DOI:10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202509090058

变质岩潜山储层垂向分带及其特征——以渤中19-6构造为例

易雪斐[1,2]，王蕙婷[1,3,*]，杨中山[4]

（1. 长江大学地球科学学院，湖北 武汉 430100；2. 非常规油气地质与工程湖北省工程研究中心，湖北 武汉 430100；3. 南方复杂页岩油气地质与开发湖北省重点实验室，湖北 武汉 430100；4. 北京大地高科地质勘探有限公司，北京 100043）

摘要：渤中19-6构造变质岩潜山大型凝析气田勘探的成功，推动了渤海湾盆地潜山油气勘探的新进程。为了进一步明确研究区变质岩潜山油气储层类型和特征，本文综合利用多种地质、测井和录井资料等，从岩性、测井曲线特征、裂缝发育情况、元素—矿物变化规律、储层类型等多角度对变质岩潜山开展研究。研究表明：研究区变质岩潜山垂向上可依据电阻率曲线均值突增、声波曲线由指形和齿化箱形组合转变为微齿化、裂缝由较宽的网状裂缝转变为产状较为一致的微裂缝等划分出风化壳带和潜山内幕带两个一级垂向结构单元。进一步可根据风化作用特征、元素-矿物演化、测井曲线形态变化、孔隙-裂缝发育程度等，将风化壳带细分为黏土带（研究区不发育）、风化砂砾岩带、淋蚀带和崩解带4种二级结构单元；将潜山内幕带细分为内幕裂缝带和致密带2种二级结构单元，并建立了渤中19-6构造变质岩潜山储层分布模式。储集空间类型和物性特征研究表明，研究区变质岩潜山最有利储层主要为风化砂砾岩带的孔隙型储层、裂缝-孔隙型储层以及潜山内幕裂缝带的裂缝型储层，其次是淋蚀带和崩解带的裂缝-孔隙型、孔隙-裂缝型储层。

关键词：渤海湾盆地；渤中19-6构造；变质岩潜山；古风化壳；储层

中图分类号：P625；TE122. 2　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-8527(2026)02-0403-12

Vertical Reservoir Units and Characteristics of Metamorphic Buried Hill: An Example from Bozhong19-6 Structure in Bohai Bay Basin, East China

YI Xuefei[1,2], WANG Huiting[1,3,*], YANG Zhongshan[4]

(1. *School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei* 430100, *China*; 2. *Hubei Engineering Research Center of Unconventional Petroleum Geology and Engineering, Wuhan, Hubei* 430100, *China*; 3. *Hubei Key Laboratory of Complex Shale Oil and Gas Geology and Development in Southern China, Wuhan, Hubei* 430100, *China*; 4. *Beijing Dadi Gaoke Geological Exploration Co., Ltd, Beijing*, 100043, *China*)

Abstract: The successful of the large condensate gas field in the metamorphic buried hill of Bozhong 19-6 structure has advanced the new phase of buried hill hydrocarbon exploration in the Bohai Bay Basin. To clarify the types and characteristics of the metamorphic buried hill reservoir in further, this study comprehensively utilizes various geological data, well logging curves, and log data to conduct a reservoir study from multiple per-

收稿日期：2025-09-09；**修回日期**：2026-01-17；**编辑**：董立。

基金项目：国家自然科学基金项目（41702116）。

作者简介：易雪斐，女，副教授，1986年出生，矿产普查与勘探专业，主要从事沉积学、石油地质学方面的研究工作。E-mail：yxf@yangtezu. edu. cn。

＊通信作者：王蕙婷，女，硕士研究生，2000年出生，地质学专业，主要从事石油地质学方向的研究工作。E-mail：ww99147@163. com。

引用格式：易雪斐，王蕙婷，杨中山. 变质岩潜山储层垂向分带及其特征——以渤中19-6构造为例［J］. 现代地质，2026，40（2）：403-414. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202509090058.

YI Xuefei, WANG Huiting, YANG Zhongshan. Vertical Reservoir Units and Characteristics of Metamorphic Buried Hill: An Example from Bozhong19-6 Structure in Bohai Bay Basin, East China［J］. GEOSCIENCE, 2026, 40（2）: 403-414. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202509090058.

spectives, including lithology, well logging curves response characteristics, fracture development, elements-minerals variation patterns, and reservoir types. The result shows that the metamorphic buried hill in Bozhong 19-6 structure can be divided into weathering crust belt and buried hill interior belt in vertical. Those two first-order vertical units can be identified based on a sudden increase in the mean value of the resistivity curves, a transition of the acoustic curves from a combination of finger-shaped and serrated box-shaped to a micro-serrated pattern, and a change from relatively wide network-like fractures to micro-fractures in relatively consistent occurrence. Furthermore, based on the weathering degree features, elements-minerals evolution, variations in well logging curves, and the development degree of pores and fractures, the weathering crust belt is subdivided into clay zone(undeveloped in study area), weathered conglomerate zone, leaching zone, and disintegration zone. And the buried hill interior belt is subdivided into interior fracture zone and the tight zone. A reservoir development model for the metamorphic buried hill in the Bozhong 19-6 structure is established. This study also indicates that the favorable reservoirs in metamorphic buried hill in study area are primarily the pore-type and some fracture-pore type reservoirs in the weathered conglomerate zone, and the fracture-type reservoirs in the interior fracture zone. And the secondary preferred reservoirs are pore-fracture type and fracture-pore type reservoirs in leaching zone, as well as the disintegration zone.

Key words: Bohai Bay Basin; Bozhong 19-6 structure; metamorphic buried hill; paleo-crust; reservoir

0 引 言

1922 年，Powers 最早提出了潜山一词，是指被盆地沉积盖层所覆盖的基底古隆起[1]。20 世纪 50 年代，Levorsen 在《石油地质学》中指出，潜山为盆地接受沉积前就已经存在的古地貌山，后期被沉积地层掩埋而成的潜伏山[2]。如今，地质学家对这一概念进行了扩展，即年轻盖层之下的盆地基岩凸起[3]。潜山在接受新地层覆盖之前，一般经受了长时间的风化改造，从而有可能形成优质的储层。我国自 20 世纪 50 年代起，在酒泉盆地、准噶尔盆地、渤海湾盆地等发现了大量的潜山油气藏，但关注的重点层位一直是潜山的顶部风化壳，如鸭儿峡变质岩潜山、冀中坳陷任丘碳酸盐岩潜山、中拐凸起火成岩潜山、渤海蓬莱 9-1 花岗岩潜山等[4-7]。21 世纪以来，辽河坳陷、渤南低凸起、渤中凹陷等太古界潜山油气藏以及济阳坳陷、渤中凹陷、莱州湾凹陷、东濮凹陷、黄骅坳陷等中生界潜山油气藏[8-14]的发现，将潜山油气藏由风化壳扩展到了潜山的内幕，标志着潜山油气藏的勘探进入了一个全新的阶段[15-16]。

变质岩本身较致密，不发育原生孔隙。变质岩潜山在地质历史时期如果遭受强烈的风化淋滤、构造破裂、热液溶蚀等改造作用，就有可能形成构造裂缝和溶蚀孔隙，使其具备较好的油气储集条件[17-19]。渤海湾盆地渤中凹陷渤中 19-6 气田是 2018 年在太古界发现的变质岩潜山凝析气田，是渤海湾盆地迄今为止发现的最大的凝析气田，该气田实现了渤海海域天然气勘探的新突破[20-22]。当前研究的重点集中于变质岩潜山的储层特征与主控因素探讨[23-26]、成藏模式与机理[27-29]等方面。根据薛永安等和施合生等的观点，渤中 19-6 构造太古界变质岩潜山上覆地层直接为新生界碎屑岩，故为“暴露型”潜山[29-30]。

国内关于潜山的垂向划分，起源于现代花岗岩风化壳的研究，主要依据风化程度的强弱进行划分，张宁和陈礼明将闽南地区的花岗岩在垂向上划分为剧风化带、强风化带、中等风化带和微风化带四个分带[31]；吴宏伟等将香港地区的花岗岩划分出新鲜花岗岩带、微风化花岗岩带、弱风化花岗岩带、强风化带、全风化带、红色和网纹状残积土带等[32]。国际上通用的花岗岩风化壳的分带包括铁质壳或红土层、砂质风化层、纹层状残积土、裂缝层和新鲜基岩[33]。徐长贵等、衣健等率先将渤中 19-6 构造变质岩潜山储集层在垂向结构上划分风化壳和潜山内幕[20, 34]。为了进一步深入认识和划分渤中 19-6 构造变质岩潜山储层，该研究选取了在变质岩潜山顶界附近有完整取心的探井：BZ19-6-A 井和 BZ19-6-B 井，充分利用了钻井的岩心、岩屑、X 衍射矿物分析、薄片、储层物性、常规测井曲线、元素录井等资料，通过对变质岩潜山内部岩性、孔隙、裂缝发育情况、

物性特征、测井曲线范围和形态特征、元素变化规律等的精细研究，建立了渤中 19–6 构造变质岩潜山储层发育模式，以期为变质岩潜山储层精细刻画和储层分布规律的深入研究提供理论基础。

1　区域地质概况

渤海湾盆地位于我国东部，横跨京、津、冀、鲁、豫、辽 4 省 2 市[35]，是一个中生代至新生代叠合盆地，具有隆凹相间的构造格局，其面积达 7.3×10^4 km^2[36–37]。渤中 19–6 构造位于渤海湾盆地渤中凹陷的西南部，是由西南次洼、南次洼和主洼所包围的洼中隆背斜构造带，其北部为渤中凹陷主洼，南部与黄河口凹陷相接，西部为埕北低凸起，东南与渤南低凸起相邻[38–39]（图 1）。构造研究表明，渤中 19–6 构造太古宙变质岩潜山经历了印支期至喜马拉雅期的多旋回构造运动的改造，其间变质岩潜山地层长期暴露于地表，发生了强烈的剥蚀和改造，形成了复杂的储集层[40]。前人在研究区提出了“优质烃源岩深埋成气，变质岩潜山多期构造运动控储，厚层超压泥岩控制油气汇聚运移和保存”的成藏模式[41]，为了更加清晰地表征变质岩潜山储层的内部特征，本次研究选取 BZ19–6–A 井和 BZ19–6–B 两口井，它们在潜山顶部界面附近取心较为完整，可以很好地反映变质岩潜山与上下地层之间的接触关系以及潜山储层内部特征。

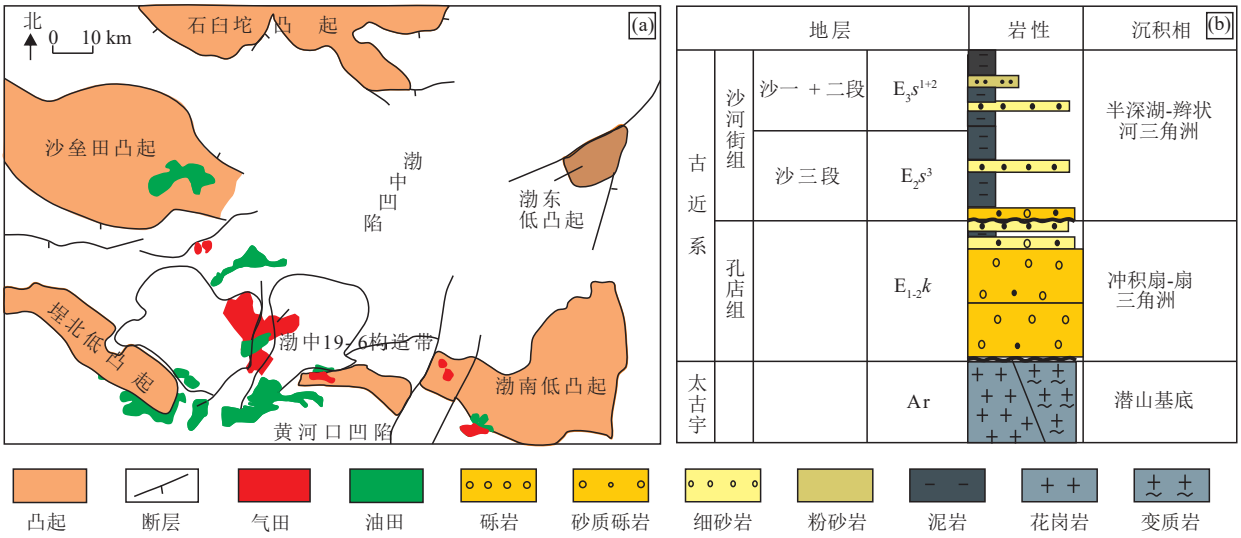


图 1　渤中 19-6 构造位置（a）及地层演化特征（b）（据文献［31］修改）

Fig. 1　Location（a）and stratigraphic evolution characteristics（b）of the Bozhong 19-6 structure（modified from reference［31］）

2　一级垂向结构单元特征

2.1　渤中 19–6 构造变质岩潜山岩性

研究区潜山钻井的岩性主要包括：变质岩（混合花岗岩、混合片麻岩、片麻岩）、砾岩类和砂岩类三种类型，下部为变质岩，往上过渡成为砂砾岩互层（图 2）。其中，变质岩以灰色、灰白色二长片麻岩为主，矿物成分主要为斜长石、钾长石、石英和少量白云母。其中，斜长石含量高于 40%，钾长石含量约占 25% ~ 35%，石英含量约占 17% ~ 30%，白云母含量约占 2% ~ 5%（图 2a–b）。砾岩类多为灰黑色–黄色，以砂质砾岩和含泥砂质砾岩为主。砾石粗大，成分主要为片麻岩，也可见石英、钾长石、斜长石和岩屑等。填隙物主要为泥质均匀分布于颗粒间，且多蚀变为水云母（图 2c–d）。砂岩为灰白色–浅灰色，以含砾砂岩和长石砂岩为主。砂质岩石成分主要见石英、钾长石、斜长石和岩屑。填隙物主要见泥质和硅质，泥质主要分布于颗粒接触处，硅质为石英次生加大形成（图 2e–f）。

2.2　一级垂向结构单元划分特征

根据风化作用的强弱程度，在垂向上将渤中 19–6 构造变质岩潜山划分为风化壳带和潜山内幕带两个一级结构单元（图 3）。风化壳带是指地表岩石在长期风化作用下，其表层岩石破碎、分解的产物残留在原地形成的疏松层状堆积体，是风化作用的产物未被完全搬运而保留在原地的结果，通常覆盖在未风化的基岩之上。随着向下埋藏深度增加，潜山遭受的风化改造强度逐渐递减直至消失，向下延伸至未受表层风化作用显著影响的

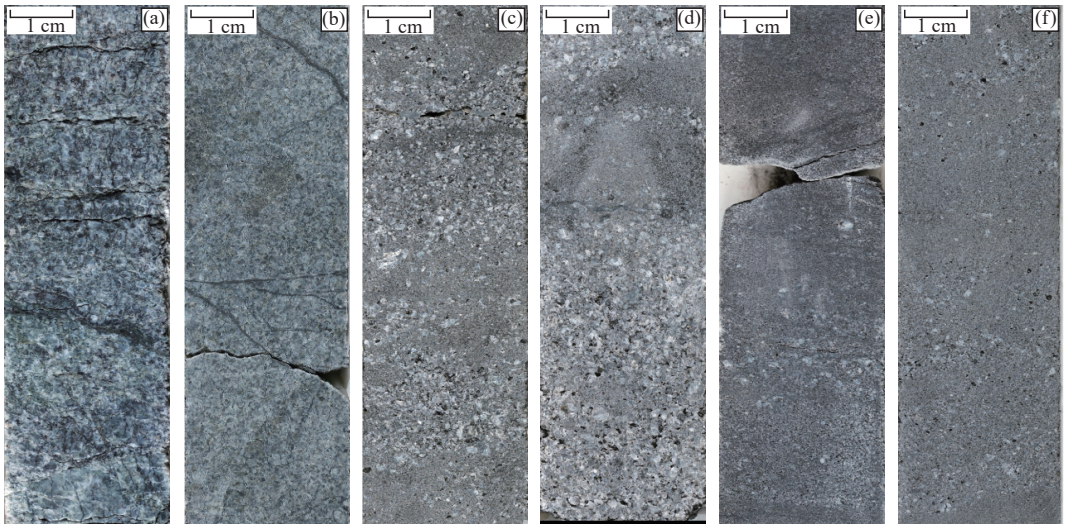


图2 渤中19-6构造变质岩潜山顶部界面附近岩心照片

Fig. 2 Core photos near the top boundary of metamorphic buried hill in Bozhong19-6 structure

(a) BZ19-6-A井,4539.0 ~ 4539.2 m,变质岩;(b) BZ19-6-B井,4435.4 ~ 4435.6 m,变质岩;(c) BZ19-6-B井,4427.2 ~ 4427.4 m,砾岩;(d) BZ19-6-B井,4428.8 ~ 4429.0 m,砾岩;(e) BZ19-6-A井,4533.4 ~ 4533.6 m,砂岩;(f) BZ19-6-B井,4426.4 ~ 4426.6 m,砂岩。

基岩区域，其中未风化部分即为潜山内幕带。前人也采取了一些化学指标和录井资料来划分潜山内部结构[32, 42-44]。本次研究中，主要通过电阻率、声波时差以及裂缝产状是否一致等对风化壳带和潜山内幕带进行识别和划分。

（1）电阻率曲线：由于风化壳带受到强烈的风化作用改造，使得其电阻率曲线较潜山内幕带整体下降；在潜山内幕带中，深侧向电阻率值波动范围为402 ~ 89125 Ω·m^{-1}，其平均值为46773 Ω·m^{-1}，而在风化壳带中，深侧向电阻率波动范围在29 ~ 5209 Ω·m^{-1}之间，其平均值为602 Ω·m^{-1}（表1），风化壳带的电阻率均值远远低于潜山内幕带。同样，潜山中电阻率曲线达到或接近最高值即“内幕电阻率基线”[38]，也明显大于风化壳带的最大电阻率值（图3）。由此，从潜山顶面往下，当电阻率曲线幅度首次接近内幕带电阻率幅度的位置，可以作为风化壳带与潜山内幕带之间的界线。

（2）声波时差曲线：风化壳带中，声波时差值的波动范围在48 ~ 70 μs·m^{-1}之间，其平均值为55 μs·m^{-1}；在潜山内幕带中，声波时差值波动范围为50 ~ 59 μs·m^{-1}，其平均值为52 μs·m^{-1}（表1）。虽然二者声波时差值相差不大，但是该测井曲线形态在不同一级垂向结构单元中存在着较大的区别。在没有断层等因素影响时，风化壳带中声波时差曲线常见多个中-低幅度指形和齿化箱形的组合；在潜山内幕带中，多为中-低幅度齿化箱形（图3）。

（3）裂缝发育情况：虽然在风化壳带和潜山内幕带中都可以识别出大量裂缝，但是仍然可以根据裂缝的发育情况来划分风化壳带和潜山内幕带。在风化壳带中，岩石具碎裂结构，岩石内可见多条走向不同的裂缝，裂缝宽度在0.02 ~ 0.4 mm之间，常被白云石、黄铁矿和泥质混合物所充填，裂缝间相互切割，形成网状裂缝（图4a-c）；而在潜山内幕带中，岩石内主要发育产状较为一致的微裂缝，微裂缝宽度在0.01 ~ 0.005 mm之间，常被方解石和白云石充填（图4d-f）。在数量上，风化壳带平均孔缝率为2.5%，内幕裂缝带的平均孔缝率为1%，较风化壳带孔缝率明显降低。

（4）元素-矿物特征：影响风化作用的因素多样，如构造活动和气候影响，从而导致元素的迁移规律较为复杂[33, 45-47]。学者通过微量元素含量、敏感元素、敏感矿物来卡取潜山界面[43-44]。本文在元素录井特征的分析中，选取了Na、Fe、Ca等元素作为敏感元素，石英和长石（钾长石和斜长石）作为敏感矿物。从沉积岩进入风化壳带后，Na元素含量显著增加，Ca元素含量明显降低，Fe元素含量减少，石英和长石矿物含量有所增加；从风化壳带进入下覆内幕带后，Ca元素、Mg元素含量出现了明显降低，Na元素、Fe元素、长石含量增加，石英含量小幅度减少。从元素整体波动情况来看，上覆砂砾岩带中各元素含量波动频繁；而在下覆内幕带中，各元素含量相对稳定，没有表现出明显的波动（图5）。这说明元素含量的变化与岩性、储层垂向分带密切相关。

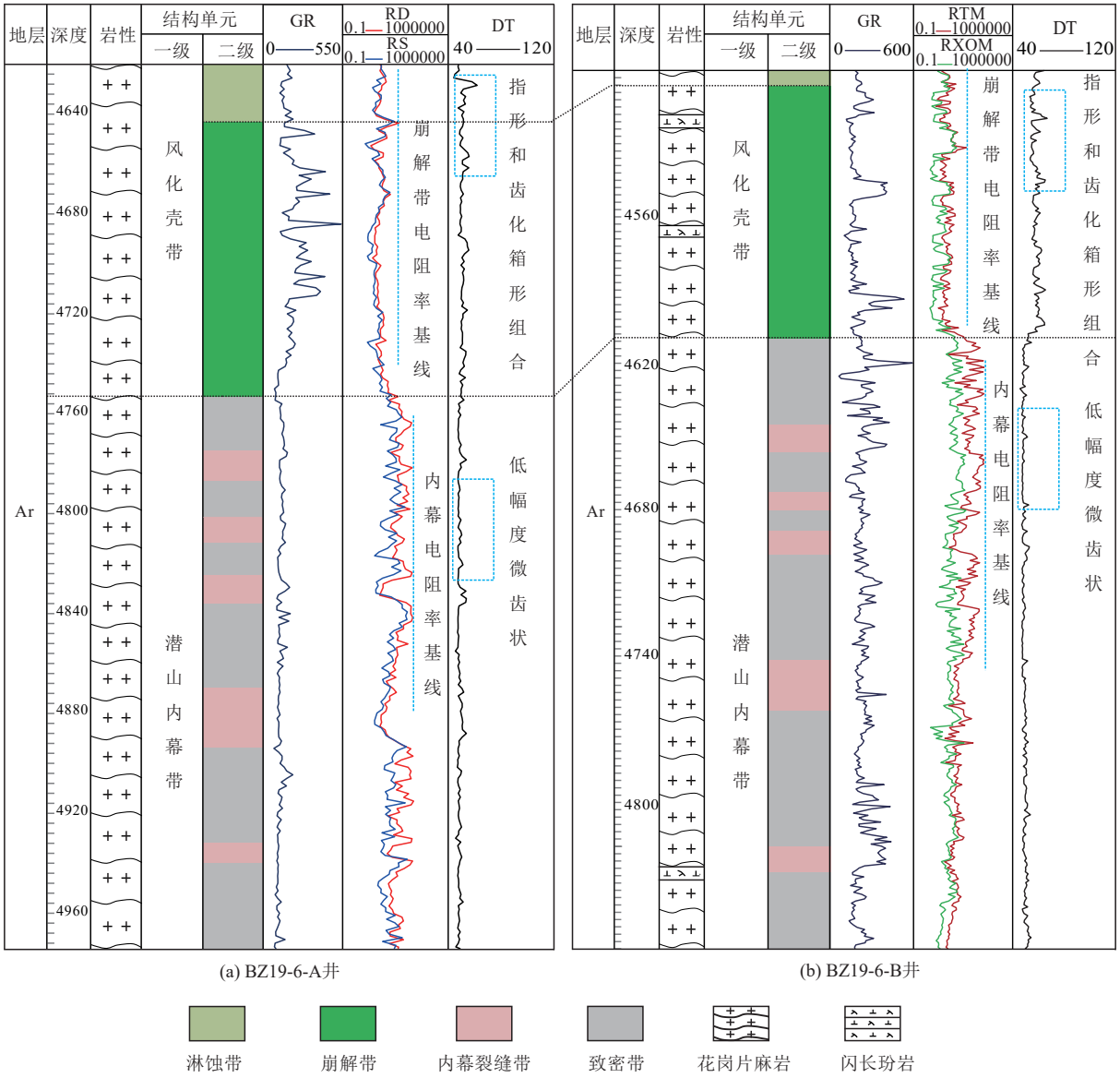


图 3　渤中 19-6 构造变质岩潜山垂向沉积单元

Fig. 3　Vertical sedimentary units of metamorphic buried hill in Bozhong19-6 structure

3　二级垂向结构单元特征

渤中 19-6 构造风化壳带在垂向上可进一步划分黏土带、风化砂砾岩带、淋蚀带和崩解带 4 种二级垂向结构单元；潜山内幕带中可识别出内幕裂缝带和致密带 2 种二级垂向结构单元。

3.1　风化壳带和潜山内幕带结构单元地质特征

黏土带在古风化壳中较难保存下来。风化砂砾岩带在黏土带之下，由风化母岩变质风化破碎产生的砂砾物质组成，其碎屑颗粒分选性与磨圆度较差，多呈次棱角状形态。岩石内不但保留原生粒间孔隙，而且风化作用形成的溶蚀扩溶裂缝亦较为显著（图 6a-b）。淋蚀带是由于受到风化作用，从而使母岩发生破裂，进而产生大量裂缝，同时，受大气降水或地下水长期渗透影响而成。淋蚀带内岩石经历了显著的蚀变作用，矿物多被绢云母化、高岭土化。在该带中，岩体呈半破碎结构，网状风化裂缝比较发育且具溶蚀扩大的特征，铸体薄片表征显示晶内溶蚀孔隙高度发育

表 1　渤中 19-6 构造变质岩潜山一级结构单元电性参数

Table 1　First-order units electrical parameters of metamorphic buried hill in Bozhong 19-6 structure

储层结构单元	深侧向电阻率(Ω·m^{-1})	声波时差(μs·m^{-1})
风化壳带	29 ~ 5209(602)	48 ~ 70(55)
潜山内幕带	402 ~ 89125(46773)	50 ~ 59(52)

注：表格中括号内为平均值

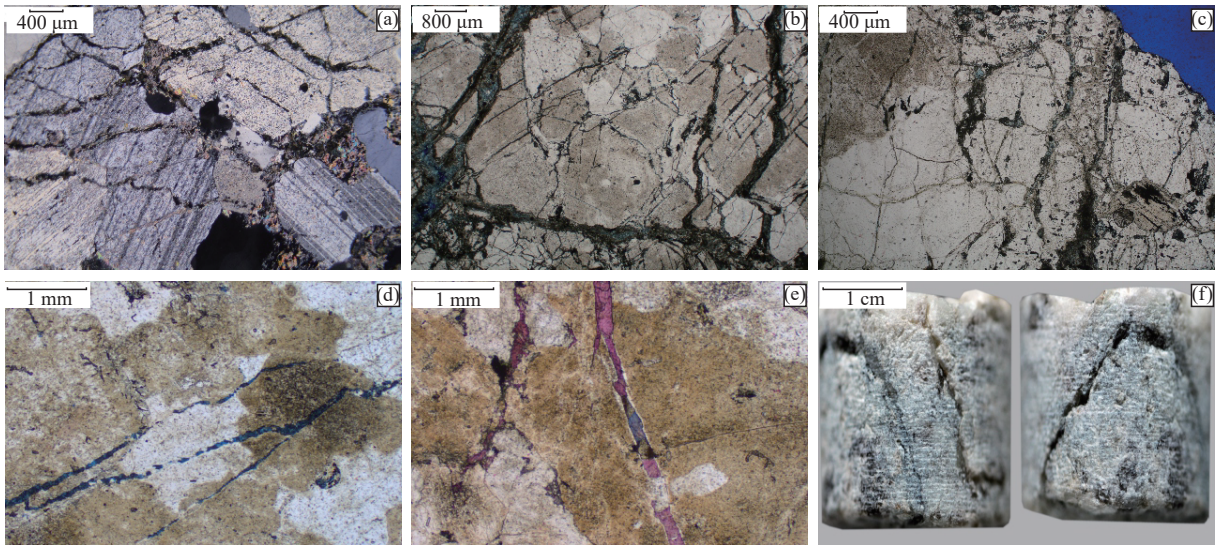


图4 渤中19-6构造变质岩潜山裂缝特征

Fig. 4 Fractures features of metamorphic buried hill in Bozhong19-6 structure

(a) BZ19-6-A井,4539.18 m,风化壳裂缝显微照片;(b) BZ19-6-B井,4475.5 m,风化壳裂缝显微照片;(c) BZ19-6-B井,4470 m,风化壳裂缝显微照片;(d) BZ19-6-A井,4815 m,潜山内幕裂缝显微照片;(e) BZ19-6-A井,5100 m,潜山内幕裂缝显微照片;(f) BZ19-6-B井,4874 m,潜山内幕壁心照片。

(图6c-d)。崩解带内不发育溶蚀缝,多为未充填-半充填风化裂缝,裂缝通常呈面状、网状,形态多样;产状也多变,发育弯曲、弧形裂缝,可见少量溶蚀孔隙(图6e-f)。内幕裂缝带是断裂作用的产物,其表现为断层面附近碎裂岩发育,且在断层两侧一定范围内裂缝密度显著增高,共同构成这一构造带,包括碎裂段和裂缝密集段。

在碎裂段中,岩石呈破碎状,主要为角砾岩和矿物碎屑,可见矿物高岭土化、绿泥石化和绢云母化。可观察到溶蚀孔、晶内溶孔和基质溶孔(图6g-h)。由于未经历风化作用与断层活动的影响,在潜山内幕中的致密带,岩性上保持致密均一,溶蚀孔隙不发育,可见少量构造裂缝,多被方解石、铁白云石等矿物完全充填(图6i)。

3.2 风化壳带和潜山内幕带二级结构单元测井识别特征

根据声波时差与电阻率测井曲线的形态差异,分别建立了风化壳带和潜山内幕带内部的二级结构单元识别特征。各二级结构单元特征如下:

在风化砂砾岩带中,电阻率曲线表现为中-高幅度指形和箱形组合,声波曲线特征则表现为中-低幅度指形和箱形组合(图7a);在淋蚀带中,电阻率曲线为多个中-高幅度箱形、漏斗形组合,声波曲线可见多个中-低幅度箱形(图7b);在崩解带中,电阻率为多个中-高幅度齿化箱形和指形组合,其电阻率曲线整体上较淋蚀带电阻率曲线高,可以以电阻率的小幅度抬升作为淋湿带和崩解带的划分界线,声波曲线可见中-低幅度箱形和指形组合(图7c);致密带电阻率曲线可见中-高幅度齿形;声波曲线具有平直低幅度微齿化的特征(图7d);在内幕裂缝带中,电阻率曲线形态可见中-低幅度齿形,与致密带电阻率相比,其曲线整体较致密带低;声波曲线整体呈低幅度微齿状,较致密带高;其中,碎裂段声波曲线较裂缝密集段齿化幅度更大(图7e)。

4 储层特征

4.1 变质岩潜山储层类型

岩心铸体薄片显示,在风化砂砾岩带中,储集空间主要为次生孔隙。孔隙类型包括颗粒粒间孔和粒内溶蚀孔,以粒间孔为主,原生孔隙不发育(图8a-b)。在淋蚀带和崩解带中,储集空间主要为次生孔隙和裂缝,孔隙多为溶蚀孔,包括部分矿物颗粒,比如斜长石、角闪石及碳酸盐类颗粒粒内溶孔,属于次生孔隙,孔隙大小可达0.08 ~ 1.5 mm(图8c)。裂缝多为构造缝,是淋蚀带和崩解带中主要的裂缝类型和主要的渗流通道。从显微薄片中可见其构造缝发育规模大,延伸距离远,相互切割呈网状,多被碳酸盐矿物充填

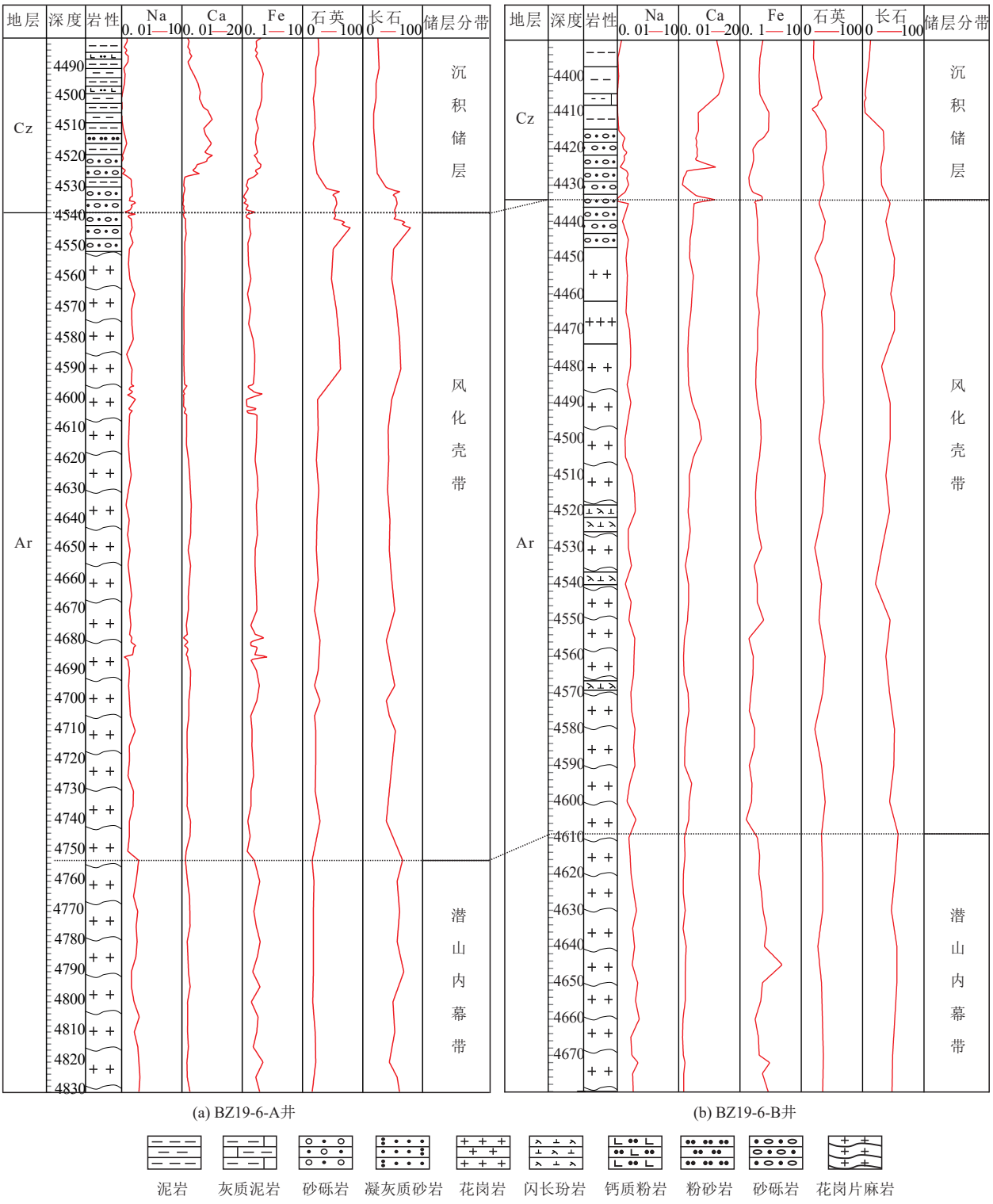


图 5　渤中 19-6 构造变质岩潜山元素-矿物变化特征

Fig. 5　Elements-minerals variation characteristics of metamorphic buried hill in Bozhong19-6 structure

(图 8d–f)。在潜山内幕带中，储集空间主要为裂缝，其包括中–高角度斜缝、扩溶缝、微裂隙等。扩溶缝是早期充填于构造缝中的碳酸盐矿物再次被溶蚀，致使裂缝加宽而形成，其宽窄不一，部分扩溶缝宽度可达 0. 1 ~ 0. 6 mm。岩石微裂缝较发育，宽度在 0. 01 mm 左右，常被泥质和铁白云石充填（图 8g–i）。因此，渤中 19–6 构造潜山储集空间包括颗粒粒间孔、粒内溶蚀孔、构造缝、扩溶缝等，储层类型为孔隙型、裂缝–孔隙型、孔隙–裂缝型、裂缝型等。

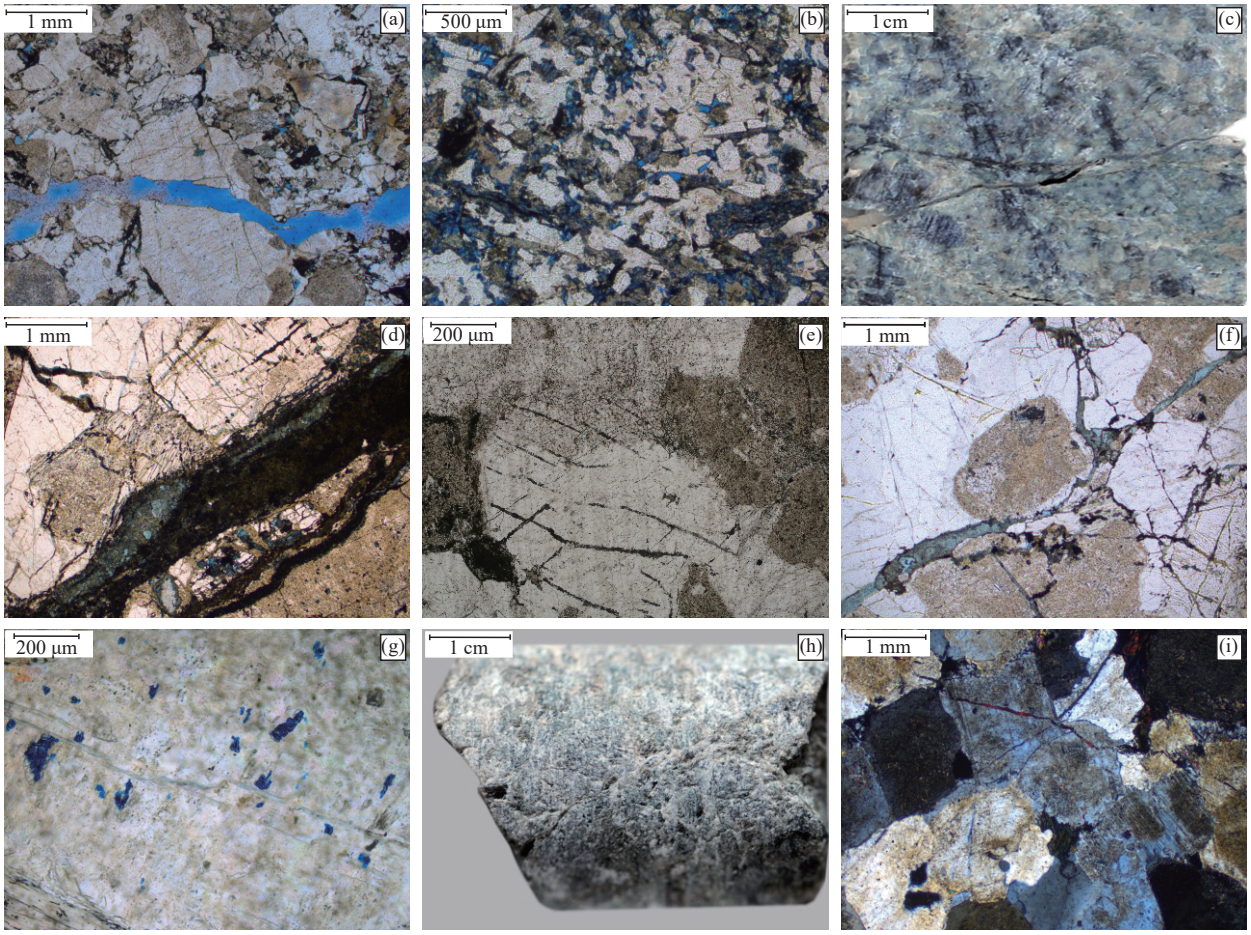


图6 渤中19-6构造变质岩潜山二级结构单元地质特征

Fig. 6 Secondary-order units geological features of metamorphic buried hill in Bozhong19-6 structure

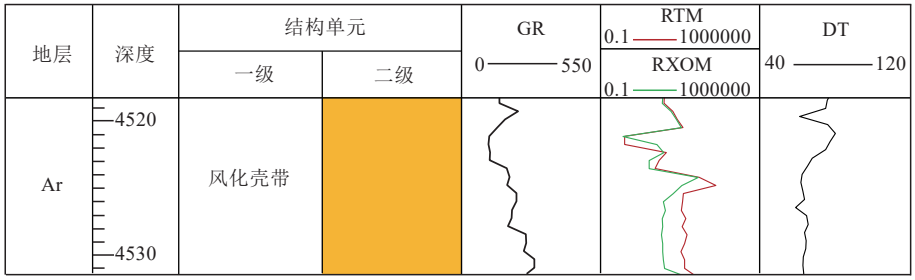
(a) BZ19-6-A井,4537.07 m,风化砂砾岩带显微照片;(b) BZ19-6-B井,4426.59 m,风化砂砾岩带显微照片;(c) BZ19-6-A井,4598.3 m ~ 4598.4 m,淋蚀带岩心照片;(d) BZ19-6-B井,4458 m,淋蚀带显微照片;(e) BZ19-6-A井,4692 m,崩解带显微照片;(f) BZ19-6-B井,4541 m,崩解带显微照片;(g) BZ19-6-A井,4875 m,内幕裂缝带显微照片;(h) BZ19-6-B井,4691 m,内幕裂缝带壁心照片;(i) BZ19-6-A井,4920 m,致密带显微照片。

4.2 变质岩潜山储层分布模式

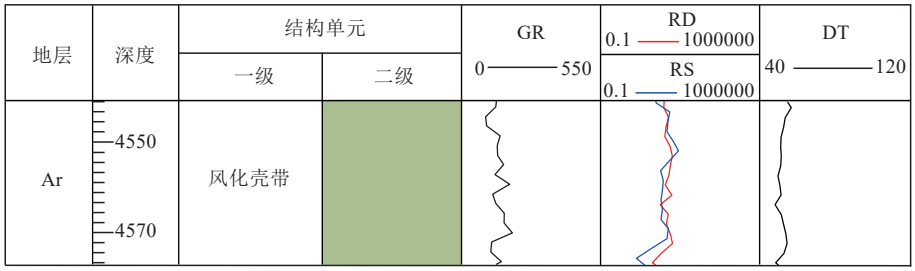
渤中19–6构造太古界变质岩潜山上直接覆盖的是新生界沉积地层，其形成过程经历了相当复杂的地质作用。印支运动早期，渤中19–6构造的北部边界形成高角度逆冲断层，导致太古宇基底露出地表，顶部古生界地层被完全剥蚀；燕山运动晚期，该区再次发生了强烈的区域性的挤压事件，渤中19–6构造再次被抬升地表遭受剥蚀[44]。如此长期的风化淋滤、构造破裂、热液溶蚀等改造作用的影响，使得本身较为致密、不发育原生孔隙的变质岩内部发育一些溶蚀孔隙和裂缝，从而有机会成为有效的优质储层。如图9所示，渤中19–6构造变质岩潜山从上往下依次可识别出风化壳和内幕带两个一级结构单元，其中风化壳中又常见风化砂砾岩带、淋蚀带和崩解带3种二级结构单元；潜山内幕可识别出内幕裂缝带和致密带2种二级结构单元。在风化砂砾岩带中，储层主要为孔隙型，其次为裂缝–孔隙型；在淋蚀带中，由于溶蚀作用非常强烈，储层类型主要为裂缝–孔隙型和孔隙–裂缝型；在崩解带中，溶蚀作用明显减弱，主要储层类型为孔隙–裂缝型；进入潜山内幕，内幕裂缝带中发育一些构造裂缝或微裂缝，也可成为较好储层，通常为裂缝型储层。

4.3 变质岩潜山储层物性特征

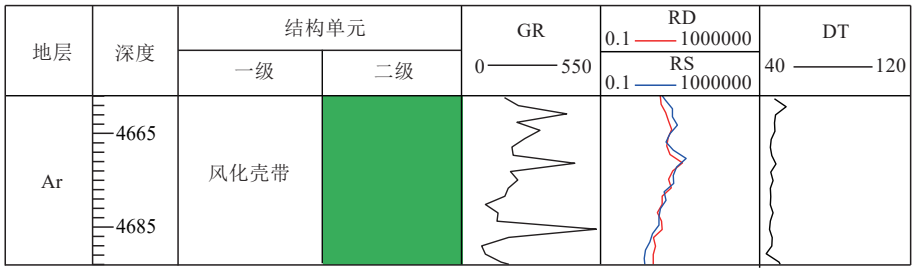
太古界变质岩潜山储层非均质性极强，以低孔、低渗为主，部分层段为高孔、高渗。王茂桢等研究认为锦州25–A构造太古界潜山储层孔隙度介于3.5% ~ 13.3%，平均7.9%，渗透率介于0.01×10^{-3} ~ 15.32×10^{-3} μm²，平均1.62×10^{-3} μm²[48]。叶涛等研究发现渤中19–6构造太古界基岩潜山平



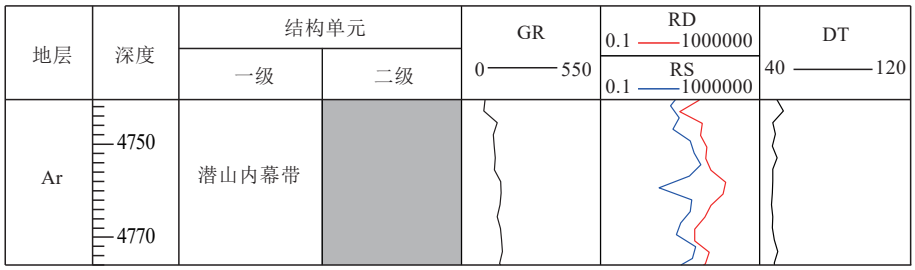
(a) 风化砂砾岩带典型测井响应特征（BZ19-6-B井）



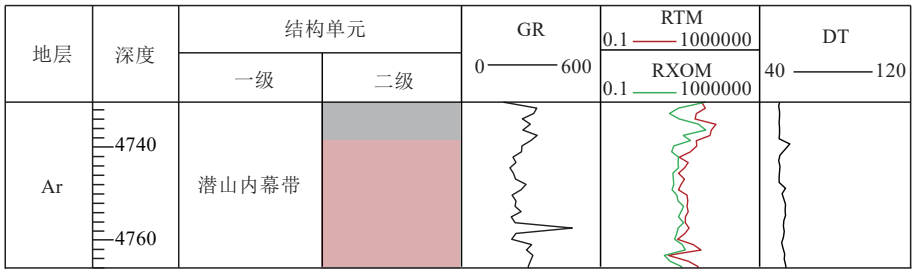
(b) 淋蚀带典型测井响应特征（BZ19-6-A井)



(c) 崩解带典型测井响应特征（BZ19-6-A井）



(d) 致密带典型测井响应特征（BZ19-6-A井）



(e) 内幕碎裂带典型测井响应特征（BZ19-6-B井）



图 7　渤中 19-6 构造变质岩潜山二级结构单元测井响应特征

Fig. 7　Secondary-order units logging curves response characteristics of metamorphic buried hill in Bozhong 19-6 structure

均孔隙度为 5%，平均渗透率为 6.48×10^{-3} μm^2 [26]。本次研究发现，如图 10 所示，风化砂砾岩带储层主要为孔隙型，其次为少量裂缝-孔隙型储层，孔隙度分布范围为 8% ~ 18%，平均值为 12%，渗透率分布范围为 0.4×10^{-3} ~ 32.18×10^{-3} μm^2，平均值为 22.5×10^{-3} μm^2，其孔隙度、渗透率值均远超平均水平，为Ⅰ类储层；内幕裂缝带主要为裂缝型储层，孔隙度分布范围为 1% ~ 5%，平均值为

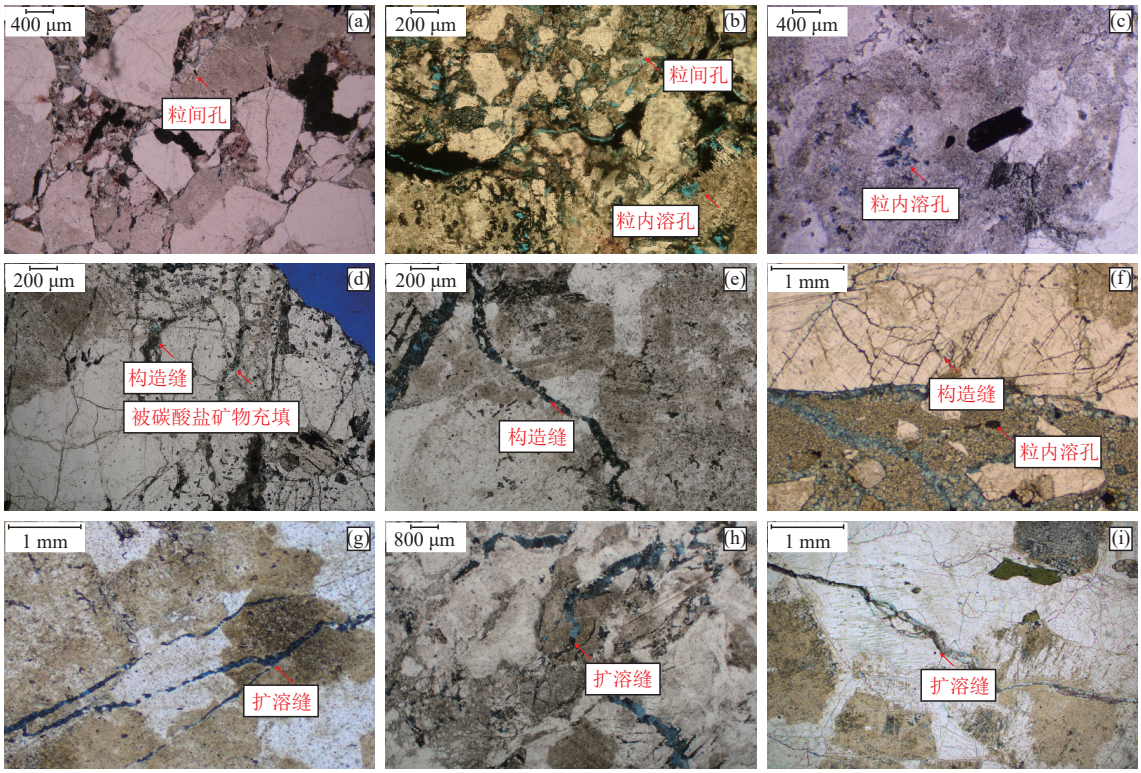


图8 渤中19-6构造变质岩潜山储集空间类型

Fig. 8 Reservoir space types of the metamorphic buried hill in Bozhong19-6 structure

(a) BZ19-6-A井,4537.3 m,风化砂砾岩带;(b) BZ19-6-B井,4428.67 m,风化砂砾岩带;(c) BZ19-6-A井,4553 m,淋蚀带;(d) BZ19-6-B井,4470 m,淋蚀带;(e) BZ19-6-A井,4655 m,崩解带;(f) BZ19-6-B井,4550 m,崩解带;(g) BZ19-6-A井,4811 m,内幕裂缝带;(h) BZ19-6-A井,4700 m,致密带;(i) BZ19-6-B井,4614 m,致密带,均为铸体薄片。

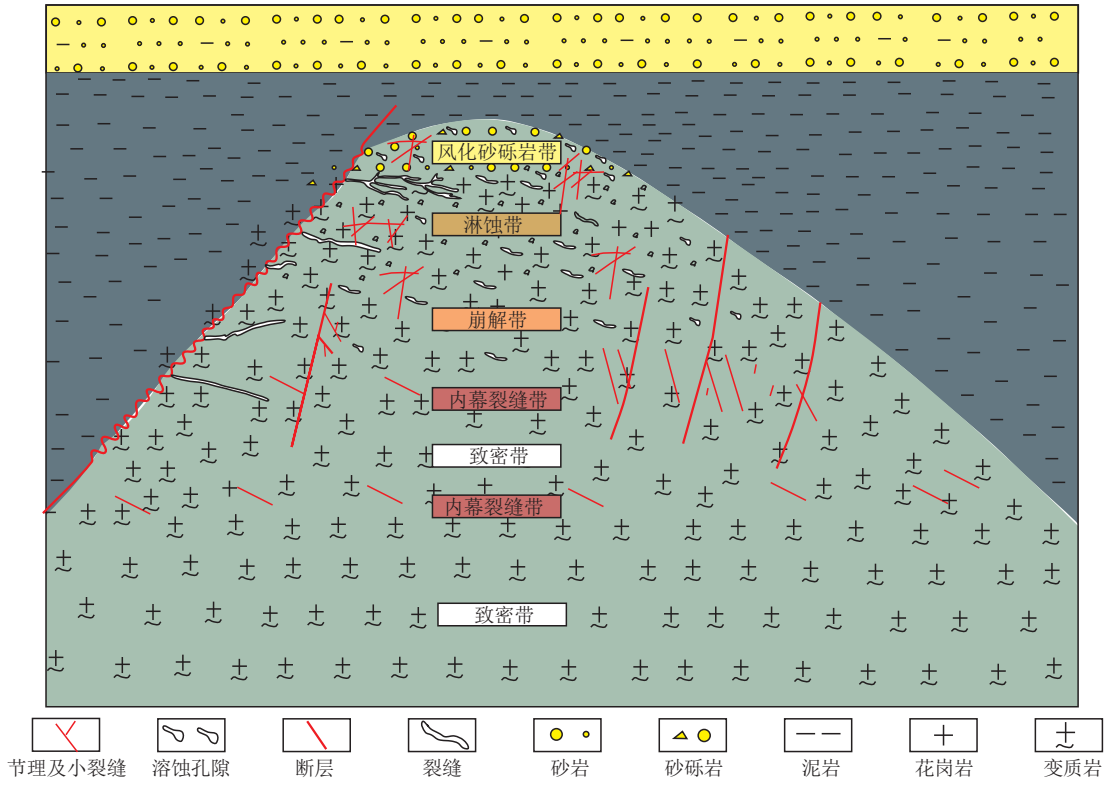


图9 渤中19-6构造变质岩潜山储层分布模式图

Fig. 9 Reservoir distributional model of metamorphic buried hill in Bozhong19-6 structure

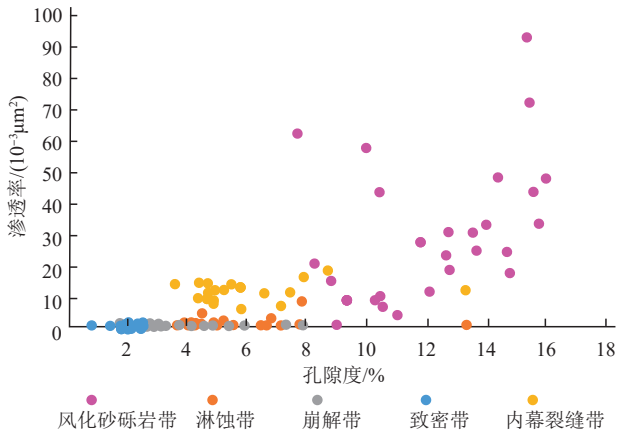


图 10　渤中 19-6 构造变质岩潜山储集层物性特征

Fig. 10　Physical property characteristics of metamorphic buried hill reservoir in Bozhong19-6 structure

4.8%，渗透率分布范围为 6.224×10^{-3} ~ 17.54×10^{-3} μm²，平均值为 15×10^{-3} μm²，其孔隙度相对较低，但裂缝的发育极大地增加了储层的渗透性，此类储层为Ⅰ-Ⅱ类储层；淋蚀带主要为裂缝-孔隙型和孔隙-裂缝型储层，其孔隙度分布范围为 2% ~ 13%，平均值为 5.2%，渗透率分布范围为 0.028×10^{-3} ~ 4.03×10^{-3} μm²，平均值为 0.735×10^{-3} μm²，为Ⅲ类储层；崩解带主要为孔隙-裂缝型储层，其孔隙度分布范围为 1.7% ~ 7.7%，平均值为 3.8%，渗透率分布范围为 0.035×10^{-3} ~ 0.4×10^{-3} μm²，平均值为 0.119×10^{-3} μm²，为Ⅲ类储层；致密带孔缝发育较差，其孔隙度分布范围为 0.7% ~ 8.1%，平均值为 3.1%，渗透率分布范围为 0.057×10^{-3} ~ 0.764×10^{-3} μm²，平均值为 0.216×10^{-3} μm²，其储层物性较差，难以成为优质储层。因此，风化砂砾岩带和内幕裂缝带是研究区潜山油气藏的主力优质储层，也是油气重点的勘探对象，其次是淋蚀带和崩解带的过渡型储层，这也与王清斌等[49]前期的研究结果较为一致。

5　结　论

（1）渤中 19-6 构造变质岩潜山岩性主要为变质岩（混合花岗岩、混合片麻岩、片麻岩）、砾岩类和砂岩类。根据测井曲线特征、录井元素矿物特征以及裂缝发育情况等，渤中 19-6 构造变质岩潜山在垂向上可识别出风化壳和潜山内幕两个一级结构单元，其中风化壳中又可进一步细分出风化砂砾岩带、淋蚀带和崩解带等；潜山内幕中可进一步细分出内幕裂缝带和致密带等。各个二级结构单元受不同程度的风化作用的影响，在测井曲线形态和分布范围上也有明显差异。

（2）渤中 19-6 构造变质岩潜山内部，储层主要受强烈的风化作用和多期构造作用的控制，风化壳带的储层主要为孔隙型，潜山内幕带储层主要为裂缝型，根据前人建立的储层标准，研究区最有利储层主要为风化砂砾岩带的孔隙型和裂缝-孔隙型储层以及潜山内幕裂缝带的裂缝型储层，其次为淋蚀带和崩解带的裂缝-孔隙型和孔隙-裂缝型储层。

参考文献：

[1] POWERS S. Reflected buried hills and their importance in petroleum geology[J]. Economic Geology, 1922, 17(4): 233 - 259.

[2] LEVORSEN A I. Geology of Petroleum[M]. AAPG, 2001: 286 - 348.

[3] 刘传虎. 潜山油气藏概论[M]. 北京：石油工业出版社，2006：3.

[4] 范泰雍，谢恭俭. 我国基岩油藏的勘探现状和前景[J]. 石油与天然气地质，1985，6(1)：113 - 116.

[5] 谢文彦，孟卫工，李晓光. 辽河坳陷基岩油气藏[M]. 北京：石油工业出版社，2012：4 - 6.

[6] 穆星，孟涛，石泉清，等. 济阳坳陷太古宙基岩储层特征及油气成藏模式[J]. 现代地质，2025，39(3)：787 - 800.

[7] 朱茂林，刘震，刘惠民，等. 东营凹陷北带基岩风化壳储层发育特征及控制因素[J]. 地学前缘，2024，31(3)：324 - 336.

[8] 李卓奕，谢敏. 渤海湾盆地东濮凹陷潜山油气成藏模式[J]. 石油与天然气地质，2025，46(2)：407 - 426.

[9] 张波，王永诗，黄铮，等. 济阳坳陷沾化东部古—中生界潜山构造样式与成藏模式[J]. 中国石油勘探，2024，29(2)：46 - 57.

[10] 王庶丞，唐华风，邹明倬，等. 渤海湾盆地莱州湾凹陷南部斜坡带中生界火山岩裂缝特征及分布规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2024，54(6)：1846 - 1859.

[11] 徐春强，王晨杰，王蔚. 渤中凹陷北部中生界火山岩储层发育特征及油气成藏条件[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2024，54(6)：1801 - 1814.

[12] 孙耀庭，张鹏飞，刘菲菲，等. 济阳坳陷桩西地区中生界火山岩成岩演化特征及有利储层分布[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2025，49(6)：42 - 54.

[13] 张津宁，王文洁，能源，等. 断陷盆地控山断层对断控潜山发育的控制和改造：以黄骅坳陷港西断层和港北潜山为例[J]. 现代地质，2024，38(6)：1445 - 1457.

[14] 牛成民，于海波，单玄龙，等. 渤海海域锦州 25-A 构造区中生界火山岩有利储层成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2024，54(6)：1788 - 1800.

[15] 单俊峰，陈振岩，张卓，等. 辽河坳陷西部凹陷西斜坡古潜山的油气运移条件[J]. 现代地质，2005，19(2)：274 - 278.

[16] 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]. 天然气工业，2019，39(1)：33 - 44.

[17] 郭龙龙，王峻，张春光，等. 渤海湾盆地辽东湾地区辽西凸起中北段太古宇潜山成储规律及主控因素[J]. 石油实验地质，2024，46(1)：46－53.

[18] 时梦临. 渤海海域渤中凹陷西南环太古宇变质岩潜山构造演化与储层形成机制[D]. 武汉：中国地质大学，2024.

[19] 巩磊，秦欣楠，高帅，等. 变质岩潜山多尺度裂缝发育特征及裂缝网络结构模式：以渤中Z变质岩潜山为例[J]. 地学前缘，2024，31(5)：332－343.

[20] 徐长贵，杜晓峰，刘晓健，等. 渤海海域太古界深埋变质岩潜山优质储集层形成机制与油气探勘意义[J]. 石油与天然气地质，2020，41(2)：235－247.

[21] 郑定业，杨贵丽，林会喜，等. 渤海湾盆地太古宇变质岩潜山油气藏特征、主控要素及勘探方向[J]. 地质论评，2025，71(5)：1585－1596.

[22] 薛永安，杨海风，黄志，等. 渤海湾盆地渤海海域油气成藏富集新认识与大型油气田发现[J]. 中国石油勘探，2025，30(1)：58-69.

[23] 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.

[24] 杜晓峰，刘晓健，张新涛，等. 渤海海域太古界变质岩储层特征与形成控制因素[J]. 中国海上油气，2021，33(3)：15－27.

[25] 赵昭，胡志伟，叶涛，等. 渤南低凸起变质岩潜山风化壳储层发育特征及控制因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2025，49(6)：30－41.

[26] 叶涛，牛成民，王清斌，等. 渤海湾盆地大型基岩潜山储层特征及其控制因素[J]. 地质学报，2021，95(6)：1889－1902.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 薛永安，李慧勇，许鹏，等. 渤海海域中生界覆盖型潜山成藏认识与渤中13-2大油田发现[J]. 中国海上油气，2021，33(1)：13－22.

[30] 施和生，牛成民，侯明才，等. 渤中13-2双层结构太古宇潜山成藏条件分析与勘探发现[J]. 中国石油勘探，2021，26(2)：12－20.

[31] 张宁，陈礼明. 闽南地区花岗岩风化壳的分带及特征[J]. 福建地质，1990，9(3)：177－185.

[32] 吴宏伟，尚彦军，曲永兴，等. 香港花岗岩风化分级化学指标体系与风化壳分带[J]. 工程地质学报，1999，7(2)：125－134.

[33] WYNS R，BALTASSAT J M，LACHASSAGNE A，et al. Application of SNMR Soundings for Groundwater Reserves Mapping in Weathered Basement Rocks (Brittany，France)[J]. Bulletin de la Societe Geologique de France，2004，175(1)：21－34.

[34] 衣健，李慧勇，单玄龙，等. 渤海湾盆地渤中凹陷太古宇变质岩潜山储集层垂向结构单元划分与识别[J]. 石油勘探与开发，2022，49(6)：1107－1118.

[35] 毛翔，罗璐，汪新伟，等. 渤海湾盆地新生代火山岩分布特征及其地热勘探潜力[J]. 现代地质，2020，34(4)：858－864.

[36] 邓运华. 渤海大中型潜山油气田形成机理与勘探实践[J]. 石油学报，2015，36(3)：253－261.

[37] 吴庆勋，高坤顺，吴昊明，等. 渤海海域前新生代基底特征及其油气勘探意义[J]. 现代地质，2019，33(4)：802－810＋819.

[38] 施宁，刘敬寿，张冠杰，等. 基底变质岩深部潜山储层构造裂缝发育特征及主控因素—以渤海湾盆地渤中B区块为例[J]. 石油实验地质，2024，46(4)：799－811.

[39] 王昕，杨海风，叶涛，等. 渤海海域深层—超深层太古宇潜山成藏条件与富集[J]. 中国石油勘探，2025，30(1)：111－124.

[40] 侯贵廷，钱祥麟，蔡东升. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究[J]. 北京大学学报(自然科学版)，2001，37(6)：845－851.

[41] 朱如凯，崔景伟，毛治国，等. 地层油气藏主要勘探进展及未来重点领域[J]. 岩性油气藏，2021，33(1)：12－24.

[42] 尚彦军，吴宏伟，曲永新，等. 花岗岩风化程度的化学指标及微观特征对比—以香港九龙地区为例[J]. 地质科学，2001，36(3)：279－294.

[43] 余意，倪朋勃，王建立，等. 元素录井技术在渤中A区块潜山界面卡取中的应用[J]. 录井工程，2021，32(1)：33－38.

[44] 胡云，谭忠健，张建斌，等. 岩屑成分分析在渤中19-6潜山界面识别中的应用[J]. 中国海上油气，2020，32(6)：70－76.

[45] DEWANDEL B，LACHASSAGNE P，WYNS R，et al. A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite quifers controlled by single or multiphase weathering[J]. Journal of Hydrology，2006，330：260－284.

[46] XU H J，MA C Q，LIU F，et al. Differences of granitic weathering at the northern and southern feet of Dabie Mountains，Central China：Implications for tectonic and climatic environments[J]. Science in China Series D：Earth Science，2003，46：641－651.

[47] 周琦杰，刘永江，王德英，等. 渤海湾中部中、新生代构造演化与潜山的形成[J]. 地学前缘，2022，9(5)：147－160.

[48] 王茂桢，王冰洁，杨传超，等. 辽东湾坳陷斜坡型太古界潜山储层特征及主控因素：以锦州25-A构造为例[J]. 断块油气田，2023，30(4)：624－631.

[49] 王清斌，刘晓健，叶涛，等. 渤海海域太古界变质岩潜山裂缝型储层发育主控因素分析[J]. 地球科学，2025，50(2)：453－465.