

Prediction and Analysis of Weathered Zone Thickness Based on the Ancient Landscape of Buried Hill

Pengjun Fan, Hongjun Fan, Tao Niu, Dakun Xiao, Shufang Ma

CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing
Email: fanpj@cnooc.com.cn

Received: Jun. 26th, 2020; accepted: Jul. 9th, 2020; published: Jul. 16th, 2020

Abstract

The BZ buried hill gas reservoir is a fractured gas reservoir of the Archeozoic buried hill located in the Bohai Bay. The Archeozoic buried hill in the BZ area has undergone multi-phase tectonic movements, and a weathering zone with a thickness of about 40 - 350 m has developed at the top. The reserves of buried hill gas reservoirs in BZ Archean are mainly concentrated in the weathered zone, so the study on the thickness distribution of the weathered zone is particularly important for the development of the gas field. In this paper, the functional relationship between the relative height of the ancient landform and the thickness of the weathering zone is established based on analyzing the characteristics of weathering zone and palaeogeomorphic restoration by using the core, drilling data and seismic data, and then the thickness distribution of the weathering zone is quantitatively predicted, which provides the basis for the reserves quality analysis and developing well plan of the BZ buried hill gas field.

Keywords

Archeozoic Buried Hill, The Ancient Landform, Weathered Zone

基于潜山古地貌的风化带厚度预测分析

樊鹏军, 范洪军, 牛涛, 肖大坤, 马淑芳

中海油研究总院有限责任公司, 北京
Email: fanpj@cnooc.com.cn

收稿日期: 2020年6月26日; 录用日期: 2020年7月9日; 发布日期: 2020年7月16日

摘要

BZ潜山气田是位于渤海湾的太古界潜山裂缝气藏, BZ区域太古界潜山经历了多期构造运动, 顶部发育了

厚约40~350 m的风化带储层，BZ潜山气田的储量主要集中于风化带储层。因此，风化带的厚度分布研究对该气田的开发尤为重要。本文利用岩心、钻井资料和地震资料，通过古地貌恢复和风化带的特征分析，建立了古地貌相对高度与风化带厚度的函数关系，进而定量预测了本区风化带的厚度分布，为BZ潜山气田的储量品质分析及开发布井提供了依据。

关键词

太古界潜山，古地貌，风化带

Copyright © 2020 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

随着渤海湾盆地勘探的深入，潜山构造带已发现众多油气藏[1] [2] [3]，BZ太古界潜山气藏正是近年在渤海湾盆地发现的千亿方级的太古界变质岩潜山裂缝型气藏。而潜山气藏开发的关键是储层发育规律的研究[4]，通常潜山顶部除构造运动形成构造缝外，在出露地表期间遭受风化淋滤作用改造会形成大量风化缝、收缩缝、溶蚀孔缝等储集空间类型，而越靠近潜山顶部，风化作用越强，储层越发育[5] [6] [7] [8] [9]，石油勘探开发中一般将受构造和风化淋滤作用双重影响的这部分储集层段称为风化带。而BZ太古界潜山气藏的储量主要集中在风化带储层，风化带的储层展布研究对气田开发至关重要。

国内外对碳酸盐风化壳储层的研究较多[10] [11] [12]，而针对太古界变质岩潜山裂缝型储层风化带厚度预测的研究甚少，同时前人针对风化带储层厚度的预测多采用地震反演及地震属性分析方法，而BZ潜山气藏埋深较大，潜山层段地震资料品质不高，不能有效开展上述方法的储层预测。从潜山风化带的发育机理分析可知，古地貌在风化带的形成过程中起着重要的控制作用，本文在研究BZ区块潜山古地貌的恢复及其与已钻井风化带厚度相关性的基础上，定量预测分析了BZ气田风化带厚度分布，为本油田风化带的开发奠定了基础，同时为周边相似潜山油气田的风化带储层研究提供了参考。

2. 地质背景

渤海湾BZ太古界潜山构造为多个洼陷环绕的近南北向构造脊，按照潜山构造形态分为南、北两个块，整体表现为南高北低的形态，前期区域构造研究分析认为BZ太古界潜山构造形态主要受燕山和喜山两期大的构造运动控制[13]。

燕山早期，太古界地层之上覆盖有古生界地层，而燕山早期的东西向挤压运动[14] [15]形成了BZ太古界潜山洼中隆构造格局；燕山晚期南北向挤压运动，使BZ太古界潜山构造进一步抬升，上覆地层遭受剥蚀，潜山地层出露，长期遭受风化淋滤。整体构造呈现为北高南低的形态。

喜山构造运动孔店时期，BZ区域南北向拉张，南部断陷活动强烈，同期南部沉积了巨厚的孔店组砂砾岩，潜山北部地层依旧出露地表接受风化改造；而沙河街组沉积期将整个构造填平补齐，潜山被整体覆盖，潜山构造保持了孔店组沉积末期的北高南低的地貌形态；东营组沉积时期，走滑运动强烈，潜山整体构造反转变为南高北低，沉积中心北移；随后的新近系时期继承了东营后期的南高北低的构造格局。

3. 古地貌恢复

从BZ油气田太古界潜山构造演化可知，在BZ区域潜山隆起带上，古近系地层直接上覆于太古界潜

山之上，南区潜山直接上覆地层为较厚孔店组地层，北区上覆地层为沙河街组地层，沉积特征与当时古地貌北高南低的形态吻合。另外，沙河街组末期整个渤海湾盆地是一个填平补齐的过程，全区大面积覆盖一套湖相地层，因此可利用沉积基准面恢复的方法近似模拟古近系地层沉积前的长期遭受风化淋滤的潜山古地貌形态。其原理为，据高分辨率层序地层学[16]，湖相泥岩的沉积基准面近似于水平面，沉积较厚的地方对应于下伏潜山的构造洼地，沉积较薄的地方对应于下伏潜山的构造高地，因此只需将沙河街顶面拉平，即可获得古地貌的近似形态，如图 1 所示。

从图上可以看出，整体上 BZ 区域潜山古地貌呈现出北高南低的形态，北区西块呈现出以 BZ-A 井区为高点的完整背斜构造形态，北区的东块为一系列的由北向南构造依次降低的断阶构造，而南区孔店组覆盖的区域古地貌为相对较低的洼陷。

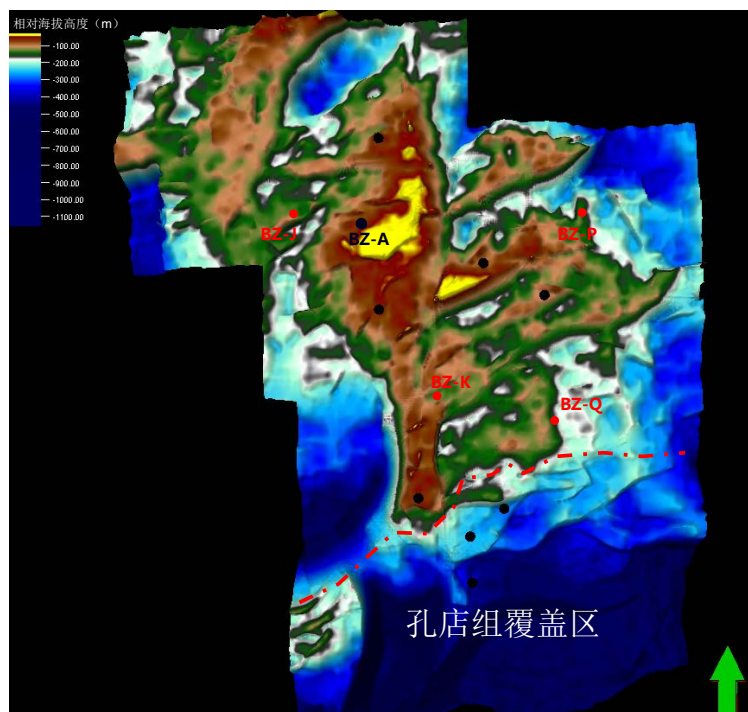


Figure 1. The ancient landform of the buried hill
图 1. 潜山古地貌

4. 风化带厚度确定

BZ 气藏的潜山储层自上而下分为风化带和内幕带，风化带的储层裂缝包括了构造运动形成的构造缝和太古界潜山出露地表期间遭受风化淋滤形成的风化缝及各种溶蚀孔缝；而内幕带的储集空间主要以构造缝为主，基本不受风化作用改造。风化带和内幕带的差异在物性以及钻时、电阻率等电测曲线上也有明显的体现。通过对 BZ 气田已钻井信息分析，总结了本区风化带的特征如下：

岩性特征方面，风化带在大汽水的作用下，云母、斜长石蚀变程度深。黑云母蚀变为菱铁矿或者绿泥石，斜长石多发生绢云母化、铁白云石化和菱铁矿化。

构造发育特征方面，由于受到断裂及风化双重作用的影响，风化带裂缝具有网状特征，储层比较连续，整体物性较好，具有似层状结构。

岩电特征方面，与内幕带相比，风化带的钻时、电阻偏低，孔隙度和净毛比偏高(钻时 8~27 min/m，电阻率 172~1160 $\Omega \cdot m$ ，孔隙度 2.3%~6.5%，净毛比 0.35~0.74)。

根据以上特征, 利用钻井资料、岩性资料和岩石物性参数, 确定出各井点风化带的厚度, 见表 1。

Table 1. Thickness of weathered zone
表 1. 风化带厚度

井名	风化带厚度/m	井名	风化带厚度/m
BZ-A	286	BZ-F	164
BZ-B	215	BZ-G	117
BZ-C	314	BZ-H	112
BZ-D	56	BZ-M	42
BZ-E	113	BZ-N	66.8

5. 风化带厚度预测分析

5.1. 古地貌与风化带厚度相关性研究

为研究古地貌与风化带厚度相关性, 统计 BZ 区块内 10 口已钻井的风化带厚度及井点处的古地貌相对高度数据, 通过交会分析分别得到了北区潜山风化带厚度及南区孔店组覆盖区域潜山风化带厚度与古地貌相对高度之间的函数关系, 见图 2。

由交会图可知, 在无孔店组覆盖的区域已钻井潜山的风化带厚度约为 50~350 m, 风化带厚度与古地貌相对高度呈正相关对数函数关系, 相关系数约为 0.7。而在孔店组覆盖的区域, 潜山构造位置较低, 孔店组的覆盖使得风化淋滤作用时间缩短, 故风化带厚度相对较薄, 约为 40~100 m, 该区的风化带厚度与古地貌相对高度呈线性的正相关关系, 相关系数为 0.85。综合分析认为本区风化带厚度与古地貌构造高度相关性较好, 相同的风化条件下, 古地貌构造高部位风化带储层厚度大, 随着古地貌构造高度下降风化带储层厚度减薄。

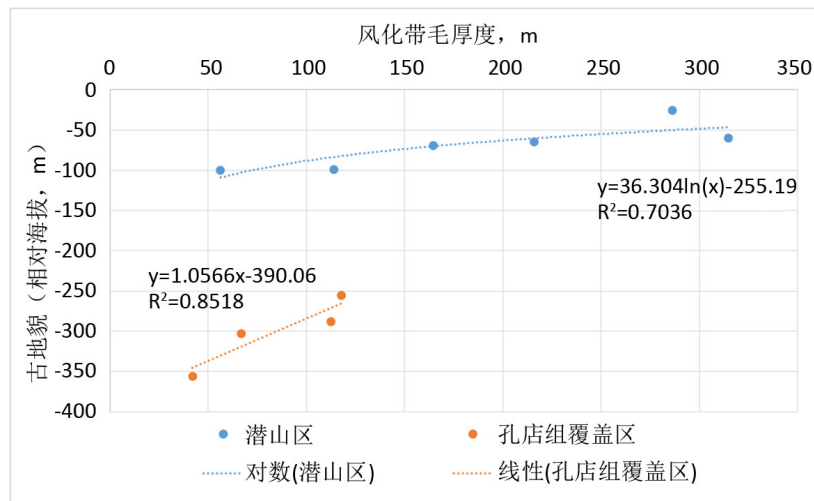


Figure 2. The crossplotting analysis of weathering zone thickness and paleogeomorphic elevation

图 2. 风化带厚度与古地貌相对高度交会图

5.2. BZ 太古界潜山风化带厚度定量预测与结果分析

鉴于古地貌相对高度与风化带厚度具有较好的相关性, 故采用协克里金插值的方法, 以潜山古地貌

相对高度数据为约束，以表 1 中各井的风化带厚度为硬数据，定量预测了 BZ 潜山风化带的厚度分布，如图 3 所示，宏观上风化带厚度的展布符合与古地貌高度的正相关关系。

通过 4 口新钻井的风化带实钻厚度与风化带预测结果对比表 2 可以看出，BZ-P、BZ-Q 与 BZ-K 井的钻前预测与实钻结果的吻合度在 85% 以上。

而 B-J 井的实钻厚度远大于预测厚度，分析原因认为，根据该井点位置所处的古地貌位置可见(图 1)，B-J 井紧邻一条南西 - 北东走向的断层，而断层形成的破碎带会增加风化淋滤作用影响的深度，对风化带厚度有一定的增幅作用[17]，故风化带实钻厚度比预测厚度值大较多。

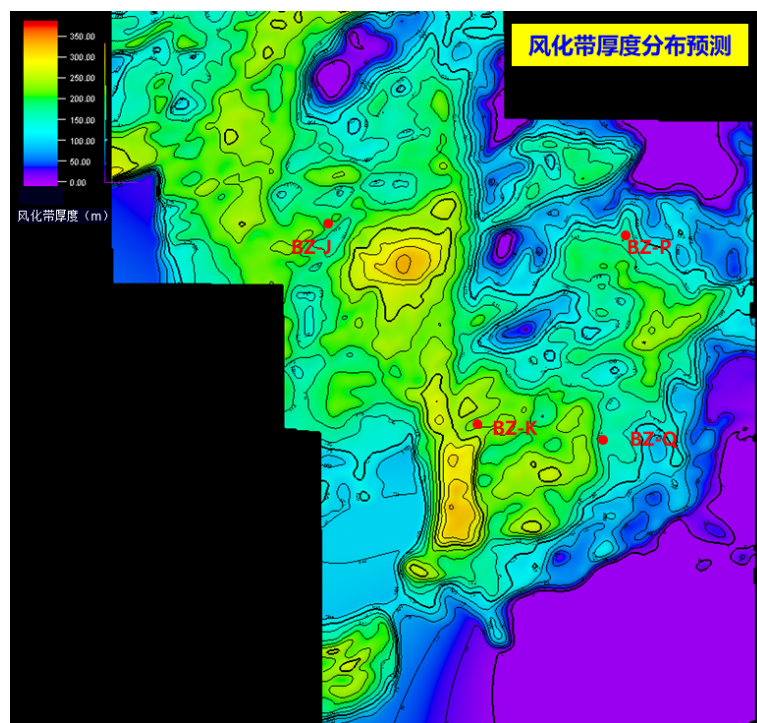


Figure 3. The prediction map of thickness distribution of buried hill weathering zone

图 3. BZ 潜山风化带厚度分布预测图

Table 2. Drilling verification of weathering zone thickness prediction results

表 2. 风化带厚度预测结果钻井验证

井名	风化带预测厚度/m	风化带实钻厚度/m	吻合度/%
BZ-P	141	128	91
BZ-Q	150	131	88
BZ-K	175	148	85
BZ-J	206	342	34

6. 结论

1) BZ 区块潜山古地貌相对高度与风化带厚度有较好的相关性，在相同的风化条件下，古地貌高部位风化带厚度大，古地貌构造低部位风化带厚度薄。基于此关系，可以有效地预测 BZ 及周边类似气田的风化带厚度，用于指导油气田开发。

2) 风化带的厚度还受古断层等多种因素的调节, 断层活动形成的破碎带会加深风化淋滤作用对储层的改造, 进而影响风化带储层的厚度。建议在类似气田采用文中的方法, 预测潜山风化带厚度时, 应去除靠近断层的井点数据参与预测, 以保证预测结果的整体合理性。

3) 在难以应用常规地震储层预测方法分析深潜山风化带储层展布时, 基于古地貌的风化带厚度预测方法为此类储层的研究提供了参考。

参考文献

- [1] 谯汉生, 方朝亮, 牛嘉玉, 等. 渤海湾盆地深层石油地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [2] 龚再升. 继续勘探中国近海盆地花岗岩储层油气藏[J]. 中国海上油气, 2010, 22(4): 213-220.
- [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] 侯明才, 曹海洋, 李慧勇, 等. 渤海海域渤中 19-6 构造带深层潜山储层特征及其控制因素[J]. 地质勘探, 2019, 39(1): 33-44.
- [5] 伍劲, 高先志, 周伟, 等. 柴达木盆地东坪地区基岩风化壳与油气成藏[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(6): 666-672.
- [6] 邹华耀, 赵春明, 尹志军, 等. 辽东湾 JZS 潜山变质岩风化壳识别及储集特征[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(4): 599-607.
- [7] 张顺, 王丽静, 张博远, 等. 松辽盆地安达古隆起风化壳特征及控藏机制[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(1): 9-16.
- [8] 李治, 秦启荣, 李朋波, 等. 准噶尔腹部火山岩风化壳储层特征及其影响因素[J]. 地质找矿论丛, 2018, 33(4): 589-596.
- [9] 陈志海, 牟珍宝, 孙钰, 等. 越南白虎油田缝洞型基岩油藏特征与开发对策[J]. 中外能源, 2009, 14(9): 45-49.
- [10] 李德文, 崔之久, 刘耕年. 风化壳研究的现状与展望[J]. 特种油气藏, 2011, 18(1): 7-11.
- [11] 汤济广, 胡望水, 李伟, 等. 古地貌与不整合动态结合预测风化壳岩溶储集层分布——以四川盆地乐山 - 龙女寺古隆起灯影组为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 674-681.
- [12] 蔡左花, 冯霞, 刘诗荣, 等. 川西坳陷 XC 构造带雷口坡组顶部风化壳储层预测[J]. 海相油气地质, 2014, 19(4): 50-56.
- [13] 徐长贵, 于海波, 王军, 等. 渤海海域渤中 19-6 大型凝析气田形成条件与成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 25-38.
- [14] 吴智平, 侯旭波, 李伟. 华北东部地区中生代盆地格局及演化过程探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(4): 385-399.
- [15] 漆家福, 于福生, 陆克政, 等. 渤海湾地区的中生代盆地构造概论[J]. 地学前缘, 2003, 10(S1): 199-206.
- [16] 王华. 层序地层学基本原理、方法与应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2008.
- [17] 易泽军, 王伟锋, 李飞, 等. 构造古地貌对石炭系火山岩风化壳型储层物性的控制作用[J]. 中国矿业, 2015, 24(S2): 153-157.