

沾化凹陷古近系低序级不整合定量识别及地质意义

巴素玉¹, 金杰华^{1,2}, 时瑞坤¹, 刘升余¹

¹中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营

²胜利石油管理局博士后科研工作站, 山东 东营

收稿日期: 2022年2月14日; 录用日期: 2022年3月11日; 发布日期: 2022年3月18日

摘要

不整合是认识陆相湖盆地层格架、分析盆地形成与演化的重要界面, 且低序级不整合对于认识局部地层接触关系、构造活动具有重要影响。本文以沾化凹陷渤深8井测井数据为基础, 首先采用主成分分析法将多个相互联系的测井曲线通过降维重构形成少数包含原始曲线85%以上信息的主成分曲线, 然后运用最优分割法将主成分曲线进行组合、判别, 定量识别低序级不整合面。最后通过将低序级不整合面识别结果与实际资料进行对比, 证实了该方法对低序级不整合面识别的有效性。精确识别低序级不整合, 对于寻找不整合遮挡油气藏具有重要的实践意义。

关键词

主成分分析, 最优分割法, 低序级不整合面, 沾化凹陷, 古近系

Quantitative Identification of Paleogene Low-Grade Unconformity and Its Geological Significance in Zhanhua Sag

Suyu Ba¹, Jiehua Jin^{1,2}, Ruikun Shi¹, Shengyu Liu¹

¹Geophysical Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying Shandong

²Working Station for Postdoctoral Scientific Research, Shengli Petroleum Administrative Bureau, Dongying Shandong

Received: Feb. 14th, 2022; accepted: Mar. 11th, 2022; published: Mar. 18th, 2022

Abstract

Unconformity is an important interface for understanding the stratigraphic framework and ana-

文章引用: 巴素玉, 金杰华, 时瑞坤, 刘升余. 沾化凹陷古近系低序级不整合定量识别及地质意义[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(3): 269-277. DOI: 10.12677/ag.2022.123028

lyzing the formation and evolution of lacustrine basins. And, low-grade unconformity plays an important role in understanding local stratigraphic contact relationship and tectonic activity. In this paper, the principal component analysis method is used to form a few principal component curves containing more than 85% of the original curve information by dimensionality reduction based on logging data of Boshen 8 well in Zhanhua Sag Firstly. And then, the principal component curves are combined and discriminated by the optimal partition algorithm, identifying the low-grade unconformities quantitatively. Finally, by comparing the identification results of low-grade unconformity with the actual data, the effectiveness of the method is verified. It is of great practical significance for finding unconformity reservoirs by identifying the low-grade unconformity accurately.

Keywords

Principal Component Analysis, Optimal Partition Algorithm, Low-Grade Unconformity, Zhanhua Sag, Paleogene

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

不整合面指曾经沉积区遭受区域抬升后,发生沉积间断-剥蚀,后期又沉降发生沉积的作用面[1]。不整合面是陆相含油气盆地的重要层序界面。通过对不整合的系统分析,对于划分层序,分析地层接触关系,建立研究工区层序地层格架,明确构造运动时间及强度,分析沉积盆地的形成与演化,寻找与不整合有关的油气藏等方面均具有重要意义(参考文献)。不整合包括角度不整合以及平行不整合。对于上下地层具有明显倾角不一致的角度不整合的识别来说,通过地震上的地震反射终止关系较容易识别,而对于无明显倾角差异性的平行不整合,则较难识别。尤其对于剥蚀时间较短,上下地层倾角差异不明显的低序级不整合来说,则目前的识别方法较少。如何获得较好的低序级不整合定量识别方法,是众多地质学家和油气勘探者一直探索的难题。

沾化凹陷古生界发育多期不整合面,其中低序级不整合面是指经历时间短,不整合面上、下地层差异小,不同产状地层的交角小,岩性组合相似,岩石学特征、地球物理特征差异小的沉积间断面。然而这些不整合面的风化程度及其结构特征对油气运移和成藏具有重要的控制作用[2] [3]。在地震资料难以准确识别低序级不整合面的情况下,基于测井资料纵向分辨率高,资料丰富的特性,本文采用主成分-最优分割两种数学方法,定量识别低序级不整合面,以期更加精确的划分层序地层,为沉积学和油气勘探研究提供基础方法[4] [5]。

2. 地质概况

不整合界面是分隔上下地层的典型沉积间断面,完整的不整合结构在纵向上可以分为两个部分,包括在不整合面之上的连续沉积地层以及不整合面之下的受到风化作用形成的风化粘土层、淋滤层以及未风化的正常地层[6] [7] [8]。由于陆相断陷盆地构造活动比较频繁、构造活动机制复杂,岩石组合类型多样,岩石本身性质复杂,地层暴露受剥蚀时间长短不一,因此,不整合面之下地层结构多样,有可能缺失风化粘土层,甚至缺失风化淋滤层,从而导致不同地区不同层位不整合结构多样[7] [8]。

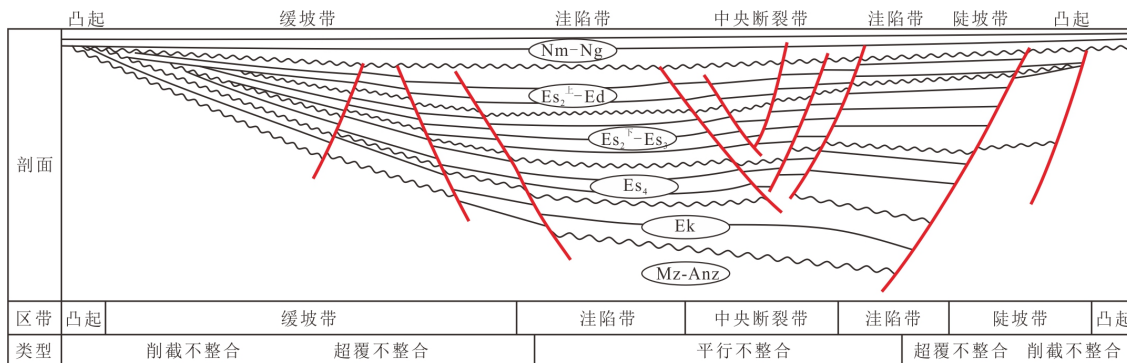


Figure 1. Model of tertiary unconformity development in Jiyang depression

图 1. 济阳拗陷第三系不整合发育模式图

沾车地区不整合纵向上划分为三层结构(图 1): 不整合面之上发育底砾岩、砂岩、泥岩及碳酸盐岩, 不整合面之下发育风化粘土层和半风化岩石, 其中半风化岩石以砂岩, 泥岩、碳酸盐岩、变质岩为主要母岩。按照风化粘土层是否发育, 将不整合结构分为 2 种类型。其中, I 型结构是指不整合中存在风化粘土层, 为完整的不整合结构类型, I 型结构主要发育在部分二级不整合中。II 型结构是指不整合面上下虽然存在沉积间断, 但是不整合面之下风化壳不发育, 因此, 不整合面之下地层结构不完整, 缺失风化粘土层。沾车地区低序级不整合大多属于 II 型不整合, 尤其在三级不整合中大量发育。

沾车地区第三系内部低序级不整合上、下岩石类型主要有上部砂岩下部泥岩、上部砂岩下部砂岩、上部泥岩下部泥岩和上部泥岩下部砂岩等 4 种岩石组合类型(图 2)。不同的不整合发育结构在油气成藏过程中的作用具有较大的差异性。不整合的结构样式决定了地层圈闭形成与输导体系有效性, 并对地层油藏的形成具有显著的控制作用[9] [10]。其中, 灰-砂接触主要发育在沙一段/沙二段形成的不整合附近, 表现为沙一段的白云岩、生物灰岩与下部沙二段地层对接。在整个沾车地区大片发育。泥灰接触主要发育在沙三/沙四段地层中, 表现为沙三段泥岩直接盖在沙四段泥灰岩之上, 主要发育在郭局子南坡地区。

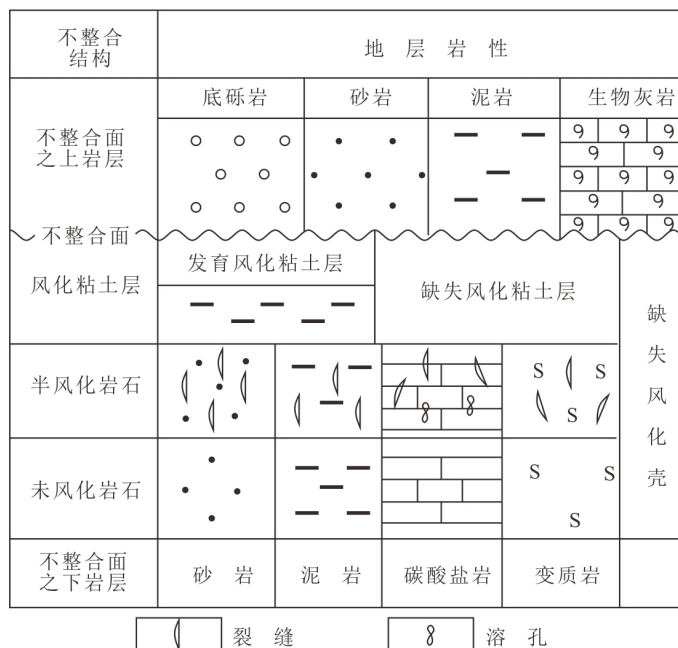


Figure 2. Lithological association diagram of tertiary unconformity vertical structure in Zhanhua sag

图 2. 沾化凹陷第三系不整合纵向结构岩性组合示意图

不整合界面上下不同类型地层的地球物理性质具有较大的差异，其测井数值也具有较大的不同，因此运用主成分 - 最优分割法开展不整合界面的定量识别具有可操作性。

3. 主成分 - 最优分割法定量识别原理

主成分分析的原理是将多个相互联系的测井曲线通过降维重构形成少数几个包含原始曲线 85% 以上信息的主成分曲线，其特点能够最大限度的保持原有测井曲线的主要信息，并将其特征放大化，为定量识别不整合面奠定基础[11]。

最优分割法借助于数理统计中方差分析的概念，把离差平方和作为划分不整合面的指标[12][13]。在研究过程中，最优分割法的理念就是认为不整合上、下地层应该是两个独立的单元，每个单元内部的同一类型的测试数值的差异应为最小，而两个单元之间同一类型的测井数值应为最大。其理念与不整合面的上、下地层形成于不同的地质环境的地质理念相符[12]。最优分割法一般运用二分迭代的数学方法，通过聚类分析反复划分不整合面，计算模拟不整合上、下两个单元内的测井数值差异，以保证每个单元内的测井数值差异性最小，而上下相邻两个单元内的测井数值最大。

主成分 - 最优分割法从测井曲线入手，该方法通过对地质特征值微弱的差异信息进行放大、组合、判别，以致达到不整合面识别方案最优的目的[5]。具体实现步骤如下：

1) 测井数据归一化处理

首先，假设每口井有 m 个测井曲线，将 n 个测井曲线的实测数据按顺序排列，得到数据矩阵：

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

选取能反映不整合面上、下地层信息(岩性、孔渗、泥质含量等)的 AC、DNL、RT、SP、GR 等测井曲线。同时，由于不同井之间的测井实测数据由于测试仪器不一而导致测试数据具有较大的差异，导致计算结果产生较大的不同，因此对所有的原始测井数据开展归一化处理。计算公式如下：

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} \{x_{ij}\}}{\max_{1 \leq i \leq n} \{x_{ij}\} - \min_{1 \leq i \leq n} \{x_{ij}\}}, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

z_{ij} 是归一化之后的新元素值，取值为 0~1， x_{ij} 是指第 i 个采样点的第 j 个观测数据，得到归一化矩阵

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1p} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{np} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

2) 计算相关系数矩阵

根据以下公式求得相关系数 r_{ij}

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (4)$$

建立相关系数矩阵 R ：

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pp} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3) 特征值与特征向量计算

特征值 $\lambda_i (i=1,2,\dots,p)$ 的计算主要运用 Jacobi 的方法求解特征方程 $|\lambda I - R| = 0$ ，然后将特征值按照从大到小的顺序排列；在求解特征值的基础上，再求解每个特征值 λ_i 所对应的特征向量 $e_i (i=1,2,\dots,p)$ 。这里要求 $\|e_i\| = 1$ ，即 $\sum_{j=1}^p e_{ij}^2 = 1$ ，其中 e_{ij} 表示向量 e_i 的第 j 个分量。

4) 主成分贡献率及累积贡献率计算，确定主成分

主成分 z_i 的贡献率为

$$z_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} \quad (i=1,2,\dots,p) \quad (6)$$

累积贡献率为：

$$\frac{\sum_{k=1}^i \lambda_k}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} \quad (i=1,2,\dots,p) \quad (7)$$

通过计算累积贡献率，当累积贡献率大于 85% 时，选取累积贡献率 85% 之前的 m 个特征向量，生成主成分向量，构成主成分曲线

5) 系统差异性表征

对于选取的第 N 行 M 列主成分曲线，首先分别以第 2 个~第 $n-1$ 个数据点对应的位置为假定的不整合面位置，不整合面之上定义为系统 1，不整合面之下定义为系统 2。引入离差平方和的计算方法，若 m 点对应的位置为真实不整合面对应的位置，则 m 点之上任意 P 点对于 m 的位置为假定不整合面位置。由于真实不整合面之上的系统 1 数据参与系统 2 的计算，则系统 2 的离差平方和必然变大，其 P 点上下系统的差异之和也必然大于真实不整合面处差异之和，差异之和最小的点即为真实不整合面所对应的点。差异之和为上下两个离差平方和相加，即

$$s_n(2; j1^*) = \min_{1 \leq j \leq n-1} \{s_n(2; j)\} \quad (8)$$

6) 定量确定不整合面

将每一个假定不整合面 P 点的差异之和生成一条综合分层曲线，则真实不整合面处应为“最小值”对应界面。

4. 应用实例

沾车地区古近系内部发现多种类型、不同规模的不整合现象，几乎都由构造活动造成。如沾化凹陷发育部分向北倾斜的斜坡，由于差异性的断裂活动，局部地区的沙二段和沙三段遭受剥蚀，而后在凹陷沉降过程中，沙一段沉积地层直接超覆于残留的地层上面，形成较多被沙一段油页岩地层遮挡的地层-岩性圈闭，部分圈闭由于油气的注入而形成地层-岩性油气藏[14]。

为了进一步验证测井曲线主成分定量识别不整合的效果，以渤深 8 井为例，选取 SP、GR、AC、CNL、

DEN、RT、R4 等 7 条曲线作为原始输入值，定量识别沙三段与沙四段之间的不整合面。

主成分分析的前提是测井数值之间相关性程度较高，而偏相关性较低。本次相关性分析采用 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验，其标准为 KMO 大于 0.5 时表明适合采用主成分因子分析。本次计算 KMO 值达到 0.789 (表 1)，认为各测井变量之间相关程度较高，同时通过计算特征值及其相应的方差贡献率，选取累加贡献率大于 85% 的 3 个主成分来表征原始输入的测井曲线。本次选取了 3 个主成分，累加贡献率达到了 87% (表 2)。

Table 1. Examination of KMO and Bartlett

表 1. KMO 和 Bartlett 的检验

取样足够度的 Kaiser-Meyer-Olkin 度量		0.789
Bartlett 的球形度检验	近似卡方	6849.034
	df	21
	Sig.	0

按照计算的成分矩阵构建主成分曲线方程(表 3)，计算主成分曲线数值，并将主成分曲线成图，构建的主成分曲线将原有曲线的特征进一步放大，为下一步数据寻优奠定基础。

Table 2. Total variance of interpretation

表 2. 解释的总方差

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差的%	累积%	合计	方差的%	累积%
1	3.872	54.669	54.669	3.827	54.669	54.669
2	1.763	25.187	79.856	1.763	25.187	79.856
3	0.524	7.491	87.347	0.524	7.491	87.347
4	0.336	4.794	92.141			
5	0.251	3.581	95.722			
6	0.179	2.553	98.275			
7	0.121	1.725	100.000			

提取方法：主成分分析。

Table 3. Typical log component matrix of Well Boshen 8

表 3. 渤深 8 井典型测井成分矩阵

变量	成分		
	1	2	3
SP	0.776	0.245	-0.461
CNL	0.86	-0.391	0.105
AC	0.826	-0.354	0.273
GR	0.756	-0.531	-0.118
DEN	-0.894	-0.184	0.055
RT	0.516	0.673	0.441
Rxo	0.407	0.81	-0.122

以构建的主成分曲线作为输入值,按照有序数列最优分割法精细处理,最终形成一条综合分层曲线,其最小值对应深度即为不整合面的深度,该方法与定义的不整合面深度与地质分层基本吻合(图3)。证明采用该方法开展不整合面定量识别和划分正确性与可行性。

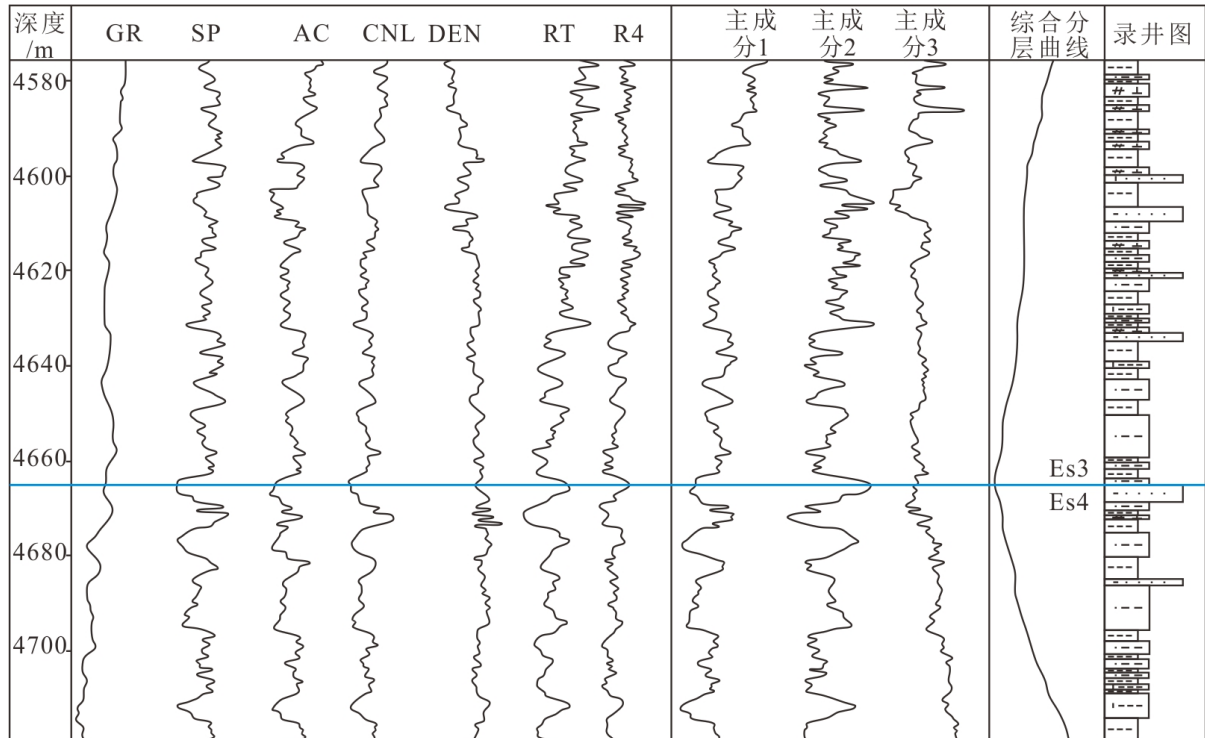


Figure 3. Quantitative identification results of sequence interface of Es3-Es4 in Well Boshen 8
图 3. 渤深 8 井 Es3-Es4 层序界面定量识别结果

5. 油气地质意义

自 20 世纪 30 年代开始,石油勘探工作者就发现部分油气藏与不整合具有重要的关系。国内外在多个油气盆地发现了与不整合相关的圈闭与油气藏,形成许多油气田。济阳拗陷古近系内部发育多种类型的不整合,包括角度不整合以及平行不整合,然而这些不整合规模相对较小,尤其在沙河街组及东营组内部发育的一系列低序级不整合,精确识别低序级不整合,不仅对于认识盆地演化、开展盆地原型恢复等具有重要的理论意义,而且对于油气勘探具有重要的实践指导意义。

沾化凹陷古近系不整合与油气藏发育的关系主要表现在三个方面。首先,不整合上、下地层可以作为油气藏重要的储集体,以沾化凹陷古近系为例,低序级不整合一般发育于基准面下降时期,地层遭受剥蚀形成不整合,其上沉积一套低位域砂体,通常为砂砾岩体;而后,基准面上升,在低位域砂砾岩体之上往往覆盖厚层泥岩,导致低位域砂体成为重要的油气储集体。其次,由于不整合体内部发育的风化粘土层可以作为重要的盖层、淋滤层可以作为重要的油气疏导层,因此凹陷内不整合发育带与其他断裂相结合,可以作为重要的油气运移通道。例如孤岛潜山的多个油气藏,其油气运移录井就可能与其上不整合有较大关系。其次,由于盆地局部构造运动或者沉积环境的改变,导致沉积盆地发生升降运动,在盆地的边缘形成以不整合为界剥蚀带,这些不整合与上下地层接触,可以形成不整合遮挡圈闭,尤其在断陷湖盆的盆缘缓坡带,由于盆地频繁活动,地层超覆带广泛发育,且由于断裂的活动,导致缓坡带频繁发生掀斜运动,导致缓坡带形成一系列倾角较小的不整合,形成断陷湖盆缓坡带低序级不整合遮挡圈

闭。同时,由于构造活动,缓坡常常发育规模不等的鼻状构造,这些鼻状构造多为油气运移的主要通道,与低序级不整合圈闭相匹配,可形成不整合遮挡油气藏。

此外,不整合对已经形成的油气藏也可能具有破坏作用[15]。不整合对油气藏的破坏作用主要体现在对盖层的破坏。地层的抬升导致油气中相对较轻的组分发生分散释放,相对重质的组分存留下来,形成稠油气藏,从而不宜开采。并且,不整合的形成表明地层抬升暴露,地层地温梯度较低,可能导致烃源岩层不能持续保持较高的地温,有机质因未成熟而不能大量生油。因此,通过数学计算,精确定量识别低序级不整合,对于寻找不整合油气藏具有重要的勘探意义。

6. 结论

1) 沾车地区低序级不整合大多属于 II 型不整合,不整合面之下风化壳并不发育,不整合结构层中不发育风化粘土层。

2) 主成分 - 最优分割法中主成分分析可以最大限度地提取原有测井曲线的主要信息,去除冗余信息,将特征放大化;最优分割法利用离差平方和的计算方法将测井信息自动分类,降低人为因素的干扰。

3) 采用主成分 - 最优分割法定量识别沾车地区渤深 8 井沙三段和沙四段之间的不整合面,其最小值对应深度与地质分层基本吻合。证明采用该方法开展不整合面定量识别的正确性与可行性。

4) 低序级不整合的定量识别与划分,对于明确陆相湖盆地形成与演化具有重要理论意义,而且对于寻找地层超覆型油气藏以及不整合遮挡型油气藏具有重要的油气勘探意义。

基金项目

胜利石油管理局博士后科研课题“车镇凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩有利储层控制因素及分布预测”(YKB2207),胜利油田分公司课题“渤南北带致密砂砾岩有效储层地震预测技术”(YGW2202),胜利油田分公司课题深度偏移资料时深双域地震属性特征研究(YJQ2103)。

参考文献

- [1] 徐开礼,朱志澄. 构造地质学[M]. 北京:地质出版社,1989.
- [2] 张营革,苏朝光,高秋菊,等. 济阳拗陷不同序级不整合构造特征与地层油藏[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 4(2): 171-178.
- [3] 刘书会,才巨宏,管晓燕,等. 低序级不整合圈闭描述关键技术——以东营凹陷南部斜坡带为例[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(5): 1022-1030+883.
- [4] 时瑞坤,巴素玉,师涛. 济阳拗陷车镇凹陷低序级不整合地震预测技术研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(2): 154-155.
- [5] 袁阳,彭光荣,白海军,等. 主成分——聚类分析方法在不整合面结构识别中的应用——以番禺 4 洼 PY5A 井为例[C]/中国石油学会石油物探专业委员会(SPG),国际勘探地球物理学家学会(SEG). SPG/SEG 南京 2020 年国际地球物理会议论文集(中文). 2020: 1479-1482.
- [6] 吴孔友,李林林,查明. 不整合纵向结构及其成藏作用物理模拟[J]. 石油实验地质, 2009, 31(5): 537-541.
- [7] 隋风贵,王学军,赵乐强. 济阳拗陷不整合油气成藏与勘探[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(6): 1-7.
- [8] 宋国奇,陈涛,蒋有录,等. 济阳拗陷第三系不整合结构矿物学与元素地球化学特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008(5): 7-11+17.
- [9] 隋风贵,王学军,卓勤功,等. 陆相断陷盆地地层油藏勘探现状与研究方向——以济阳拗陷为例[J]. 油气地质与采收率, 2007(1): 1-6.
- [10] 陈钢花,张蕾,宋国奇,等. 测井资料在地层不整合纵向结构研究中的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(1): 50-54.
- [11] 王宵宇,谢然红,毛治国,等. 主成分分析法在致密砂岩岩性识别的应用研究[J]. 天然气与石油, 2021, 39(1): 88-93.

-
- [12] 陈钢花, 张蕾, 宋国奇, 等. 测井资料在确定不整合面深度中的应用[J]. 石油物探, 2008(3): 311-314+20.
- [13] 张振飞, 谢忠怀, 李宝利, 等. 多参数测井地层划分的遗传最优分割法及其在济阳坳陷中生界中的应用[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2009, 34(4): 682-690.
- [14] 王锐. 胜利探区地层油藏富集规律与勘探技术研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国石油大学, 2007.
- [15] 尹微, 陈昭年, 许浩, 等. 不整合类型及其油气地质意义[J]. 新疆石油地质, 2006(2): 239-241.