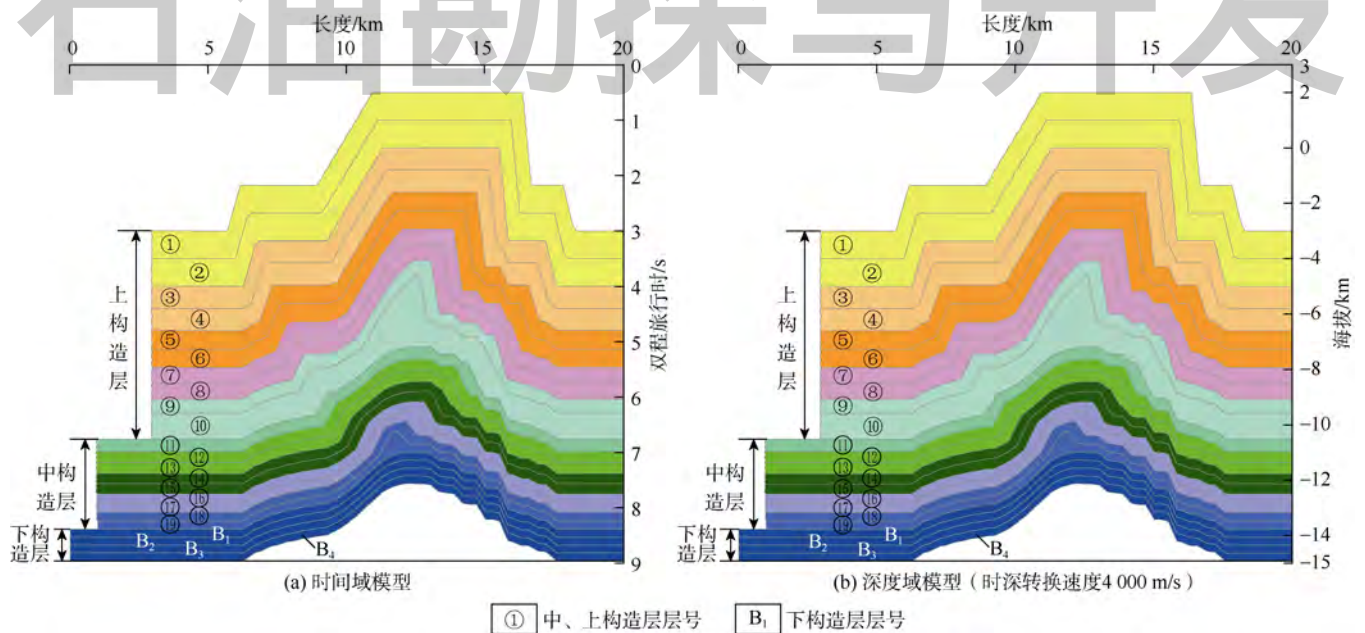


图3 时深转换双滑脱模型

图4与图2的分段特征相似,3组分段与3个构造分层分别相对应,分段线性拟合的斜率指示上、中、下构造层的缩短量分别为3 km、1 km和0 km。通过相邻构造层拟合线的交点坐标 $A(4.34, 19.26)$ 和 $B(1.14, 16.06)$ 可计算出两个滑脱面分别位于剖面中未变形区域的海拔-10.58 km和-13.78 km(见图3b)。

但上述计算获得的海拔-10.58 km和-13.78 km并不代表真实的滑脱面位置。由于研究关注的是时间域剖面,因此,可以通过速度场反算获得时间域剖面中的滑脱面位置为6.79 s和8.39 s,与预设的滑脱面位置一致(见图3a)。这一结果证明,上述的处理和分析对时间域剖面中滑脱面的厘定是有效的。

分析表明,对于时深转换时间域数据,结合均匀速度场的时深转换得到伪深度数据通过 S_t - H_t 关系的分段特

征可以厘定叠加构造的分层性,利用各分层数据的相关性可判识背斜构造的真实性。其中,真实变形的构造层将表现出线性相关,且线性拟合的斜率可指示构造缩短量,而假背斜构造往往表现出线性不相关或斜率趋近于0。

3 反射地震处理的时间域双滑脱模型

不同于时深转换模型,勘探上的地震处理实际上包含不断消除构造假象的复杂过程。本文对构造模型(见图1)进行地震正演处理,得到水平叠加时间剖面(见图5a)和叠后偏移时间剖面(见图5b)。水平叠加时间剖面在结构上整体与时深转换模型相似,在深层存在畸变(见图5a)。经过多次偏移处理后获得的叠后偏移时间剖面在一定程度上可以降低深层畸变的幅度,但不能保证完全消除影响(见图5b)。因此,对于这种叠合时

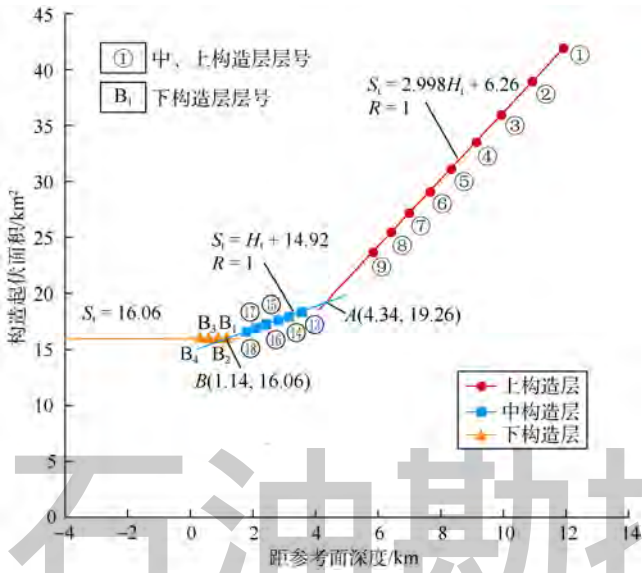
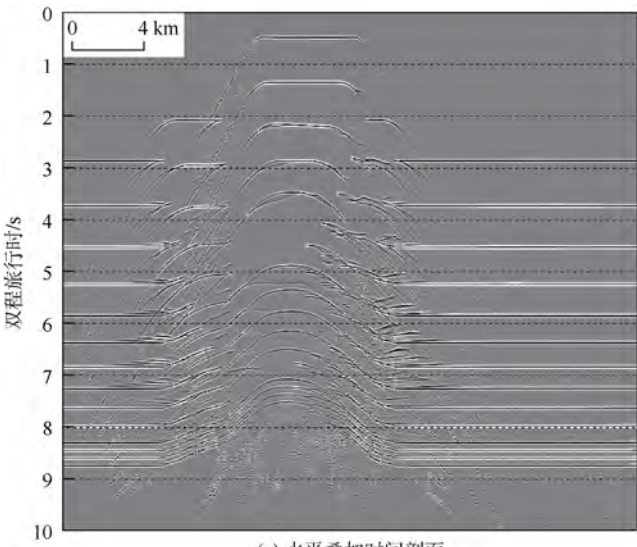


图4 时深转换模型的 S_t-H_t 关系

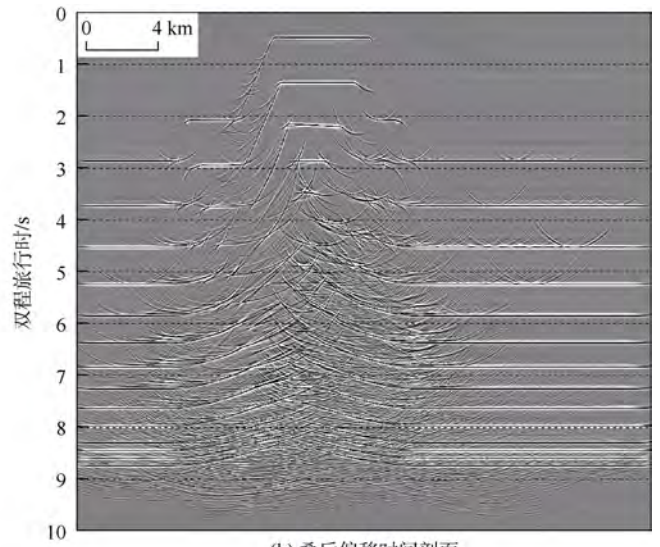
间偏移剖面，仍有必要判识其深层背斜构造的真假。

以 2 000 m/s 的均匀速度场，对叠后偏移时间剖面（见图 5b）进行了时深转换，并由地质人员根据地震同相轴的连续性对地震剖面做出构造解释（见图 6）。由于叠后偏移剖面的波组复杂，解释的结构和分层特征并未严格参考初始模型。因此，模型被重新划分为 14 个小层，但结构上，之前的中、下构造层在解释剖面中无明显区分（见图 6）。

设置参考面海拔 H_t 为 -10 km，并对 14 个小层分别开展 S_t 、 H_t 测量和统计分析（见图 6、图 7）。分析结果显示，模型的 3 个构造层可以通过数据的 3 个分段关系清晰划分，且分段拟合的直线斜率与初始模型的预设值近似（见图 7）。下构造层的斜率为 0 意味着该层本质上并未发生变形，因而可以推断下构造层所表现出的背斜构造是由于速度拉升造成的假象（见图 5、图 6）。



(a) 水平叠加时间剖面



(b) 叠后偏移时间剖面

图5 双滑脱模型的反射地震处理结果

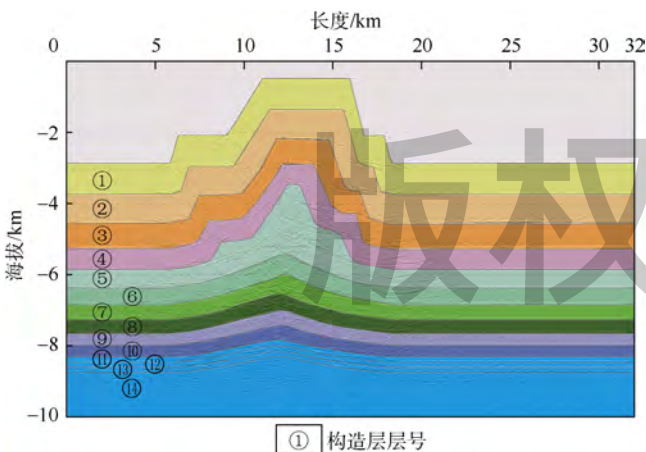


图6 反射地震处理模型的深度解释剖面

然而，与图 2 有所不同的是，相邻线段之间没有相交点，因而不能精确计算滑脱面位置（见图 7），只

能通过相邻构造分层来估算滑脱面所处的位置范围。如图 7 中的阴影部分宽度指示两个滑脱面的位置可能分别处于海拔 -5.86 ~ -6.38 km 和 -8.00 ~ -8.31 km，反算回时间域剖面（见图 5b），则分别对应 5.86 ~ 6.38 s 和 8.00 ~ 8.31 s。造成这一问题的原因是由于中、下构造层的层面解释未严格参考初始模型，可能导致测量的面积被严重低估。对于这种情况，滑脱面位置需要综合上述估算结果、地震剖面现象以及地质依据进行确定。

综上所述，对于叠加偏移的时间剖面，尽管可能存在地震处理和结构解释上的一些复杂性和不确定性，但对于叠加构造的分层特征是可以厘定的，且适用上文提出的深层背斜构造真假的判识依据。

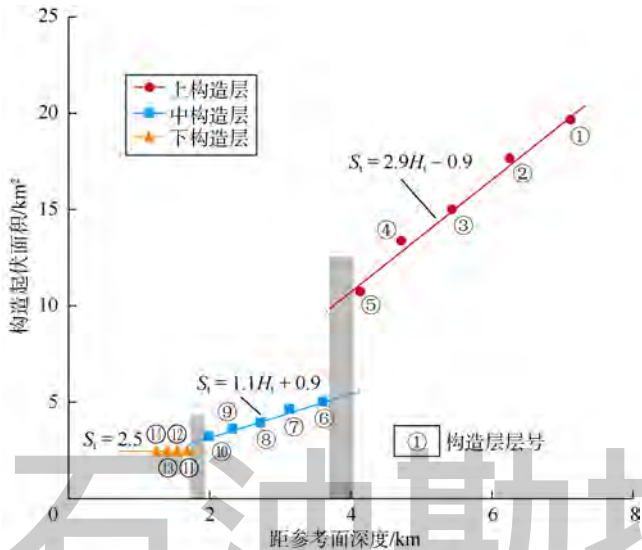


图7 反射地震处理模型的 S_t-H_t 关系(阴影宽度区间内发育滑脱面)

4 实例分析

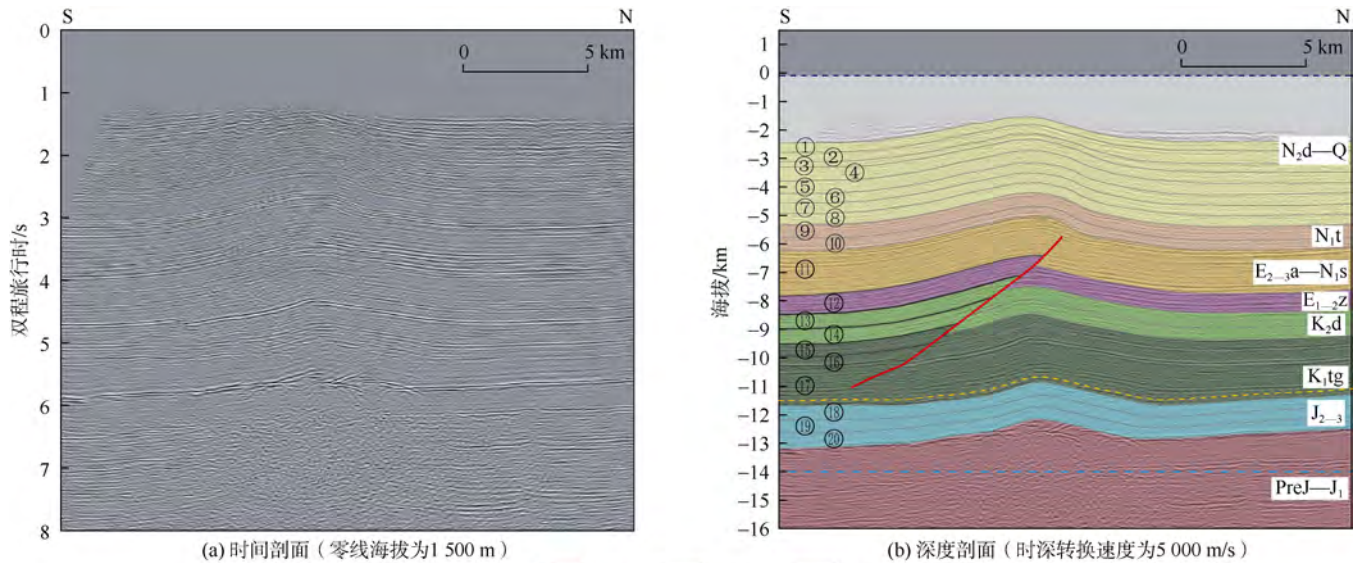
选取准噶尔盆地南缘和川东褶皱带的 2 条二维时间地震剖面作为案例进行分析，方便研究者更好地

理解上述技术的应用。

4.1 准噶尔盆地南缘某构造的时间地震剖面分析

以过准噶尔盆地南缘某构造的 1 条时间地震剖面为例(见图 8a)，其结构自上而下整体表现为宽缓的背斜。为了厘定该构造中可能的滑脱层位置和判识深层背斜的真实性，研究应用 5 000 m/s 的均匀速度进行时深转换，并开展构造解释(见图 8b)。

虽然该剖面结构简单，但其 S_t-H_t 关系复杂(见图 9)。根据其数据分段特征，可划分出 4 个构造层(见图 9)。其中，由①—④小层组成的上构造层和由⑤—⑪小层组成的中构造层均表现为线性负相关($R < 0$)，这在构造上可能与同构造的生长地层相关^[27,30]而非滑脱作用的构造分层。对于以白垩系为主的下构造层(⑫—⑳小层)，线性拟合斜率指示该构造层约有 1.2 km 的变形缩短。对于深部底构造层，尽管其结构形态在剖面上表现出与下构造层一致，但相关系数和斜率趋近于 0，意味着其背斜形态并非真实的背斜构造，而是速度拉升造成的假象。



(a) 时间剖面(零线海拔为1500 m) (b) 深度剖面(时深转换速度为5000 m/s)

① 构造层层号 断层 参考面 滑脱面 地表地形线
Q—第四系；N_{2d}—新近系独山子组；N_{1t}—新近系塔西河组；N_{1s}—新近系沙湾组；E_{2-3a}—古近系安集海河组；E_{1-2z}—古近系紫泥泉子组；K_{2d}—上白垩统东沟组；K_{1tg}—下白垩统吐鲁群；J₂₋₃—中—上侏罗统；J₁—下侏罗统；PreJ—前侏罗系

图8 准噶尔盆地南缘某构造的地震及地质解释剖面

此外，结合下构造层和底构造层分段拟合直线的交点 A (2.5, 3.7)(见图 9) 计算出滑脱层位于海拔 -11.5 km (见图 8b)，对应时间剖面中 5.2 s 的位置。

构造分析表明该构造整体显示有 1 个滑脱褶皱变形，并有两期生长地层记录。滑脱面位于下白垩统底部(5.2 s 处)，与区域上对该套滑脱层的认识是一致的。剖面中滑脱面之上的白垩系构造层发生了约 1.2 km 的

变形缩短(见图 8a)，而滑脱面之下的中—上侏罗统并未发生褶皱变形。该剖面中存在中—上侏罗统呈背斜形态的构造假象。

4.2 川东褶皱带某构造的时间地震剖面分析

对川东褶皱带某滑脱构造带的 1 条时间地震剖面(见图 10a) 进行分析。经 4 000 m/s 均匀速度时深转换和构造解释后，获得伪深度域剖面(见图 10b)，其结构

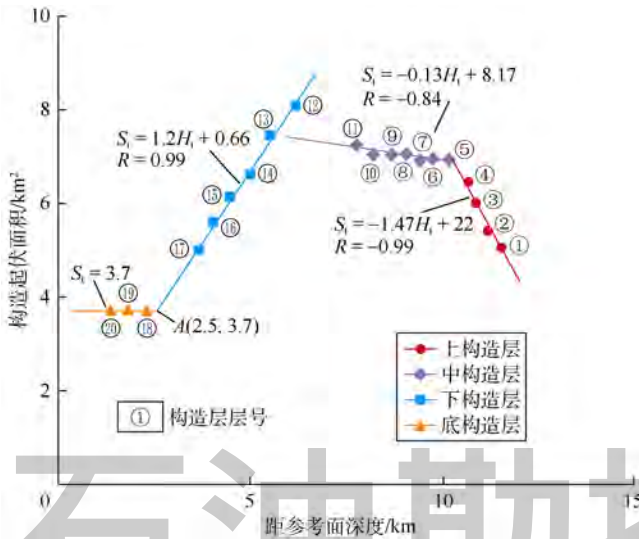


图9 准噶尔盆地南缘地区某构造的 S_t-H_t 关系

包含与滑脱作用相关的上、中、下3个构造层。

S_t-H_t 关系图中参考面海拔 H_t 设置于 -7.20 km ，数据的3分段关系与结构剖面中3个构造层相对应(见图11)。3个分段的拟合直线交点为 $A(3.14, 2.69)$ 和 $B(2.30, 0.80)$ ，对应指示伪深度剖面中两个滑脱面分别位于参考面之上 3.14 km 和 2.30 km ，即滑脱面位于海拔 -4.06 km 和 -4.90 km 处。将此结果反算回时间域剖面(见图10a)，获得两个滑脱面分别位于 2.03 s 和 2.45 s 的位置。

对于中、上构造层，线性拟合的相关性和斜率指示它们分别发生了 2.25 km 和 0.98 km 的缩短构造变形(见图11)。其中，中构造层的构造缩短大于上构造层，可能与中构造层的挤压楔入作用有关。下构造层中拟合的斜率为0，指示该层在该时间剖面中的背斜构造是假象，真实深度结构中应未发生褶皱变形。

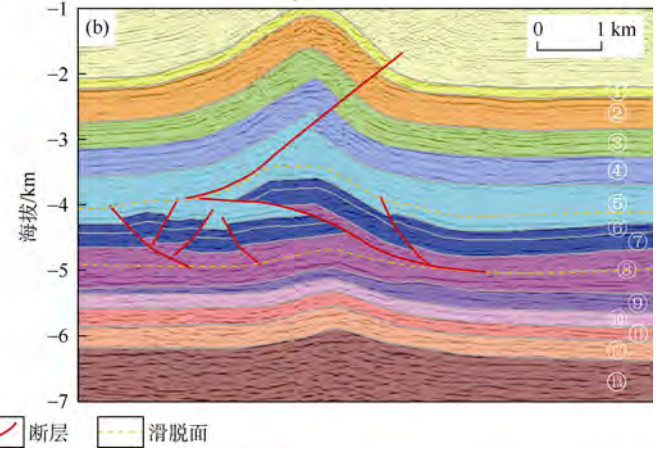
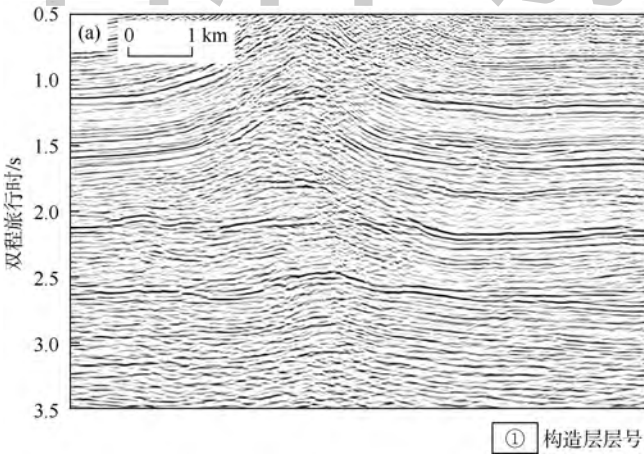


图10 川东褶皱带某构造的地震及地质解释剖面

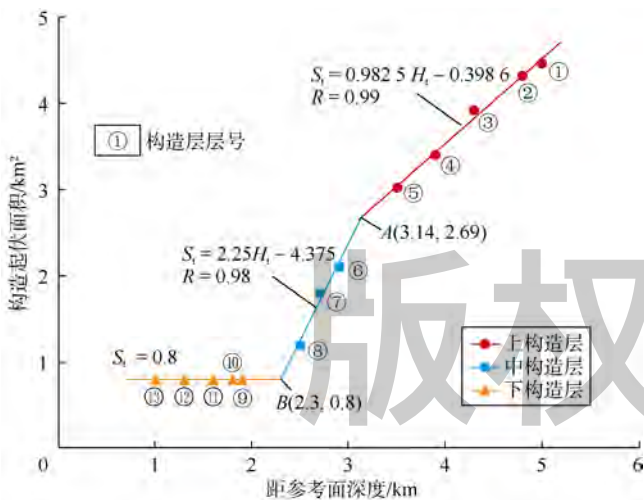


图11 川东褶皱带某构造的 S_t-H_t 关系

传统上，它可以通过构造解释提供地下地质结构的信息。但这些信息在可靠性和定量性方面是有限的，尤其对于复杂构造区而言，结构上的多构造层叠置和深层的虚假构造信息可能导致勘探目标不落实。

本研究基于模型正演和勘探实例解剖提出了一种在时间域地震剖面中开展构造分析的方法。其处理过程主要包括对时间域剖面进行均匀速度的时深转换、对获得的伪深度域剖面进行地震构造解释和测量、利用测量的构造起伏面积和距参考面距离开展分段相关关系分析等。综合分析，该方法对于解析多滑脱构造是适用的。如在受多滑脱或多层次构造叠置影响的地质结构中，通常可以表现出分段的相关性(或不相关性)；不考虑层间剪切作用，真实的构造变形中起伏面积和距参考面距离将表现出一定的线性相关(其正相关斜率通常代表构造缩短量)，而虚假的构造变形则表现出线性不相关(相关系数和线性斜率趋近于0)。此

5 讨论

5.1 时间域地震资料的多滑脱构造分析

时间域地震资料是油气勘探中常用的基础资料。

方法在一定程度上可以有效地利用时间域地震资料，从中提取出更多确切的构造信息，用以区分构造分层、厘定构造层的缩短量、量化滑脱面位置、判识深层构造的真实性。这有助于复杂构造区的地质结构解析和深层勘探目标风险评估。

5.2 时深转换速度模型的有效性

严格说来，对时间域地震数据进行时深转换需要依赖准确的速度模型。但这在多数情况下难以实现。实例分析表明，应用均匀速度对多滑脱构造的分析是可行的。均匀速度便于时间域和深度域的地震数据在比例上进行简单的互算，且不影响分析结果的准确性。

但并非所有的速度模型都适用于时深转换处理。例如，本文曾尝试利用水平层状速度模型和垂向梯度速度模型来开展时深转换和多滑脱构造分析，但发现所得到的伪深度剖面存在很严重的结构畸变，其 S_t-H_t 的相关关系极不合理。因此，基于水平层状速度模型或垂向梯度速度模型的时深转换在多滑脱构造分析中并不适用。

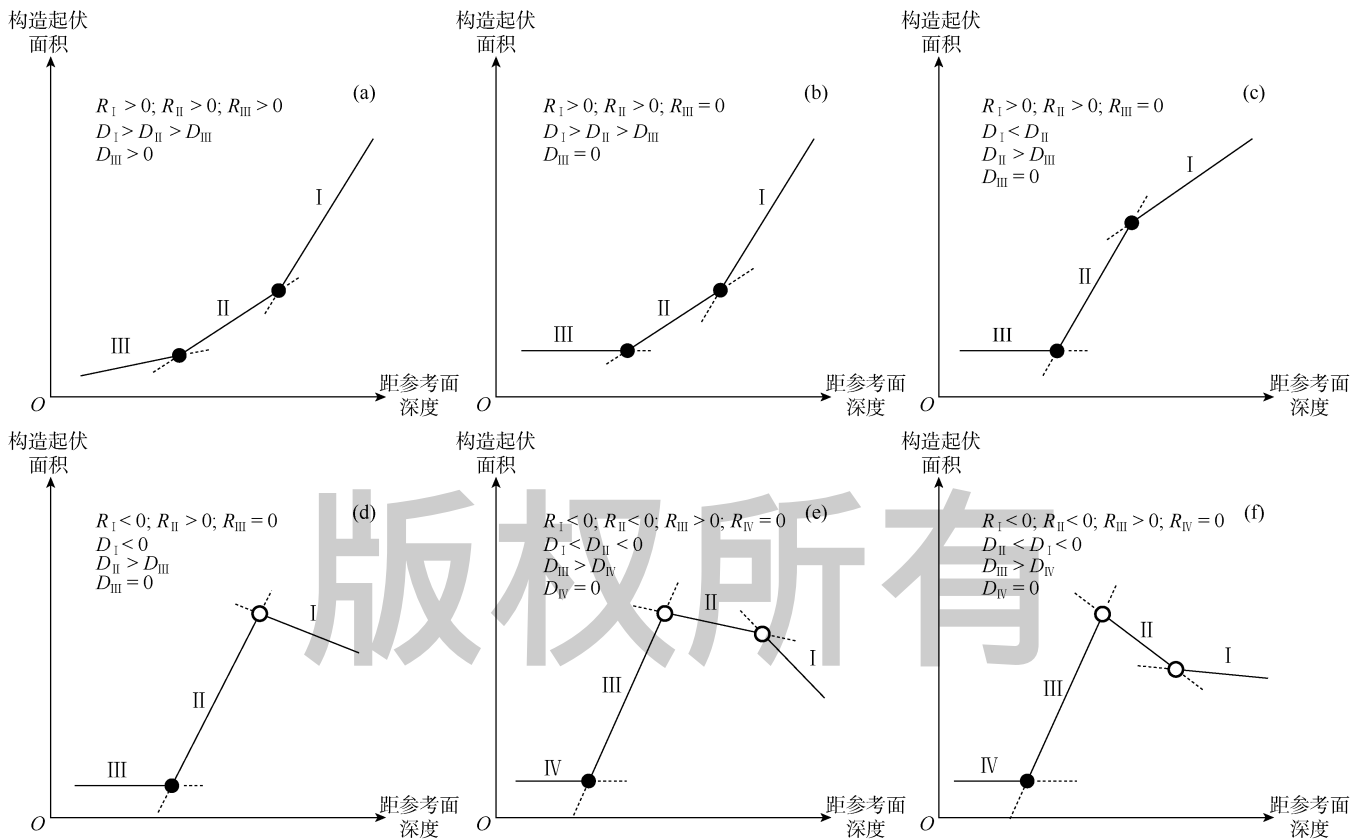
5.3 多构造层叠置结构中的 S_t-H_t 关系

在多滑脱挤压构造中，由于滑脱面的分隔，剖面上

的地质结构通常是分层的，对应的 S_t-H_t 关系在理想条件下也将会表现出分段的相关性 ($R>0$ 为正相关)，且相邻分段的交点通常与滑脱面所处的位置有关，分段拟合的斜率指示构造层的缩短量 (D)，斜率越大则构造层的缩短量越大。缩短量大于 0 ($D>0$)，意味着构造层存在挤压缩短，而等于或趋于 0 则意味着地层未变形。

利用 S_t-H_t 关系区分的多滑脱构造层，相邻构造层之间的变形缩短必然存在差异。因此，根据构造缩短量的变化，多滑脱的构造分层可能存在多种配置关系（见图 12a—12c）。对于自上而下分 3 个构造层 I、II 和 III 的模型，图 12a 和图 12b 均表明层缩短量自上而下减少 ($D_I>D_{II}>D_{III}$)，但图 12a 的下构造层 (III) 存在构造变形 ($D_{III}>0$)，而图 12b 的下构造层 (III) 则未发生变形 ($D_{III}=0, R_{III}=0$)；图 12c 的配置中 $D_I<D_{II}$ 说明中构造层 (II) 的缩短量大于上构造层 (I)，这一模式与川东地区的实例（见图 11）相类似。

然而，并非所有的构造层叠置都与滑脱作用相关。从准噶尔南缘的实例中可以发现，除滑脱构造分层外， S_t-H_t 的负相关 ($R<0$) 可以揭示由生长地层或披覆地层所组成的构造层（见图 9）。在滑脱构造中，如果同时



$R>0$ (正相关) 对应滑脱构造； $R<0$ (负相关) 对应生长或披覆地层； R 等于或趋于 0 为未变形

图 12 多构造层叠置结构模型的 S_t-H_t 关系

伴有生长或披覆地层^[30], S_t-H_t 关系往往是复杂多变的 (见图 12d—12f)。在图 12d 的 3 个构造层 I、II 和 III 中, 构造层 I 由生长或披覆地层组成 ($R_I < 0$), II 为滑脱构造层 ($R_{II} > 0$), III 为未变形层 ($R_{III} = 0$); 在图 12e 和图 12f 的 4 个构造层 I、II、III、IV 中, 构造层 I 和 II 均由生长或披覆地层组成 ($R_I < 0, R_{II} < 0$), 其中图 12e 的模式与准噶尔盆地南缘实例相类似, $D_I < D_{II} < 0$ 指示构造层 I 发育期间的沉积/抬升比率较构造层 II 要小得多, 而图 12f 的情况则相反。

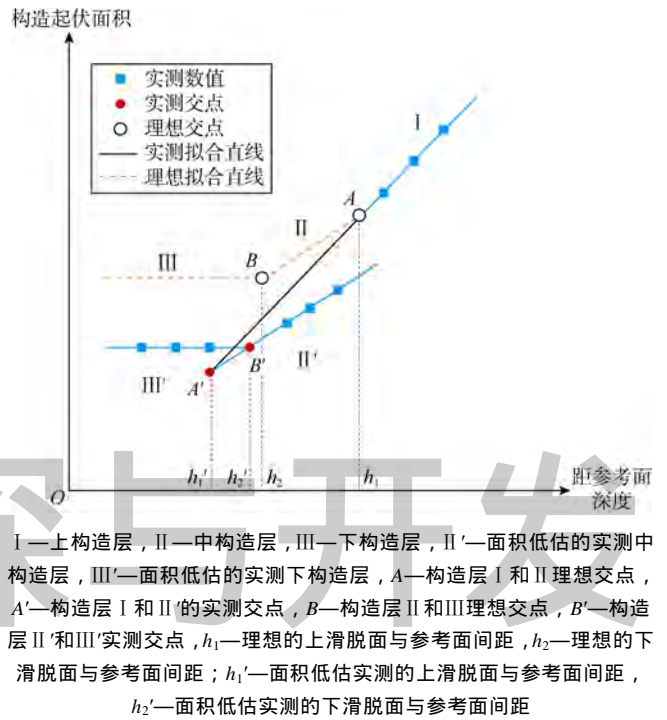
5.4 S_t-H_t 关系的不确定性

基于 S_t-H_t 关系分析多滑脱构造, 地震解释、地层剥蚀或测量的不确定性可能会引起 S_t 或 H_t 的高估或低估, 这对于变形层滑脱面位置或构造缩短量的精确厘定有一定影响。

图 13 展示了 1 种中、下构造层 S_t 可能被低估的情况, 类似关系已出现在上文的案例中 (见图 7)。

理想条件下, 根据 3 个构造层 I、II、III 的交点 A、B 对应的深度 h_1 、 h_2 可以厘定滑脱面的位置。然而, 由于中构造层 (II) 下构造层 (III) 的 S_t 被低估, 它们的实测数据分别分布于 II' 和 III', 导致拟合交点 A' 和 B' 的位置与地质解释不匹配, 因而通过深度 h_1' 、 h_2' 不能合理地推导出滑脱面所处的位置。

深度 H_t 被高估或低估的情况通常可能出现在原始地层非水平或不等厚的结构中。据此可建立一个底部非水平、上部地层不等厚的滑脱褶皱模型 (见图 14a)。其中, 上构造层褶皱缩短量为 2.068 km, 下构造层未变形, 滑脱面倾斜。由于剖面中地层非水平展布, 褶皱左、右两翼的地层距离参考面的深度是不一致的,



I—上构造层, II—中构造层, III—下构造层, II'—面积低估的实测中构造层, III'—面积低估的实测下构造层, A—构造层 I 和 II 理想交点, A'—构造层 I 和 II' 的实测交点, B—构造层 II 和 III 理想交点, B'—构造层 II' 和 III' 实测交点, h_1 —理想的滑脱面与参考面间距, h_2 —理想的滑脱面与参考面间距; h_1' —面积低估实测的上滑脱面与参考面间距, h_2' —面积低估实测的下滑脱面与参考面间距

图 13 中、下构造层 S_t 被低估情况下的 S_t-H_t 关系

H_t 的值将随测量位置的不同而变化。根据褶皱左翼地层距参考面深度、右翼地层距参考面深度及二者的平均深度建立 S_t-H_t 关系 (见图 14b)。对于上构造层而言, 3 组 S_t-H_t 关系的线性拟合斜率左翼小 (1.824)、右翼大 (2.383), 只有按平均深度拟合的斜率 (2.068) 与褶皱的缩短量相吻合。如果以构造缩短量为检验标准, 对于原始地层非水平或不等厚的褶皱变形, 在其 S_t-H_t 关系中 H_t 的高估可导致构造缩短量被低估, 反之则导致构造缩短量被高估。

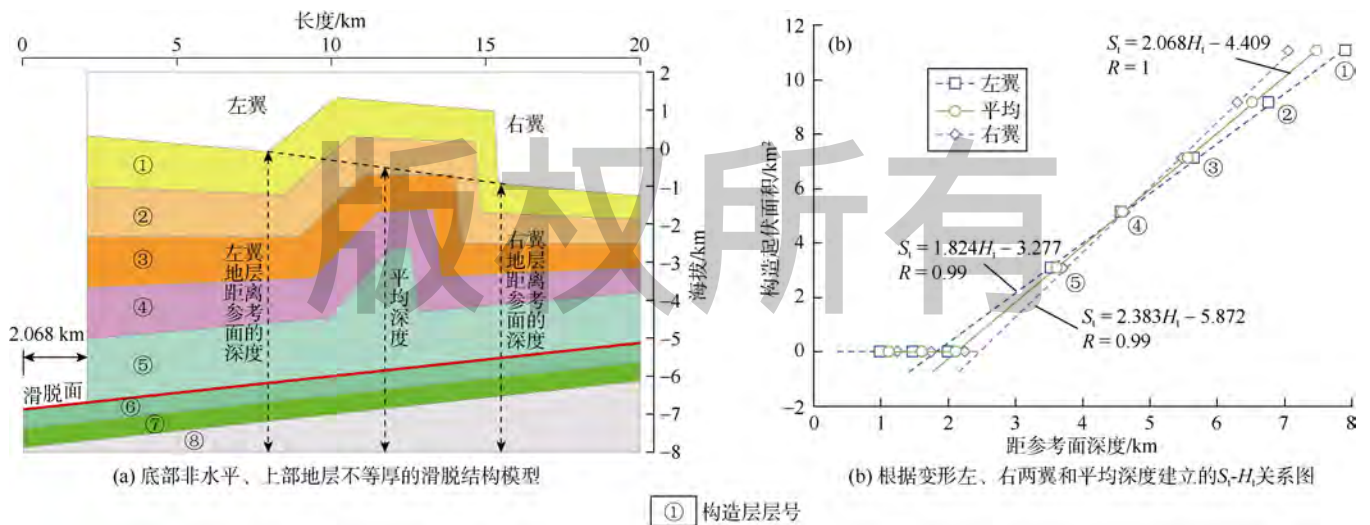


图 14 非水平地层结构的挤压滑脱模型及 S_t-H_t 关系

6 结论

提出一种在时间域地震剖面中开展多滑脱构造分析和深层构造真实性判识的方法。该方法包括：①利用任意均匀速度场对时间域地震剖面进行时深转换；②对获得的深度域剖面进行地震构造解释和测量；③利用测量的构造起伏面积和距参考面深度数据建立分段的 S_t-H_t 相关关系；④利用 S_t-H_t 关系划分构造层、厘定构造缩短量和滑脱面在时间域剖面中的位置，以及判识深层构造的真假。

利用 S_t-H_t 关系开展多滑脱构造分析， S_t-H_t 的分段性是构造层划分的依据。在多构造层叠置的复杂地质结构中，构造层的配置模式可能是多样的，包含了滑脱构造的叠置和生长地层或披覆地层的叠置等。在不考虑地质结构、地层剥蚀和测量引起的不确定性的情况下， S_t-H_t 的分段线性拟合斜率可指示各个构造层的缩短量，通过相邻分段的交点可计算滑脱层位置。

S_t-H_t 的线性不相关（相关系数和线性斜率趋近于0）可以作为判识深层地层未变形或存在地震构造假象的依据。本方法对于排除深层地震成像畸变的干扰、落实深层构造规模、降低勘探风险具有重要意义。

地震资料处理与解释、地层剥蚀或测量的不确定性可能会引起构造起伏面积（ S_t ）或深度（ H_t ）的高估或低估，对于变形层滑脱面位置或构造缩短量的精确厘定有一定影响，但并不影响多构造层的划分以及深层背斜构造的真实性判识。

符号注释：

D ——计算的构造层缩短量，km； H_r ——任意测量参考面位置，km； H_t ——原始未变形的地层顶部至任意测量参考面的垂向距离，km； R ——相关系数； S_t ——褶皱的构造起伏高出原始未变形层面的变形面积， km^2 。

参考文献：

- [1] 伍志明, 李亚林, 贺振华, 等. 高陡复杂构造的地震成像技术进展[J]. 天然气工业, 2004, 24(2): 40-43.
WU Zhiming, LI Yalin, HE Zhenhua, et al. Progress in seismic imaging techniques of high-steep complicated structures[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(2): 40-43.
- [2] 张研, 徐凌, 陈立康. 前陆冲断带复杂构造地震成像技术对策[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 62-64.
ZHANG Yan, XU Ling, CHEN Likang. Technical countermeasure of seismic imaging for complex structure in foreland overthrust belt[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5): 62-64.
- [3] 杨金华, 满益志, 刘洋, 等. 复杂构造成像能力及其存在问题[J].

天然气工业, 2008, 28(6): 34-36.

- YANG Jinhua, MAN Yizhi, LIU Yang, et al. Analysis on seismic image ability of complex structure[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 34-36.
- [4] 陈海清, 戴晓云, 潘良云, 等. 时间剖面上的假构造及其解决方法[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(5): 590-596.
CHEN Haiqing, DAI Xiaoyun, PAN Liangyun, et al. False structures on time domain seismic sections and corresponding resolutions[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(5): 590-596.
- [5] KIM Y C, SAMUELSEN C M, HAUGE T A. Efficient velocity model building for prestack depth migration[J]. The Leading Edge, 1996, 15(6): 751-753.
- [6] HERRON D A. Pitfalls in seismic interpretation: Depth migration artifacts[J]. The Leading Edge, 2000, 19(9): 1016-1017.
- [7] 汪新伟, 汪新文, 马永生. 准噶尔盆地南缘褶皱-冲断带的构造变换带特征[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(3): 345-354.
WANG Xinwei, WANG Xinwen, MA Yongsheng. Characteristics of structure transform zones in the fold-thrust belts on the southern margin of Junggar basin, Northwest China[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(3): 345-354.
- [8] 陈书平, 漆家福, 于福生, 等. 准噶尔盆地南缘构造变形特征及其主控因素[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 151-157.
CHEN Shuping, QI Jiafu, YU Fusheng, et al. Deformation characteristics in the southern margin of the Junggar Basin and their controlling factors[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 151-157.
- [9] 管树巍, 何登发, 雷永良, 等. 中国中西部前陆冲断带运动学分类、模型与勘探领域[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 66-78.
GUAN Shuwei, HE Dengfa, LEI Yongliang, et al. Kinematic classification, structural modeling and prospective fields of the foreland thrust belts in Midwest China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 66-78.
- [10] GUAN S W, STOCKMEYER J M, SHAW J H, et al. Structural inversion, imbricate wedging, and out-of-sequence thrusting in the southern Junggar fold-and-thrust belt, northern Tian Shan, China[J]. AAPG Bulletin, 2016, 100(9): 1443-1468.
- [11] SCHARER K M, BURBANK D W, CHEN J, et al. Detachment folding in the Southwestern Tian Shan-Tarim foreland, China: Shortening estimates and rates[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(11): 2119-2137.
- [12] 汤良杰, 余一欣, 杨文静, 等. 库车前陆褶皱冲断带前缘滑脱层内部变形特征[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 944-951.
TANG Liangjie, YU Yixin, YANG Wenjing, et al. Internal deformation features of detachment layers in the front of the Kuqa foreland fold-thrust belt[J]. Geology in China, 2006, 33(5): 944-951.
- [13] 何登发, 周新源, 杨海军, 等. 库车坳陷的地质结构及其对大油气田的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 19-32.
HE Dengfa, ZHOU Xinyuan, YANG Haijun, et al. Geological structure and its controls on giant oil and gas fields in Kuqa

- Depression, Tarim Basin: A clue from new shot seismic data[J]. *Geotectonica Et Metallogenia*, 2009, 33(1): 19-32.
- [14] LI S, WANG X, SUPPE J. Compressional salt tectonics and synkinematic strata of the western Kuqa foreland basin, southern Tian Shan, China[J]. *Basin Research*, 2012, 24(4): 475-497.
- [15] 唐鹏程, 饶刚, 李世琴, 等. 库车褶皱-冲断带前缘盐层厚度对滑脱褶皱构造特征及演化的影响[J]. *地质前缘*, 2015, 22(1): 312-327.
- TANG Pengcheng, RAO Gang, LI Shiqin, et al. The impact of salt layer thickness on the structural characteristics and evolution of detachment folds in the leading edge of Kuqa fold and thrust belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 312-327.
- [16] 汤良杰, 杨克明, 金文正, 等. 龙门山冲断带多层次滑脱带与滑脱构造变形[J]. *中国科学: 地球科学*, 2008, 38(S1): 30-40.
- TANG Liangjie, YANG Keming, JIN Wenzheng, et al. Multi-level decollement zones and detachment deformation of Longmenshan thrust belt, Sichuan Basin, southwest China[J]. *SCIENCE CHINA Earth Sciences*, 2008, 51(S2):32-43.
- [17] 王丽宁, 陈竹新, 李本亮, 等. 龙门山冲断带北段构造解析及有利区带预测[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(5): 539-545.
- WANG Lining, CHEN Zhuxin, LI Benliang, et al. Structural characteristics of the northern Longmenshan fold-thrust belt and the favorable exploration areas, Sichuan Basin, Southwest China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(5): 539-545.
- [18] LU R Q, HE D F, SUPPE J, et al. Structural model of the central Longmen Shan thrusts using seismic reflection profiles: Implications for the sediments and deformations since the Mesozoic[J]. *Tectonophysics*, 2014, 630: 43-53.
- [19] YAN D P, ZHOU M F, SONG H L, et al. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China)[J]. *Tectonophysics*, 2003, 361(3): 239-254.
- [20] WANG Z X, ZHANG J, LI T, et al. Structural analysis of the multi-layer detachment folding in Eastern Sichuan Province[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2010, 84(3): 497-514.
- [21] EPARD J L, GROSHONG R H. Excess area and depth to detachment[J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77(8): 1291-1302.
- [22] GROSHONG R H. Area balance, depth to detachment, and strain in extension[J]. *Tectonics*, 1994, 13(6): 1488-1497.
- [23] YU Y X, TANG L J, YIN J Y, et al. Calculation of depth to detachment and its significance in the Kuqa Depression[J]. *Petroleum Science*, 2006, 3(2): 34-38.
- [24] HUBERT-FERRARI A, SUPPE J, GONZALEZ-MIERES R, et al. Mechanisms of active folding of the landscape (southern Tian Shan, China)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B3): 485-493.
- [25] 谢会文, 尹宏伟, 唐雁刚, 等. 基于面积深度法对克拉苏构造带中部盐下构造的研究[J]. *大地构造与成矿学*, 2015, 39(6): 1033-1040.
- XIE Huiwen, YIN Hongwei, TANG Yangang, et al. Research on subsalt structure in the Central Kelasu Structure Belt based on the area-depth technique[J]. *Geotectonica Et Metallogenia*, 2015, 39(6): 1033-1040.
- [26] 许安明, 吴超, 尚江伟, 等. 面积深度法在库车坳陷北部盐下构造变形研究中的应用[J]. *天然气工业*, 2015, 35(6): 37-42.
- XU Anming, WU Chao, SHANG Jiangwei, et al. Application of area-depth method in studies on the deformation of subsalt structures in the northern Kuqa Depression[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(6): 37-42.
- [27] CONTRERAS J, YARBUH I, LOTERO-VÉLEZ A. Derivation of the area balance relations of detachment folds from first principles[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2016, 78(9): 247-253.
- [28] MITRA S, NAMSON J S. Equal-area balancing[J]. *American Journal of Science*, 1989, 289(5): 563-599.
- [29] GONZALEZ-MIERES R, SUPPE J. Relief and shortening in detachment folds[J]. *Journal of Structural Geology*, 2006, 28(10): 1785-1807.
- [30] SHAW H J, CONNORS C, SUPPE J. Seismic interpretation of contractional fault-related folds: An AAPG seismic atlas[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2005.
- 第一作者简介: 陈竹新(1979-), 男, 江西永修人, 博士, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 从事盆地构造解析与建模方面的研究。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心, 邮政编码: 100083。E-mail: chenzhuxin@petrochina.com.cn
- 收稿日期: 2017-09-18 修回日期: 2018-02-24
- (编辑 高日丽 王大锐)