

引用格式:刘闯,桑亚迪,王琳,等.东海西湖凹陷斜坡中段古潜山充填缝成因机制[J].油气藏评价与开发,2026,16(3):597-606.

LIU Chuang, SANG Yadi, WANG Lin, et al. Genetic mechanisms of filled fractures in paleo-buried hill on middle slope of Xihu Sag, East China Sea[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2026, 16(3): 597-606.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2026.03.009

## 东海西湖凹陷斜坡中段古潜山充填缝成因机制

刘闯,桑亚迪,王琳,张书迪,杨佳毅,程雪彤,许可,吴凯伦

(中国石化上海海洋油气分公司勘探开发研究院,上海 200120)

**摘要:**近年来,海域潜山油气勘探在渤海、南海均取得高产油气流,而东海海域潜山勘探尚未取得油气突破。基于岩心观察、薄片分析、X衍射分析、元素分析、锆石U-Pb测年等手段,对东海西湖凹陷斜坡中段潜山特征及裂缝充填机制开展分析。研究表明:①潜山基底岩性为花岗岩,锆石U-Pb年龄约113 Ma,成山完成于早白垩世;②研究区裂缝为主要的储集空间,钻井证实研究区潜山基底受始新世至渐新世三期断裂活动影响,高角度构造裂缝广泛发育,成岩矿物被密集网状裂缝破碎切割呈碎裂结构,以闭合缝为主;③裂缝浅层主要充填物为方解石,以海水碳酸盐岩自生沉积矿物填充作用为主;深层充填矿物发育石英-方解石-黄铁矿组合,充填碳酸盐组分具有高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值、碳氧同位素分馏程度高、稀土元素右倾、Eu显著正异常等标志性特征,主要来源于深部幔源上涌高温流体,与古新世—始新世、渐新世—中新世两期岩浆活动有关。通过研究,明确了充填缝的成因机制,预测了有效缝发育区,为下一步油气勘探部署提供依据。

**关键词:**古潜山;充填缝;方解石;西湖凹陷;东海

中图分类号:TE122

文献标识码:A

### Genetic mechanisms of filled fractures in paleo-buried hill on middle slope of Xihu Sag, East China Sea

LIU Chuang, SANG Yadi, WANG Lin, ZHANG Shudi, YANG Jiayi, CHENG Xuetong, XU Ke, WU Kailun

(Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China)

**Abstract:** In recent years, high-yield oil and gas flows have been obtained from buried hill reservoirs in the Bohai Sea and South China Sea, but no breakthroughs have been made in the East China Sea. Based on core observations, thin-section analysis, X-ray diffraction, elemental analysis, and zircon U-Pb dating, the characteristics of the buried hill and fracture-filling mechanisms in the middle slope zone of the Xihu Sag in the East China Sea were analyzed. The results showed that: (1) the basement rock of the buried hill consists of granite, with a zircon U-Pb age of about 113 Ma, indicating its formation was completed in the Early Cretaceous. (2) Fractures were the main reservoir space in the study area. Drilling results confirmed that the basement rock of buried hill was affected by three stages of fault activity from the Eocene to the Oligocene, resulting in high-angle structural fractures. Diagenetic minerals were broken and cut by dense networks of fractures, forming clastic structures dominated by closed fractures. (3) The shallow fractures were mainly filled with calcite, with the filling primarily derived from authigenic carbonate minerals precipitated within marine sediments. In contrast, deep fractures developed a quartz-calcite-pyrite combination. The carbonate filling components were characterized by high  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios, strong carbon and oxygen isotope fractionation, right-skewed rare earth element patterns, and significant positive Eu anomalies, indicating that the filling minerals originated mainly from high-temperature fluid upwelling from the mantle. These processes were associated with the two episodes of magmatic activity during the Paleocene-Eocene and Oligocene-Miocene. This study clarifies the genetic mechanisms of filled fractures and predicts zones of effective fracture development, providing a basis for future oil and gas exploration and deployment.

**Keywords:** paleo-buried hill; filled fracture; calcite; Xihu Sag; East China Sea

近年来,海域潜山勘探在渤海和南海取得多项突破。渤海湾盆地渤中凹陷发现了全球最大的渤中19-6整装潜山凝析气田,探明天然气超过 $1 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 、凝析油超过

$1 \times 10^8 \text{ t}$ ,揭示了渤中凹陷深层暴露型太古宇变质岩低位潜山的勘探潜力<sup>[1-3]</sup>。随后,在渤中19-6构造北侧发现了亿吨级渤中13-2气田,其为中生界覆盖下的大型太古

收稿日期:2025-01-02。

第一作者简介:刘闯(1989—),男,博士,副研究员,从事石油勘探研究工作。地址:上海市浦东新区商城路1225号1号楼,邮政编码:200120。  
E-mail:liuchuang.shhy@sinopec.com

基金项目:国家科技重大专项“低勘探程度凹陷油气成藏条件与突破方向”(2024ZD1400106);中国石化上海分公司科技项目“西湖凹陷宝云亭地区古潜山勘探潜力研究”(KJ-2022-4)。



源岩层系。渐新统时期,沉积环境转变为河流-三角洲沉积环境,砂体大规模富集<sup>[17-18]</sup>。目前,西湖凹陷的勘探主要围绕始新统平湖组及渐新统花港组2套层系开展,基底潜山领域尚未取得实质性进展<sup>[19-22]</sup>。

## 2 岩石学特征

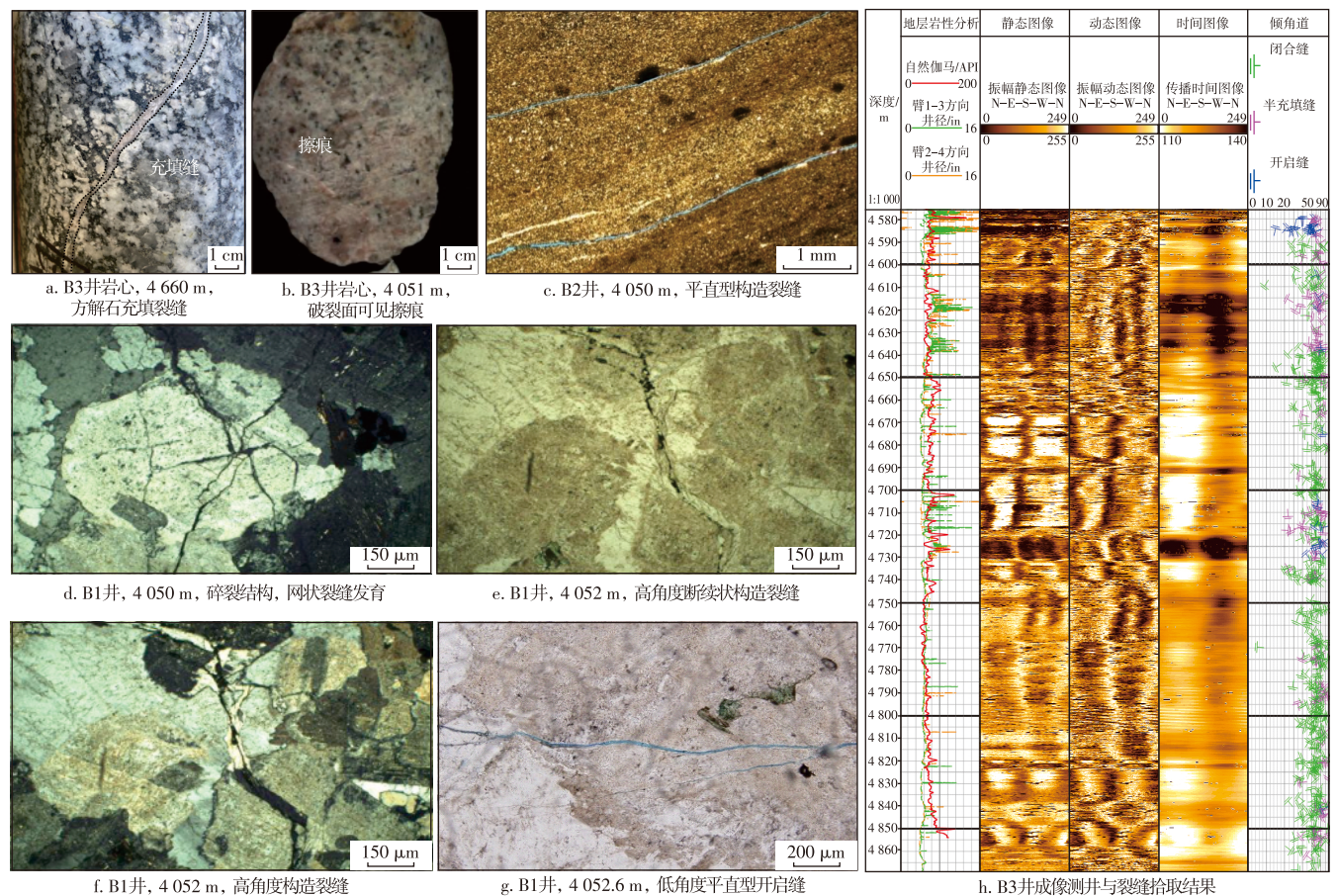
### 2.1 裂缝发育特征

东海西湖凹陷平北斜坡潜山带及周缘的已钻井揭示,古潜山基底岩性主要为花岗岩,包括中酸性火山岩和花岗质侵入岩,局部被晚期英安斑岩、辉长岩侵入。潜山基底岩心花岗岩以棕红色、灰白色为主,呈花岗结构或斑状结构,块状构造,以石英、长石、黑云母为主要矿物成分,基质主要为长英质、隐晶质、玻璃质(图2a、图2b)。石英多呈他形,碎裂结构明显,长石呈半自形板状,聚片双晶结构清晰,局部蚀变严重(图3a、图3b、图3d)。裂缝广泛发育,局部呈碎裂结构,从岩心上可以识别缝面平直低角度的构造缝、高角度缝面不平整充填的构造成岩缝,断面可见擦痕,其成因与断层活动有关(图2a、图2b)。按照裂缝发育形态分类,花岗岩基底普遍发育平直型尖

灭状(图2c、图2g)或断续状构造裂缝(图2e、图2f)、长石和石英碎屑被裂缝穿切呈碎裂结构,局部形成晶内微裂缝(图2d)。

### 2.2 裂缝充填特征

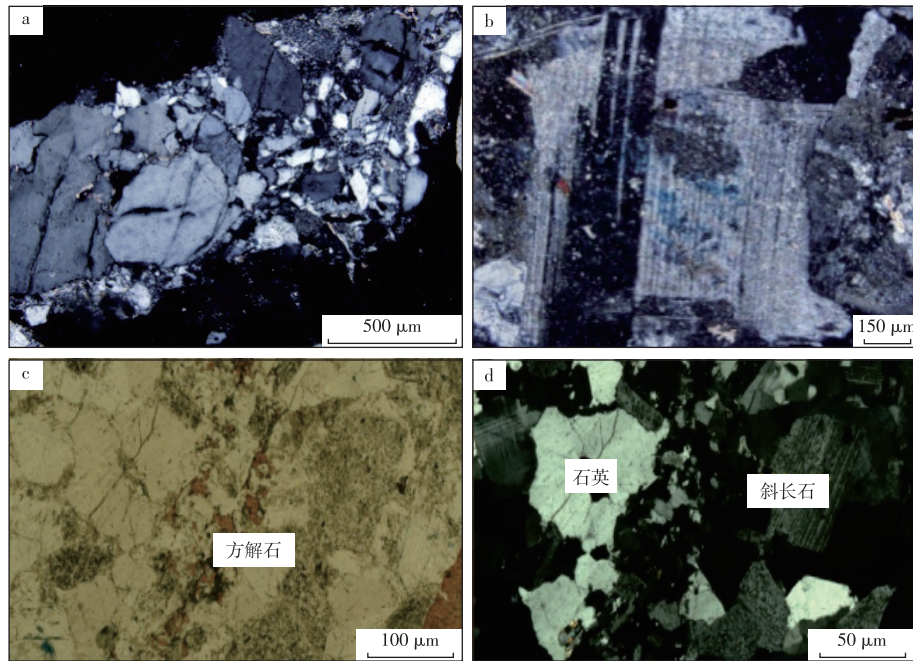
按照裂缝被矿物充填的程度,可将裂缝划分为开启缝、半充填缝、闭合缝。以B3井所揭示古潜山319 m地层为例,根据成像测井结果共拾取了537条天然裂缝(图2h),其中以闭合缝为主,裂缝充填率达81.9%。未充填的较大高角度构造缝,缝壁平直,表生风化淋滤作用弱,此类裂缝可能与后期断层活动的改造有关,是潜山的有效储集空间(图2c—图2g)。被充填的裂缝,其充填矿物以方解石、石英、黄铁矿为主。方解石多呈不规则他形充填于裂缝孔隙,边界呈港湾状,这指示围岩被自生碳酸盐岩矿物交代(图3c)。石英充填裂缝时呈现半自形-他形粒状,其粒径远小于潜山基底花岗岩中的石英斑晶,晶粒间接触界限不规则且难以分辨,这表明其形成时经历了迅速冷却结晶(图3a、图3d),推测可能与裂缝充填流体与围岩及海水迅速发生热量交换有关。裂缝充填的暗色矿物主要为黄铁矿,局部可见良好的自形立方体外形,



注: 1 in = 0.025 4 m。

图2 东海西湖凹陷斜坡中段古潜山裂缝发育特征

Fig. 2 Fracture development characteristics of paleo-buried hill on middle slope of Xihu Sag, East China Sea



注:a为B1井深度3 985 m岩心铸体薄片半自形-他形粒状石英矿物充填裂缝;b为B1井深度4 053 m岩心铸体薄片呈长石半自形板状,发育聚片双晶;c为B2井深度4 198 m岩心铸体薄片方解石港湾状溶蚀;d为B2井深度4 198 m岩心铸体薄片石英、斜长石矿物特征。

图3 东海西湖凹陷斜坡中段古潜山基底花岗岩矿物学特征

Fig. 3 Mineralogical characteristics of basement granite in paleo-buried hill on middle slope of Xihu Sag, East China Sea

当黄铁矿与石英、长石共生时,多呈星散状、团块状或枝杈状充填于晶间(图3d)。黄铁矿是低温热液流体活动的重要指示矿物,其对充填裂缝石英的交代作用指示热液流体具有较强的酸性<sup>[23-24]</sup>。充填裂缝的石英-方解石-黄铁矿组合是高温酸性热液作用下的典型矿物组合标志,这反映出古潜山基底裂缝形成后,可能受到后期热液活动的强烈改造,成岩矿物将裂缝充填闭合。

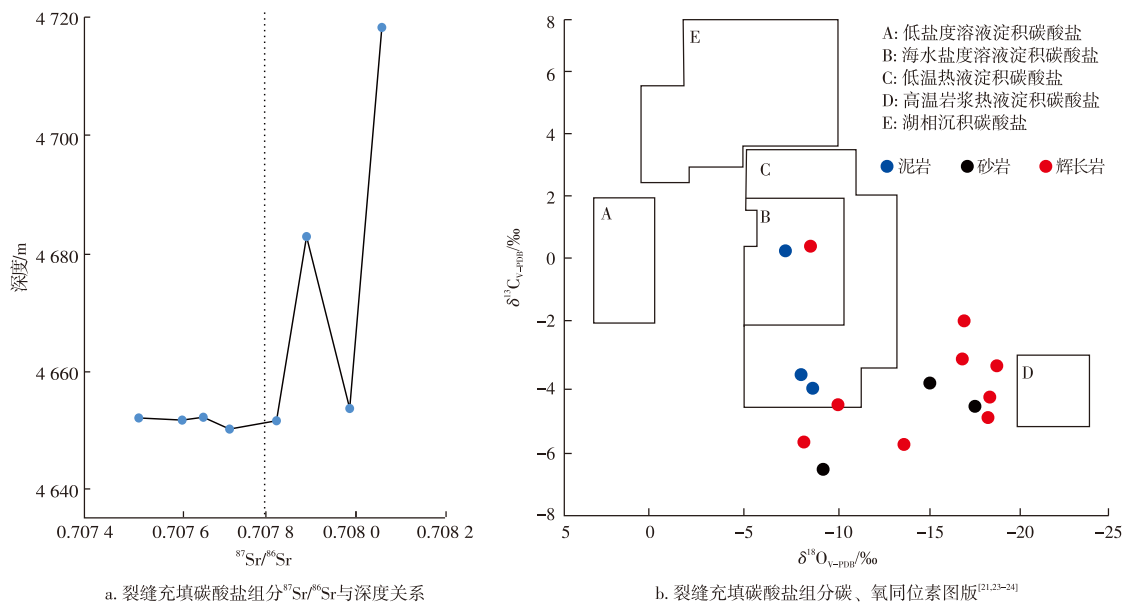
### 3 地球化学特征

#### 3.1 锶同位素

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值是指示充填裂缝流体的物质来源、流体性质以及成岩作用过程的重要指标。B3井4 658.37~4 726.30 m井段的花岗岩基底裂缝充填碳酸盐岩组分中, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值介于0.707 492~0.708 083,平均值为0.707 794,该比值接近或略高于海相碳酸盐岩正常锶同位素比值0.707 8,这表明裂缝充填流体主要来自沉积海水。局部深度处 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值高于该井段平均值以及海相碳酸盐岩正常锶同位素比值(图4a),这表明裂缝受到后期成岩流体充填的影响。高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值尤其出现在裂缝破碎段的较深部位,这可能与随着埋深增加,海水充填裂缝与酸性岩浆岩基底发生水-岩反应,深部热液流体活动导致锶的富集有关。

#### 3.2 碳、氧同位素

对基底辉长岩、荧光细砂岩碳酸盐组分进行取样,开展碳、氧稳定同位素分析,以此示踪其来源及成因。取样样品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  值域介于0.15‰~-7.33‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$  值域介于-8.18‰~-18.81‰,这些值主要落在碳、氧同位素图版的海水盐度溶液淀积碳酸盐区域(B区)、低温热液淀积碳酸盐区域(C区),以及低温热液淀积碳酸盐区域(C区)与高温岩浆热液淀积碳酸盐区域(D区)的过渡区域(图4b)<sup>[23,25-26]</sup>。采样自泥岩的碳酸盐产物,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  平均值为-2.8‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$  平均值-8.12‰。与海相碳酸盐岩碳、氧同位素分布区间( $\delta^{13}\text{C}\approx 0$ ;  $\delta^{18}\text{O}$  取值0~-6‰)相比,该碳酸盐产物的同位素值略有分馏,落在海水盐度溶液淀积碳酸盐区域与低温热液淀积碳酸盐区域,这反映出海相碳酸盐直接沉积的过程中,局部区域受到了低温热液流体影响。荧光砂岩中的碳酸盐物质,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  平均值为-6.6‰, $\delta^{18}\text{O}$  平均值为-12.3‰。其碳、氧同位素分馏程度高于一般海相碳酸盐岩,但低于火成碳酸盐岩,多数落在低温热液淀积碳酸盐区域和高温岩浆热液淀积碳酸盐区域的过渡地带,这可能与成岩过程中高温流体的影响有关。在局部高温热液流体的作用下,水中的 $\delta^{18}\text{O}$  发生大量消耗与分解。流体携带经热解的烃类物质进入砂岩储集层,并在其中富集沉淀。这一过程导致砂岩中的 $\delta^{13}\text{C}$  与 $\delta^{18}\text{O}$  相较于正常海相碳酸盐岩



注: ..... 为海相碳酸盐岩正常锶同位素比值。

图4 东海西湖凹陷斜坡中段古潜山裂缝充填方解石同位素特征

Fig. 4 Isotopic characteristics of calcite filling in fractures of paleo-buried hill on middle slope of Xihu Sag, East China Sea

均呈现出偏负的特征,且砂岩具备荧光反应<sup>[23]</sup>;辉长岩中的碳酸盐矿物,其 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 与 $\delta^{18}O_{V-PDB}$ 值域范围较广, $\delta^{13}C$ 平均值为 $-4.2\text{‰}$ , $\delta^{18}O$ 平均值为 $-14.5\text{‰}$ ,这些数值接近高温岩浆成因碳酸盐的同位素特征。这表明随着深度增加以及围岩性质的变化,热液流体对辉长岩的改造作用不断加剧。

### 3.3 稀土元素

稀土元素是指示沉积物质来源、沉积环境以及流体特征的重要标志物<sup>[27-28]</sup>。对B3井岩心的碳酸盐组分开展稀土元素分析,结果显示稀土元素配分曲线呈整体右倾态势(图5),即轻稀土元素相对富集,而重稀土元素相

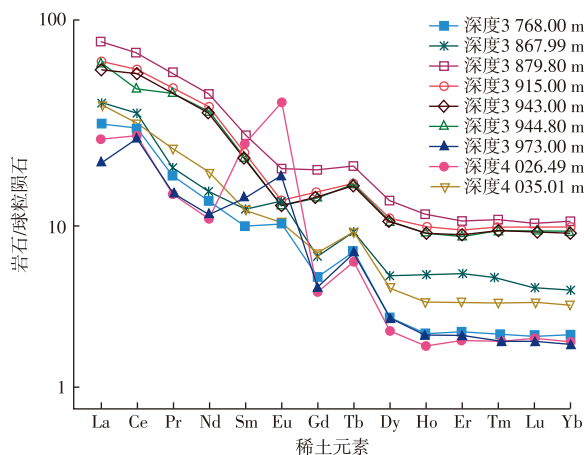


图5 东海西湖凹陷斜坡中段古潜山裂缝充填方解石稀土元素配分曲线

Fig. 5 Rare earth element distribution patterns of calcite filling in fractures of paleo-buried hill on middle slope of Xihu Sag, East China Sea

对亏损。这种轻重稀土的显著分异现象,表明碳酸盐组分受到了后期热液流体的强烈改造作用。此外,部分样品中Eu元素的含量呈显著的正异常特征。通常而言, $Eu^{2+}$ 容易富集于还原性的高温热液流体之中。因此,样品中Eu元素的正异常现象,可能与在还原环境下,热液流体与基岩发生水-岩反应,进而导致 $Eu^{2+}$ 富集有关<sup>[23,29-31]</sup>。

## 4 裂缝充填成因

### 4.1 潜山基底构造-岩浆作用

东海陆架盆地是一个地质构造极为复杂的盆地,其基底组成复杂,且历经多期构造-岩浆作用的叠加与改造,属于中生代-新生代盆地。该盆地的基底呈现出独特的双重结构,下伏为元古宇深变质岩、上覆则是中生界岩浆岩<sup>[32-33]</sup>。西湖凹陷地处东海陆架盆地东部凹陷带的中部区域。受区域岩浆活动期次的影响,该凹陷至少存在两期前新生代岩浆岩基底。这两期基底分别对应中侏罗世(约162 Ma)和白垩纪(73~134 Ma)。除此之外,西湖凹陷还受到古新世-始新世(63.0~42.5 Ma)以及渐新世-中新世(34.0~14.7 Ma)持续岩浆活动的影响。为进一步探究相关地质信息,对钻井岩心开展了锆石U-Pb定年分析。分析结果显示,古潜山基底锆石Th/Ub比值平均值为1.19,这一数值指示了这些锆石为岩浆成因。在众多分析结果中,选取谐和度高的数据进行了加权平均计算,得出锆石年龄约为113 Ma(表1)。该年龄对应着一期白垩纪岩浆事件,由此基本确定了斜坡中段花岗岩潜山基底的形成时代。

表1 东海西湖凹陷斜坡中段古潜山基底岩心锆石U-Pb定年分析结果

Table 1 Zircon U-Pb dating results of basement core from paleo-buried hill on middle slope of Xihu Sag, East China Sea

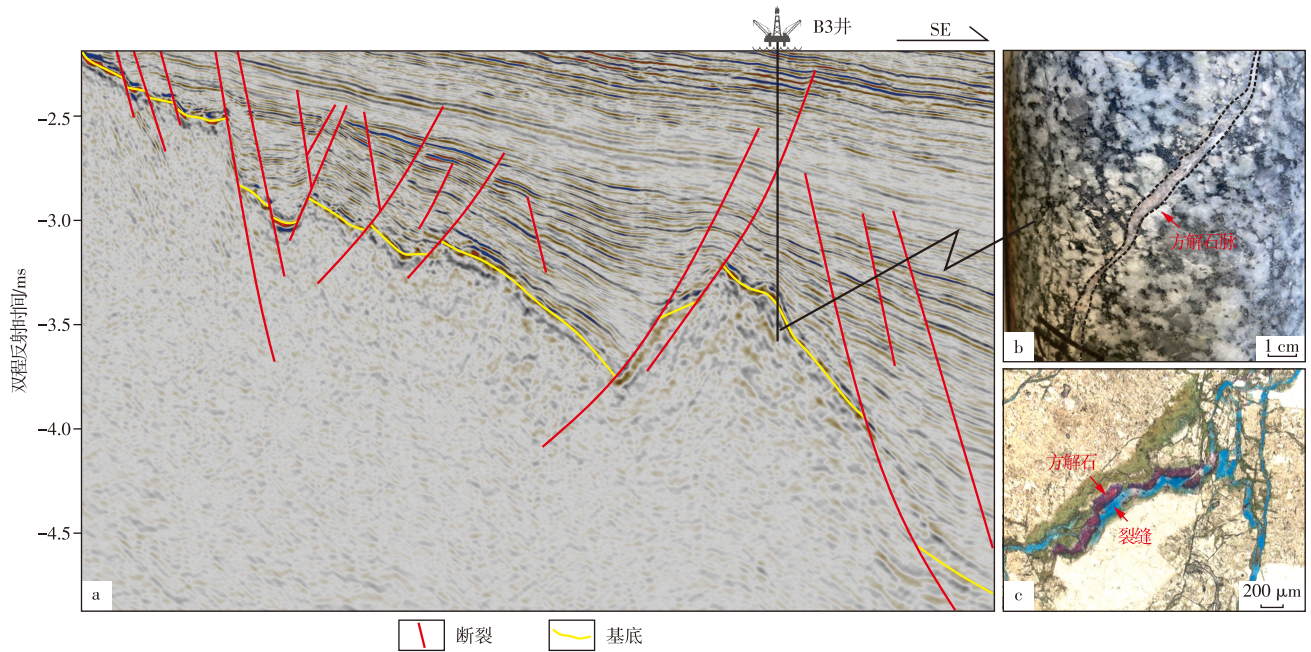
样品 编号	元素含量/ $10^{-6}$		Th/U 计算	同位素比值				年龄/Ma				谐和度		
	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 测值	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (1个标 准差)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 测值	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (1个标 准差)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 测值	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (1个标 准差)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 测值	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (1个标 准差)		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 测值	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (1个标 准差)
1	229.98	259.15	0.887	0.11	0.03	0.05	0.01	1 069.90	272.18	106.96	24.86	115.89	7.60	1.08
2	745.87	520.49	1.433	0.11	0.03	0.05	0.01	819.61	354.77	100.91	23.76	110.43	5.66	1.09
3	336.90	242.67	1.388	0.13	0.04	0.05	0.02	1 857.65	312.78	113.79	35.14	110.34	9.26	0.97
4	256.35	275.45	0.931	0.12	0.03	0.05	0.02	1 649.74	288.80	107.12	29.49	106.13	7.53	0.99
5	407.75	401.04	1.017	0.13	0.03	0.05	0.01	1 087.30	304.00	118.53	25.74	114.35	6.34	0.96
6	954.53	486.35	1.963	0.11	0.02	0.05	0.01	727.22	278.01	110.24	23.79	113.61	5.76	1.03
7	342.89	296.95	1.155	0.13	0.03	0.05	0.01	1 266.00	328.97	113.62	28.58	108.86	5.96	0.96
8	104.78	101.89	1.028	0.13	0.06	0.06	0.03	2 920.91	357.36	107.42	46.73	115.93	13.79	1.08
9	422.38	416.74	1.014	0.12	0.03	0.05	0.01	1 190.29	241.11	109.15	25.16	111.81	7.09	1.02
10	199.92	177.48	1.126	0.13	0.03	0.06	0.01	1 212.50	318.83	116.67	29.12	113.13	6.88	0.97
11	172.08	129.99	1.324	0.13	0.04	0.05	0.02	1 672.76	433.54	114.00	32.84	111.43	7.69	0.98
12	516.75	315.27	1.639	0.11	0.02	0.05	0.01	153.68	287.71	105.30	19.47	114.01	5.30	1.08
13	204.88	212.74	0.963	0.12	0.03	0.05	0.01	1 056.36	292.88	110.28	27.89	112.82	6.31	1.02
14	143.83	104.05	1.382	0.13	0.05	0.05	0.02	2 258.44	308.87	114.82	40.62	110.24	9.15	0.96
15	107.24	162.42	0.660	0.12	0.04	0.05	0.02	1 816.87	356.87	110.21	35.38	117.68	8.91	1.07
16	604.14	622.23	0.971	0.12	0.02	0.05	0.01	71.78	376.20	115.07	18.91	115.50	4.85	1.00
17	87.97	88.29	0.996	0.12	0.05	0.06	0.03	3 022.57	336.24	108.16	46.71	110.95	11.31	1.03
18	288.55	195.73	1.474	0.11	0.03	0.04	0.01	1 360.47	316.89	114.91	31.74	119.96	8.64	1.04
19	92.89	107.47	0.864	0.12	0.05	0.05	0.02	2 418.81	439.67	112.97	41.81	119.04	11.43	1.05
20	268.73	298.58	0.900	0.12	0.03	0.05	0.01	1 292.67	319.12	107.40	27.15	111.33	7.80	1.04
21	347.44	314.65	1.104	0.10	0.03	0.05	0.01	1 064.57	334.98	111.87	29.16	114.84	6.19	1.03
22	72.39	112.39	0.644	0.12	0.05	0.05	0.02	2 319.45	348.08	108.92	43.62	119.07	10.69	1.09
23	258.27	287.84	0.897	0.13	0.04	0.06	0.02	1 368.94	335.76	118.26	30.67	114.60	9.21	0.97
24	520.63	458.76	1.135	0.12	0.03	0.05	0.01	538.83	393.56	107.80	24.10	117.93	6.51	1.09
25	1 098.04	385.68	2.847	0.12	0.03	0.05	0.01	538.91	388.53	112.28	24.07	113.00	5.80	1.01
26	1 122.27	658.72	1.704	0.11	0.02	0.05	0.01	103.19	391.56	103.76	19.65	111.56	5.00	1.08
27	260.42	269.15	0.968	0.12	0.03	0.05	0.01	1 286.83	299.69	113.35	26.69	111.72	8.02	0.99
28	188.92	187.53	1.007	0.11	0.04	0.05	0.02	1 851.17	447.59	99.24	35.98	107.00	7.80	1.08

西湖凹陷是在太平洋板块俯冲所引发的弧后伸展这一构造背景下形成的。自早白垩世以来,在大规模岩浆活动以及地幔上涌的共同作用下,该区域的岩石圈持续伸展减薄。自新生代以来,还叠加了多期次的构造变形改造作用<sup>[34-35]</sup>。古潜山位于西湖凹陷斜坡带的中段区域,自新生代以来,依次经历了雁荡运动、玉泉运动、龙井运动以及冲绳海槽运动。依据地质演化特征,可将其划分为4个阶段:古新世蠕散型伸展断陷阶段、始新世陆缘扭张断陷阶段、渐新世—中新世陆内挤压挠曲拗陷阶段以及上新世以来的弧后陆架边缘拗陷阶段。在这一漫长的地质演化过程中,古潜山发育了一套能够切穿基底以及上覆沉积地层的多期断裂体系<sup>[35]</sup>。这套断裂体系从始

新世至渐新世持续活动,可进一步细分为早期、早中期、长期3个活动期次。在这些活动期次的作用下,下伏的花岗岩基底中广泛发育了高角度构造裂缝。同时,石英、长石等斑晶矿物呈现出碎裂结构,被密集的网络裂缝破碎切割(图6—图7)。

#### 4.2 裂缝充填机制

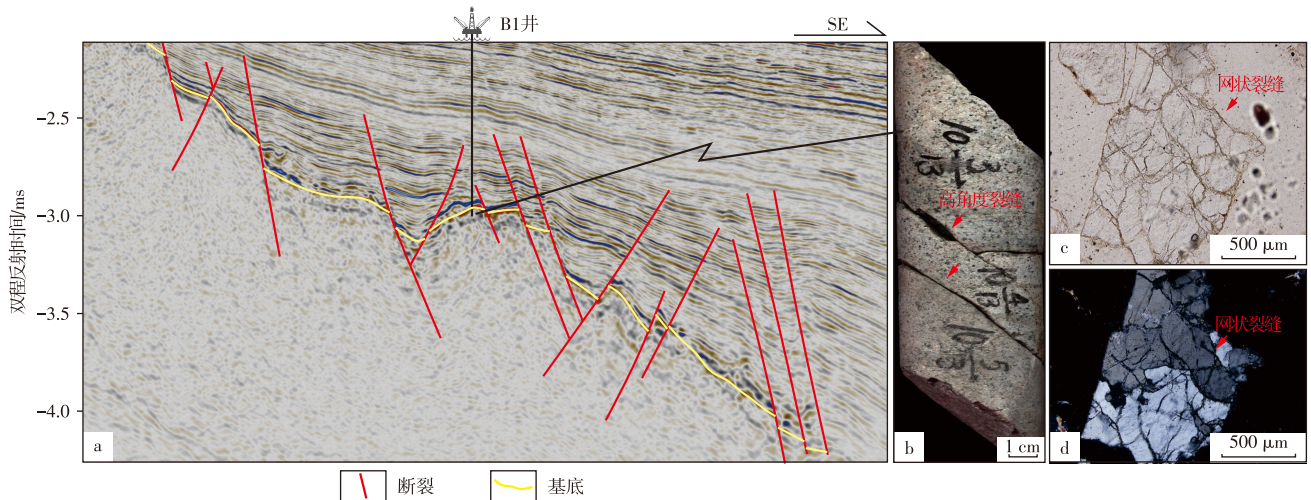
根据充填裂缝矿物石英-方解石-黄铁矿组合特征(图2—图3),以及充填碳酸盐组分所呈现出的高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(图4a)、较高的碳、氧同位素分馏程度(图4b)、稀土元素配分曲线右倾、Eu显著正异常等一些列标志性特征,可推断潜山基底花岗岩裂缝中的充填碳酸盐所含的



注:a为过B3井地震剖面;b为B3井潜山岩心照片,可见方解石充填裂缝;c为B3井潜山薄片照片,单偏光,可见方解石充填部分裂缝。

图6 东海西湖凹陷斜坡中段古潜山裂缝充填特征

Fig. 6 Fracture filling characteristics of paleo-buried hill on middle slope of Xihu Sag, East China Sea



注:a为过B1井地震剖面;b为B1井潜山岩心照片,可见高角度裂缝;c为B1井潜山薄片照片,单偏光,可见网状裂缝;d为B1井潜山薄片照片,正交光,可见网状裂缝。

图7 东海西湖凹陷斜坡中段古潜山断裂特征

Fig. 7 Fracture characteristics of paleo-buried hill on middle slope of Xihu Sag, East China Sea

自生物质受到了深部热液流体的显著影响。这表明裂缝充填与后期岩浆活动所引发的高温水-岩反应密切相关。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值以及碳、氧同位素特征进一步表明,沿裂缝由浅入深, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值呈现出增大的趋势,同时碳、氧同位素的分馏程度也愈发加剧。这一现象说明基底花岗岩裂缝深部受到热液流体的影响更大,而向浅部逐渐过渡到低温热液作用或正常海水碳酸盐岩沉积作用,指示充填裂缝的流体来源来自深部岩浆熔融。

白垩纪(约110 Ma时)发生一期重要岩浆事件,期间,花岗岩体侵入片麻岩古老基底,塑造斜坡中段古潜山

较新花岗岩基底。始新世—渐新世断裂体系持续发育,形成切穿潜山基底与上覆沉积地层的构造裂缝。潜山裂缝浅部,未充填构造裂缝提供良好的储集空间,局部受海水碳酸盐岩沉积作用,形成方解石脉充填裂缝;潜山裂缝深部,伴随古新世—始新世(63.0~42.5 Ma)、渐新世—中新世(34.0~14.7 Ma)两期岩浆活动及持续活动的早中期—长期断裂作用,上涌的软流圈物质减压熔融并与由基底裂缝沟通而来的海水发生水-岩反应,导致大量高温热液成岩流体充填裂缝,使潜山深部闭合缝中的充填矿物具有深部热液流体成岩的一般特征(图8)。

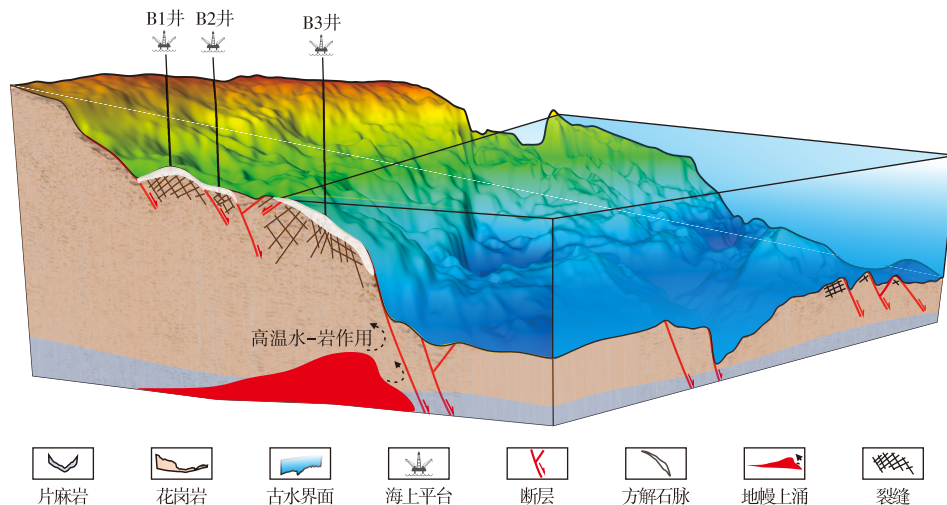


图8 现今东海西湖凹陷斜坡带中段古潜山裂缝充填模式

Fig. 8 Present-day fracture-filling model of paleo-buried hill on middle slope of Xihu Sag, East China Sea

## 5 结论

1) 东海西湖凹陷斜坡带中段潜山基底岩性主要为花岗岩, 锆石 U-Pb 年龄约 113 Ma, 成山完成于早白垩世。

2) 新生代以来, 受始新世至渐新世三期断裂活动影响, 潜山基底高角度构造裂缝广泛发育, 成岩矿物多呈碎裂结构, 被密集网状裂缝破碎切割, 以闭合缝为主。

3) 裂缝浅部充填矿物以海水沉积方解石为主,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值与碳、氧同位素分馏程度接近正常海水, 风化溶蚀作用强, 可提供有效储集空间; 沿裂缝向深部, 充填矿物发育石英-方解石-黄铁矿组合,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值高, 碳、氧同位素接近高温岩浆热液碳酸盐岩沉积区域, 稀土元素配分曲线右倾且伴随 Eu 显著正异常, 指示充填裂缝流体受古新世-始新世、渐新世-中新世两期岩浆流体强烈改造, 裂缝充填程度变高, 有效裂缝较少。

### 参考文献

- [1] 谢玉洪. 渤海湾盆地渤中凹陷太古界潜山气藏 BZ19-6 的气源条件与成藏模式[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 858-866.  
XIE Yuhong. Gas resources and accumulation model of BZ19-6 Archean buried-hill large-scale gas reservoir in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 858-866.
- [2] 施和生, 王清斌, 王军, 等. 渤中凹陷深层渤中 19-6 构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 36-45.  
SHI Hesheng, WANG Qingbin, WANG Jun, et al. Discovery and exploration significance of large condensate gas fields in BZ19-6 structure in deep Bozhong sag[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 36-45.
- [3] 闫建丽, 李超, 马栋, 等. 渤海复杂潜山油藏动静态特征识别方法及应用[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(2): 308-316.  
YAN Jianli, LI Chao, MA Dong, et al. Dynamic and static feature identification method of complex buried hill reservoirs in Bohai and its application[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(2): 308-316.
- [4] 李慧勇, 牛成民, 许鹏, 等. 渤中 13-2 大型整装覆盖型潜山油气田的发现及其油气勘探意义[J]. 天然气工业, 2021, 41(2): 19-26.  
LI Huiyong, NIU Chengmin, XU Peng, et al. Discovery of Bozhong 13-2 Archean large monoblock volatile buried hill oilfield and its oil and gas exploration significance[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(2): 19-26.
- [5] 廖新武, 谢润成, 周文, 等. 古地貌对渤海湾盆地 B 区块太古宇暴露型潜山变质岩风化带储层裂缝发育的影响[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 406-417.  
LIAO Xinwu, XIE Runcheng, ZHOU Wen, et al. The effects of paleogeomorphology on the development of fractures in reservoirs of weathering metamorphic zone in an exposed Archean burial hill, Block B, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 406-417.
- [6] 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.  
SHI Hesheng, NIU Chengmin, HOU Mingcai, et al. Analysis of hydrocarbon accumulation conditions of double-layered Archeozoic buried hill and major discovery of Bozhong 13-2 Oil and Gasfield, Bohai Sea area[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 12-20.
- [7] 田立新, 刘杰, 张向涛, 等. 珠江口盆地惠州 26-6 大中型泛潜山油气田勘探发现及成藏模式[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 1-11.  
TIAN Lixin, LIU Jie, ZHANG Xiangtao, et al. Discovery and accumulation pattern of HZ26-6 large-medium sized pan-buried hill oil and gas field in Pearl River Mouth basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 1-11.
- [8] 郭原草, 郭建华, 劳海港, 等. 琼东南盆地松南低凸起 YA 区花岗岩潜山风化壳储层特征及发育控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1155-1167.  
GUO Yuancao, GUO Jianhua, LAO Haigang, et al. Characteristics and factors controlling the development of weathered crust reservoirs in buried granite hills, YA area, Songnan swell, Qiongdongnan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1155-1167.
- [9] 赵勇, 李久娣, 严曙梅, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷油气开发技术及攻关方向[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(5): 711-721.

- ZHAO Yong, LI Jiudi, YAN Shumei, et al. Oil and gas development technologies and research directions in Xihu Sag of East China Sea Shelf Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2025, 15(5): 711-721.
- [10] 张尚虎, 李昆, 庄建建, 等. 断陷期源汇系统及勘探方向: 以东海陆架盆地西湖凹陷平北地区为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2025, 15(5): 722-733.
- ZHANG Shanghu, LI Kun, ZHUANG Jianjian, et al. Source-sink system and exploration directions during rift period: A case study of Pingbei area in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2025, 15(5): 722-733.
- [11] 范洪军, 罗江华, 牛涛, 等. 渤中19-6凝析气田太古界潜山储层裂缝特征及低渗主控因素[J]. *中国海上油气*, 2021, 33(4): 85-93.
- FAN Hongjun, LUO Jianghua, NIU Tao, et al. Fracture characteristics and low permeability main controlling factors of Archean buried hill reservoirs in BZ19-6 condensate field[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(4): 85-93.
- [12] 郭颖, 王粤川, 韦阿娟, 等. 潜山内幕火山岩储层特征及控制因素: 以渤海海域秦皇岛30A地区白垩系为例[J]. *沉积学报*, 2017, 35(2): 343-357.
- GUO Ying, WANG Yuechuan, WEI Ajuan, et al. Characteristics and controlling factors of buried-hill inner volcanic reservoir: An example from the Cretaceous in Qinhuangdao 30A area, offshore Bohai Sea, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(2): 343-357.
- [13] 李继岩. 多期构造裂缝发育充填特征及其主控因素: 以济阳坳陷平南潜山为例[J]. *沉积学报*, 2020, 38(2): 420-428.
- LI Jiyang. Filling characteristics and main controlling factors for the development of multi-phase structural fractures: A case of the Pingnan buried hill from Jiyang depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(2): 420-428.
- [14] 周荔青, 江东辉, 周兴海, 等. 东海西湖凹陷西斜坡断层-岩性油气藏富集评价体系与勘探方向[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(5): 747-754.
- ZHOU Liqing, JIANG Donghui, ZHOU Xinghai, et al. Evaluation system and exploration optimization for fault-lithologic reservoir on the western slope of Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(5): 747-754.
- [15] 周心怀, 蒋一鸣, 唐贤君. 西湖凹陷成盆背景、原型盆地演化及勘探启示[J]. *中国海上油气*, 2019, 31(3): 1-10.
- ZHOU Xinhuai, JIANG Yiming, TANG Xianjun. Tectonic setting, prototype basin evolution and exploration enlightenment of Xihu sag in East China Sea basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(3): 1-10.
- [16] 徐发. 东海陆架盆地新生界结构特征及迁移规律[J]. *石油天然气学报*, 2012, 34(6): 1-7.
- XU Fa. Characteristics of Cenozoic structure and tectonic migration of the East China Sea shelf basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2012, 34(6): 1-7.
- [17] 蔡华, 张建培, 唐贤君. 西湖凹陷断裂系统特征及其控藏机制[J]. *天然气工业*, 2014, 34(10): 18-26.
- CAI Hua, ZHANG Jianpei, TANG Xianjun. Characteristics of the fault systems and their control on hydrocarbon accumulation in the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(10): 18-26.
- [18] 杨彩虹, 高兆红, 蒋一鸣, 等. 西湖凹陷平湖斜坡带始新统平湖组碎屑沉积体系再认识[J]. *石油天然气学报*, 2013, 35(9): 11-14.
- YANG Caihong, GAO Zhaohong, JIANG Yiming, et al. Reunderstanding of elastic rock sedimentary facies of Eocene Pinghu formation in Pinghu slope of Xihu Sag[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2013, 35(9): 11-14.
- [19] 刘创新, 高红艳, 刘彬彬, 等. 西湖凹陷中央反转带花港组储层成岩演化南北差异及其影响因素分析[J]. *地质论评*, 2024, 70(4): 1353-1365.
- LIU Chuangxin, GAO Hongyan, LIU Binbin, et al. Analysis on the difference of diagenetic evolution and its influencing factors between north and south of Huagang Formation reservoir in central inversion zone of Xihu Sag[J]. *Geological Review*, 2024, 70(4): 1353-1365.
- [20] 单帅强, 梁世友, 王斌, 等. 西湖凹陷木广迎地区断陷层地质结构与油气勘探意义[J]. *地质科学*, 2024, 59(3): 831-840.
- SHAN Shuaiqiang, LIANG Shiyu, WANG Bin, et al. Geological structure and its significance for petroleum exploration of fault structural layer in the Muguangying area, Xihu Sag[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2024, 59(3): 831-840.
- [21] 董靓雯, 刘闯, 沈珊. 西湖凹陷保聚斜坡TJT构造中上始新统平湖组深部储层探讨[J]. *海洋石油*, 2021, 41(2): 28-36.
- DONG Jingwen, LIU Chuang, SHEN Shan. Discussion of deep reservoirs in Pinghu formation of TJT structure in Baochu slope, Xihu Sag[J]. *Offshore Oil*, 2021, 41(2): 28-36.
- [22] 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.
- [23] 朱士波. 济阳坳陷热液流体活动特征及其油气地质意义[J]. *非常规油气*, 2024, 11(2): 21-28.
- ZHU Shibao. Characteristics of hydrothermal fluid activity and its petroleum geological significance in Jiyang Depression[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2024, 11(2): 21-28.
- [24] 丁辉, 葛文胜, 董连慧, 等. 新疆东准噶尔绿源金矿床地质特征与金成矿物质来源分析[J]. *地质学报*, 2018, 92(5): 1019-1040.
- DING Hui, GE Wensheng, DONG Lianhui, et al. Geological characteristics and gold source analysis of the Luyuan Gold Deposit in eastern Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(5): 1019-1040.
- [25] 王大锐, 张映红. 渤海湾油气区火成岩外变质带储集层中碳酸盐胶结物成因研究及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(2): 40-42.
- WANG Darui, ZHANG Yinghong. A study on the origin of the carbonate cements within reservoirs in the external metamorphic belt of the Bohai Bay oil-gas bearing region[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(2): 40-42.
- [26] 韩俊, 尤东华, 钱一雄, 等. 微区原位碳氧同位素分析技术对碳酸盐岩成岩流体性质的约束: 以塔里木盆地寒武系—奥陶系为例[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(1): 135-144.
- HAN Jun, YOU Donghua, QIAN Yixiong, et al. Constraints on carbonate diagenetic fluid properties by microzone *in situ* analysis of

- carbon and oxygen isotopes: A case study of Cambrian–Ordovician, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(1): 135–144.
- [27] 付宇, 孙晓明, 李登峰, 等. 深海沉积物中稀土元素的富集成矿作用[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2024, 43(1): 79–89.  
FU Yu, SUN Xiaoming, LI Dengfeng, et al. Enrichment and mineralization of rare earth elements in deep-sea sediments[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2024, 43(1): 79–89.
- [28] 石学法, 毕东杰, 黄牧, 等. 深海稀土分布规律与成矿作用[J]. *地质通报*, 2021, 40(增刊1): 195–208.  
SHI Xuefa, BI Dongjie, HUANG Mu, et al. Distribution and metallogenesis of deep-sea rare earth elements[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(Suppl. 1): 195–208.
- [29] 马少兵, 裴秋明, 王亮, 等. 内蒙古喀喇沁旗大西沟萤石矿床成因: 来自稀土元素、流体包裹体和H–O同位素的制约[J]. *西北地质*, 2024, 57(4): 50–65.  
MA Shaobing, PEI Qiuming, WANG Liang, et al. Genesis of the Daxigou Fluorite Deposit, Harqin Banner, Inner Mongolia, China: Constraints from rare earth elements, fluid inclusions and H–O isotopes[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(4): 50–65.
- [30] 陈国超, 张晓飞, 裴先治, 等. 东秦岭东段五垛山花岗岩基白草垛花岗伟晶岩微量元素富集型锆石特征及岩浆热液过程[J]. *地质学报*, 2023, 97(3): 688–704.  
CHEN Guochao, ZHANG Xiaofei, PEI Xianzhi, et al. Trace element enriched zircon and magmatic hydrothermal process of Baicaoduo granitic pegmatite in Wuduoshan batholith in the eastern part of East Qinling[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(3): 688–704.
- [31] 张德会, 龚庆杰. 初论元素富集成矿的地球化学机理—以岩浆热液矿床的形成为例[J]. *地质地球化学*, 2001, 29(3): 8–14.  
ZHANG Dehui, GONG Qingjie. On the geochemical mechanisms of enrichment and ore formation of ore metals[J]. *Geology–geochemistry*, 2001, 29(3): 8–14.
- [32] 钟锴, 王雪峰, 张田, 等. 东海陆架盆地西部坳陷带中生界残留盆地分布特征与勘探潜力[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(6): 41–51.  
ZHONG Kai, WANG Xuefeng, ZHANG Tian, et al. Distribution of residual Mesozoic basins and their exploration potential in the western depression zone of East China Sea Shelf Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(6): 41–51.
- [33] 杨传胜, 李刚, 杨长清, 等. 东海陆架盆地及其邻域岩浆岩时空分布特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(3): 125–133.  
YANG Chuansheng, LI Gang, YANG Changqing, et al. Temporal and spatial distribution of the igneous rocks in the East China Sea shelf basin and its adjacent regions[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(3): 125–133.
- [34] 刘金水, 许怀智, 蒋一鸣, 等. 东海盆地中、新生代盆架结构与构造演化[J]. *地质学报*, 2020, 94(3): 675–691.  
LIU Jinshui, XU Huaizhi, JIANG Yiming, et al. Mesozoic and Cenozoic basin structure and tectonic evolution in the East China Sea basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(3): 675–691.
- [35] 李三忠, 曹现志, 王光增, 等. 太平洋板块中—新生代构造演化及板块重建[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(5): 642–677.  
LI Sanzhong, CAO Xianzhi, WANG Guangzeng, et al. Meso–Cenozoic tectonic evolution and plate reconstruction of the Pacific plate[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(5): 642–677.

(编辑 徐佩)