

# Comprehensive Identification of Longitudinal Zoning of Granite Buried Hills in Bohai Bay Basin

—Taking PL Granite Buried Hill in Bohai Sea as an Example

Xu Liang, Laiming Song, Jing Tang, Tao Niu, Xiaoqing Pan, Ting'en Fan

CNOOC Research Institute, Beijing  
Email: liangxu@cnooc.com.cn

Received: Jan. 29<sup>th</sup>, 2019; accepted: Feb. 13<sup>th</sup>, 2019; published: Feb. 21<sup>st</sup>, 2019

---

## Abstract

With the deepening of oil and gas exploration in Bohai Bay Basin, more and more buried hill oil fields of granite bedrock have been discovered. Unlike conventional clastic rocks, the development of strata is controlled by accommodation space and sediment supply (A/S). Granite protoliths are compact and single. The formation of reservoirs is controlled by weathering, so the vertical zoning is difficult, which seriously restricts the development of basic work such as geological model. Based on the largest granite buried hill in the Bohai Sea-PL buried hill, this paper synthetically utilizes logging, drilling and logging, analysis and laboratory data, as well as XRF element logging and INPEFA spectrum attribute analysis, and forms a set of new identification technology of buried hill zoning interface, which has achieved good results in practical application and effectively supported the establishment of buried Hill geological model.

## Keywords

Granite Buried Hill, Stratigraphic Division and Correlation, XRF Elemental Logging, Spectrum Properties

---

# 渤海湾盆地花岗岩潜山纵向分带综合识别研究

——以渤海PL花岗岩潜山为例

梁旭, 宋来明, 汤婧, 牛涛, 潘晓庆, 范廷恩

中海油研究总院, 北京  
Email: liangxu@cnooc.com.cn

收稿日期：2019年1月29日；录用日期：2019年2月13日；发布日期：2019年2月21日

## 摘要

随着渤海湾盆地油气勘探的深入，越来越多的花岗岩类基岩潜山油田相继被发现。有别于常规碎屑岩地层发育受控于可容纳空间与沉积物供给(A/S)，花岗岩原岩致密、单一，储层的形成受控于风化作用，纵向分带难度大，严重制约着地质模式等基础工作的开展。本文依托渤海最大的花岗岩潜山-PL潜山，综合利用测井、钻录井、分析化验等方面的资料，以及XRF元素录井和INPEFA频谱属性分析等技术手段，形成了一套新的潜山分带界面识别技术方法，在实际应用中取得了良好的效果，有效支撑了潜山地质模式的建立。

## 关键词

花岗岩潜山，地层划分与对比，XRF元素录井，频谱属性

Copyright © 2019 by authors 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

随着油气勘探程度的深入，基岩油气藏也越来越受到广泛的重视。目前世界范围内的基岩潜山油气田中，40%产于花岗岩潜山储层中，储量约占基岩油气田储量的75% [1] [2]，以越南的白虎油田和锦州25-1S油田较为著名。国内外勘探开发实践表明，花岗岩潜山储层非均质性强，且内幕变化复杂，储层的纵横向分布对油气的富集具有明显的控制作用。花岗岩原岩致密，只有经历后期风化淋滤以及构造裂缝改造才能形成有效储层，因此从成因上来说该类油藏多为风化壳型油藏。

国内外对碳酸盐岩风化壳型储层的研究起步较早且较为成熟[3] [4]，而针对花岗岩类风化壳型储层分带性尚处于起步阶段。钻井取心和野外露头观察表明花岗岩类风化壳型储层同样具有垂直分带特征，其优势储层集中在风化壳附近100 m以内，特别是在50 m左右最好。国内外不同学者根据风化壳的结构、岩矿特征、化学指标等对这些带进行了定性或半定量的划分[5]，主要是依据风化程度的强弱划分为极强风化带、强风化带、次风化带、弱风化带，本文中沿用以上分类标准。但在实际油田操作中，不同风化带界面识别存在困难，潜山内幕地震成像质量差，且测井响应不明显，而又无系统取芯资料，由此制约了储层地质模式的建立和优质储层的预测。

## 2. 研究区概况

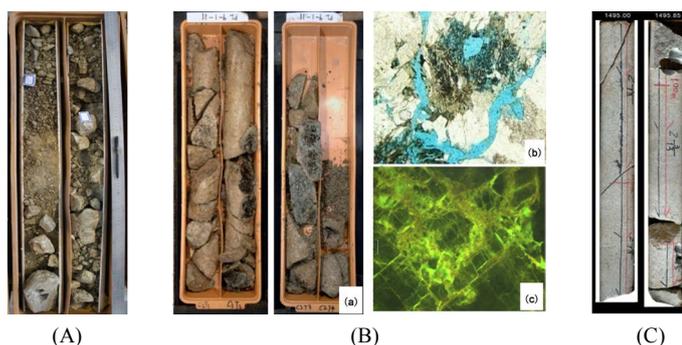
本次研究区(渤海PL油田)位于渤海庙西北凸起之上，整体构造为依附于凸起东界大断层发育的大型半背斜，潜山南北高点为元古界变质岩潜山，中间宽缓鞍部为中生界花岗岩侵入体。PL油田为国内海上第一个亿吨级花岗岩潜山油田，发育裂缝孔隙型储层，潜山岩性较为单一、缺乏常规沉积岩旋回特征，纵向分带难度大。本文综合利用PL油田钻录井、测井、分析化验等方面的资料，以及XRF元素录井和INPEFA频谱属性分析等技术手段，形成了一套新的潜山分带界面识别技术方法，在实际应用中取得了良好的效果，有效支撑了潜山地质模式的建立。

### 3. 花岗岩潜山地层纵向分带识别技术

#### 3.1. 钻录井分带特征综合识别技术

##### 3.1.1. 岩心、薄片识别

通过大量的岩心和薄片观察,认为潜山纵向上主要分为极强风化带、强风化带、次风化带和弱风化带,其中极强风化带因遭受风化作用最为严重,花岗岩中长石多风化为高岭土等粘土矿物,孔隙多为泥质充填,无储集性能(图 1(A));强风化带岩心多呈散砂状和碎块状,铸体薄片见大量溶蚀孔隙,微裂缝也极其发育(图 1(B));次风化带取心整体致密,仅在裂缝发育段储层得到改善,裂缝面含油,见少量溶蚀孔隙(图 1(C))。



(A) 1284 m~1288 m 花岗岩遭强烈风化,松散呈土壤状。(B) (a) 风化较重,疏松,裂缝发育,裂缝面含油;(b) 铸体薄片(单偏光 25×)孔隙发育,见角闪石溶孔和溶解构造缝;(c) 1605.79 m, 荧光薄片,未充填裂缝发中亮-亮绿色荧光。(C) 1495 m~1495.85 m, 基质致密,发育高角度裂缝。

Figure 1. Identification characteristics of cores and thin sections in each weathering zone

图 1. 各风化带岩心、薄片识别特征

##### 3.1.2. 钻时曲线识别

钻时反映的是岩石可钻性,可钻性与岩石本身的致密程度密切相关,而岩石的致密程度主要是由岩性和物性决定的,因此,钻时能够反映岩石的岩性和物性,而且不受岩石本身的电性、磁性或放射性等因素的影响[6]。而本区储层纵向上岩性变化不大,在钻头、钻压、转盘转数等参数稳定时钻时基本上反应了岩石物性纵向上的差异。

图 2 中 PL11 井钻时曲线在强风化带和次风化的分界处可见明显的钻时异常。

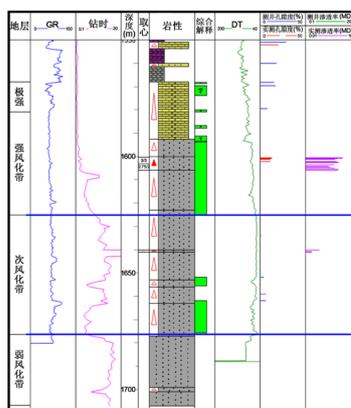


Figure 2. Integrated logging map of well PL11

图 2. PL11 井综合录井图 in well PL5

### 3.2. X 射线元素录井(XRF)界面识别技术

X 射线荧光元素录井(通常用英文缩写 XRF 表示)技术是近年来兴起的一项新技术,通过 X 射线脉冲数来记录元素产生的荧光能量和强度,定性地指示元素含量的高低。XRF 技术目前尚处于应用研究阶段,目前国内很少开展 X 射线元素录井地层划分的工作,仅有少数油田进行了探索性试验与研究[7], PL 潜山多数评价井均采用 XRF 技术开展录井。

XRF 技术的原理在于各种矿物的抗风化能力不同,各种元素的迁移能力不同,在不同的风化作用阶段,元素的富集情况和形成的矿物也不一样。但风化作用最终会造成不稳定矿物(铁镁矿物、长石类矿物等)向稳定矿物(石英和黏土矿物)的转变;易迁移元素(Cl、S、Ca、Mg、Na、Mn、硅酸盐中的 Si、P 等元素)的流失和弱迁移元素(Fe、Al、Ti 等)、不迁移元素(Si)的富集。因此,从理论上能够通过元素的不同及含量的变化来进行地层的划分与对比。

以 PL5 井为例,不迁移元素 Si 的富集以及易迁移元素 Ca, P, Na, Al 的流失,很好的说明了元素在垂向上规律性的变化(图 3)。

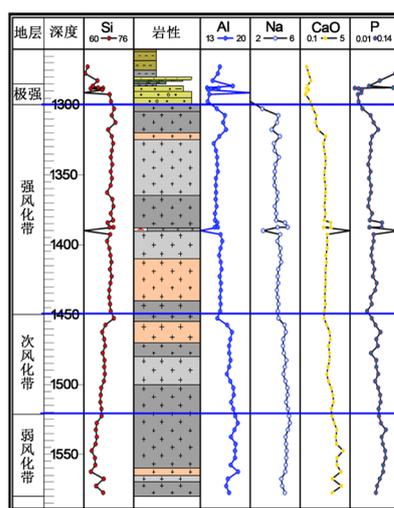


Figure 3. Vertical distribution of rock components

图 3. PL5 井岩石组分纵向分布图

### 3.3. 基于“测井频谱分析”的测井识别技术

从 PL 潜山 15 口评价井测井曲线特征来看,个别井纵向上可以通过曲线基值和形态的变化识别出各个风化带,尤其是对于极强风化带顶底界的识别。但就强风化带、次风化带底界却很难形成一套统一的标准。

为此引入了 INPEFA 测井频谱分析技术,INPEFA 测井频谱分析技术是荷兰沉积学家 S.D.Nio 研发的一种以最大熵分析方法为基础的测井曲线频谱分析方法,该方法通过一系列的数学运算把使曲线由深度域转化为频率域,使隐藏在测井曲线中的地层特征更加显现化。其原理主要是已经依据“求异对比”的理念—原始的花岗岩在未经风化构造改造这一因素影响时是不会有频谱曲线纵向上的差异的,相似的风化构造改造程度有相似的频谱曲线响应特征,因此只需要把这一因素导致的测井响应差异放大,形态相似性好的曲线其地层发育也相似,就可以实现地层多井对比[8]。

以 PL2 和 PL4 井为例,分别对 GR, DT, DEN 三条测井曲线做了整体 INPEFA 频谱分析,利用该技术可以将原始测井曲线中的趋势或是差异放大,使地层界面易于识别(图 4),风化带底界 DT 呈明显的负转折点, DEN 则呈正转折点。

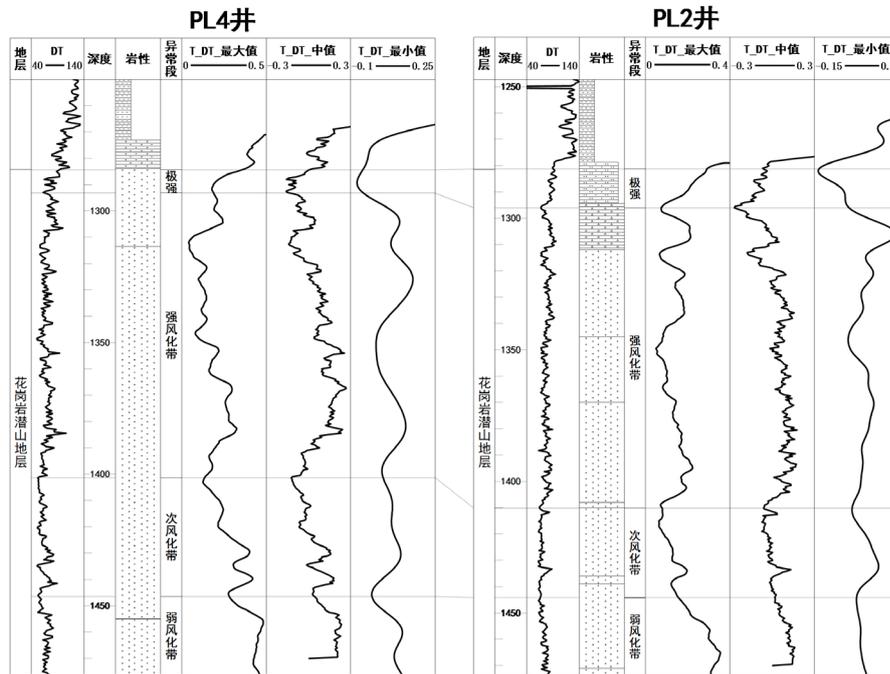


Figure 4. Stratigraphic division correlation map by log spectrum analysis  
图 4. 测井频谱分析划分对比图

#### 4. 潜山地层纵向分带综合识别图版

在多种潜山纵向分带技术应用的基础上，最终确定了 PL 油潜山地层划分图版(图 5)，各风化带综合识别特征如下

	常规测井	频谱曲线	元素录井	钻时	取心	薄片	储集空间
极强风化带	GR RD AC 高伽玛, 低电阻, 低速 PL14井	T-DT T-DEN 正转折点 负转折点	Si Al K 高Si, 低Al, K	PL14井 低钻时			无储集空间
强风化带	GR RD AC 低伽玛, 较高电阻, 较高速 PL14井	T-DT T-DEN 正转折点 负转折点	Si Al K 较高Si, 较低Al, K	较低钻时			上部: 孔隙性 下部: 裂缝-孔隙性
次风化带	GR RD AC 低伽玛, 高电阻, 高速 PL14井	T-DT T-DEN 正转折点 负转折点	Si Al K 较低Si, 较高Al, K	较高钻时			裂缝型 孔隙-裂缝型
弱风化带	GR RD AC 低伽玛, 高电阻, 较高速 PL14井	因底界面未钻穿, 无法获取界面特征	Si Al K 低Si, 高Al, K	高钻时			裂缝型 孔隙-裂缝型 裂缝-孔隙型 孔隙型

Figure 5. Vertical zoning identification chart of granite buried hill in PL oilfield  
图 5. PL 油田花岗岩潜山纵向分带识别图版

极强风化带位于花岗岩侵入体顶部，录井表现为泥质含量高，低钻时特征，测井响应则为高 GR、低电阻、低速的特征。PL2 井在极强风化带内的取心证实，本带风化非常强烈，部分呈粉砂质泥状结构，难以形成有效储层。地球化学元素特征上以富 Si、Fe 等难迁移元素，贫 Ca、Na 等易迁移元素为特征，岩矿特征上则以高石英含量，低长石含量为特征，该带风化成熟度最高，化学蚀变程度也最强。

强风化带位于花岗岩侵入体的上部，经过强烈风化、淋滤作用，溶蚀孔、洞，裂缝均较发育，钻时较下部明显偏低，测井响应表现为低 GR，较高电阻，较高波速的特征，INPEFA 频谱曲线上 DEN 为负转折点，DT 为正转折点。综合解释证实，该带储层发育，横向分布稳定，连通性较好。本带岩心，多见散砂状和碎块状储层，铸体薄片见大量的颗粒溶蚀孔和部分粒间孔，构造裂缝发育，形成网状缝，沟通溶孔，形成很好的储集空间，以孔隙型储层和裂缝-孔隙型储层为主。岩石地化以及岩矿特征上较极强风化带 SI 含量降低，Ca、Na 等含量升高，石英含量降低，长石含量升高，该带化学风化成熟度降低，但较下部次风化带和弱风化带仍较高。

次风化带的风化、淋滤作用变弱，溶蚀孔、洞较少，以裂缝为主，钻时曲线基值较上部明显增加，表现为低 GR、高电阻、高速的测井响应特征，INPEFA 频谱曲线上 DEN 为负转折点，DT 为正转折点。致密段较多，储层发育变差，横向分布不稳定，连通性较差。取心证实，本带存在有效储层，但整体比较致密。

弱风化带钻遇井较少，该带裂缝较发育，致密带厚度增加，整体物性变差，钻时基值较上部增加，但在裂缝发育段钻时降低明显，测井曲线上表现为低 GR、高电阻、较高速的特征。铸体薄片观察仅在构造缝周围发育有少量的溶蚀孔隙。

## 5. 应用效果分析

该潜山纵向分带综合识别图版在实际应用显示出较高的技术优势，一方面在 PL18 和 PL19 评价井钻进中通过钻时曲线和 XRF 技术准确、快速的确定潜山界面；另一方面各井分带的技术成果结合潜山古地貌分析，形成了由高部位向鞍部中心及北西方向环带状依次减薄的“簸箕圈”模式，模式对于后期有利储层的预测，开发井位的优选起到了很好的指示作用(图 6)。

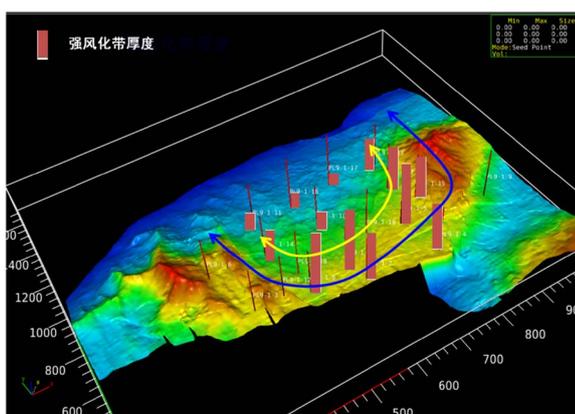


Figure 6. Reservoir distribution model in PL buried hill

图 6. PL 潜山储层发育模式

## 6. 结论

1) 渤海 PL 花岗岩潜山具纵向分带性，依据风化程度的不同将其分为极强风化带、强风化带、次风化带和弱风化带；

2) 综合利用 PL 油田钻录井、分析化验、测井等方面的资料, 引入 XRF 元素录井和 INPEFA 频谱属性分析等技术手段, 形成潜山纵向分带综合识别图版, 能弥补不同资料间地层划分对比当中存在的不足, 在实际应用中具有较高的技术优势。

## 参考文献

- [1] 潘建国, 郝芳, 张虎权, 等. 花岗岩和火山岩油气藏的形成及其勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 2008, 18(3): 380-385.
- [2] 潘杨飞, 徐守余. 全球基岩油气藏分布及成藏规律[J]. 特种油气藏, 2011, 18(1): 7-11.
- [3] 李德文, 崔之久, 刘耕年. 风化壳研究的现状与展望[J]. 地球学报, 2002, 23(3): 283-288.
- [4] 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, 9(1): 57-63.
- [5] 尚彦军, 宏伟, 曲永新. 花岗岩风化程度的化学指标对比及其微观岩石学研究—以香港九龙地区为例[J]. 地质科学, 2001, 36(3): 279-294.
- [6] 张谊平. 综合录井钻时参数在火山岩储层评价中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(S1): 29-31.
- [7] 张国龙, 闫长青, 张国庆, 等. X 射线荧光元素录井在南堡油田潜山卡层中的应用研究[J]. 录井工程, 2012, 23(1): 20-24.
- [8] 范廷恩, 梁旭, 宋来明, 等. 一种花岗岩地层划分对比方法[P]. 中国专利, ZL 2016 1 0403178.X, 2017-12-15.

### 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: 2163-3967, 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: [ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)