

陈心路, 赵志平, 惠冠洲, 等. 渤海海域变质岩风化壳发育特征及其储层定量预测[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(10): 33-41.

# 渤海海域变质岩风化壳发育特征及其储层定量预测

陈心路, 赵志平, 惠冠洲, 岳军培, 赵婧

(中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459)

**摘要:**随着渤海油田锦州 25-1 南、锦州 20-2 以及渤中 26-2 等风化壳型油气田的相继发现, 以及近两年渤中 19-6 千亿方大气田的重大勘探突破, 元古—太古宇变质岩逐步成为渤海海域潜山勘探层系的重点之一。为了研究渤海变质岩潜山风化壳的发育特征并建立其储层预测方法, 通过对典型潜山取心、薄片、测井、常量元素以及物性资料分析, 划分了变质岩潜山的风化壳纵向结构, 明确了风化壳发育差异的控制因素, 并以 5 项因素灰关联系数为介质, 采用 Q 型聚类法对储层级别进行了优劣排序。研究表明: 变质岩风化壳可以划分为 5 个纵向结构, 其发育程度明显受岩性、构造和保存条件等因素的影响, 其中, 被前人忽视的上覆沉积环境作为风化壳的保存条件意义重大。对 11 口已钻井风化壳进行变量因子归类, 由好到差划分了 I—IV 4 个储层级别。利用该方法在渤中 19-6 风化壳预测中的应用效果较好。

**关键词:** 变质岩; 风化壳; 灰色关联; 储层预测; 渤海海域

中图分类号: P744.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.168

## 0 引言

根据目前渤海海域潜山勘探现状, 共有 100 多口探井钻遇元古—太古宇, 其中锦州 25-1 南、锦州 20-2 以及渤中 26-2 等多个变质岩油气藏获得了较高的产能<sup>[1-4]</sup>, 尤其是近几年渤中 19-6 千亿方大型凝析气田的发现, 再次证实了渤海海域元古—太古宇变质岩地层具有较大的油气勘探潜力。前人对变质岩储层进行了大量的研究, 主要集中在风化壳划分及裂缝识别、统计等方面<sup>[3-6]</sup>。尽管目前渤海油气在风化壳型和内幕型变质岩油气藏中均有分布, 但物性好、产能高的层段主要分布在潜山顶部风化壳, 并且不同地区的风化壳差异和储层预测的研究仍相对匮乏<sup>[3]</sup>。

风化壳的研究最早可追溯到 19 世纪, 国内外学者在风化壳分带结构方面做了大量工作, 如 CHARLES 等<sup>[7]</sup>将风化壳自上而下依次为最终分解产物带、水解带、淋滤带、崩解带和未风化带。在传统的风化壳控制因素上, 前人主要集中在岩性、风化时长、古

地貌等单因素上<sup>[7-8]</sup>, 并且属于定性分析的范畴, 研究尺度相对粗放。近年来, 优质储层定量研究取得了一定的进展, 比如李德江等<sup>[9]</sup>考虑视压实率、视溶蚀率等定量分析了各类成岩相的分布特征, 对优质储层分布进行了定量预测; 余瑜等<sup>[10-11]</sup>通过计算压实系数、胶结系数和溶蚀系数等参数划分了储集层的定量类型。研究表明, 多因素综合的储层定量评价对于优质储层分布预测是比较准确的<sup>[9-11]</sup>。

21 世纪以来, 基于计算机的多元统计学在地球科学学科中应用愈加广泛, 聚类分析方法在油源对比、沉积物源和岩性分类等方面取得了较多成果<sup>[12-14]</sup>。根据渤海油田“增储上产”的需要, 本文将针对变质岩地层, 在渤海重点地区通过取心、薄片、测井、分析化验以及物性资料的分析, 在微观、宏观岩矿鉴定和测井耦合的思路下, 厘清变质岩的风化壳纵向结构及其发育的影响因素, 然后再运用多元统计学中的聚类分析法对风化壳储层质量进行变量因子归类, 计算出变质岩潜山储层发育的因子系数和风化壳分级指标, 进而对未钻井地区的风化壳储层优劣程度进行准确的预测。

## 1 区域地质背景

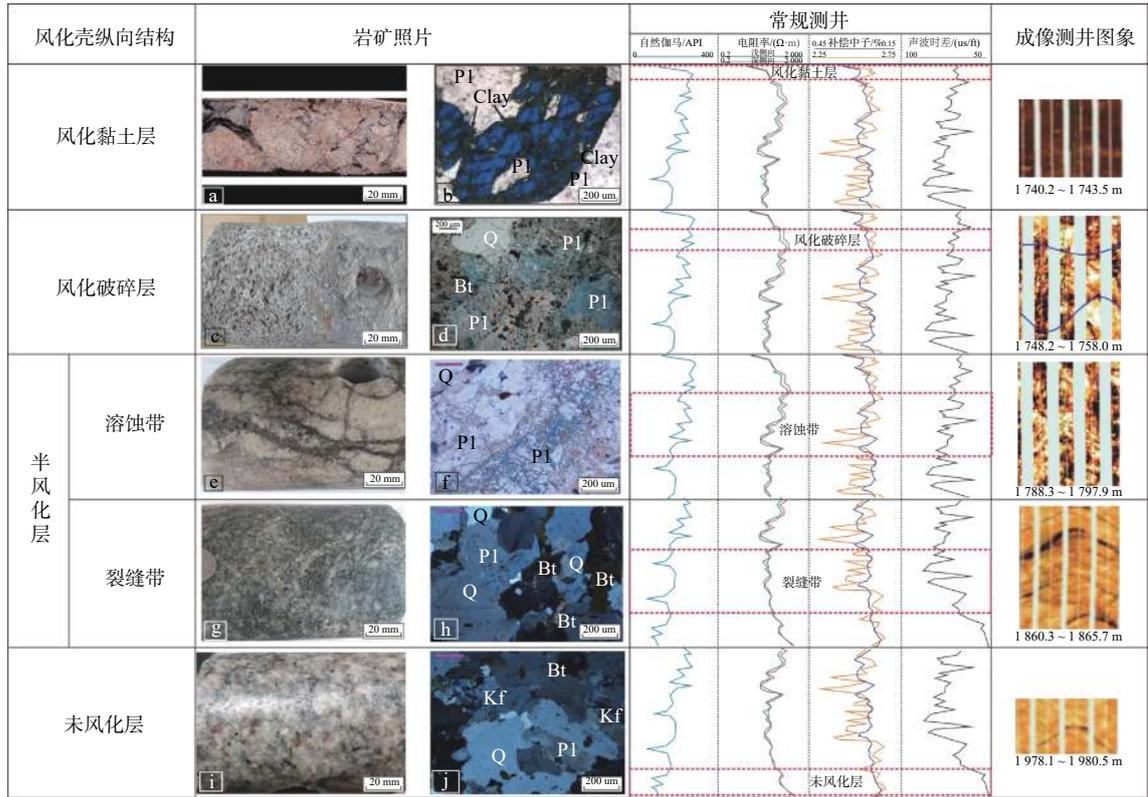
渤海探区位于渤海湾盆地东北部, 系指渤海海

收稿日期: 2020-11-10

资助项目: 中海油“十三五”油气资源评价项目(YXKY-2018-KT-01); “十三五”国家科技重大专项(2016ZX05024)

作者简介: 陈心路(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事潜山储层成藏综合研究工作。E-mail: chenxl72@cnooc.com.cn





(a)风化黏土层,由风化松散的黏土矿物组成,JZ25-C井,2 000.5 m;(b)风化黏土层,原始矿物晶型消失,JZ25-C井,2 000.8 m,×50(-);(c)风化破碎层,发育大量溶蚀孔隙,BZ27-A井,3 657.3 m;(d)风化破碎层,大部分溶孔得以保留,BZ27-A井,3 657.3 m,×50(-);(e)半风化层溶蚀带,溶蚀网状缝发育,BZ27-B井,3 698.5 m;(f)半风化层溶蚀带,沿斜长石、黑云母节理发育溶蚀孔,BZ27-B井,3 720.7 m,×50(-);(g)半风化层裂缝带,裂缝发育,BZ26-A井,3 330.8 m;(h)半风化层裂缝带,微裂缝被黏土矿物等充填,BZ26-A井,3 330.3 m,×100(+);(i)未风化层,致密无孔缝,CFD18-B井,3 960.5 m;(j)未风化层,黑云母零星分布,无蚀变现象,CFD18-B井,3 960.3 m,×25(+).

图中:Q为石英,Pl为斜长石,Kf为钾长石,Bt为黑云母,Clay为黏土

图 2 渤海变质岩风化壳纵向结构分带综合划分

Fig.2 Comprehensive vertical zoning of the weathered crust of metamorphic rocks in Bohai Sea

于厚度太薄,该层在常规测井曲线上难以识别,成像测井上表现为黑色低阻影像,如辽西凸起上 JZ25-C 井 2 000~2 003 m 岩心段(图 2a、b)。

## 2.2 风化破碎层

该层主要由风化黏土和破碎岩块堆积而成,呈灰褐色,基岩的原岩格架基本被破坏,厚度约 4~12 m。该层风化溶蚀强烈,网状缝均发生溶蚀,缝面圆滑,储集空间以孔隙为主,孔隙度最高达 12.8%。常规测井上伽马值和密度值较大,中子值和声波时差偏小,曲线与下伏地层呈突变接触,成像测井上整体偏暗,模糊不清,夹杂溶孔暗斑。渤南低凸起 BZ27-A 井基岩风化壳上部 3 657.3 m 处岩心和薄片特征显示,岩心上风化破碎角砾和黏土组成,发育大量溶蚀孔隙,局部充填碳酸盐岩条带(图 2c)。薄片上原始矿物晶型基本消失,残留矿物为石英和钾长石,蚀变矿物云母和斜长石沿解理面溶蚀加宽,大部分溶孔得以保留,局部被石膏、方解石和黏土

等混杂充填(图 2d)。

## 2.3 半风化层溶蚀带

该带厚度范围为 50~120 m,原岩矿物格架基本保留,风化溶蚀作用较强,矿物棱角模糊,以溶蚀孔、扩大缝为主。岩网上网状缝大量发育,多数裂缝未被充填,并存在溶蚀加宽现象,边缘模糊不平,局部发育溶蚀孔洞(图 2e)。岩矿薄片上可见长石绢云母化,黑云母绿泥石化,网状缝发育,长石和黑云母沿解理面溶蚀加宽,多数为有效缝,原始矿物晶型基本得以保留。常规测井表现为自然伽马、电阻率较大,中子、密度、声波时差曲线呈跳跃状。FMI 图像呈现出亮暗杂乱分布,局部可见较大的暗斑(图 2f)。

## 2.4 半风化层裂缝带

该带原岩矿物格架基本完好保存,风化溶蚀作用较弱,见微量黏土矿物,以构造裂缝为主。常规

测井表现为中子、密度和声波时差跳跃幅度较大,频率较高。FMI图像整体颜色较亮,裂缝边界清晰,溶蚀加宽现象稀少,局部可见亮暗杂乱出现的现象,是由于裂缝切穿网状缝溶蚀加宽造成的。渤南低凸起 BZ26-A 井岩心溶蚀现象仅局部可见,发育大量细长的裂隙,边界清晰溶蚀弱,裂缝孔隙度开始占优势,薄片上原矿晶型保存完整,长石、云母蚀变化程度低,仅局部可见解理面溶蚀加宽的现象(图 2g、h)。

## 2.5 未风化层

该层未钻穿,原岩格架完好保存,未见任何风化溶蚀痕迹,无溶蚀孔洞,无黏土矿物,仅见少量微裂缝发育。通过与半风化层对比,该带实际上接近新鲜的基岩,岩心、薄片上发育少量构造微裂缝,未见风化蚀变现象。常规测井上表现为深浅电阻率曲线幅度差很小,伽马较小,补偿密度值达到最大,声波时差曲线平直,数值很小(图 2i、j)。

## 3 风化壳储层定量预测

### 3.1 风化壳控制因素及其指标化

尽管风化壳纵向结构整体上具有分带性,但由于多种因素的影响,不同区域的风化壳厚度及结构存在较大的差异性。前人研究表明,风化壳发育的

差异程度、物性条件及时空展布特征主要受构造、古地貌、风化时长、保存条件及岩性等多种因素的影响<sup>[20-21]</sup>,但缺乏对各个因素的重要程度进行区分和排序,无法准确判断各个控制因素的主次关系。

对渤海地区变质岩风化壳控制因素的定量分析,是以岩性、构造、风化时长、古地貌及保存条件 5 项因素为基础的评价指标来进行控制因素的重要程度排序。

岩性对风化壳形成的影响主要表现为裂缝的发育程度和矿物的溶蚀能力,笔者对岩性因素的指标化是采用脆性指数来定量岩性对风化程度的控制作用<sup>[22]</sup>,其计算公式为:

$$\beta = \frac{C_{\text{石英}} + C_{\text{长石}}}{C_{\text{石英}} + C_{\text{长石}} + C_{\text{角闪石}} + C_{\text{云母}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\beta$  为脆性指数(脆度), %;

$C_{\text{石英}}$  为石英质量分数, %;

$C_{\text{长石}}$  为长石质量分数, %;

$C_{\text{角闪石}}$  为角闪石质量分数, %;

$C_{\text{云母}}$  为云母质量分数, %。

对区内岩心观察和薄片鉴定,识别和划分出 6 种主要的变质岩类型,分别为浅粒质混合岩、混合岩化浅粒岩、浅粒岩、混合花岗岩、混合片麻岩和斜长片麻岩,相应的脆性指数越大,表明浅色矿物含量越高,裂缝发育能力越强,矿物溶蚀后储集空间的保留越好(表 1)。

表 1 渤海主要变质岩类型及其脆性指数

Table 1 Main metamorphic rocks and their brittleness index in Bohai Sea

岩石类型	浅粒质混合岩	混合岩化浅粒岩	浅粒岩	混合花岗岩	混合片麻岩	斜长片麻岩
脆度( $\beta$ )/%	97.33	95.01	95.00	90.22	84.20~87.63	81.22

构造运动通常会引引起区域应力场的变化,在岩石圈一般表现为褶皱、断层或裂缝的产生。因此,裂缝的发育程度可以有效反映出不同区域构造活动的强弱。笔者对构造因素的指标化是基于裂缝加权平均面密度进行定量分析的。通过对区内 11 口已证实探井的岩心、测井裂缝密度进行统计和计算,得出了渤南低凸起西段和辽西凸起中段构造活动较强,其次是沙垒田凸起及其斜坡带,最后是庙西北凸起地区。

风化活动是在自然外力的作用下自地壳表层向深部地层逐渐进行的。通常风化作用的持续时间越长,风化侵蚀的深度越大,即风化时长越长,风化壳发育的厚度越大。针对渤南低凸起西段、辽西

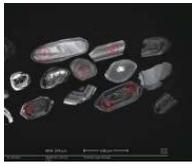
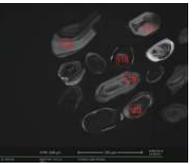
凸起中段和沙垒田凸起及其斜坡带代表井进行了 U-Pb 同位素年龄测定(表 2),计算结果表明,风化时长越长,风化壳发育的厚度越大。

地貌的高低起伏与风化剥蚀程度具有良好的相关性<sup>[21]</sup>,一般地,地貌较高部位优先发生破碎,且风化程度最强,部分风化产物向低部位脱落,固结形成风化壳(图 3)。基于“印模法”利用建模软件对渤南低凸起西段、辽西凸起中段进行了微古地貌恢复,建立了古海拔高度与风化壳厚度的对应关系。研究表明,古地貌斜坡区风化壳厚度最大,其次为古地貌凸起区,古地貌低洼区最小。

前文提到的早期形成的风化壳,其厚度通常会小于现今观测到的风化壳厚度值。这是由于早期

表 2 典型井变质岩风化壳厚度与风化时长关系对比

Table 2 Comparison between weathered crust thickness and weathering time for metamorphic rocks

	JZ20-A井	JZ25-C井	CFD1-A井	BZ27-A井	BZ26-A井
锆石取样位置					
风化时长/ $\times 100$ Ma	24.89	25.10	25.50	22.99	30.83
风化壳厚度/m	33.90	59.30	50.60	13.60	68.50

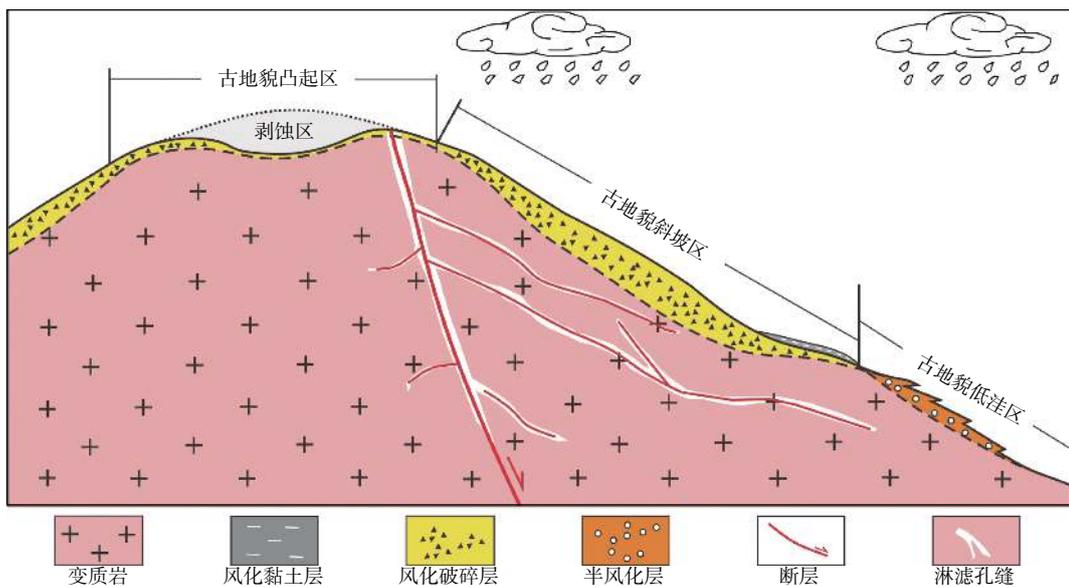


图 3 古海拔高度与风化壳厚度的对应关系模式图

Fig.3 The relationship between paleo-altitudes and weathering crust thickness

风化壳半固结时, 被晚期新生代水流冲刷侵蚀造成的, 因此, 晚期的水流性质对现今风化壳的残留厚度影响较大。一般地, 风化壳上覆地层为砂砾岩时, 指示强水动力的古水流, 对下伏风化壳侵蚀较强, 而泥岩表示静水环境, 破坏作用相对较弱。基于测井相建立了水动力指数  $E_i$  定量风化壳的保存程度。统计表明:  $E_i$  值越大, 对风化壳破坏作用越大, 风化壳厚度越小;  $E_i$  值越小, 风化壳的保存程度越高, 风化壳厚度越大(图 4)。

### 3.2 风化壳储层定量评价及预测

Q 型聚类分析是根据样本间各变量总体上的相似程度而对样本进行分类, 最终以综合评价指标 ( $REI$ ) 作为评判标准 ( $REI$  取值范围介于 0~10), 是目前常用的一种多元统计分析方法<sup>[23-26]</sup>。渤海海域不同钻井具有不同的变质岩风化壳发育厚度, 应用 Q 型聚类分析计算出  $REI$  值, 将以上 5 种因素相近的风化壳归为一类, 相差悬殊的属于另一类, 代

表着不同的风化壳类型。通过对区内 11 口钻井的控制因素定量计算和统计, 得到的数据如表 3。

对表 3 中 11 口钻井数据进行标准化、归一化处理, 采用 Q 型聚类分析得到的树状图谱见图 5。当相似系数为 10 时, 聚类效果最好, 风化壳可划分为 I、II、III 和 IV 4 种类型, 此时, 以 5 项因素的灰关联系数为因子通过计算综合评价指标  $REI$  对未知地区的风化壳类型进行预测<sup>[24]</sup>, 其计算公式为:

$$REI = F_{frag} \times \beta + F_{frac} \times N + F_{leng} \times T + F_{posi} \times G + F_{stor} \times P \quad (2)$$

式中:  $REI$  为综合评价指标;

$F_{frag}$  为脆度因子;

$\beta$  为岩石脆度;

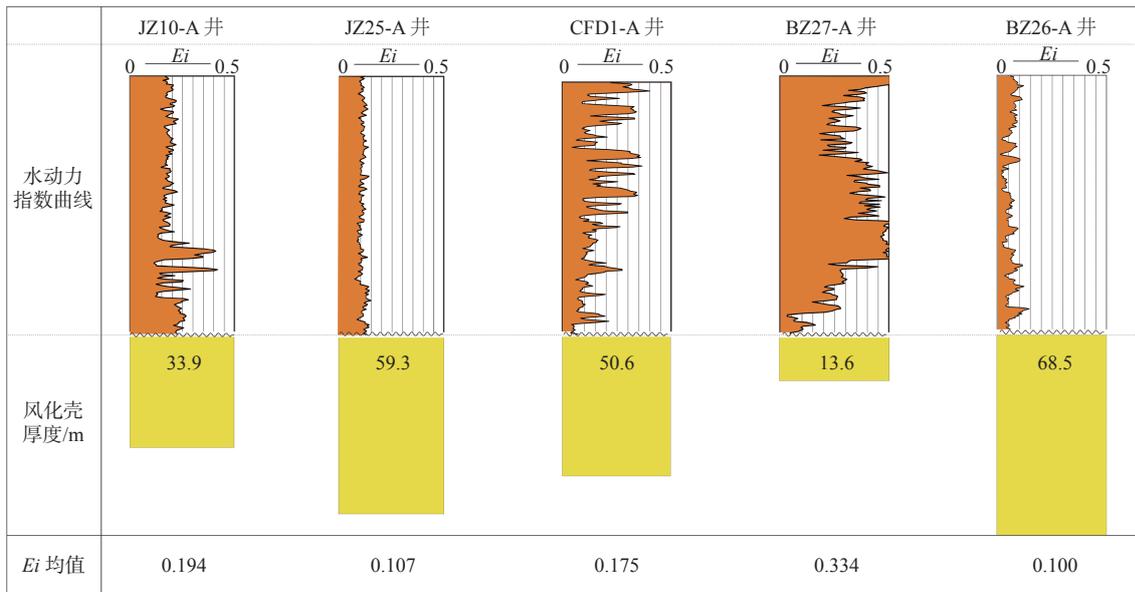
$F_{frac}$  为裂缝因子;

$N$  为裂缝密度;

$F_{leng}$  为风化时长因子;

$T$  为间断时间;

$F_{posi}$  为古地貌因子;



GR、CNCF 曲线均经过标准化、归一化处理; 选取不整合面以上 100 m 范围的沉积体数据进行计算

图 4 风化壳厚度与保存条件的定量对应关系

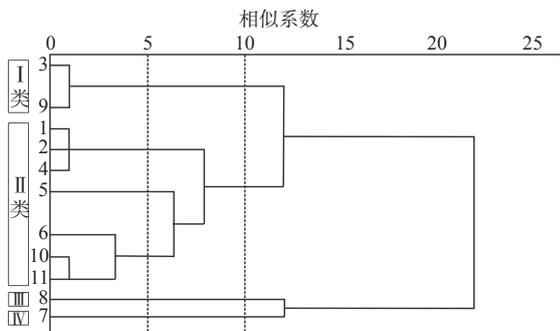
Fig.4 The relationship between weathered crust thickness and preservation conditions

表 3 渤海变质岩各井位的控制因素指标均值

Table 3 The mean value of control factors for wells in Bohai Sea

序号	井名	岩石脆度 $\beta/\%$	裂缝/(条/m)	间断时间/( $\times 100$ Ma)	古地貌位置*	保存程度**
1	JZ25-A	84.20	4.65	25.11	3	0.393
2	JZ25-B	85.11	4.55	24.82	3	0.316
3	JZ25-C	86.30	4.11	25.10	1	0.433
4	JZ25-D	85.00	2.53	25.24	2	0.357
5	JZ20-A	85.61	3.68	24.89	2	0.306
6	CFD1-A	87.63	1.64	25.50	3	0.325
7	CFD18-B	80.22	1.74	27.93	3	0.309
8	CFD18-A	81.22	1.33	27.55	1	0.211
9	BZ26-A	95.00	5.48	30.83	2	0.287
10	BZ27-A	95.01	2.80	22.99	2	0.277
11	BZ27-B	97.33	3.52	24.87	2	0.286

注: 古地貌位置\*量化指标为斜坡区风化壳厚度最大, 赋值为3, 其次为凸起区, 赋值为2, 低洼区最小, 赋值为1; 保存程度\*\*量化指标为 $(1-E_i)/2$ , 其中 $E_i$ 为水动力指数, 与风化壳保存程度呈负相关。



序号对应于表 3 中井位

图 5 渤海变质岩风化壳储层 Q 型聚类分析图谱

Fig.5 Q cluster analysis for metamorphic rock weathering crust reservoir in Bohai Sea

$G$  为古地貌位置;

$F_{stor}$  为保存因子;

$P$  为保存程度。

I 类风化壳,  $REI > 7$ , 包括 JZ25-C 井、BZ26-A 井等, 岩性以混合花岗岩、浅粒岩类为主, 裂缝密度为 3.52~5.48 条/m, 间断时间为  $(24.63 \sim 30.83) \times 100$  Ma, 微古地貌为斜坡、凸起区, 保存条件介于 0.286~0.455, 风化壳整体发育较好, 厚度超过 100 m, 孔隙度平均达到 6.51%, 属于优质风化壳储层。

II 类风化壳,  $REI$  介于 6~7, 包括 CFD1-A 井、JZ25-B 井等, 岩性主要为混合片麻岩, 裂缝密度为 2.80~4.65 条/m, 间断时间为  $(24.99 \sim 27.93) \times 100$  Ma,

微古地貌为斜坡、凸起区, 部分为低洼区, 保存条件介于 0.277~0.433, 风化壳整体发育良好, 厚度平均为 90 m, 孔隙度介于 2.38%~5.70%, 属于较好风化壳储层。

Ⅲ类风化壳,  $REI$  为 5~6, 包括 CFD18-A 井等, 岩性以片麻岩类为主, 裂缝密度为 0.846~1.339 条/m, 间断时间为  $(24.40\sim27.93)\times 100$  Ma, 微古地貌为低洼区, 保存条件介于 0.122~0.211, 风化壳整体发育一般, 厚度分布于 40~100 m, 孔隙度平均达 2.7%, 属于中等风化壳储层。

Ⅳ类风化壳,  $REI < 5$ , 如 CFD18-B 井, 岩性为斜长片麻岩、石英片岩, 裂缝密度平均 0.102 条/m, 间断时间为  $22.30\times 100$  Ma, 微古地貌为凸起、低洼区, 保存条件介于 0.211~0.362, 风化壳整体发育差, 厚度普遍  $< 50$  m, 孔隙度  $< 2.4\%$ , 属于差风化壳储层。

通过对渤海 BZ19-6 构造变质岩风化壳储层进行数据统计, 考虑了岩性、构造、间断时间、古地貌、保存条件等因素的影响<sup>[27-28]</sup>, 以沙河街组沉积相和建模恢复古地貌等值线为底图对 BZ19-6 构造风化壳储层类型进行了平面预测(图 6)。

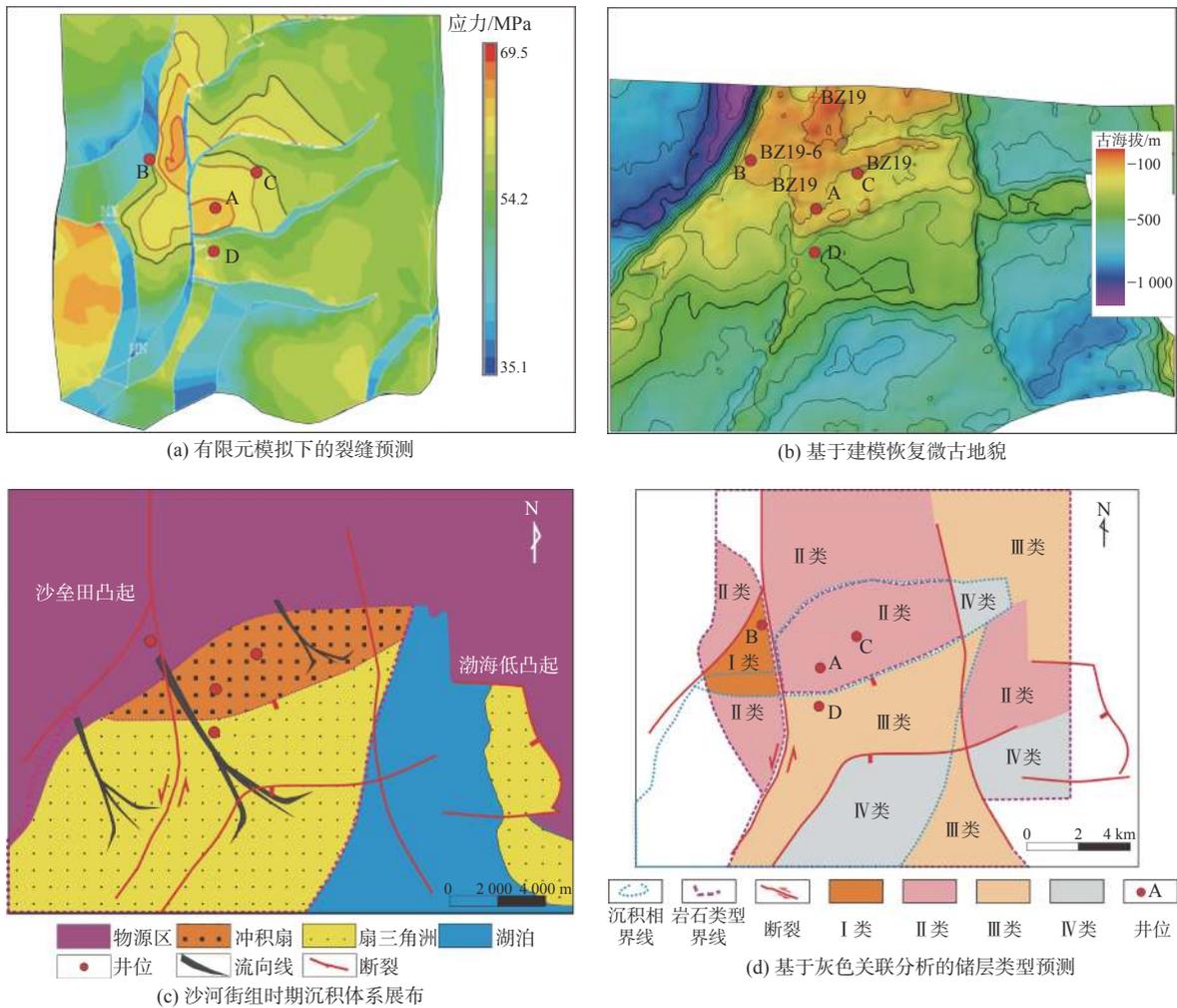


图 6 渤海 BZ19-6 构造风化壳储层类型平面预测综合分析

Fig.6 Plane prediction of weathering crust type for BZ19-6 structure

变质岩风化壳类型发育明显受岩性和裂缝体系的控制(图 6a), 混合花岗岩、浅粒岩类等以及断裂带附近地区容易发育裂缝带, 后期风化易形成 I、II 类风化壳。除此之外, 上覆地层沉积体系和古地貌形态也起着重要的作用(图 6b、c)。I、II 类风化壳主要分布在水动力弱的滨、浅湖相以及风化溶蚀强的古地貌斜坡、凸起区, 而储层品质较差的 III、

IV 类风化壳大多数位于扇三角洲、辫状河、曲流河等强水动力环境以及古地貌低洼、凸起区(图 6d)。

实钻结果显示(表 4), BZ19-6 构造 B 井凝析气层厚度达 270 m, 产能较高(日产气  $32\times 10^4$  m<sup>3</sup>, 日产油 310 m<sup>3</sup>), 而 A、C 井气层厚度约 50~90 m, 产能相对较低(日产气  $18\times 10^4$  m<sup>3</sup>, 日产油 120 m<sup>3</sup>)。根据 Q 型聚类和灰色关联分析预测结果, B 井变质岩

表4 BZ19-6地区预测与实钻结果对比

Table 4 Comparison of predicted and actual drilled results in BZ19-6 area

	A井	B井	C井	D井
预测风化壳类型	II类	I类	II类	III类
实钻日产气/万m <sup>3</sup>	18.0	32.0	8.1	0.1~0.2
实钻日产油/m <sup>3</sup>	120	310	73	0
吻合程度	优	优	良	良

储层属于I类风化壳, A、C井则属于II类风化壳。另外, 采用该方法预测的D井为III类风化壳, 而实际钻探气层厚度<50 m, DST测试日产气仅1 000~2 030 m<sup>3</sup>, 切实证明了该方法的实钻可靠性较高。

## 4 结论

(1)研究目的决定了风化壳的研究方法, 并且不同岩性的风化壳纵向结构和储集空间组合存在较大差异。以油气勘探开发为目的, 针对变质岩地层, 按照原岩蚀变强度、岩体结构破坏级别、元素淋失量、黏土含量及物性、自然伽马、电阻率、补偿中子、密度、声波时差和FMI图像在不同分带表现出的差异性, 将风化壳自上而下划分为风化黏土层、风化破碎层、半风化层溶蚀带与半风化层裂缝带和未风化层5个结构, 其中半风化层是变质岩风化壳储层的最重要部分, 也是油气稳产的主要层段。

(2)不同于前人的单因素或双因素分析, 本文总结出风化壳的发育差异受到岩性、构造、间断时间、微古地貌和上覆沉积环境等5项因素影响, 其中上覆沉积环境因素是根据水动力差异创新提出的, 且对先存风化壳储层的保存条件起到至关重要的作用。

(3)与前人风化壳定性分析不同, 本文以5项因素灰关联系数为介质, 采用Q型聚类法对11口已钻井风化壳储层进行变量因子归类, 将储层级别划分出4个优劣排序, I类风化壳以风化破碎层和半风化层溶蚀带为主, 储层物性最好; IV类风化壳以半风化层裂缝带为主, 储层物性差; II、III类储层物性介于二者之间。利用该方法对变质岩潜山BZ19-6构造4口探井进行风化壳分类评价和预测, 实钻结果验证该方法应用效果较好。

### 参考文献:

[1] 郭太现. 锦州25-1南油田储层裂缝测井识别及有效性评价[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2012, 9(7): 54-56.

[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, 3(30): 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, 32(6): 17-20.

[4] 王德英, 王清斌, 刘晓健, 等. 渤海湾盆地海域片麻岩潜山风化壳型储层特征及发育模式[J]. 岩石学报, 2019, 35(4): 1181-1193.

[5] 李景阳, 朱立军. 论碳酸盐岩现代风化壳和古风化壳[J]. 中国岩溶, 2004, 23(1): 56-62.

[6] 黄建红, 谭先锋, 程承吉, 等. 花岗质基岩风化壳结构特征及油气地质意义: 以柴达木盆地东坪地区基岩风化壳为例[J]. 地球科学, 2016, 41(12): 2041-2061.

[7] CHARLES H K, MAKENYA A H M, SHUKRANI M, et al. Geochemistry and Sm-Nd systematics of the 1.67 Ga Buanji Group of southwestern Tanzania: paleo-weathering, provenance and paleo-tectonic setting implications[J]. Geoscience Frontiers, 2017, 8(5): 1025-1037.

[8] 杨洪伟, 吕洪志, 崔云江, 等. JZ-S油田变质岩潜山储层的测井评价新方法及其应用[J]. 中国海上油气, 2012, 24(S1): 47-49, 56.

[9] 李德江, 杨威, 谢增业, 等. 准噶尔盆地克百地区三叠系成岩相定量研究[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(4): 268-274.

[10] 余瑜, 林良彪, 高健, 等. 川东南中二叠统茅口组硅质岩地球化学特征及形成环境[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(S1): 20-27.

[11] 余瑜. 川南地区须家河组砂岩储层特征及成岩相定量研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.

[12] 倪军娥, 方度, 王冰洁. 伊通地堑鹿乡断陷油源对比分析: 基于多元统计分析进行油源对比[J]. 新疆石油天然气, 2007, 3(4): 17-20.

[13] 操应长, 宋玲, 王健, 等. 重矿物资料在沉积物物源分析中的应用: 以湘西南凹陷古近系流三段下亚段为例[J]. 沉积学报, 2011, 29(5): 835-841.

[14] 寻知锋, 余继峰. 聚类和判别分析在测井岩性识别中的应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2008, 27(5): 10-13.

[15] 陈心路, 韦阿娟, 王粤川, 等. 渤海海域西南部太古宙变质岩岩性对裂缝的控制作用[J]. 地质科技通报, 2018, 37(2): 165-173.

[16] 罗宪波, 李云鹏, 葛丽珍, 等. 变质岩潜山裂缝油藏高效开发技术研究与实践[J]. 中国海上油气, 2016, 3(28): 91-96.

[17] 陆诗阔, 李冬冬. 变质岩储层岩性及裂缝测井识别方法研究进展[J]. 特种油气藏, 2016, 23(4): 1-6.

[18] 赵乐强, 张金亮, 宋国奇, 等. 济阳拗陷前第三系顶部风化壳结构发育特征及对油气成藏的影响[J]. 地质学报, 2009,

- 83(4): 570-578.
- [19] 邹才能, 侯连华, 杨帆, 等. 碎屑岩风化壳结构及油气地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(12): 2652-2664.
- [20] APLIN A C, MACQUAKER J H S. Mudstone diversity: origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems[J]. AAPG Bulletin, 2011, 12: 2031-2059.
- [21] 杨俊杰, 谢庆邦, 宋国初. 鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳古地貌成藏模式及气藏序列[J]. 天然气工业, 1992, 4(10): 8-13.
- [22] 赖锦, 王贵文, 范卓颖, 等. 非常规油气储层脆性指数测井评价方法研究进展[J]. 石油科学通报, 2016, 1(3): 330-341.
- [23] 马立文, 窦齐丰, 彭仕宓, 等. 用Q型聚类分析与判别函数法进行储层评价: 以冀东老谷庙油田28X1 区块东一段为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2003, 33(1): 83-86.
- [24] 吴育平, 孙卫, 魏驰, 等. 基于聚类分析和灰色关联分析法的储层综合评价: 以鄂尔多斯盆地姬塬地区长61储层为例[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 1(3): 35-41.
- [25] 高伟, 张志军, 郭军, 等. 辽东湾地区东营组湖底扇地震响应机理分析及储层描述[J]. 中国海上油气, 2017, 29(5): 48-55.
- [26] 唐俊, 王琪, 马晓峰, 等. Q型聚类分析和判别分析法在储层评价中的应用: 以鄂尔多斯盆地姬塬地区长81储层为例[J]. 特种油气藏, 2012, 19(6): 28-31.
- [27] 黄道军, 文彩霞, 季海锴, 等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳储层特征及主控因素分析[J]. 海相油气地质, 2009, 14(3): 10-18.
- [28] 陈心路, 王粤川, 彭靖淞, 等. 基于测井-录井资料评价变质岩风化壳结构: 以渤海南部渤中X构造为例[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 32-39.

## CHARACTERISTICS OF WEATHERED METAMORPHIC ROCKS CRUST IN BOHAI SEA AND ITS QUANTITATIVE PREDICTION

CHEN Xinlu, ZHAO Zhiping, HUI Guanzhou, YUE Junpei, ZHAO Jing

(Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

**Abstract:** With the discoveries of the oil and gas fields of weathered crust type, such as the Jinzhou 25-1 south, Jinzhou 20-2 and Bozhong 26-2 oilfields, and the breakthrough of the Bozhong 19-6 Gas Field of billions cubic meters in reserve in the past two years, the weathered Proterozoic-Archaean metamorphic rocks have become one of the key exploration targets in the Bohai Sea. In order to reveal the structure of the weathered crust for effective use of the reservoir prediction method to the buried hills consisting of metamorphic rocks, based on coring, thin slices, logging, major elements and physical property data, the vertical structure of the weathered crust of metamorphic buried hill and the controlling factors of weathered crust are studied in this paper. By using the Q-type clustering method and the grey correlation coefficient, the weathered crust of metamorphic rocks can be divided into five vertical sequences, and their development status is obviously affected by lithology, structure and preservation conditions. Among them, the sedimentary environment of the cover, which is often ignored by previous researches, are of great significance as far as the preservation conditions for the weathered crust type of oil and gas fields are considered. According to the variable factor classification for the 11 drilled weathered crusts, four reservoirs fall in classes I-IV from top to bottom. The method has been successfully applied in the prediction of the Bozhong 19-6 weathered crust gas field and should be referred in the future.

**Key words:** metamorphic rocks; weathered crust; grey relativity analysis; reservoir prediction; Bohai Sea