

渤海变质岩潜山储层特征及分布预测研究

张建民, 王西杰, 来又春, 周连德

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津

收稿日期: 2023年12月13日; 录用日期: 2024年3月15日; 发布日期: 2024年3月22日

摘要

近几年随着渤海一系列大型潜山油藏勘探发现, 潜山油藏已成为渤海勘探、开发的重点目标。潜山油藏裂缝成因复杂、非均质性强, 且地震资料品质差, 致使裂缝储层精细、准确预测难度大。为了研究渤海变质岩潜山风化壳的发育特征及其储层预测方法, 本文从潜山裂缝储层的成因机理出发, 对风化壳的垂向结构进行了系统的划分, 将潜山风化壳依次划分为强风化带、次风化带及内幕带。通过对已钻井资料和地震资料综合分析, 开展了裂缝地球物理响应特征分析研究, 分析了裂缝密度与储层之间的关系, 确定了强风化带内储层厚度与裂缝发育程度的正相关性, 通过属性优选, 精细描述了风化带裂缝储层发育特征。该套技术体系有效指导了渤中19-6气田方大气田的储量评价, 为渤海类似地质条件的深埋潜山勘探开发提供了宝贵经验。

关键词

变质岩潜山, 储集空间, 风化带, 储层预测

Research on the Characteristics and Distribution Prediction of Bohai Metamorphic Rock Buried Hill Reservoirs

Jianmin Zhang, Xijie Wang, Youchun Lai, Liande Zhou

Tianjin Branch of CNOOC, Tianjin

Received: Dec. 13th, 2023; accepted: Mar. 15th, 2024; published: Mar. 22nd, 2024

Abstract

In recent years, with the discovery of a series of large-scale buried hill reservoirs in Bohai, buried hill reservoirs have become a key target for exploration and development in Bohai. The genesis of fractures in Qianshan oil reservoirs is complex, with strong heterogeneity, and poor seismic data

quality, making it difficult to accurately predict fractured reservoirs. In order to study the development characteristics and reservoir prediction methods of weathered crust in Bohai metamorphic rock buried hills, this paper starts from the genesis mechanism of fractured reservoirs in buried hills and systematically divides the vertical structure of weathered crust into strong weathering zone, secondary weathering zone, and inner curtain zone. Through comprehensive analysis of drilling and seismic data, a study was conducted on the geophysical response characteristics of fractures. The relationship between fracture density and reservoir was analyzed, and the positive correlation between reservoir thickness and fracture development degree in strongly weathered zones was determined. Through attribute selection, the development characteristics of fractured reservoirs in weathered zones were described in detail. This technical system effectively guides the reserve evaluation of the BZ19-6 gas field in the Bohai Sea, providing valuable experience for the exploration and development of deep buried hills with similar geological conditions in the Bohai Sea.

Keywords

Metamorphic Buried Hill, Reservoir Space, Weathering Zone, Reservoir Prediction

Copyright © 2024 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

古潜山亦称潜山构造,是指古地层长期遭受风化、侵蚀、断裂、褶皱作用形成的古地貌残丘、断块山、残余背斜等古地形高点,而后被新的沉积物覆盖[1]。渤海湾盆地潜山为新生界底不整合面之下的基岩隆起构造,其形成和最终定型是前新生代各期构造运动的结果[2]。

多数变质岩潜山油气藏,其主要储集空间为裂缝,部分发育溶孔,具有双孔介质特征。分析认为,多数变质岩原始孔隙不发育,如果没有后期改造形成裂缝等次生联通孔隙,一般很难形成储层[3]。因此,裂缝,溶孔等后期次生改造孔隙成为多数变质岩潜山油气藏的主要储集空间[4]。变质岩中哪些岩性在后期受构造应力或风化作用等改造容易形成裂缝、溶孔等次生孔隙,哪些岩性不容易受外界作用而被改造,是影响变质岩潜山油气藏储集性好坏的重要因素,即搞清楚裂缝和孔隙成因是评价变质岩潜山油气藏储集性好坏的一大重要指标[5][6]。前人对风化壳储层预测,主要集中在岩性、风化时长、古地貌等因素上,属于定性分析的预测。本文通过对已钻井资料和地震资料综合分析,开展了裂缝地球物理响应特征分析研究,分析了裂缝密度与储层之间的关系,确定了强风化带内储层厚度与裂缝发育程度的正相关性,通过属性优选,精细描述了风化带裂缝储层发育特征。

2. 地质概况

渤中 19-6 构造位于渤中凹陷西南部,被渤中凹陷、沙南凹陷和黄河口凹陷所环绕,整体表现为被走滑断层及其派生断层复杂化的具有背斜特征的断块构造,呈“洼中隆”的构造格局,具有优越的烃源供给条件[7][8]。太古界潜山油气藏,风化带主要发育网状缝和粒内溶蚀孔,储集孔间以孔隙-裂缝型和裂缝-孔隙型储层为主缝与缝之间以及缝与孔之间相互沟通,形成很好的储集空间,储层物性较好。内幕储层储集空间主要类型是裂缝。渤中 19-6 气田太古界潜山储层总孔隙度分布在 3.48%~4.07%,平均 3.86%,测井解释基质孔隙度分布在 2.95%~3.77%,平均 3.35%。试井解释渗透率在 $2\sim 4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,测井解释总渗透率分布在 $2.34\sim 2.80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $2.64 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,测井解释基质渗透率分布在 0.29~0.49 ×

$10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值在 $0.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

渤中 19-6 太古界潜山储层风化带上部裂缝较为发育, 且局部破碎严重, 整体呈网状特征。在风化带内部, 随深度增加, 岩石碎裂化减弱, 但仍可见多期裂缝交错, 呈网状特征。风化带下部岩心风化程度明显减弱, 以构造缝为主, 部分在张性裂缝内可见自形成石英晶体充填。潜山内幕带以构造缝为主, 网状特征不明显, 基质致密。内幕带仅在内幕高角度断层附近岩石破碎程度高, 裂缝较为发育。

3. 潜山储集空间类型

渤中 19-6 气藏是太古界潜山变质岩储层。目的层段主要岩性为二长片麻岩、斜长片麻岩和混合片麻岩, 属于区域变质岩类, 主要矿物为长石、石英和云母, 几乎不含导电矿物。研究区经历多期次的构造运动, 产生众多类型、规模不一的断层, 长石和石英脆性大, 因此, 在断层附近派生大量的构造裂缝, 地层物性得到改善, 为后续进一步改造形成储层奠定基础。研究区在之后的历史时期暴露于地表, 遭受强烈的风化作用, 在构造裂缝的基础上进一步溶蚀改造后具备一定的储集能力, 在不同区域和构造部位的改造程度存在较大差异, 因此, 形成的储集空间类型多样且规模不一, 最终形成古潜山油气藏。随着与潜山顶部距离的增大, 潜山内部受地表地质营力的影响逐渐减小, 储层受改造程度逐渐减弱[9][10]。

综合分析储集空间类型和配置关系, 结合电成测井资料, 将渤中 19-6 凝析气藏潜山变质岩储层划分为三种类型, 即裂缝型储层、孔隙-裂缝型储层和裂缝-孔隙型储层。

1) 裂缝型储层。储层岩石结构完整, 储集空间类型以裂缝为主, 裂缝发育, 部分裂缝存在充填现象, 多数为开启有效裂缝, 溶蚀改造作用较弱(图 1(a))。

2) 孔隙-裂缝型储层。储层岩石结构被破坏, 储集空间类型包括裂缝和溶蚀孔洞, 且裂缝占比较大, 溶蚀改造作用较强, 沿裂缝面发育溶蚀孔洞, 呈串珠状(图 1(b)), 对储层有明显建设性改造作用。

3) 裂缝-孔隙型储层。受构造运动及淋滤作用影响, 储层岩石破碎严重, 储集空间类型包括孔隙和裂缝, 但孔隙占比大, 裂缝主要起连通渗流作用, 因溶蚀改造作用强烈, 裂缝被改造的模糊不清(图 1(c))。

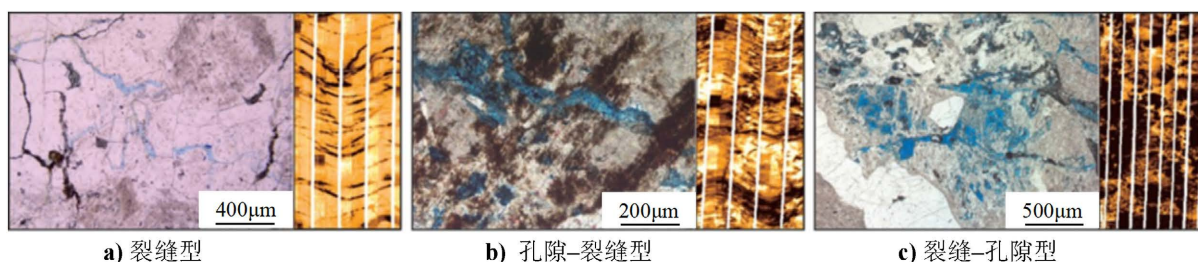


Figure 1. Thin section and FMI images of three types of reservoirs

图 1. 三种类型储层的薄片和 FMI 图像

三种类型储层具有一个共同点, 即裂缝发育且为开启的有效裂缝。三者存在联系, 即岩石在构造运动作用下产生裂缝, 形成裂缝型储层; 溶蚀流体沿裂缝面溶蚀改造裂缝型储层, 形成孔隙-裂缝型储层; 当溶蚀改造程度较大时形成裂缝-孔隙型储层。受控于多种因素, 并非所有储层都能演化为裂缝-孔隙型储层, 矿物成分是先决条件, 裂缝控制储层的发育, 溶蚀改造作用控制储层类型的发育。

4. 潜山风化带垂向分带

通过对渤中 19-6 潜山花岗质风化壳取心的岩相学观察, 对风化壳的垂向结构进行了系统的划分, 将潜山风化壳依次划分为强风化带、次风化带及内幕带。根据各风化带对应的测井响应, 统计了各带的密度、声波时差、密度和电阻率变化区间(表 1)。

Table 1. Zoning standards for weathering crust of buried hills in the Bozhong Depression

表 1. 渤中凹陷潜山风化壳分带标准

分带	密度(ZDEN) (g/cm ³)	声波(DT24) (μs/f)	RS (Ω·m)	RD (Ω·m)
剧风化带	2~2.6	50~90	800~1600	800~1600
强风化带	2.2~2.7	50~80	900~1700	900~1700
次风化带	2.2~2.8	50~70	1000~2000	1000~2000
内幕带	2.2~2.9	45~60	1100~2000	1100~2000

1) 剧风化带

剧风化带位于潜山的顶部，岩性主要由风化成因的砂砾岩构成，剧风化带总体厚度较薄，只在渤中19-6构造低洼区域的部分井内发现，高陡峭地区钻井风化壳顶部的剧风化带已被剥蚀带走。在测井曲线中剧风化带的伽马曲线值最高。测井成像图上显示出电阻较小的特征，其值介于800~1600 Ω·m，密度值最小介于2~2.6 g/cm³。并且在垂向上显示电阻率降低、密度增大、声波时差快速减小的特征(图2)。

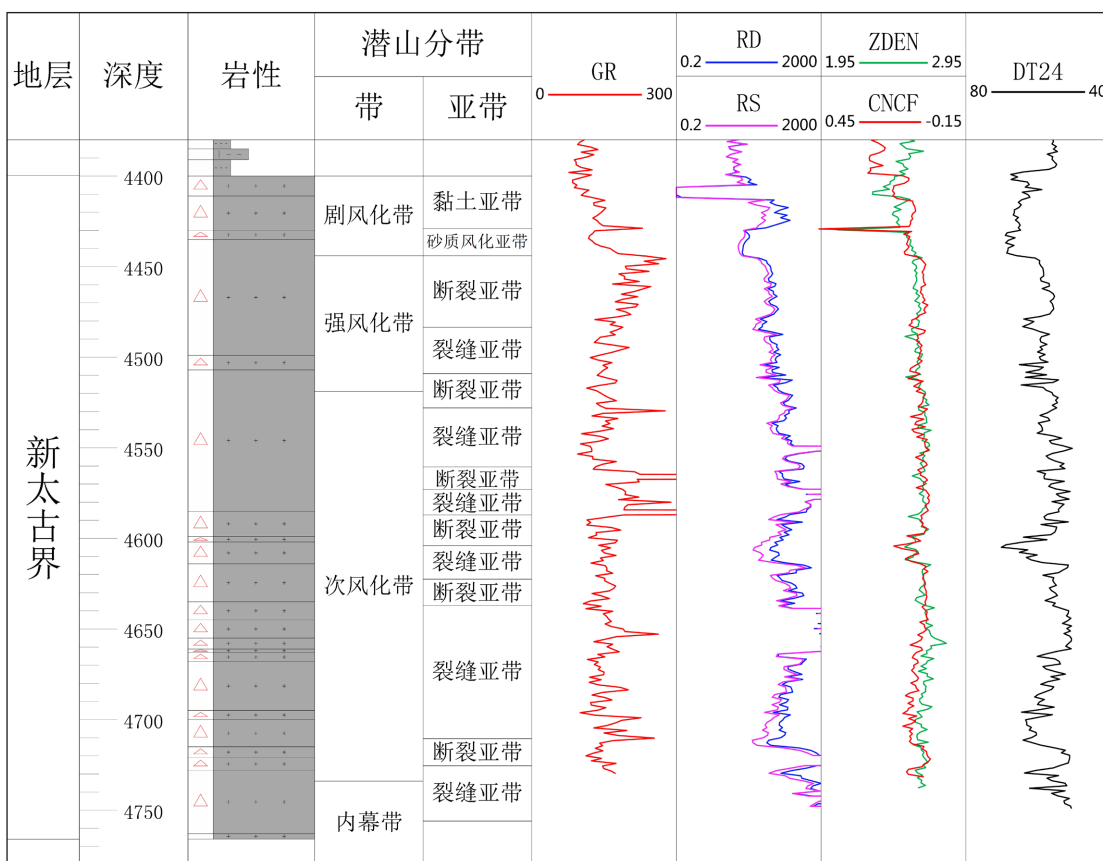


Figure 2. Vertical zoning logging response curve of Qianshan weathering zone

图 2. 潜山风化带垂向分带测井响应曲线

2) 强风化带

强风化带发育在剧风化带之下，距离风化壳较近，主要由风化程度较高的花岗质岩类组成，受风化淋滤作用影响的强度仅次于剧风化带，测井曲线中的密度值稍有增加，介于2.2~2.7 g/cm³，声波时差减小，介于50~80 μs/f(表1)，电阻率突然增加，且电阻率总体保持在一个高值范围内。与剧风化带不同的

是强风化带受到构造变形的影响和控制。研究区内潜山风化壳强风化带与传统意义上风化壳相比,并没有随着深度的增加,储集能力减少的特征,不仅靠近风化壳的层位可以成为优质储层,更深层位中受构造运动影响形成的断层和构造裂缝也可以形成优质的储集层,断层和裂缝在测井曲线图上表现出伽马值远高于围岩及电阻突然陡降的特点(图 2)。

3) 次风化带

次风化带垂向上位于强风化带之下,距离风化壳更远,主要由风化程度较低的花岗质岩类组成。受风化作用的影响进一步降低,且溶蚀作用主要发生在断裂带和高角度裂缝的周围。同强风化带相似的是,可进一步细分为断裂亚带、裂缝亚带和致密亚带。与强风化带不同的是,次风化带的厚度要远远高于强风化带,致密亚带的发育程度较强风化带发育。在测井成像图上可以明显的看出,次风化带的电阻率要高于强风化带,介于 $1000\sim 2000\ \Omega\cdot m$,密度值稍有增加,介于 $2.2\sim 2.8\ g/cm^3$,声波时差减小,介于 $50\sim 70\ \mu s/ft$ 。孔隙度和渗透性都远远低于强风化带,测井数据均显示次风化带的物性特征没有弱风化带和强风化带好(图 2)。

4) 内幕带

内幕带主要由新鲜的花岗质基岩构成,该带位于潜山最底部,内幕带的厚度在整个潜山占比最大,基本上不受风化作用的影响或受风化作用的影响十分微弱,与强风化带和次风化带相同,内幕带进一步也划分为裂缝亚带、断裂亚带和致密亚带。

内幕带同其它各亚带最大的区别是受风化作用影响减弱,受构造的控制和影响比较明显。沿断裂亚带或者裂缝亚带两侧有明显的蚀变,粘土矿物也主要分布裂缝亚带和断裂亚带两侧。内幕带中致密亚带最为发育,远远高于其它各带内致密亚带的占比。在测井曲线上内幕带中的电阻率最大,整体上表现高阻低导特征,其值介于 $1100\sim 2000\ \Omega\cdot m$,声波时差介于 $45\sim 60\ \mu s/ft$ 和孔隙度值均较小,体积密度介于 $2.2\sim 2.9\ g/cm^3$ 与其它各带相比更大(图 2)。

5. 潜山裂缝储层分布预测研究

研究区主要发育裂缝,溶蚀孔/洞一般与裂缝伴生,且洞的规模都不大,在地震上的反射特征不明显,因此,本次潜山储层地震预测主要针对裂缝、以及与裂缝相伴生的溶蚀孔开展研究。

5.1. 地球物理响应特征分析

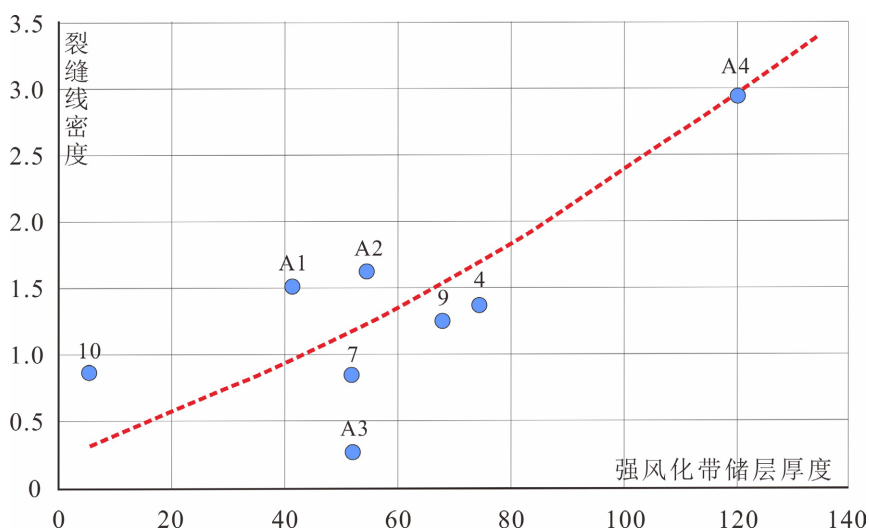


Figure 3. Intersection diagram of crack line density and reservoir thickness in strongly weathered zones

图 3. 裂缝线密度与强风化带储层厚度交会图

通过测井响应特征分析, 研究区 12 口井钻遇潜山强风化带垂厚差异较大, 横向上井间强风化带的厚度变化大, 储层发育情况差异也较大; 纵向上, 从单井的速度、密度、阻抗曲线特征分析来看, 储层与非储层无明显差异。本文基于成像测井解释的裂缝成果, 分析了裂缝密度与储层之间的关系。通过裂缝线密度与强风化带厚度、强风化带储层厚度交会图(图 3)可以看出: 强风化带内, 储层厚度与裂缝发育程度近似呈正相关关系。

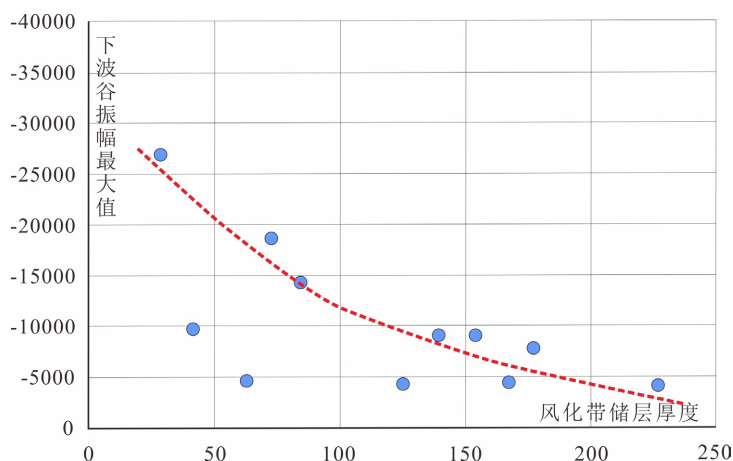


Figure 4. Intersection diagram of amplitude attributes and weathering zone reservoirs

图 4. 振幅属性与风化带储层交会图

5.2. 基于振幅属性的储层定性预测

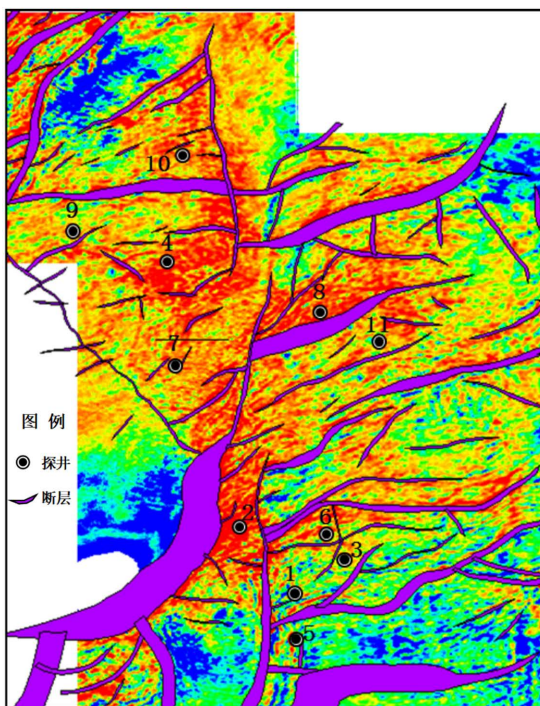


Figure 5. Weathering zone attribute map (lower valley amplitude)

图 5. 风化带属性图(下波谷振幅)

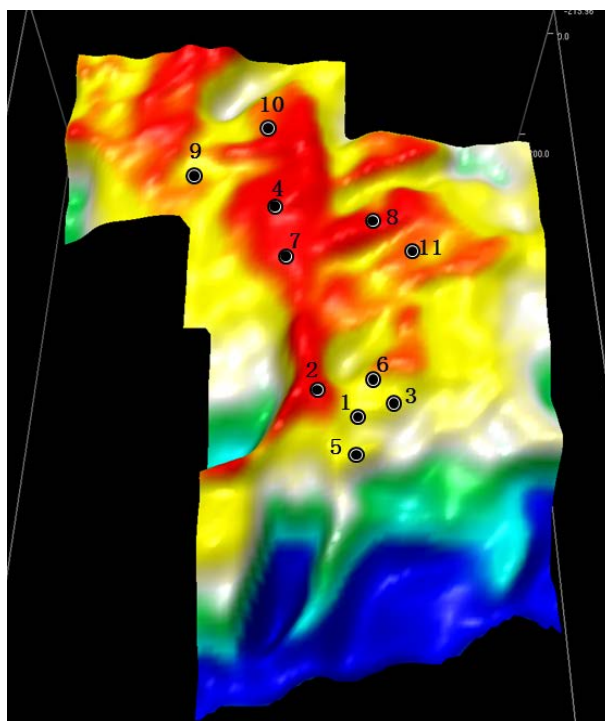


Figure 6. Ancient landform map of Qianshan top boundary
图 6. 潜山顶界古地貌图

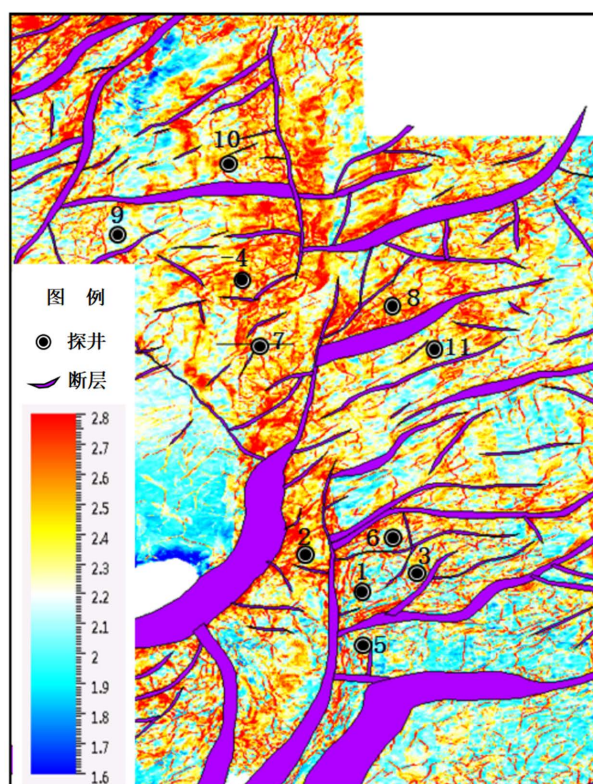


Figure 7. Hidden mountain insider attribute map (root mean square amplitude)
图 7. 潜山内幕属性图(均方根振幅)

通过统计研究区井点的多项振幅值(主要包括上波谷振幅、T_g波峰振幅、下波谷振幅、下一波峰振幅)以及比值,与总风化带厚度、总风化带储层厚度进行交会分析,寻找储层与振幅特征的关系(图4)。

从交会结果看,风化带储层垂厚与下波谷的振幅有较好的相关性,风化带储层厚度越厚,下波谷振幅能量越弱。因此优选T_g下波谷振幅属性来作为风化带储层的定性预测属性如图5所示,潜山顶界面古地貌越高,风化带储层越发育,符合地质规律(图6)。

根据地震响应特征分析,潜山内幕的高陡反射指示内幕裂缝发育带,因此内幕带采用均方根振幅属性来表征储层的发育情况(图7)。平面属性图中红黄色为强能量指示内幕储层发育,其内幕储层均大于100 m,红黄的强能量区域均分布在断层周围,与断层有较好的匹配性;蓝白色为弱能量指示内幕储层欠发育,均方根振幅切片从上到下能量减弱,指示潜山内幕顶部储层优于下部储层。

6. 结论

1) 从潜山裂缝储层的成因机理出发,对风化壳的垂向结构进行了系统的划分,将潜山风化壳依次划分为强风化带、次风化带及内幕带,系统分析了各风化带对应的测井响应,总结了各带的密度、声波时差、密度和电阻率变化区间:强风化带电阻值介于800~1600 Ω·m,密度值最小介于2~2.6 g/cm³,在垂向上显示电阻率降低、密度增大、声波时差快速减小的特征;强风化带密度值介于2.2~2.7 g/cm³,声波时差介于50~80 μs/ft;次风化带电阻率介于1000~2000 Ω·m,密度值介于2.2~2.8 g/cm³,声波时差介于50~70 μs/ft;内幕带电阻率值介于1100~2000 Ω·m,声波时差介于45~60 μs/ft,体积密度介于2.2~2.9 g/cm³。

2) 通过对已钻井资料和地震资料综合分析,开展了裂缝地球物理响应特征分析研究,分析了裂缝密度与储层之间的关系,确定了强风化带内储层厚度与裂缝发育程度的正相关性,通过属性优选,精细描述了风化带裂缝储层发育特征。

参考文献

- [1] 吴伟涛,高先志. 辽河拗陷西部凹陷变质岩潜山油气成藏特征[M]. 北京:中国石化出版社,2017.
- [2] 薛永安,李慧勇. 渤海海域深层太古界变质岩潜山大型凝析气田的发现及其地质意义[J]. 中国海上油气,2018,30(3): 1-9.
- [3] 周心怀,项华,于水,等. 渤海锦州南变质岩潜山油藏储集层特征与发育控制因素[J]. 石油勘探与开发,2005,21(3): 145-150.
- [4] 童凯军,赵春明,吕坐彬,等. 渤海变质岩潜山油藏储集层综合评价与裂缝表征[J]. 石油勘探与开发,2012,39(1): 56-63.
- [5] 黄保纲,汪利兵,赵春明,等. JZS 油田潜山裂缝储层形成机制及分布预测[J]. 石油与天然气地质,2011,32(5): 701-717.
- [6] 邹华耀,赵春明,尹志军,等. 渤海湾盆地新太古代结晶岩潜山裂缝发育的露头模型[J]. 天然气地球科学,2013,24(5): 879-885.
- [7] 张在震,张卫平,李照延,等. 渤海湾盆地北低凸起潜山断裂特征及其控藏机制[J]. 海相油气地质,2014,19(2): 21-28.
- [8] 李长宏,彭英明,褚庆忠,等. 渤海湾盆地上太古界潜山油藏岩性特征、储集空间类型及影响因素[J]. 中国海上油气,2018,30(5): 21-28.
- [9] 张宇. 岩性对兴隆台变质岩潜山内幕油藏的控制作用[J]. 特种油气藏,2016,23(4): 64-69.
- [10] 陈建波,潘玲黎,童凯军,等. 辽西低凸起太古宇变质岩潜山储层控制因素研究[J]. 石油地质与工程,2016,30(4): 8-14.