



## 风化壳型花岗岩潜山有效储层预测

李林致, 郭刚, 祁鹏, 崔敏, 李峰, 王欣, 王剑

### Prediction of favorable reservoir in granite weathering-crust buried-hill type——A case study of the Baoyunting area on Pinghu slope

LI Linzhi, GUO Gang, QI Peng, CUI Min, LI Feng, WANG Xin, and WANG Jian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062902>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 海洋天然气水合物储层特性及其资源量评价方法

Characteristics of marine gas hydrate reservoir and its resource evaluation methods

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 44

#### 南黄海崂山隆起二叠系砂岩储层特征及其油气勘探前景

Characteristics and hydrocarbon prospects of the Permian sandstone reservoirs of the Laoshan Uplift, South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 181

#### 南薇西含油气盆地地层层序及生储盖组合特征

Characteristics of stratigraphic sequence and the source-reservoir-cap assemblages in the Nanweixi petroliferous basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 163

#### 海洋天然气水合物储层蠕变行为的主控因素与研究展望

Controlling factors and research prospect on creeping behaviors of marine natural gas hydrate-bearing-strata

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 3

#### 中国海域基岩油气藏特征及未来勘探方向

Characteristics of the recently bedrock hydrocarbon reservoir in China Seas and future exploration directions

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 151

#### 南海北部陆坡神狐海域SH-CL38站位的粒度特征及沉积记录

Sediment grain size characteristics of the Core SH-CL38 in the Shenhu area on the northern continental slope of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 90



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李林致, 郭刚, 祁鹏, 等. 风化壳型花岗岩潜山有效储层预测——以平湖斜坡宝云亭地区为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 160-169.  
LI Linzhi, GUO Gang, QI Peng, et al. Prediction of favorable reservoir in granite weathering-crust buried-hill type——A case study of the Baoyunting area on Pinghu slope[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(2): 160-169.

# 风化壳型花岗岩潜山有效储层预测 ——以平湖斜坡宝云亭地区为例

李林致, 郭刚, 祁鹏, 崔敏, 李峰, 王欣, 王剑

中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

**摘要:** 平湖斜坡是东海盆地西湖凹陷的油气重点勘探区域, 随着勘探开发的不断深入, 深部和基底潜山油气藏成为重要的油气勘探接替领域。为进一步指导该区油气勘探, 综合利用录井、测井、地震、岩心与实验分析等多种资料, 对平湖斜坡宝云亭油气区花岗岩潜山储层发育主控因素及有效储层分布开展研究。结果表明, 矿物成分为花岗岩储层的形成提供物质基础, 风化淋滤控制溶蚀孔隙形成, 构造活动形成大量裂缝提升储层物性, 三者共同控制着花岗岩潜山储层展布。利用古地貌恢复、蚂蚁体属性提取等手段, 预测风化溶蚀强度和裂缝发育程度, 对宝云亭油气区花岗岩潜山储层进行了综合评价。

**关键词:** 花岗岩潜山; 有效储层; 风化壳; 平湖斜坡

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062902

## Prediction of favorable reservoir in granite weathering-crust buried-hill type ——A case study of the Baoyunting area on Pinghu slope

LI Linzhi, GUO Gang, QI Peng, CUI Min, LI Feng, WANG Xin, WANG Jian

CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China

**Abstract:** Pinghu slope is the key exploration area of oil and gas in the Xihu Sag, East China Sea basin. With the deepening of exploration and development, buried-hill-typed reservoirs in deep and basement have become an important target. To promote the exploration, the main controlling factors and favorable reservoir distribution of granite weathering-crust buried-hill reservoirs in the Baoyunting area of Pinghu slope were studied comprehensively using various data including logging, seismic, core, and experimental analysis. Results show that the mineral composition provided material bases for the formation of the granite weathering-crust buried-hill-typed reservoir; leaching controlled the formation of dissolution pores; and tectonic activities generated many fractures. These factors improved the physical properties of the reservoir, and jointly controlled the distribution of reservoirs in the buried-hill type. In addition, using paleogeomorphic restoration and ant body attribute extraction, the weathering and dissolution intensity and fracture development degree were predicted, and finally the granite buried hill reservoirs in the Baoyunting oil-gas area was evaluated in overall.

**Key words:** granite buried hill; favorable reservoir; weathering crust; Pinghu slope

花岗岩潜山分布范围广, 剩余资源量丰富, 具有较好的石油与天然气勘探前景。随着勘探技术的不断进步, 目前, 国内外多个盆地的花岗岩潜山内均取得了勘探突破, 如乍得 Bongor 盆地花岗岩潜山油藏、柴达木盆地东坪花岗岩基底气藏以及渤海海域蓬莱 9-1 中生界花岗岩潜山油气藏等<sup>[1-4]</sup>。勘探实践表明, 花岗岩潜山储层的非均质性比碎屑岩储层更强, 有效储层的发育受岩石组分、构造运动、地形、风化溶蚀及后期埋藏成岩改造等多种地质因

素的共同控制<sup>[5]</sup>, 勘探难度大。因此, 如何明确潜山储层发育主控因素及有效储层展布一直是花岗岩古潜山油气勘探的难点<sup>[6]</sup>。

东海盆地西湖凹陷平湖斜坡已有两口井钻遇了花岗岩基底, 见油气显示。但由于海上油气勘探探井少、钻探成本高, 目前, 西湖凹陷潜山领域尚未取得勘探突破, 缺乏针对花岗岩储层特征与展布等勘探难题的研究。本文综合利用录井、测井、地震、岩芯与实验分析等多种资料, 厘清了西湖凹陷

资助项目: 国家科技重大专项“中国近海富烃凹陷优选与有利勘探方向预测”(2016ZX05024-002)

作者简介: 李林致(1992—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事海洋油气沉积储层综合研究工作, E-mail: lilzh18@cnooc.com.cn

收稿日期: 2022-06-29; 改回日期: 2022-09-05. 周立君编辑

平湖斜坡宝云亭油气区花岗岩潜山储层发育的主控因素, 建立了花岗岩潜山风化壳储层分类评价标准, 预测了储层展布规律, 旨在为西湖凹陷平湖斜坡潜山领域的勘探与评价提供指导。

### 1 区域地质概况

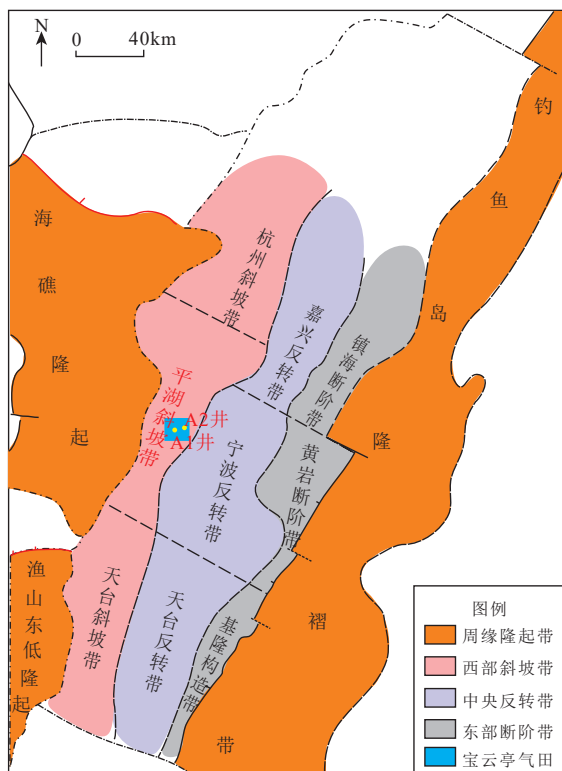
西湖凹陷是东海陆架盆地规模最大的新生代含油气凹陷, 油气资源丰富, 构造格架具有东西分带、南北分块的特点<sup>[7]</sup>。凹陷内由西至东划分为西部斜坡带、中央反转带和东部断阶带。西部斜坡区由北至南又分为杭州斜坡带、平湖斜坡带及天台斜坡带<sup>[8-9]</sup>。西湖凹陷经历了始新世断陷期、渐新世—中新世拗陷期和上新世—第四纪区域沉降期 3 个演化阶段, 主要发生 8 次构造运动, 包括基隆运动、雁荡运动、瓯江运动、平湖运动、玉泉运动、花港运动、龙井运动和冲绳海槽运动<sup>[10]</sup>。地层自下而上发育基底, 白垩系石门潭组, 古新统, 始新统八角亭组、宝石组、平湖组, 渐新统花港组, 中新统龙井组、玉泉组、柳浪组, 上新统三潭组和第四系东海群。

西湖凹陷目前仅有 A1、A2 两口井钻遇了潜山基底, 均位于平湖斜坡带的宝云亭气田区(图 1), 因此本次研究对象为宝云亭潜山区。通过对潜山岩

芯、薄片观察和 K-Ar 测年分析, 确定宝云亭气田区潜山的岩性主要为花岗岩, 时代为中生代(116 Ma), 上覆石门潭组为 91 Ma, 表明宝云亭潜山经历了约 25 Ma 的暴露剥蚀, 受到风化溶蚀作用和多期构造运动的共同影响, 为潜山储层奠定了良好的储集空间。古近系沉积后, 特别是始新世的海进时期, 形成了一套厚层泥岩, 具备了良好的盖层条件, 使该区古潜山油气藏勘探具有广阔的前景。

### 2 花岗岩潜山分带特征

花岗岩坚硬致密, 但由于其内部节理发育, 暴露地表之后受到较强的物理风化和构造应力作用, 地表水广泛渗入, 促进了风化淋滤进程, 形成厚层风化壳。随深度增加, 风化作用逐渐减弱, 风化壳纵向上表现出一定的分带性<sup>[11]</sup>。根据风化强度的差异, 综合壁芯、薄片鉴定、岩屑录井和测井曲线特征, 将宝云亭潜山风化壳自上而下分为风化带和裂缝带。风化带岩石疏松, 伽马曲线呈现高值(75~120 API), 电阻率曲线表现为从上到下逐渐增高(100~800 Ω·m)的钟形韵律特征<sup>[12]</sup>。裂缝带电阻率普遍较高(900~1800 Ω·m), 伽马曲线相对较低(50~80 API), 声波时差值低(55~60 μs/m), 曲线呈



地层			界面 序号	时间 /Ma	构造 运动	盆地 演化
系	统	组				
第四系		东海群	T0		冲绳运动	区域 沉降 阶段
新近系	上新统	三潭组	T10	13	龙井运动	
		柳浪组	T12			
	中新统	玉泉组	T16			
		龙井组	T20			
古近系	渐新统	花港组	T30	23.3	花港运动	拗陷 阶段
		始新统	平湖组	T40	32	
	宝石组		T50	43	平湖运动	
	八角亭组		T80	56.5	瓯江运动	
	古新统		T100	65	雁荡运动	
			Tg	96	基隆运动	
上白垩统		石门潭组				断陷 阶段
基底						

图 1 西湖凹陷宝云亭气田构造位置及演化特征

Fig.1 Tectonic setting and evolution of Baoyunting gas field in Xihu Sag

箱型韵律, 裂缝发育处测井曲线变化大, 测井解释平均孔隙度 5.7%, 岩芯和镜下岩矿鉴定可见裂缝发育。揭示潜山的两口井钻遇风化带厚度为 16 m, 裂缝带厚度为 43 和 194 m, 二者均未钻穿裂缝带 (图 2)。

### 3 花岗岩潜山储层发育主控因素

#### 3.1 矿物成分提供物质基础

渤海湾盆地潜山油气田勘探实践表明, 在同样的构造应力作用下, 岩石成储与矿物含量的相关性明显。长英质含量高的岩石更容易产生裂缝, 形成储层。当长英质矿物小于 70% 的时候, 孔隙度基本小于 2%, 储层品质显著降低, 因此, 将储层长英质矿物含量下限定为 70%<sup>[13]</sup>。宝云亭潜山及周缘广泛发育花岗岩类基底, 岩石薄片鉴定表明, 该区花岗岩类的长石含量 50%~70%, 石英含量 25%~35%, 暗色矿物含量 5%~15%, 半自形粒状结构和块状构造, 主要岩性为二长花岗岩, 整体长英质含量高, 是潜山后期发育风化壳储层的物质基础。

#### 3.2 后期改造提升储层物性

##### 3.2.1 风化淋滤控制溶蚀孔隙形成

黏土矿物是流体作用过程中水岩反应的产物<sup>[14]</sup>, 大多数黏土矿物主要是风化作用形成的<sup>[15]</sup>。通过扫描电镜观测, 发现研究区薄片发育大量伊蒙混层、伊利石、蒙脱石等黏土矿物, 并见明显的长石矿物溶蚀现象 (图 3), 揭示了风化淋滤对该区储层发育的重要影响。宝云亭地区裸露地表的花岗岩经历了 25 Ma 的暴露剥蚀, 物理风化作用强烈, 促使其破裂变得松散, 同时大气中的二氧化碳融入雨水, 形成弱碳酸, 与岩石中的碳酸钙、硅酸盐、铝硅酸盐等矿物发生氧化、溶解及黏土化等。经过大气淡水的淋滤, 风化形成的易溶物质和黏土矿物被冲走, 从而使致密的花岗岩内产生了次生孔、洞、缝, 增加了储集空间, 有效提升了花岗岩储层的物性<sup>[16]</sup>。

风化壳垂向风化淋滤强度的不同, 影响着储层物性的垂向变化。宝云亭潜山风化壳中的风化带风化程度最高, 各矿物很大程度上均发生蚀变, 黏土矿物含量高, 多形成粒间孔、晶内溶蚀孔, 测井解释孔隙度为 6.5%~9.4%, 发育孔隙-裂缝型储层。

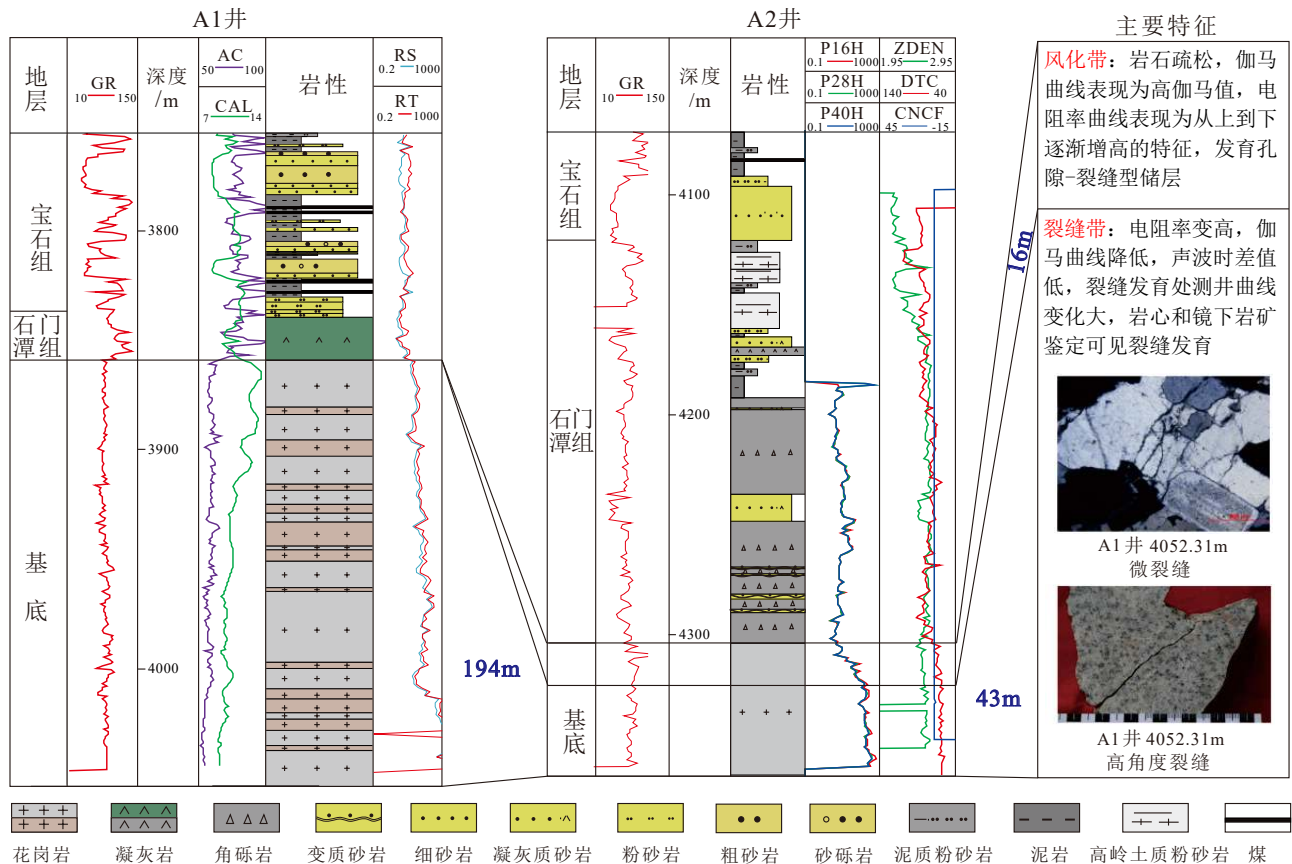


图 2 A1-A2 连井风化壳垂向分带特征

Fig.2 Vertical zoning characteristics of weathered crust of Wells A1-A2

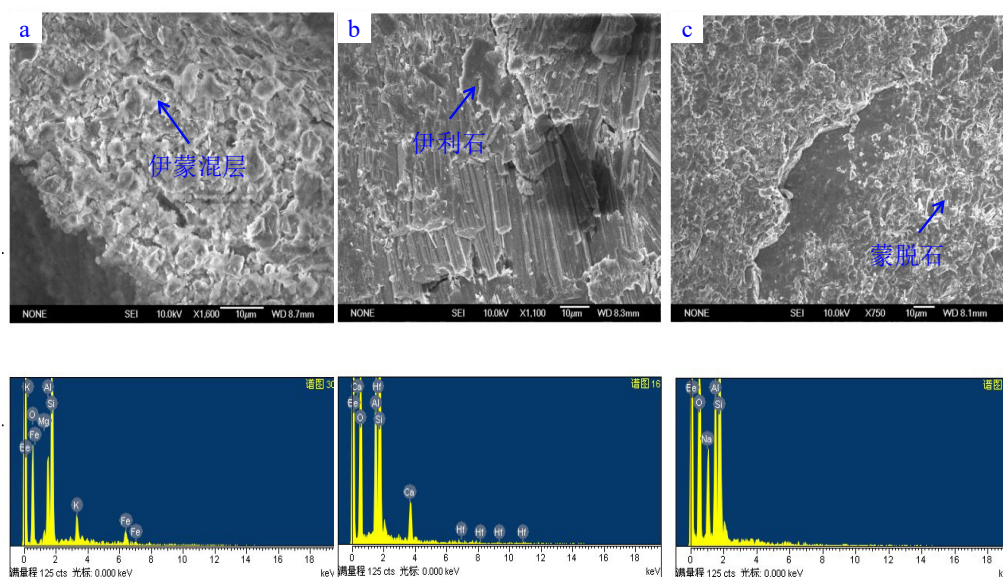


图 3 西湖凹陷宝云亭潜山扫描电镜显微照片

a. 伊蒙混层, A1 井 4053.46 m; b. 伊利石, 见溶蚀孔, A1 井 4053.46 m; c. 蒙脱石, 见溶蚀孔, A1 井 4053.46 m。

Fig.3 SEM micrograph of the Baoyunting buried hill in the Xihu Sag

a: Smectite mixed layer 4053.46 m in Well A1; b: illite, see dissolution hole 4053.46 m in well A1; c:montmorillonite, see dissolution hole 4053.46 m in well A1.

裂缝带在靠近裂缝发育处见矿物的蚀变, 溶孔整体发育较少, 测井解释平均孔隙度 4.5%~5.1%, 主要发育裂缝型储层。

### 3.2.2 构造活动控制裂缝形成

宝云亭潜山形成主要经历了“早期隆升、中期埋藏改造、晚期稳定”成山过程, 大量裂缝在潜山形成过程中发育并保留。早期潜山形成期主要发生在始新统之前, 地层长期隆起上升并遭受剥蚀。东海盆地属于华夏地块向东海陆架的延伸, 与陆上有相似的演化背景。自三叠纪以来经受了印支运动、燕山运动等多期构造运动的影响, 印支运动时期主要发生南北向陆-陆碰撞, 形成 NW 向构造, 燕山运动时期主要发生东西方向洋-陆碰撞, 形成 NE 向构造, 奠定了潜山裂缝规模性发育的基础。中期埋藏改造过程主要发生在始新世到中新世, 潜山隆起后被掩埋覆盖, 于水下接受沉积。这一时期, 西湖凹陷经历了平湖运动、玉泉运动、花港运动及龙井运动等一系列构造运动, 导致潜山内幕裂缝的发育, 形成大量高角度、斜交断层。潜山晚期稳定期发生在上新世至今, 潜山油气田形成后地层稳定沉降, 构造活动不强烈, 潜山油气得以保存。

从东海盆地潜山储层孔隙度、渗透率与距风化壳顶面关系分析(图 4)可以看出, 在裂缝发育处的储层物性有较明显的提升, 说明潜山裂缝的发育可以有效提升储层物性。同时, 在薄片上观测到沿裂

缝发生溶蚀、溶解现象, 发育黏土矿物, 显示裂缝的发育可以为流体改造提供通道, 改善致密花岗岩的储层物性。

## 4 有效储层预测

宝云亭油气田花岗岩潜山受风化溶蚀和复杂断裂的双重影响, 控制着有效储层的展布, 因此如何对潜山储层的溶蚀强度和裂缝发育程度进行分析评价是宝云亭潜山储层预测的关键。

### 4.1 风化溶蚀孔隙预测

风化溶蚀作用受到多种因素的控制, 包括了岩石性质、气候环境、地质构造以及古地形等条件。宝云亭潜山整体岩性为花岗岩, 长石含量高(占 35%~55%), 具备可溶蚀的物质基础。该潜山形成于白垩纪, 是典型的温室气候<sup>[17]</sup>, 气候潮湿炎热, 植物繁盛, 化学生物风化作用强, 矿物易被分解, 同时后期构造活动强烈, 断层的发育为溶蚀提供了良好的通道。因此, 在岩石性质、气候环境、地质构造都利于风化溶蚀的条件下, 微古地形的差异对宝云亭潜山风化壳溶蚀强度的影响至关重要。微古地形对风化壳的控制作用主要体现在通过调整风化壳内部垂向不同分带的比例, 进而控制了整个风化壳平面储集性能的差异<sup>[18]</sup>。古地貌高地的地下水

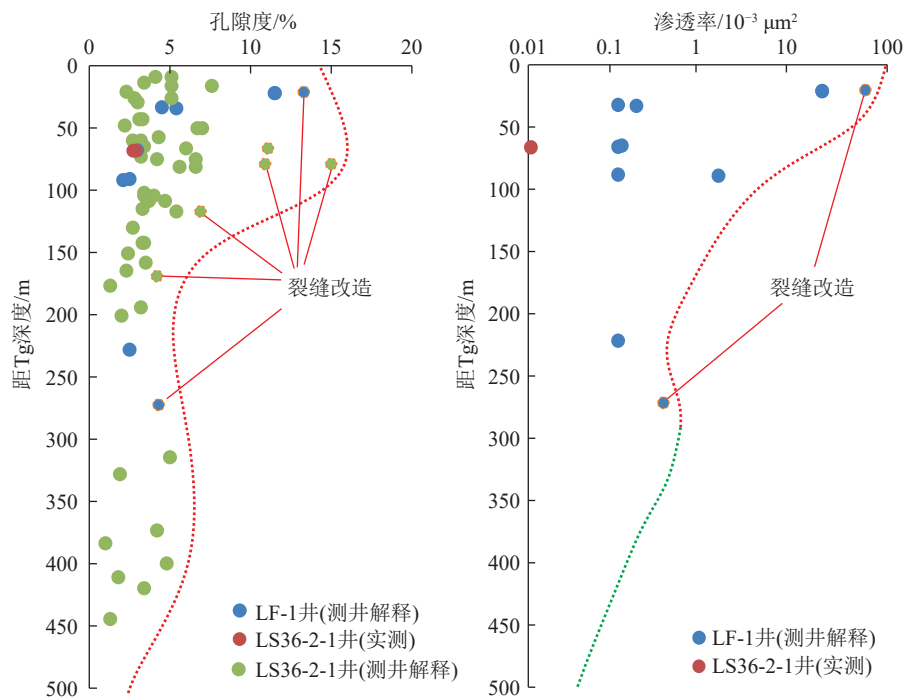


图4 东海盆地潜山储层物性与距风化壳顶面距离关系

Fig.4 Relationship between reservoir physical properties and top surface of weathering crust in the Baoyunting buried hill

位相对低,同时侵蚀作用也相对强烈<sup>[11]</sup>,风化形成的碎屑物难以保留并形成良好的储集空间,造成垂向上风化带比例低,主要发育裂缝带。古地貌洼地区主要为沉积卸载区,溶蚀作用较弱,次生孔隙发育差,风化壳整体薄。只有在古地貌平缓的斜坡区植被相对发育,经过风化作用形成的碎屑物质容易残留并保存,因此广泛发育较厚的风化带和裂缝带,风化壳垂向分带结构完整(图5)。从勘探实践上看,研究区A1井不发育风化带,其物性差于A2井,也正是因为A1井位于古地貌高地(图6),风化带产物容易被剥蚀,造成了孔隙的缺乏,仅保留了裂缝带。

因此,通过对宝云亭潜山古地貌进行恢复,可以定性预测该区风化溶蚀孔隙的分布。本次采用层序地层学古地貌恢复法,该方法的关键是通过沉积分析确定基准面,根据基准面与地表的位置关系,确定各处的地质作用<sup>[19]</sup>。利用地震解释软件,可追踪宝云亭古隆起被沉积埋藏时的沉积均衡面Tg。西湖凹陷钻井揭示Tg之上沉积了一套广泛分布的石门潭组,为复杂的多沉积体系组合。当石门潭组沉积结束时,古隆起被初次完全覆盖,利用地震反射结构和沉积特征明确石门潭组顶界面T100并进行追踪,该界面可视为沉积基准面。将T100拉平,通过地震数据时间与深度的转换,计算沉积基准面T100与古隆起沉积均衡面Tg之间的

厚度,该厚度反映了古隆起被水淹没时的古水深,即为石门潭组沉积前也就是宝云亭古潜山的构造古地貌形态。古地貌形态恢复结果(图7)显示,研究区东南部和西北部为古地貌洼地,是主要的沉积卸载区,溶蚀作用弱;西南部和东北局部地区为古地貌高地,虽然溶蚀作用强,但剥蚀作用同样强烈,风化壳难以保留;西南—东北展布的中部斜坡带为古地貌斜坡区,溶蚀强烈且溶蚀产物容易被保留,为宝云亭潜山的有利溶蚀孔隙形成区带。

#### 4.2 潜山裂缝预测

目前,国内外对潜山储层的裂缝预测主要采用了相干体、曲率体及蚂蚁体等地球物理属性<sup>[20]</sup>。相干体属性技术是基于地震反射同相轴的不连续性预测断裂分布,该技术不受解释误差影响但刻画精度低,且只能预测同相轴错断的断层。曲率属性技术基于地震几何属性来反映地震反射体的弯曲程度,但其只能识别两侧存在地层褶曲现象的断裂,对微小断层的识别存在局限。蚂蚁体属性技术基于蚁群算法实现对断裂的追踪和识别。相比于其他的裂缝预测技术,该方法能定性识别小断层和大尺度裂缝,去除了与断裂无关的信息,提高了断裂解释精度<sup>[21]</sup>。本次主要基于petrel软件平台中的“Ant-tracking”属性模块进行蚂蚁体属性提取,对宝云亭潜山内的复杂断层进行分布预测。

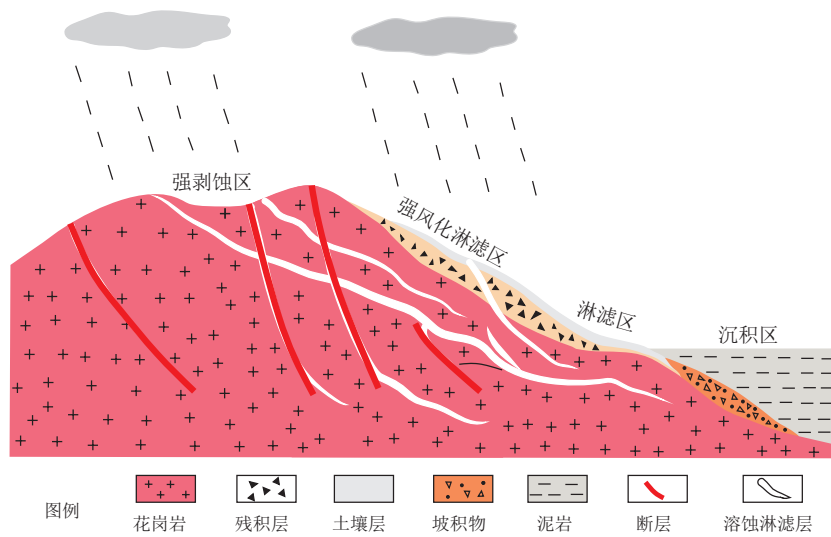


图 5 不同古地形下花岗岩风化壳形成模式图

Fig.5 Formation model of granite weathering crust in different paleotopography

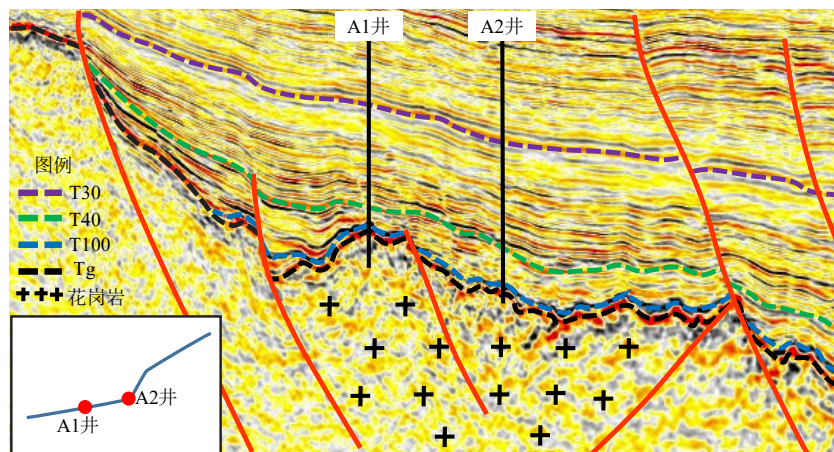


图 6 宝云亭潜山 A1-A2 连井地震剖面图

Fig.6 Seismic profile of Wells A1-A2 in the Baoyunting buried hill

蚂蚁追踪技术的实质就是检测地震数据体中的不连续性<sup>[22]</sup>, 因此, 在对地震数据体进行蚂蚁追踪之前, 通常需要通过地震数据预处理、边界检测、边界增强等手段突出地震数据体的不连续特征, 以便提高蚂蚁体属性追踪的精度。在追踪算法上, 主动蚂蚁追踪算法有助于挖掘断层, 但由于其“主动性”较强, 致使噪声较清晰。被动蚂蚁追踪算法倾向于追踪极强信号, 放弃较弱信号, 有助于压制噪声, 体现大断层趋势, 但是易导致局部不清晰的低级别小断层呈断续特征, 破坏其连续性<sup>[23]</sup>。因此, 本次采取了连续 3 次“被动+主动+被动”模式的蚂蚁体运行, 尽可能地呈现断裂系统特征, 获得清晰的图像。在参数选择上, 基于前期对宝云亭地区区域断裂构造的研究, 认为该区在始新世中晚期为压扭背景, 宝云亭地区北东向早期断裂与始新世中

晚期 NWW-SEE 向伸展方向斜交, 宝云亭古隆起发生扭动, 在其内部形成近南北向调节断层, 且断裂倾角主要分布在 15°~80°之间。因此利用蚂蚁体产状控制玫瑰花图进行调节<sup>[24-25]</sup>, 滤掉 NW-SE 方向上的断裂及小于 15°倾角的断裂, 从而降低低倾角特性的层位及多解断层对蚂蚁追踪的干扰。追踪原理及流程见图 8。

从蚂蚁体属性追踪结果(图 9)上看, 断层连续性得到明显增强, 较好地压制了噪声。该区东南侧的断层发育程度高于西北侧, 方向主要以平行于主断裂的北西-南东向和垂直于断裂的北东-南西向呈网格破碎状分布, 符合区域构造背景下的断层发育模式。同时, 已钻 A1、A2 井在蚂蚁体属性上均位于断层附近, 岩芯揭示了两口井裂缝的存在, 因此, 本次采用的蚂蚁体追踪流程能够较可靠地反映出

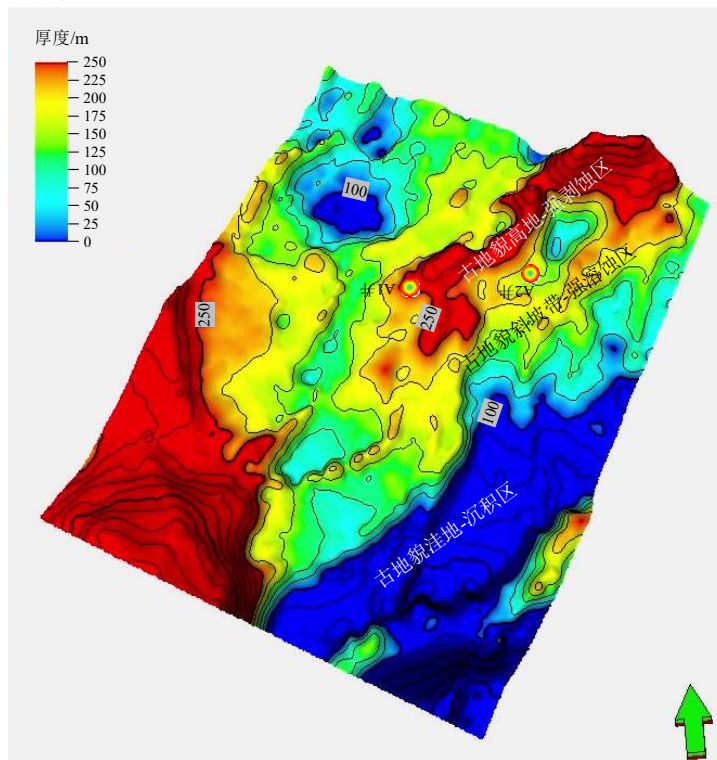


图7 宝云亭潜山及周缘古地貌恢复图

Fig.7 Restoration of ancient landform of the Baoyunting buried hill and its periphery

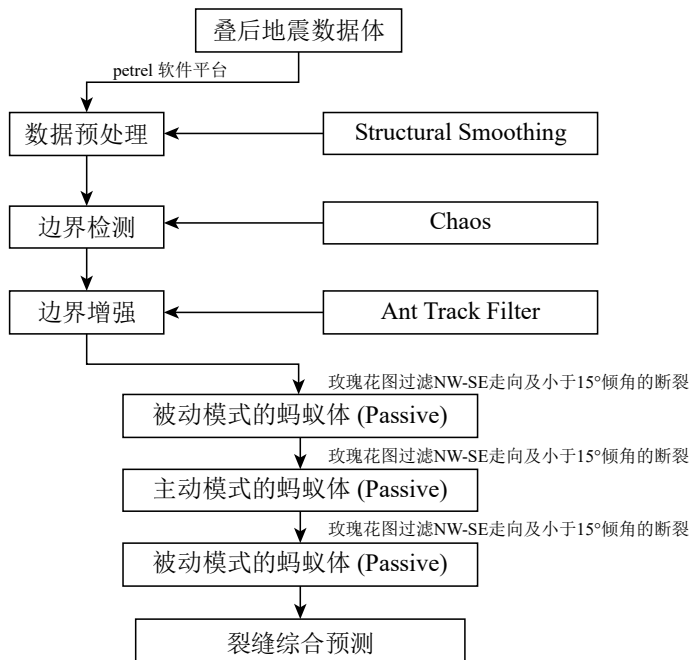


图8 蚂蚁体属性裂缝预测流程图

Fig.8 Flow chart of crack prediction in ant tracking algorithm

宝云亭潜山的裂缝发育情况。

### 4.3 有效储层综合预测

综合分析溶蚀强度与裂缝发育程度, 建立储层

分类评价标准(表1), 对宝云亭潜山的储层发育情况进行分类预测(图10)。其中, 一类储层为有效储层, 储集空间类型为孔隙-裂缝型, 主要发育在较强溶蚀作用的古地貌斜坡带和预测的裂缝发育叠合



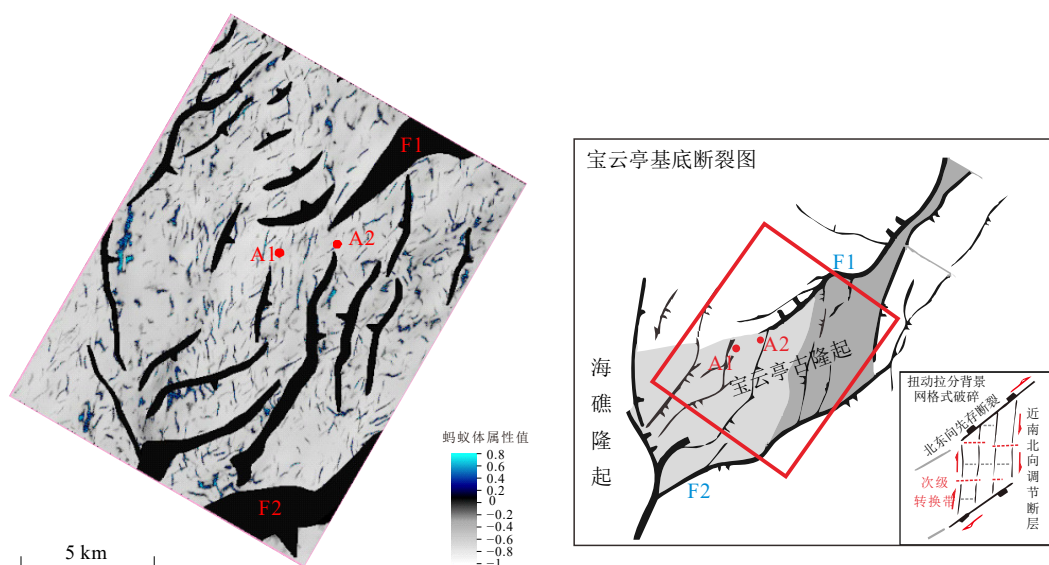


图 9 宝云亭潜山及周缘蚂蚁体属性平面分布图

Fig.9 Plane distribution of ant body attributes in the Baoyunting buried hill and its surroundings

表 1 宝云亭潜山风化壳型花岗岩储层分类评价

Table 1 Classification and evaluation of weathering-crust-typed granite reservoir in the Baoyunting buried hill

储层类型	储集空间类型	储层定性特征	储层定量表征	已钻井特征
一类储层	孔隙-裂缝型	古地貌斜坡带+裂缝发育区	古地貌高度100~250 m, 蚂蚁体属性值大于0.2	A2井潜山岩芯发育裂缝, 出后效气约1万m <sup>3</sup>
二类储层	裂缝型	古地貌高地+裂缝发育区	古地貌高度大于250 m, 蚂蚁体属性值大于0.2	A1井潜山井段发育裂缝, 见气测异常显示
	孔隙型	古地貌斜坡带+裂缝不发育区	古地貌高度100~250 m, 蚂蚁体属性值小于0.2	暂无
三类储层	无有效储集空间	古地貌高地/洼地+裂缝不发育区	古地貌高度大于250 m或小于100 m, 蚂蚁体属性值小于0.2	暂无

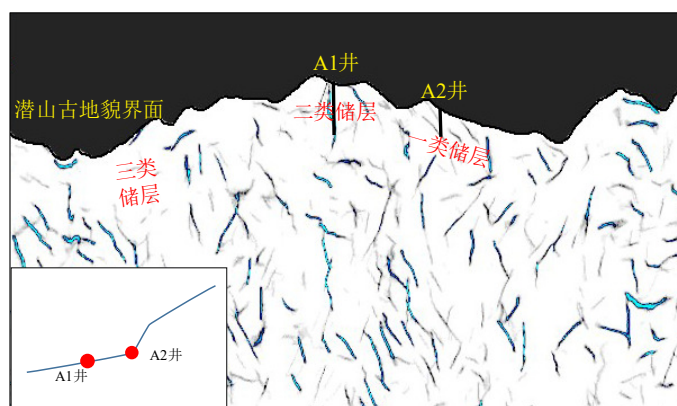


图 10 宝云亭潜山储层综合预测图

Fig.10 Comprehensive prediction of favorable reservoir in the Baoyunting buried hill

区, 定量表征参数为古地貌高度 100~250 m, 蚂蚁体属性值大于 0.2。A2 井钻遇的潜山部位在一类储层发育区, 具有较好的油气显示, 出后效气约 1 万 m<sup>3</sup>。二类储层为差储层, 储集空间类型为单一裂缝型或孔隙型, 主要发育在古地貌高地的裂缝发育区或古地貌斜坡带的裂缝不发育区, 定量表征参数为古地

貌高度大于 250 m、蚂蚁体属性值大于 0.2 或古地貌高度 100~250 m、蚂蚁体属性值小于 0.2。A1 井钻遇的潜山部位在二类储层发育区, 油气显示较差, 仅见部分气测异常。三类储层为非储层, 主要发育在古地貌洼地或高地的裂缝不发育区, 定量表征参数为古地貌高度大于 250 m 或小于 100 m, 蚂

蚁体属性值小于0.2。

## 5 结论

(1) 宝云亭地区花岗岩潜山经历了25 Ma的暴露剥蚀, 形成风化壳, 纵向上具有明显的分带性。上部风化带岩石疏松, 测井曲线表现为高伽马值, 电阻率曲线呈钟形的特征, 发育孔隙-裂缝型储层。下部裂缝带电阻率变高, 伽马曲线降低, 声波时差值低, 裂缝发育处测井曲线变化大, 岩芯和镜下岩矿鉴定可见裂缝发育, 主要为裂缝型储层。

(2) 花岗岩潜山受原始物质成分、风化淋滤、构造活动的综合影响, 控制有效储层的发育。其中, 矿物成分为花岗岩储层的形成提供了物质基础, 风化淋滤控制溶蚀孔隙形成与分布, 构造活动形成大量裂缝提升储层物性。

(3) 通过古地貌恢复可对宝云亭潜山溶蚀程度进行平面预测。在古地貌高地侵蚀作用相对强烈, 风化形成的碎屑物难以保留。古地貌洼地区主要为沉积卸载区, 溶蚀作用较弱, 次生孔隙发育差。只有在古地貌斜坡区植被发育, 化学风化作用、生物风化作用相对较强, 风化形成的细碎屑物质容易残留并保存, 形成较厚的风化层。同时, 利用蚂蚁体属性对裂缝的刻画清晰且可靠, 能够较好地预测宝云亭潜山裂缝的平面展布。

(4) 结合古地貌、蚂蚁体属性平面特征和钻井资料, 建立了宝云亭区花岗岩潜山风化壳储层分类评价标准。其中, 一类储层为有效储层, 储集空间类型为孔隙-裂缝型, 主要发育在较强溶蚀作用的古地貌斜坡带和蚂蚁体属性反映的裂缝发育叠合区, 古地貌高度为100~250 m, 蚂蚁体属性值大于0.2, 油气显示较好; 二类和三类储层为差储层或非储层, 储层空间单一或无效, 缺乏溶蚀作用和裂缝的发育。

## 参考文献 (References)

- [1] 沈澈, 蒋有录, 苏圣民, 等. 二连盆地乌兰花凹陷花岗岩潜山储层特征及发育模式[J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(6): 12-19. [SHEN Che, JIANG Youlu, SU Shengmin, et al. Characteristics and development modes of the granite buried-hill reservoir in Wulanhua Sag of Erlian Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(6): 12-19.]
- [2] 闫林辉, 常毓文, 田中元, 等. 乍得Bongor盆地潜山基岩储集层特征[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 60-68. [YAN Linhui, CHANG Yuwen, TIAN Zhongyuan, et al. Characteristics of basement rock reservoirs in Bongor Basin, Chad [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(6): 60-68.]
- [3] 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. [WU Jin, GAO Xianzhi, ZHOU Wei, et al. Base rock weathering crusts and petroleum accumulation in Dongping Area, Qaidam Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(6): 666-672.]
- [4] 胡志伟, 徐长贵, 杨波, 等. 渤海海域蓬莱9-1油田花岗岩潜山储层成因机制及石油地质意义[J]. 石油学报, 2017, 38(3): 274-285. [HU Zhiwei, XU Changgui, YANG Bo, et al. Reservoir forming mechanism of Penglai 9-1 granite buried-hills and its oil geology significance in Bohai Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(3): 274-285.]
- [5] 徐守立, 尤丽, 毛雪莲, 等. 琼东南盆地松南低凸起周缘花岗岩潜山储层特征及控制因素[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2717-2728. [XU Shouli, YOU Li, MAO Xuelian, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of granite buried hill in Songnan low uplift, Qiongdongnan Basin [J]. Earth Science, 2019, 44(8): 2717-2728.]
- [6] 宋爱学, 杨金海, 胡斌, 等. 琼东南盆地深水区长潜山裂缝性储层展布特征及有利区含油性预测[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(7): 60-67. [SONG Aixue, YANG Jinhai, HU Bin, et al. Distribution patterns of fracture reservoirs in the buried-hills in deep water areas of Qiongdongnan Basin and prediction of favorable areas for hydrocarbon exploration [J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(7): 60-67.]
- [7] 刘金水, 廖宗廷, 贾健谊, 等. 东海陆架盆地地质结构及构造演化[J]. 上海地质, 2003(3): 1-6. [LIU Jinshui, LIAO Zongting, JIA Jianyi, et al. The geological structure and tectonic evolution of the East China Sea shelf basin [J]. Shanghai Geology, 2003(3): 1-6.]
- [8] 魏恒飞, 陈践发, 陈晓东. 东海盆地西湖凹陷凝析气藏成藏特征及分布控制因素[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2019, 49(6): 1507-1517. [WEI Hengfei, CHEN Jianfa, CHEN Xiaodong. Characteristics and controlling factors of condensate reservoir accumulation in Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2019, 49(6): 1507-1517.]
- [9] 侯国伟, 李帅, 秦兰芝, 等. 西湖凹陷西部斜坡带平湖组源-汇体系特征[J]. 中国海上油气, 2019, 31(3): 29-39. [HOU Guowei, LI Shuai, QIN Lanzhi, et al. Source-to-sink system of Pinghu Formation in west slope belt of Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(3): 29-39.]
- [10] 苏奥, 陈红汉. 东海盆地西湖凹陷宝云亭气田油气成藏史: 来自流体包裹体的证据[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 300-309. [SU Ao, CHEN Honghan. Accumulation history of Baoyunting gas field in the Xihu Sag, East China Sea Basin: from evidence of fluid inclusions [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 300-309.]
- [11] 黄建红, 谭先锋, 程承吉, 等. 花岗岩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): 2041-2060. [HUANG Jianhong, TAN Xianfeng, CHENG Chengji, et al. Structural features of weathering crust of granitic basement rock and its petroleum geological significance: a case study of basement weathering crust of Dongping Area in Qaidam Basin [J]. Earth Science, 2016, 41(12): 2041-2060.]
- [12] 刘震, 朱茂林, 刘惠民, 等. 花岗岩风化壳储层形成机理及分布特征: 以东营凹陷北带西段为例[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 163-175.

- [LIU Zhen, ZHU Maolin, LIU Huimin, et al. Formation mechanism and distribution characteristics of granitic weathering crust reservoir: a case study of the western segment of the northern belt of Dongying Sag [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2021, 42(2): 163-175.]
- [13] 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. [WANG Deying, WANG Qingbin, LIU Xiaojian, et al. Characteristics and developing patterns of gneiss buried hill weathering crust reservoir in the sea area of the Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(4): 1181-1193.]
- [14] 华仁民, 李晓峰, 张开平, 等. 金山金矿热液蚀变黏土矿物特征及水-岩反应环境研究[J]. *矿物学报*, 2003, 23(1): 23-30. [HUA Renmin, LI Xiaofeng, ZHANG Kaiping, et al. Characteristics of clay minerals derived from hydrothermal alteration in Jinshan gold deposit: implication for the environment of water-rock interaction [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2003, 23(1): 23-30.]
- [15] 张乃娴. 黏土矿物与风化作用[J]. *建材地质*, 1992(6): 1-6. [ZHANG Naixian. Clay minerals and weathering [J]. *China Non-Metallic Minerals Industry*, 1992(6): 1-6.]
- [16] 王昕, 周心怀, 徐国胜, 等. 渤海海域蓬莱9-1花岗岩潜山大型油气田储层发育特征与主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(2): 262-270. [WANG Xin, ZHOU Xinhui, XU Guosheng, et al. Characteristics and controlling factors of reservoirs in Penglai 9-1 large-scale oilfield in buried granite hills, Bohai Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(2): 262-270.]
- [17] 胡修棉. 白垩纪“温室”气候与海洋[J]. *中国地质*, 2004, 31(4): 442-448. [HU Xiujian. Greenhouse climate and ocean during the Cretaceous [J]. *Geology in China*, 2004, 31(4): 442-448.]
- [18] 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. [YI Zejun, WANG Weifeng, LI Fei, et al. Tectonic geomorphology control factors on properties of weathering reservoirs of carboniferous volcanic rocks [J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(S2): 153-157.]
- [19] 左丽群. 古地貌恢复方法综述[J]. *石油地质与工程*, 2019, 33(3): 12-16,21. [ZUO Liqun. Review on methods of paleo-geomorphologic restoration [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2019, 33(3): 12-16,21.]
- [20] 陈亮, 张珂嘉, 张振平, 等. 裂缝型储层预测技术优选: 以涪陵地区侏罗系大安寨段为例[J]. *石油地质与工程*, 2013, 27(5): 43-45. [CHEN Liang, ZHANG Kejia, ZHANG Zhenping, et al. Optimization of fracture reservoir prediction technology: with reservoir of Daanzhai member of Jurassic in Fulin region as an example [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2013, 27(5): 43-45.]
- [21] 姜晓宇, 张研, 甘利灯, 等. 花岗岩潜山裂缝地震预测技术[J]. *石油地球物理勘探*, 2020, 55(3): 694-704. [JIANG Xiaoyu, ZHANG Yan, GAN Lideng, et al. Seismic techniques for predicting fractures in granite buried hills [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2020, 55(3): 694-704.]
- [22] 刘厚彬, 于兴川, 张震, 等. 长宁页岩地层井下复杂及裂缝三维展布规律研究[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2021, 43(4): 208-218. [LIU Houbin, YU Xingchuan, ZHANG Zhen, et al. A study on downhole complex and three dimensional distribution of fractures in Changning shale formation [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2021, 43(4): 208-218.]
- [23] 李楠, 王龙颖, 黄胜兵, 等. 利用高清蚂蚁体精细解释复杂断裂带[J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54(1): 182-190. [LI Nan, WANG Longying, HUANG Shengbing, et al. 3D seismic fine structural interpretation in complex fault zones based on the high-definition ant-tracking attribute volume [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54(1): 182-190.]
- [24] 张欣. 蚂蚁追踪在断层自动解释中的应用: 以平湖油田放鹤亭构造为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(2): 278-281. [ZHANG Xin. Application of ant tracing algorithm in fault automatic interpretation: a case study on Fangheting structure in Pinghu oilfield [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(2): 278-281.]
- [25] 刘慧楠, 李婷婷, 张幸兴, 等. 蚂蚁体属性断裂解释技术及在苏德尔特地区的应用[J]. *中国锰业*, 2019, 37(6): 38-41, 47. [LIU Huinan, LI Tingting, ZHANG Xingxing, et al. Fracture interpretation technology on ant attribute and its application in suddelt area [J]. *China's Manganese Industry*, 2019, 37(6): 38-41, 47.]