

中国东海陆架盆地西湖凹陷西部斜坡带古近系宝石组 沉积充填特征

王辉¹, 秦兰芝¹, 徐靖琦¹, 陈永军¹, 张威², 代勇¹, 陈贺贺^{2,3}

[1. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335; 2. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083; 3. 中国地质大学(北京)极地地质与海洋矿产教育部重点实验室, 北京 100083]

摘要:东海陆架盆地西湖凹陷的油气勘探主要集中在始新统平湖组和渐新统花港组,而宝石组基础研究相对薄弱,沉积环境和沉积特征尚未完全明确。根据西湖凹陷的地震资料、钻井及测井数据、古生物资料和元素地球化学分析数据,研究了宝石组沉积充填特征。研究表明:①地震反射界面 T_4^0 与 T_8^0 之间为宝石组碎屑岩地层,顶、底界面具有明显的上超和削截地震反射特征。宝石组在凹陷中心厚度可达2 000 m,具备形成烃源岩的物质基础。②宝石组沉积受断层分段性活动控制,形成了多个相对独立的沉积中心。在西部斜坡带自北向南构造样式有变化。北段杭州斜坡带为反向协调构造缓坡型,中段平湖斜坡带为多期断裂叠加陡坡型,南段天台斜坡带为同向协调构造缓坡型。③宝石组为微咸水弱氧化-弱还原沉积环境,古盐度自北向南呈升高趋势,水体较浅,为湖/海平面升降频繁的海-陆过渡相沉积。④宝石组南、北沉积体系具有差异。北段杭州斜坡带主要发育辫状河三角洲-海湾沉积体系,南段天台斜坡带和平湖斜坡带(除平北区)主要发育局限海沉积环境下的潮坪-潮汐三角洲-滨浅海沉积体系,中段平湖斜坡带水下低凸起分隔南北,为低凸起遮挡下中段-北段的潟湖和海湾沉积体系,厚层泥岩发育,是西湖凹陷宝石组的主力烃源岩。

关键词:沉积体系;沉积环境;宝石组;西部斜坡带;西湖凹陷;东海陆架盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Sedimentary filling characteristics of the Paleogene Baoshi Formation in the western slope of Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

WANG Hui¹, QIN Lanzhi¹, XU Jingqi¹, CHEN Yongjun¹, ZHANG Wei², DAI Yong¹, CHEN Hehe^{2,3}

[1. Shanghai Branch of CNOOC (China) Limited, Shanghai 200335, China; 2. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Polar Geology and Marine Mineral Resources (Ministry of Education), China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: Hydrocarbon exploration in the Xihu Sag of the East China Sea Shelf Basin is concentrated primarily in the Eocene Pinghu Formation and the Oligocene Huagang Formation. In recent years, it has shifted to the Baoshi Formation in the western slope of the sag. However, fundamental research on the Baoshi Formation remains limited, leading to an unclear understanding of its sedimentary environment and characteristics. In this study, we investigate the sedimentary filling characteristics of the Baoshi Formation in the Xihu Sag using seismic, borehole, log, and paleontological data, as well as data from elemental geochemical analysis. The results indicate that the Baoshi Formation occurs between the T_4^0 and T_8^0 seismic reflection interfaces. This formation consists of a series of clastic layers, with its top and bottom boundaries characterized by pronounced onlapping seismic reflection and truncation. It has a thickness of up to 2 000 m at the sag center, providing a material basis for the formation of source rocks. The Baoshi Formation is deposited under the control of segmented fault activities, resulting in the formation of multiple independent depocenters. The western slope exhibits varying structural styles from north to south. Specifically, the northern Hangzhou slope zone occurs as a reversely harmonic tectonic ramp, the central Pinghu slope zone consists of a steep slope structure shaped by multi-stage

收稿日期:2024-12-03;修回日期:2025-02-10。

第一作者简介:王辉(1981—),男,工程师,石油地质。E-mail:wanghui7@cnooc.com.cn。

通信作者简介:陈贺贺(1989—),男,副教授、博士研究生导师,沉积学。E-mail:hehechen@cugb.edu.cn。

基金项目:中国海洋石油有限公司重大科技专项(KJZX-2023-0101);国家自然科学基金项目(42306083);中央高校基本科研业务专项(2-9-2021-006,3-7-9-2024-06)。

fault superimposition, while the southern Tiantai slope zone represents a normally harmonic tectonic ramp. The Baoshi Formation is formed in a brackish, weakly oxidizing to weakly reducing sedimentary environment, with paleosalinity increasing from north to south. This formation consists of the deposit of the marine-continental transitional facies in shallow water with frequent lake/sea level fluctuations. It exhibits distinct sedimentary systems in its northern and southern portions. Specifically, the northern Hangzhou slope zone is characterized by a braided river delta-bay sedimentary system, whereas the southern Tiantai and Pinghu slope zones (excluding the Pingbei area) are dominated by a tidal flat-tidal delta-littoral neritic sedimentary system in a restricted marine sedimentary environment. The northern and southern sedimentary systems along the western slope are dissected by a low salient in the central Pinghu slope zone, which serves to shelter lagoon and bay sedimentary systems in a restricted setting. The thickly laminated mudstones in these sedimentary systems act as the major source rocks of the Baoshi Formation in the Xihu Sag.

Key words: sedimentary system, sedimentary environment, Baoshi Formation, western slope zone, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

引用格式:王辉,秦兰芝,徐靖琦,等. 中国东海陆架盆地西湖凹陷西部斜坡带古近系宝石组沉积充填特征[J]. 石油与天然气地质,2025,46(3):910-925. DOI:10. 11743/ogg20250314.

WANG Hui, QIN Lanzhi, XU Jingqi, et al. Sedimentary filling characteristics of the Paleogene Baoshi Formation in the western slope of Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 910-925. DOI: 10. 11743/ogg20250314.

东海陆架盆地是中国东海海域的一个新生代含油气盆地,具有沉积厚度大、油气资源丰富等特点。西湖凹陷是东海陆架盆地油气勘探开发的主要地区,主要勘探层位集中在始新统平湖组和渐新统花港组^[1-3]。宝石组位于平湖组下部,因2001年钻探的B-1井揭示大套厚层泥岩而得名^[4-5],泥岩地层厚度占比高达98.5%。近年来,杭州斜坡带和平湖斜坡带实施的多口探井在平湖组下段以及宝石组层系中获得商业油气发现。基于油-源母质来源与成熟度分析,已证实宝石组对油气生成具有重要贡献^[6],揭示始新统宝石组具备较大的勘探潜力,未来有望成为西湖凹陷增储上产的勘探新领域。2019年实施的H-6井和N-6井分别钻遇近400 m和900 m厚的宝石组,为深入研究宝石组的地质特征和生烃潜力提供了重要基础。

前人对西湖凹陷宝石组开展了年代地层、沉积环境和沉积特征等方面的研究。在沉积环境研究方面^[5-13],胡明毅和张喜林等学者提出了陆相沉积、近海湖泊沉积、局限浅海沉积和半深水海湾沉积等多种沉积环境类型,但目前仍然存在较大的争议。在沉积体系类型方面,普遍认为宝石组在整个西湖凹陷均发育,其物源体系继承了古新世裂陷早期西部盆外物源体系与东部盆缘近物源体系为主的特征,受控于盆缘断层的活动。其中,西湖凹陷西斜坡的宝石组主体以辫状河三角洲为主,而东部则以扇三角洲及浊积扇体系为主^[8-12]。然而,B-1井钻探结果揭示,西部斜坡带发育厚层泥岩,这与现有的西斜坡沉积体系以辫状河三角洲为主的认识存在明显矛盾,严重制约了西湖凹陷宝

石组深层油气勘探的推进。因此,亟需进一步开展沉积体系类型及展布特征的研究。

近期勘探结果表明,西湖凹陷在早始新世时期构造活动强烈,西部斜坡带南北延伸范围较广,构造样式复杂,沉积环境呈现多样化特征,构造-沉积耦合关系对于揭示盆地沉积充填展布特征具有重要意义。因此,本文通过精细标定和区域地震解释,结合29口钻遇宝石组的测井和录井资料,进一步挖掘现有资料潜力,从地震、岩石电性、古生物和地球化学等方面,对西湖凹陷始新统宝石组的沉积充填特征进行系统研究和探索,重点研究宝石组沉积时期西湖凹陷的分隔特性,分析其南北存在差异的原因,并结合地震资料明确西湖凹陷宝石组的沉积相类型及沉积充填特征,为西湖凹陷深层前平湖组地层的油气勘探提供科学依据。

1 地质背景

西湖凹陷位于东海陆架盆地东部,其地层自基底向上依次发育上白垩统石门潭组(K_2s),古新统(暂无井钻遇),始新统宝石组(E_2b)和平湖组(E_2p),渐新统花港组(E_3h),中新统龙井组(N_1l)、玉泉组(N_{1y})和柳浪组(N_{1ll}),上新统三潭组(N_2s)以及更新统东海群($Qpdh$)(图1)^[1-3]。

西湖凹陷自晚白垩世开始裂陷,经历了早期多幕裂陷阶段、中期断-拗转换阶段、晚期拗陷和反转阶段以及末期区域沉降阶段^[1-2,14]。宝石组发育于盆地断陷阶段,可进一步分为2幕,分别对应宝石组(宝)下段

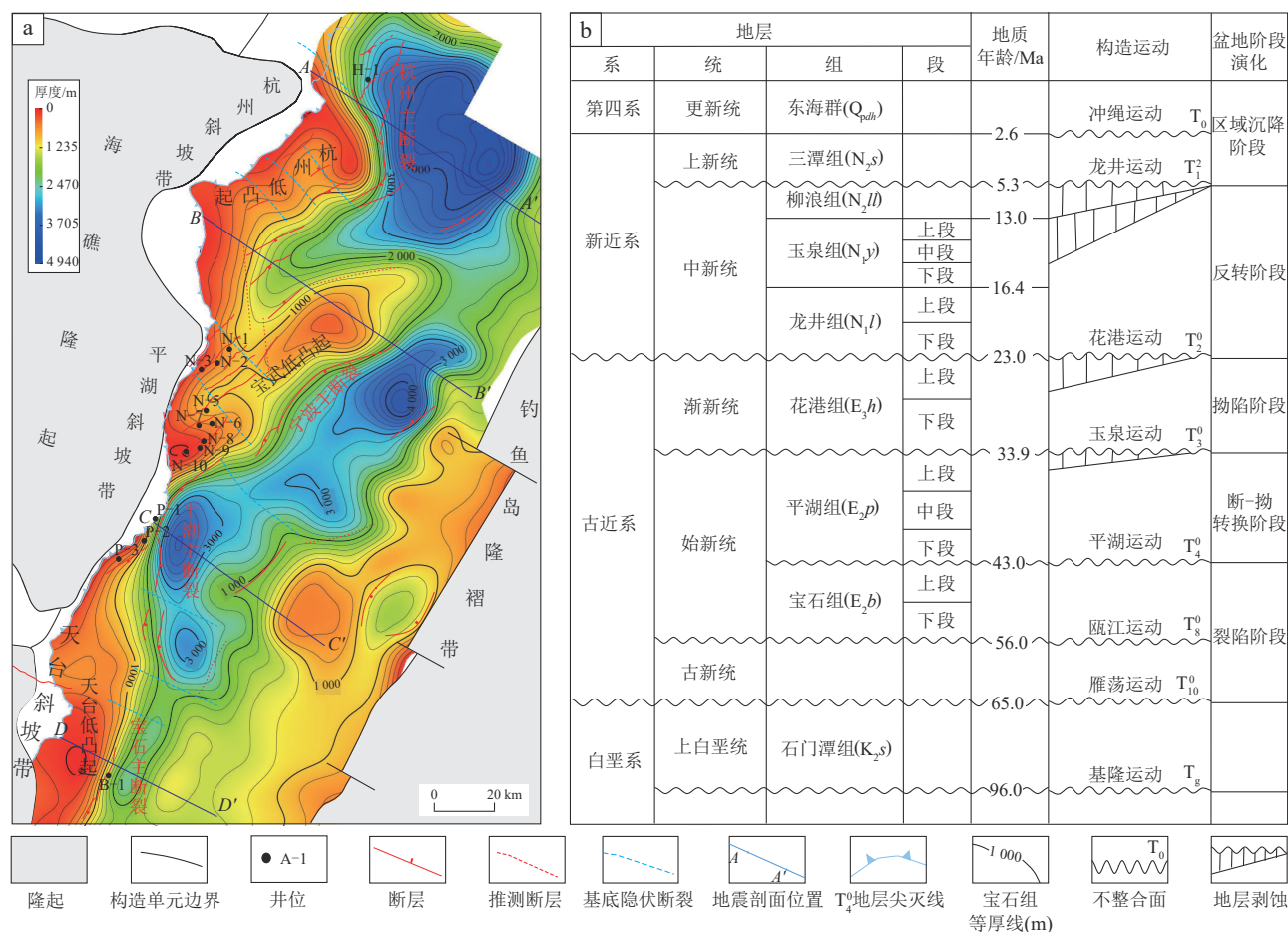


图1 西湖凹陷宝石组构造区划(a)及地层单元简表(b)(据唐贤君,有修改)^[16]

Fig. 1 Structural division map, and tectonic and stratigraphic profile of the Baoshi Formation, Xihu Sag (modified after reference [16])

和宝上段。地层沉积厚度和充填特征明显受到伸展断层的控制,在断陷早期(断陷Ⅰ幕),整个凹陷呈不对称的“W”型,形成多个由地堑-半地堑和地垒-半地垒组成的复式断陷结构,断陷后期(断陷Ⅱ幕),凹陷仍受拉张应力场的控制,但强度已有所减弱,此时海平面相对上升,沉积范围在宝石组沉积末期达到最大。

西湖凹陷在平面上具有“东西分带、南北分块”的构造特征^[1-2,14]。在东西方向上,西湖凹陷被划分为3个三级构造单元,分别是西部斜坡带、中央背斜带和东部断阶带。其中,西部斜坡带自北向南进一步划分为杭州构造带(北段)、平湖构造带(中段)和天台构造带(南段)。此外,平湖斜坡带发育NE向盆内凸起,称为宝武低凸起(图1)^[15-16]。

2 宝石组控盆断裂时-空演化

2.1 关键地震界面及地震反射特征差异

识别关键地震界面是进行地层划分与对比的基础

和关键。宝石组发育于裂陷期,是一套发育于T₄⁰与T₈⁰地震反射界面之间的碎屑岩地层,整体呈楔形结构(图2)。在断裂活动初期,地层逐步上超;而在断裂活动末期,地层发生抬升并遭受剥蚀。在地震剖面上表现为“上超下削”的反射终止关系,界面之上常见上超或下超反射,界面之下常见削截或顶超反射。

T₈⁰地震反射界面对应始新世早期的瓯江运动,为宝石组底界面,该界面上、下波组特征存在明显差异,在盆地西缘,界面之上多见上超特征,界面之下则存在明显的削截特征,形成区域性的角度不整合面(图2)。在杭州斜坡带及平北区,T₈⁰界面发育在边界大型断裂的下降盘,其地震反射特征表现为中-强振幅、中-低连续性或弱振幅、低连续性反射,向东延伸至盆地内部时地震波杂乱,界面之上部分可见上超特征。在平湖斜坡带(除平北区),T₈⁰界面在近深大断裂及向盆地内部延伸至断阶发育处表现为波组特征转换界面。界面之上为中-强振幅、高连续的反射波组,界面之下为中-弱振幅、中连续性的反射波组。在盆地深洼处,T₈⁰界面表现为中-弱振幅、中-低频反射波组的底界,

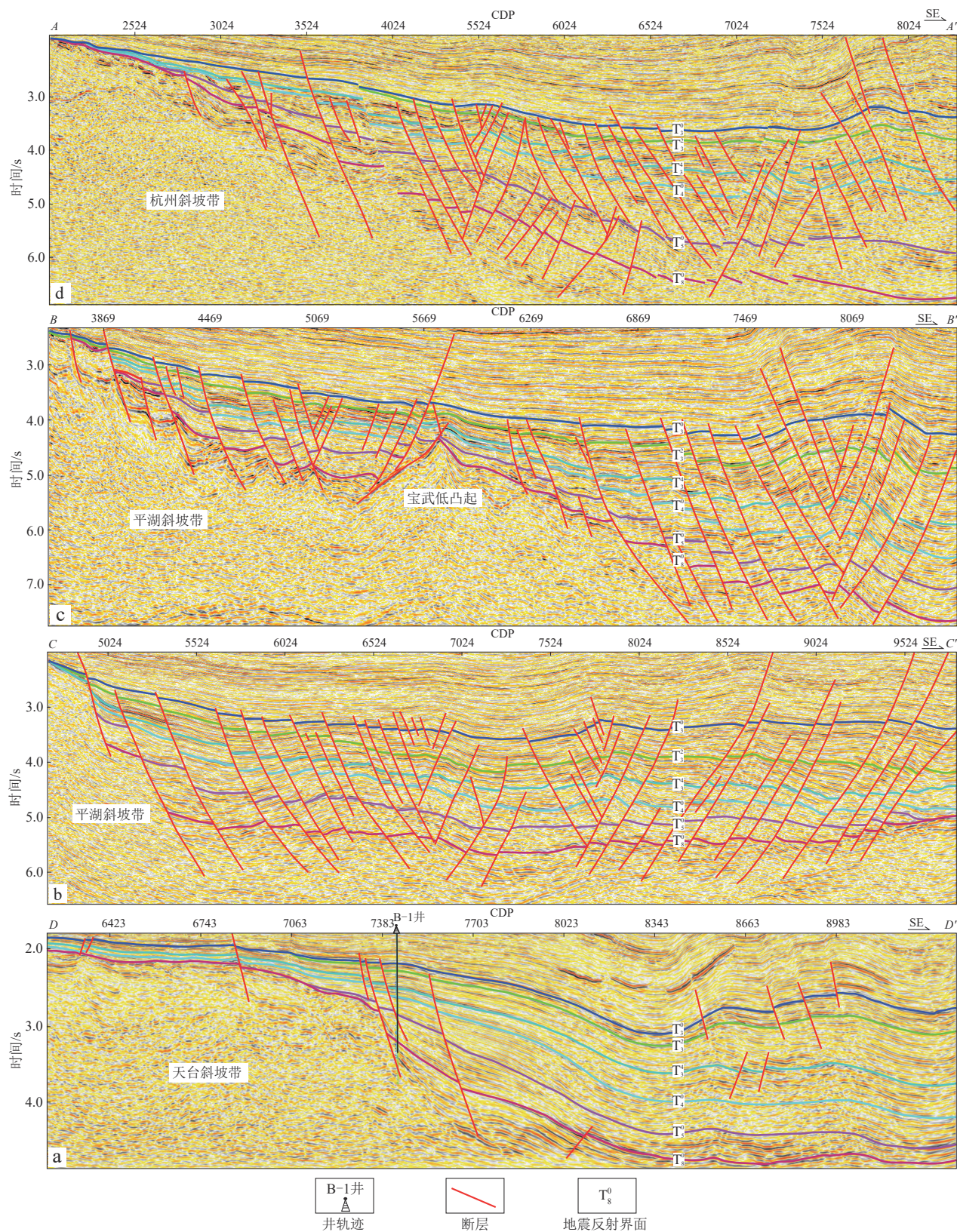


图2 西湖凹陷西部斜坡带构造样式特征(剖面位置见图1a)

Fig. 2 Structural style characteristics of the western slope zone in the Xihu Sag (see Fig. 1a for the section location)

a. 同向协调构造缓坡型; b. 多期断裂叠加陡坡型; c. 反向协调断阶+多期断裂叠加缓坡型; d. 反向协调构造缓坡型

其下部为较高频反射地层。在天台斜坡带, T_8^0 界面之下地层主要表现为一套中-强振幅、低频、中连续性的

反射波组, 界面之上则为一套强振幅、低频、中-高连续的反射波组。

T_4^0 界面对应平湖运动,为宝石组的顶界面,是宝石组与平湖组的分界面,该界面是断陷期向断-拗转换期过渡的构造界面,同时也是一个大范围的区域剥蚀不整合界面,在整个西湖凹陷范围内, T_4^0 界面均表现出上超与削截的特征,其中以削截特征尤为明显,上超特征仅出现在盆地边缘地区(图2)。 T_4^0 界面上、下波组特征存在差异,界面之上为一套强反射特征波组,连续性好;界面之下波组连续性差,同相轴多出现合并与分叉现象,这种特征在西湖凹陷北部和南部地区均可识别。在杭州斜坡带,抬升剥蚀最为明显, T_4^0 界面表现为剥蚀和超覆。在该区域内部可识别出一个大的不整合界面,削截下伏地层特征明显,上、下地层的产状明显不同,这种差异在北部表现尤为突出。在杭州斜坡带中、南部的和平湖构造带, T_4^0 界面表现为波组特征转换界面,上、下波组特征差异明显。在平北区, T_4^0 界面之上平湖组地层为中-强振幅、中-高连续性、中频特征的一套反射波组,而其下宝石组则表现为弱振幅、中频、中-低连续性特征的反射波组。在平湖斜坡带(除平北区), T_4^0 界面表现为中-弱振幅、中频、中连续性反射波组,界面之上平湖组反射特征则为中-弱振幅、中高频、中-高连续性反射波组。在天台斜坡带, T_4^0 界面上、下的地震反射特征存在差异,界面之上表现为弱振幅、低频、低连续性反射波组,而界面之下的宝石组则为中-强振幅、中高频、中-高连续反射波组。

T_3^0 界面为宝石组内部发育的局部不整合界面,也是宝石组下段与上段的地层分界面,在西湖凹陷西缘, T_3^0 界面普遍上超至 T_2^0 界面之上并终止(图2)。在盆地内部, T_3^0 界面上、下的波组特征存在差异:界面之上部分区域可见上超特征,而界面之下以发育顶超为特征。在杭州斜坡带, T_3^0 界面上、下的地层产状相似,均表现出由盆地西缘向盆地中心前积的特征,但地震反射特征存在差异, T_3^0 界面之下的宝石组下段反射特征为中弱振幅、中低频、低连续性,以顶超前积和杂乱前积反射构型为特征;而 T_3^0 界面之上的宝石组上段反射特征为中低振幅—中强振幅、中频、中连续性,以顶超前积和S型前积反射构型为特征。在平湖斜坡带西缘, T_3^0 界面之上可识别出明显的上超特征。 T_3^0 界面及上、下波组的产状和地震反射特征相差不大,均为中-弱振幅、低频、中连续性。在西湖凹陷南部平湖斜坡带和天台斜坡带, T_3^0 界面表现为中-弱振幅、中连续性。界面之上的波组地震反射特征与 T_3^0 界面相似,而界面之下的宝石组下段反射特征为中-高振幅、中频、中-高连续性。

2.2 控盆断层活动性

西湖凹陷宝石组沉积时期为盆地的强断陷期,断裂活动强烈,受NW-SE向拉张作用影响,NE向断裂系统发育^[1,14],其中宁波主断裂和平湖主断裂等NE向控注断裂控制了整个盆地的构造格局,并制约着可容纳空间的变化和沉积物的堆积,进而控制各区带的沉积特征。该时期西湖凹陷呈现出东西双断的构造特征,同沉积断层的差异性活动形成了多个沉积中心,形成多隆多洼的构造格局。受断层组合及活动性差异控制,在不同区带分别形成不同的古地貌和构造样式^[17](图3),进而控制了宝石组沉积充填特征。

通过对三维地震工区内宝石组同沉积断层活动的定量表征,明确了宝石组沉积中心的分布及其演变过程。F1为天台斜坡带的控边断层;F2和F4为平湖斜坡带的控边断层,F3和F4断层共同控制了平湖沉积中心的形成,呈现双断特征;F5—F8断层共同控制了宝武低凸起西部沉积中心的发育;F9和F10断层控制了宝武低凸起东侧的沉积中心;F11和F12断层为杭州斜坡带的控边断层。杭州斜坡带发育的北西向杭州主断裂(F12)不是控注断裂,而是一系列反向协调断层。F12断层在 T_3^0 界面的累计断距主要在1 000~1 300 ms。东侧的控注断层位于三维地震工区之外,但根据二维地震资料,其规模大于F13断层,沉积中心位于F13断层东侧至东部控注断裂之间,最大沉积厚度位于东侧控注断层的下降盘。杭州主断裂和系列协调断层形成了缓坡型地貌(图3),从而使得该区域水体范围较大,水生生物发育良好。平北区宝武低凸起东侧发育了控注的北西向宁波主断裂(F9和F10),其 T_3^0 界面的累计断距主要在500~800 ms,古地貌具有一定坡度,坡折之上有利于发育潮坪沉积,凹陷东侧也发育了控注断裂,与F9和F10断层之间形成了具有一定规模的沉积中心,最大沉积厚度位于东侧控注断裂的下降盘。宝武低凸起西侧发育了一系列反向断裂,次级沉积中心位于宝武低凸起以西的反向断裂下降盘,形成了相对封闭的障壁体系(图3)。平湖构造带发育了控注的平湖主断裂(F4)和一系列同向叠加断层,F4断层在 T_3^0 — T_4^0 界面之间持续活动,断裂活动性强且较稳定,累计断距1 500~2 300 ms,多期正向断裂叠加形成了陡坡地貌,有利于局部发育浊积体。东侧断裂活动性弱,沉积中心位于平湖主断裂的下降盘,但范围不大,发育了西湖凹陷最厚、层序最全的宝石组。天台斜坡带发育了控注的宝石主断裂(F1),其 T_3^0 界面的累计断距主要在450 ms左右,断裂活动性弱,同向协调断层相对不发育,

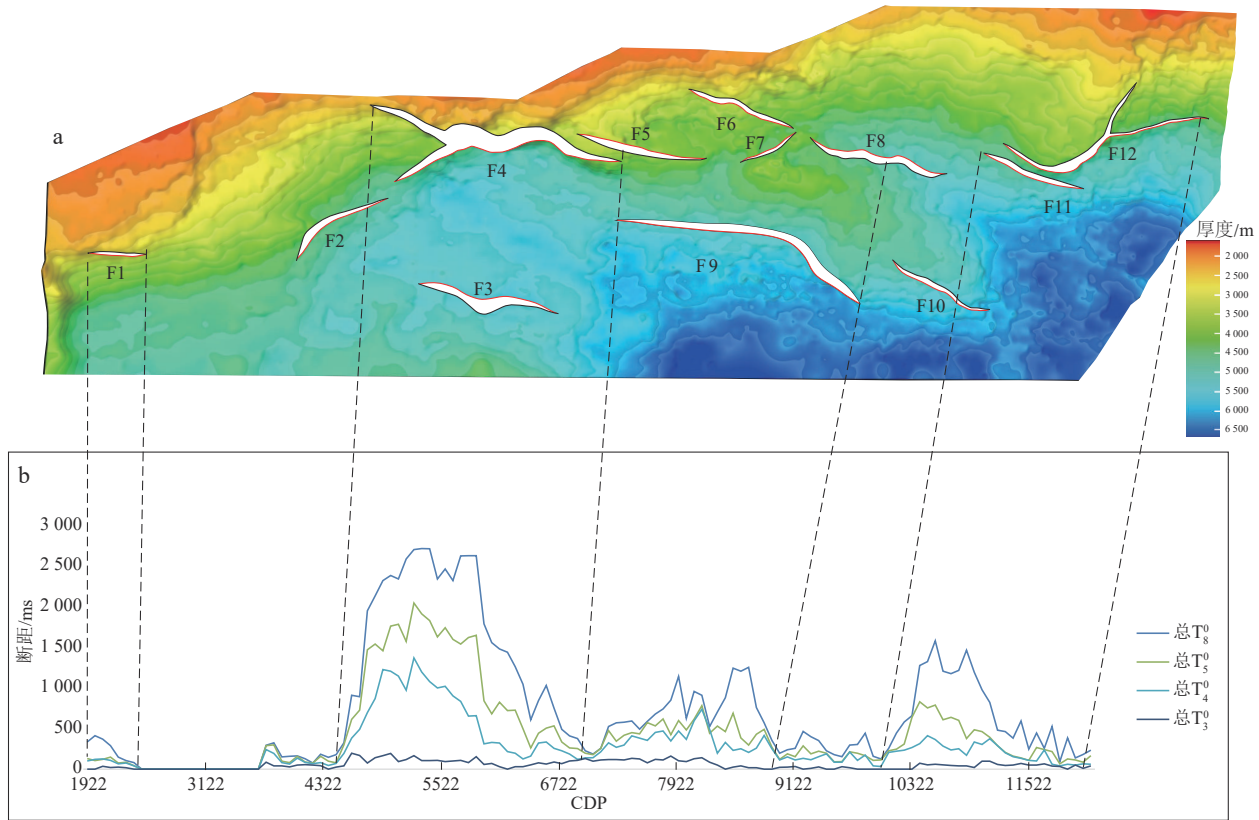


图3 西湖凹陷宝石组同沉积断层分布(a)和同沉积断层活动性统计(b)

Fig. 3 Statistics on the activity of synsedimentary faults in the Baoshi Formation, Xihu Sag

沉积中心位于F1下降盘,沉积中心范围较小(图3)。古地貌具有一定坡度,西侧的天台低凸起有一定高差,坡折之下有利于发育扇三角洲和浊积体。在上述3个斜坡带中, T_3^0 界面的累计断距均小于 T_8^0 界面,表明断裂活动性整体减弱,然而,平湖主断裂的累计断距最大,天台主断裂的累计断距最小。宝上段($T_5^0-T_4^0$)整体沉积充填特征与宝下段($T_8^0-T_3^0$)类似,各沉积中心仍在持续发育(图3)。

2.3 构造样式特征

早-中始新世西湖凹陷裂陷作用达到鼎盛,盆地内沉积了一套范围广且厚度大的同沉积地层,始新统宝石组沉积于西湖凹陷断陷高峰期^[14,18]。西部斜坡带整体呈现断裂坡折特征,受西缘主断裂的控制显著。西部斜坡带不同构造单元地层结构差异明显,呈现出“南北分块、南陡北缓”的特征。该沉积时期,西部斜坡带地层厚度横向变化大,沉积中心位于北段的杭州斜坡带西部、中段的宁波主断裂和平湖主断裂下降盘一侧,而西斜坡带边缘断层上升盘的构造高部位则存在地层缺失。

杭州斜坡带主要受杭州主断裂控制,发育反向协

调断层缓坡型构造样式,宝石组平缓下倾,各个地层逐层上超,由西向东呈楔状分布,厚度逐渐增大。东部存在沉积中心且面积较大(图2d)。在平北区,由于先存宝武低凸起的存在,低凸起西侧发育反向断槽,由西向东呈楔状分布,次级沉积中心位于低凸起西侧根部。宝武低凸起东侧地层充填特征与杭州斜坡带相似,控洼断裂为低凸起东侧的宁波主断裂,发育多期断裂叠加缓坡型构造样式,其东部为沉积中心(图2c)。平湖斜坡带主要受平湖主断裂控制,发育多期断裂叠加陡坡型构造样式,同沉积断裂活动控制了宝石组地层的形成,沉积中心在主断裂下降盘(图2b)。天台斜坡带主要受宝石主断裂控制,发育同向协调构造缓坡型构造样式,断裂发育程度低。天台斜坡地势高,地形相对平缓,宝石组沉积厚度整体较薄,沿斜坡向北部增厚,由斜坡向盆地内部厚度逐渐增大(图2a)。

3 宝石组沉积特征

精细的沉积相研究需要识别各区带沉积相标志,这是最基本也是最重要的任务。沉积相的识别标志及研究方法较多,基于研究区现有资料,本文选取了钻井

取心、岩性组合及地球物理(测井、地震)标志^[8,17-21]作为主要依据。

3.1 典型岩心相标志

钻井取心是最直观的沉积相识别标志,通常依据岩心的颜色、岩性序列、结构构造及生物扰动等特征去识别沉积环境。在西湖凹陷西部斜坡带,宝武组岩心的泥岩颜色以灰色和浅灰色为主,黑色次之,局部含煤;砂岩颜色以灰白色和浅灰色为主。这些特征总体反映了其沉积时的气候条件以潮湿为主,水体较浅,水介质条件以弱还原(水下)为主(图4)。

在研究区平北区北部,岩心主要表现为含砾中-粗砂岩(石英砾)和细砂岩,呈正粒序,发育平行层理及

交错层理,可见冲刷面(图4a),反映沉积时水动力条件为牵引流,指示强动力和强物源供给的三角洲前缘水下分流河道沉积。泥岩夹粉砂岩的岩心则发育变形层理且虫孔发育(图4b),指示快速堆积的水下分流间湾沉积环境。在平北区宝武低凸起西侧,钻井取心表现为细砂岩-粉砂岩-泥岩组合,发育脉状层理、透镜状层理、双向层理、潮汐束和双黏土层等(图4c,d),表现为潮间带沉积特征。而宝武低凸起之上岩心主要为含泥砾细砂岩(图4e),指示强水动力条件,为潮下带的潮道沉积。在天台斜坡带B-1井,宝武组取心为灰白色大套泥岩夹粉砂岩,发育水平层理,见贝壳,生物扰动强烈(图4f),反映沉积时水动力条件较弱,指示低能的临滨沉积环境。

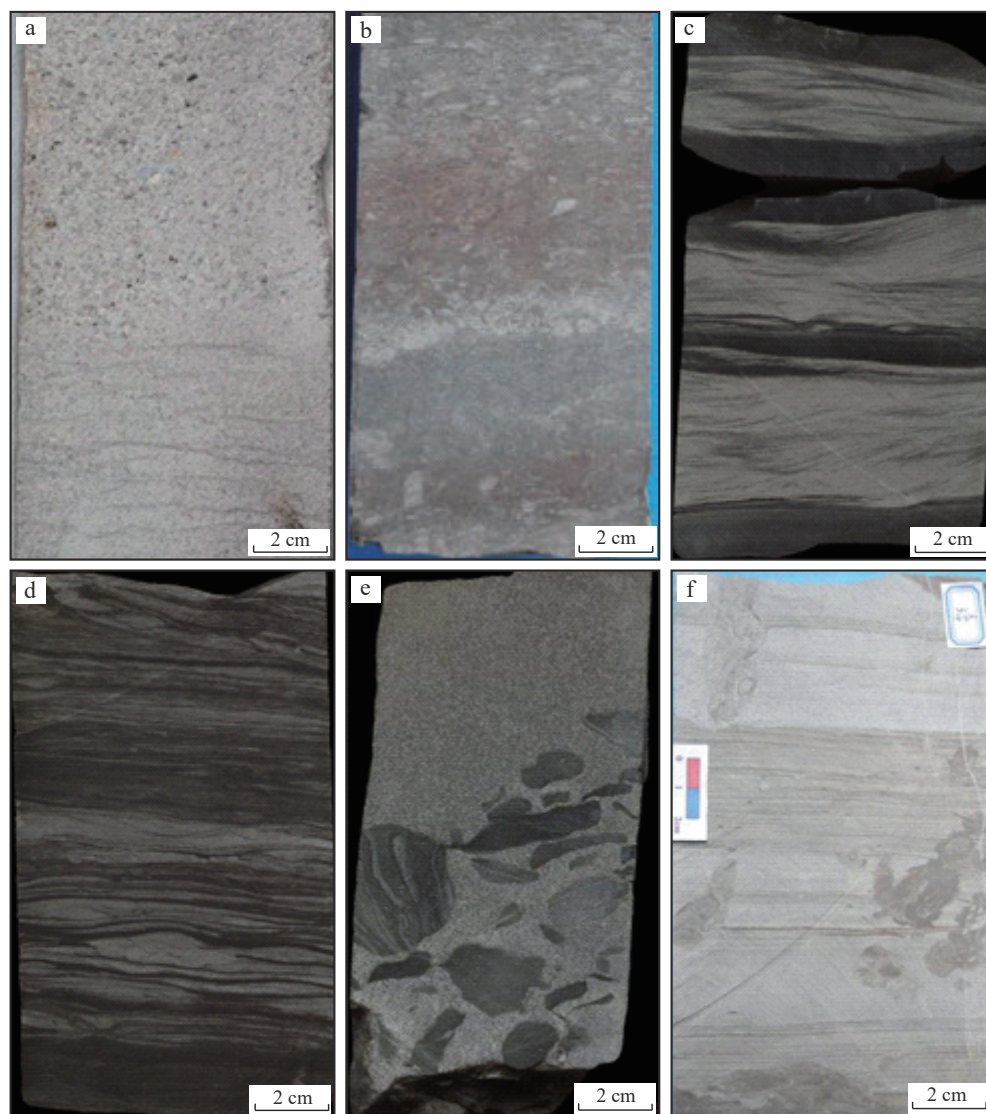


图4 西湖凹陷宝武组典型岩心照片

Fig. 4 Images of typical cores from the Baoshi Formation, Xihu Sag

a. N-4井,埋深4 111.6 m,底砾岩及冲刷面;b. N-3井,埋深3 633.0 m,变形层理;c. N-7井,埋深4 059.6 m,潮汐束;d. N-5井,埋深4 379.2 m,透镜状层理及双黏土层;e. N-9井,埋深4 189.0 m,泥砾;f. B-1井,埋深3 804.8 m,水平层理,虫孔

3.2 典型单井相解释

通过对自然伽马(GR)和电阻率曲线的外形、平滑程度、顶-底接触关系和数值大小等参数进行分析,可以对岩性进行测井相定性解释。西湖凹陷西部斜坡带宝石组主要发育潮坪-潟湖相、三角洲相和局限海相3种沉积相组合,在不同构造带呈现不同的典型沉积相特征。

宝石组典型的三角洲相沉积发育于杭州构造带的H-1井,以三角洲平原-前缘亚相为主,其GR值较低,GR曲线呈顶底递变的钟形或箱形,且多期叠置,反映了分流河道侧向迁移形成的自下而上由粗变细的正韵律特征。

水下分流河道间湾和前三角洲表现为高GR值,GR曲线呈低幅度的齿形,接近泥岩基线,指示沉积时水动力条件较弱,沉积物多为泥质,前三角洲GR曲线更稳定(图5)。平北区北部N-3井发育少量受潮坪影响显著的三角洲沉积。其三角洲前缘的测井曲线形态主要分为顶、底突变的齿化箱形,反映了水下分流河道加积的沉积作用;部分为漏斗形,自下而上由细变粗的反韵律特征,代表了沉积水动力的逐渐增强以及水体向上变浅的响应,为河口坝沉积作用的结果。

宝石组典型潮坪相发育于平湖构造带N-5井,包括潮上带、潮间带和潮下带亚相,其中潮间带沉积最为

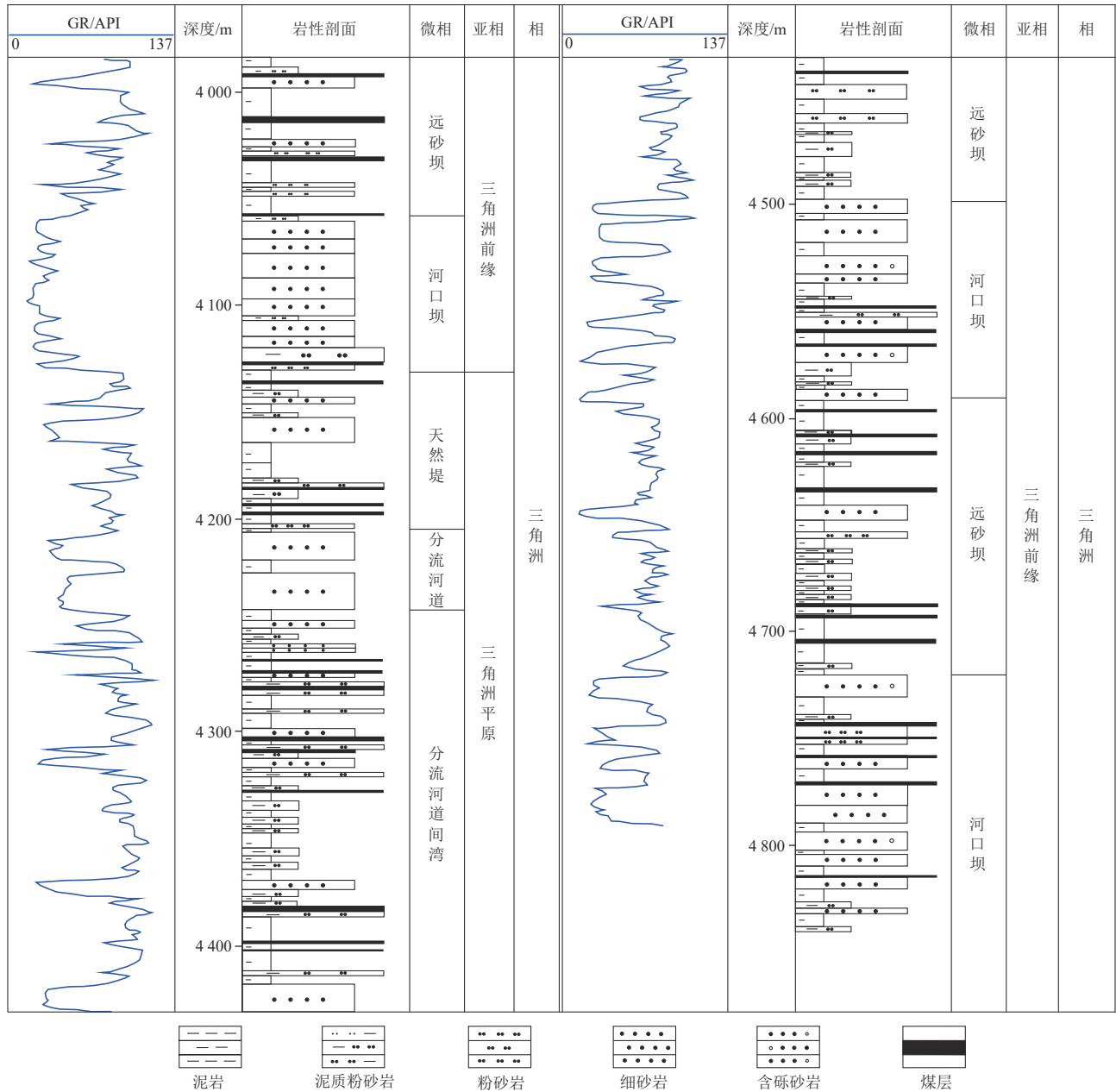


图5 西湖凹陷西部斜坡杭州构造带H-1井宝石组沉积特征

Fig. 5 Sedimentary characteristics of the Baoshi Formation in well H-1, Hangzhou tectonic zone, western slope of the Xihu Sag

发育,测井曲线形态主要分为箱形与钟形组合、指形和齿形,砂岩段GR值较低,顶底多为突变界面(图6)。GR曲线为箱形与钟形组合的地层段,其岩性以中砂岩及细砂岩为主,多为潮道侧向迁移引起的沉积物粒度垂向递变,为潮道砂体侧积的结果;GR曲线为指形的地层段,其岩性多为薄层的粉-细砂岩,常与粉砂质泥岩和泥岩薄互层出现,多指示为混合坪-砂坪沉积;GR曲线为齿形的地层段,是泥岩发育段,泥岩较纯,常与

薄层煤层互层,多指示为泥坪沉积。

宝石组为典型的局限海沉积,发育于天台斜坡带B-1井(图7),测井曲线特征为锯齿状,微弱起伏,GR值较高,电阻率较低,且深侧向电阻率(LLD)和浅侧向电阻率(LLS)几乎重合。

3.3 地震相标志

西湖凹陷西部斜坡带宝石组通过地震相分析共

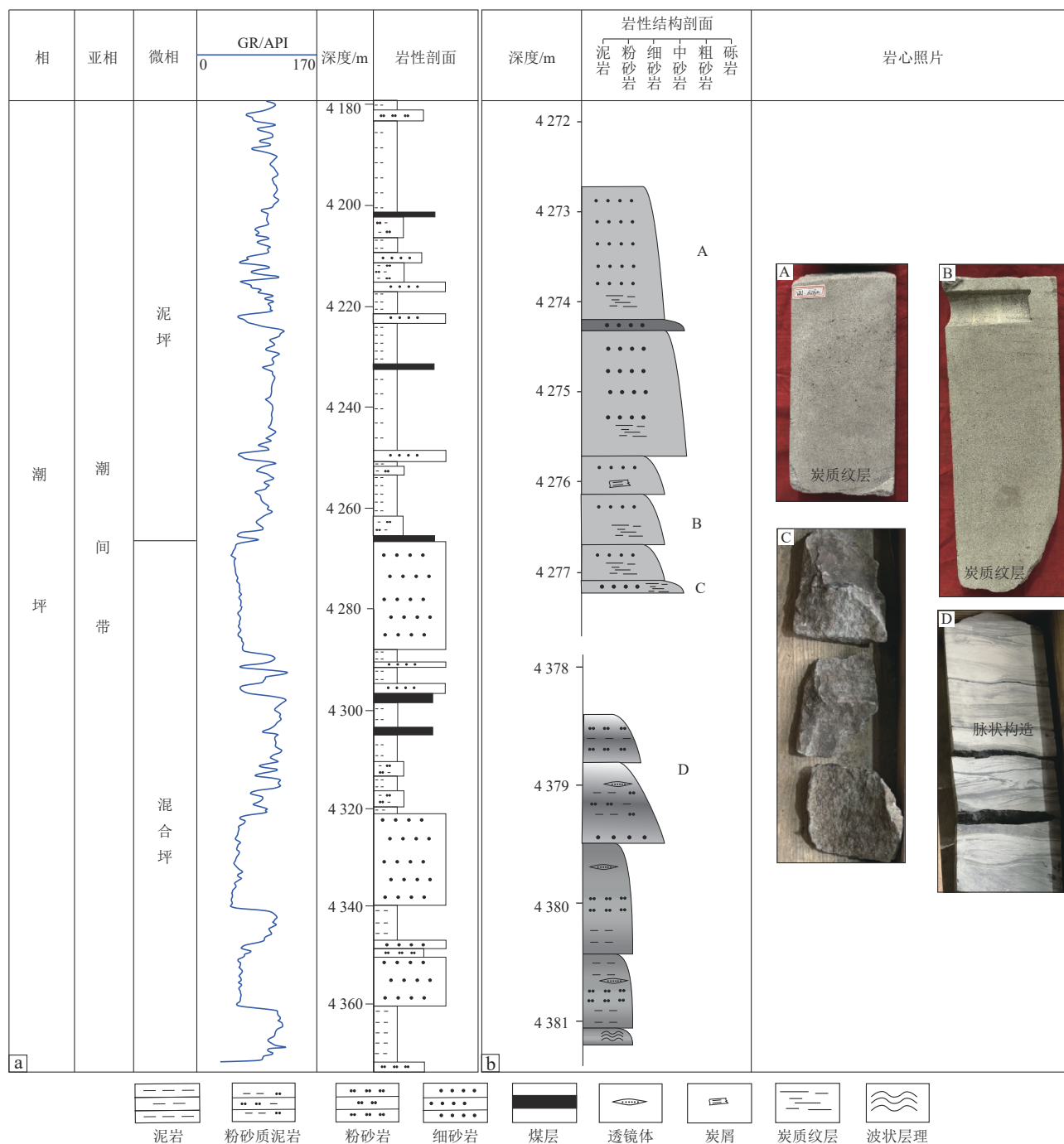


图6 西湖凹陷西部斜坡带平湖构造带N-5井宝石组沉积特征

Fig. 6 Sedimentary characteristics of the Baoshi Formation in well N-5, Pinghu tectonic zone, western slope of the Xihu Sag

a. N-5 井单井沉积相图; b. N-5 井取心段沉积相图

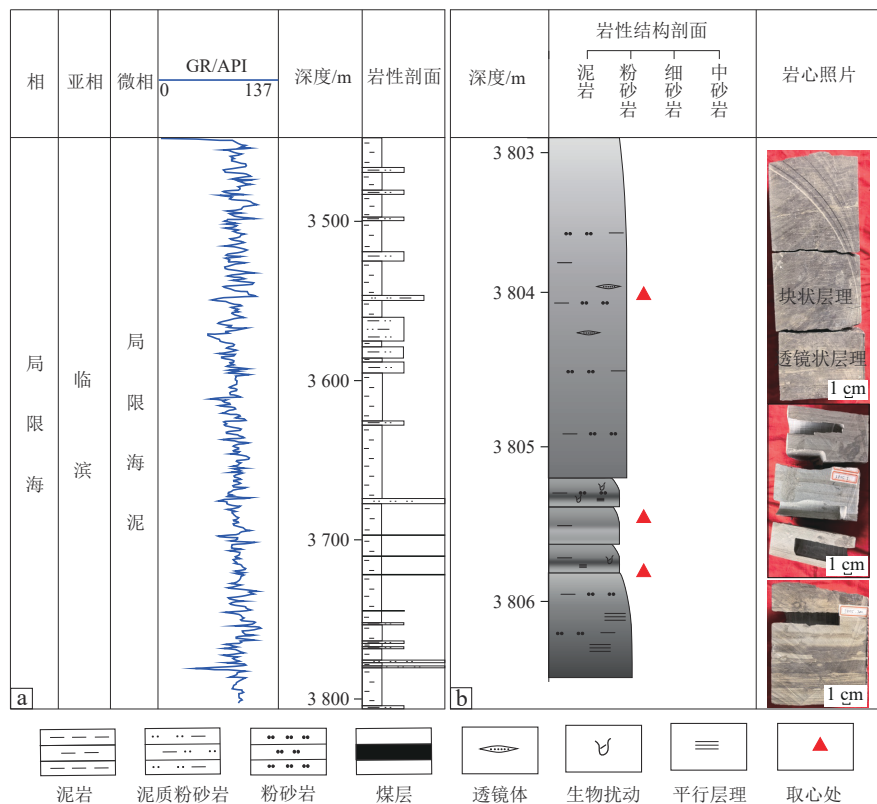


图7 西湖凹陷西部斜坡天台构造带B-1井宝石组沉积特征

Fig. 7 Sedimentary characteristics of the Baoshi Formation in well B-1, Tiantai tectonic zone, western slope of the Xihu Sag

a. B-1井单井沉积相图;b. B-1井取心段沉积相图

识别出杂乱前积、楔状发散、乱岗反射结构、平行和亚平行地震相等(图8)。杂乱前积地震相主要为楔状,代表一种相对快速的沉积环境,反映陆源沉积物向盆地的推进,对应扇三角洲沉积;中振幅、中连续斜交前积地震相主要发育于西湖凹陷西北部斜坡带,向凹陷内部延伸较远,一般代表三角洲沉积;中-弱振幅、低连续、地震亚平行地震相主要为席状,反映了水动力中等偏弱、相对较稳定的沉积环境,代表三角洲或潮坪;变/强振幅、亚平行地震相主要为楔状或席状,反映沉积环境不稳定和高能量,解释为较高能富砂的潮坪相沉积;中-弱振幅、乱岗反射结构地震相代表较深水体、弱水动力条件下的局限海沉积;中振幅、中连续楔状发散地震相多见上超地震反射关系,较好的连续性反映能量较低的稳定沉积环境,解释为局限浅海沉积。

4 宝石组地质特征时-空差异

区别于前人认识^[8-11],本文认为西湖凹陷宝石组分割特征明显,南北存在诸多差异,包括地震反射、地层结构和古环境等方面。

4.1 岩性组合特征差异

西湖凹陷西部斜坡天台构造带宝石组尚未进行钻井取心,可依据测井相和岩性组合等特征对该区域的沉积特征开展研究。天台斜坡带H-1井宝石组厚度较大,岩性以砂-泥互层为主,下部发育多套含砾中砂岩,中部为厚层泥岩夹细砂岩,砂/地比为15%;上部为厚层砂岩夹杂色泥岩,砂/地比为46%,单期砂岩累计厚度达60.0 m(图9)。

西湖凹陷西部斜坡平湖构造带的测井曲线形态主要分为箱形与钟形组合、指形和齿形,低GR值砂岩段的顶底多为突变界面。该区域测井岩性以泥岩夹薄层粉砂岩和细砂岩为主,砂岩段最厚约22.0 m,夹少量煤层(图9)。平北区宝武低凸起西侧N-6井宝石组岩性以泥岩夹薄层粉砂岩和细砂岩为主,砂/地比仅为13%,不发育粗粒沉积,砂层数目和厚度减少,最厚砂岩仅为宝石组上段底部的一套钟形砂岩,厚度为14.5 m。平北区宝武低凸起上钻井岩性为厚层泥岩夹顶、底GR曲线突变的砂岩,砂岩厚度为10.0~30.0 m。

西湖凹陷西部斜坡天台构造带宝石组测井曲线形态以锯齿状为主,自然伽马具有典型高值特征,其数值

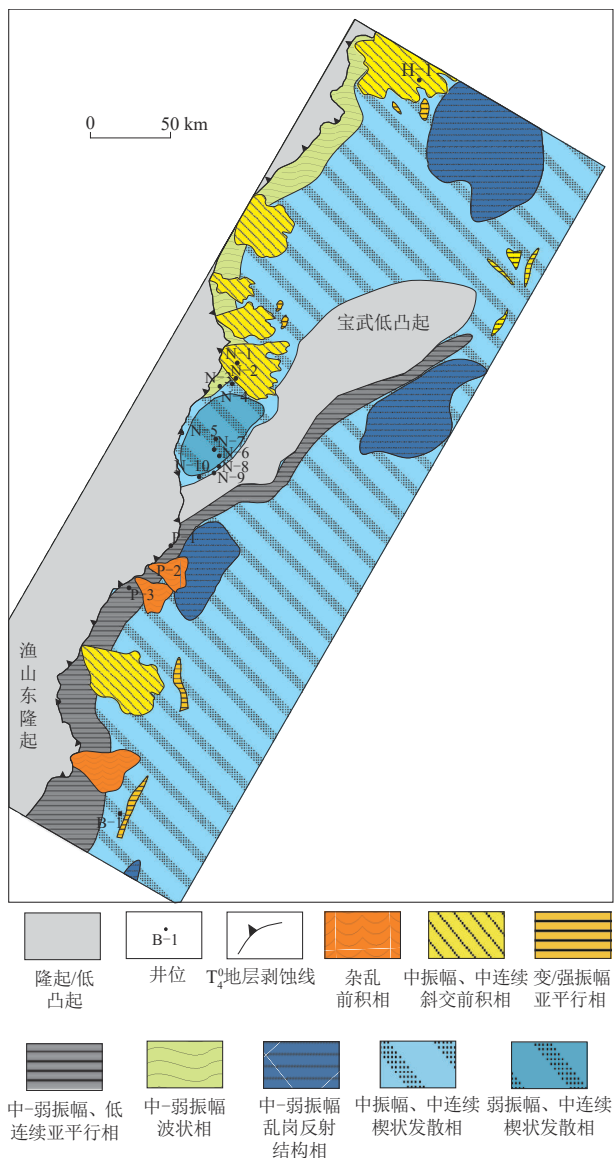


图8 西湖凹陷宝石组地震相平面展布

Fig. 8 Planar view of the seismic facies distribution in the Baoshi Formation, Xihu Sag

范围为80~120 API。测井岩性特征表现为厚层灰黑色泥岩、粉砂质泥岩夹粉砂岩条带和少量煤层。天台斜坡带宝石组整体反映出水体稳定、还原的沉积环境。

由此可见,除B-1井为大套泥岩外,其他钻井均为砂-泥岩互层的岩性组合特征,泥/地比为40%~60%,可以判断B-1井大套泥岩段是层序控制下的局限海沉积。此外,杭州斜坡带H-1井、平湖斜坡带P-3井和天台斜坡带B-1井均不发育煤层,印证了杭州斜坡带H-1井的强水动力注入和平原沼泽不发育,以及平湖斜坡带P-3井和天台斜坡带B-1井的大高差和局限海的滨海平原不发育。西湖凹陷西部斜坡带,自北向南,泥岩含量逐渐增加,砂/地比含量逐渐降低,指示陆源注入含量向南减少。北部为陆源淡水注入的环境,南部

更多为浅海环境(图9)。

4.2 古生物组合特征差异

古气候是地层发育的重要控制因素之一,通过孢粉化石与已知现代植物原位孢粉的对比,可以确定其母体植物的类型,再根据孢粉组合的组分及现代植物的生态习性,可以恢复沉积时期的古植被面貌,进而推测当时的古地理和古气候^[7,18]。

西湖凹陷宝石组沉积时期的孢粉特征较为一致,以发育含量较高的杉粉属-双束松粉属-栎粉属孢粉属组合为特征,少量的桉木粉、榆粉、芸香粉和水龙骨单缝孢等,干旱孢粉含量极低,表明宝石组整体处于温暖湿润的亚热带气候环境^[7]。其中,天台斜坡带B-1井孢粉中以中生型松粉和沼生杉粉为主,针叶林占优。平湖斜坡带N-3井和N-6井孢粉中以中生型双束松粉、榆粉、桉木粉和沼生杉粉为主,为针阔混交林。杭州斜坡带H-1井,中生型榆粉和栎粉含量明显升高,而中生型双束松粉和沼生的杉粉明显降低,阔叶林占优(图9)。

西湖凹陷微体化石和藻类特征差异巨大。天台斜坡带B-1井的多个层段存在有孔虫、沟鞭藻和钙质超微等海相化石^[4,7],化石丰度较高,有孔虫以底栖类为主,浮游类极少见,同时见丰富的孢粉化石和少量淡水藻类与疑源类,指示滨海沉积环境。平湖斜坡带P-2等井多个层段见少量有孔虫及零星沟鞭藻和钙质超微化石,较B-1井海相化石明显减少,指示陆源水系输入较强的海相环境(图9)。平北区武云亭构造带的N-6井等和孔雀亭构造带N-3井等多口井在宝石组沉积期个别层位见零星沟鞭藻和钙质超微等海相化石,品类单一、丰度极低,孢粉化石丰富,发现少量淡水绿藻或疑源类,指示淡水河湖或沼泽沉积环境。而杭州斜坡带北部H-1井多个层段见一定数量浮游有孔虫内核化石(数个层段有孔虫内核化石大于10枚/m,最高160枚/m)及少量介形虫破体和轮藻,品类单一、丰度低,推测其陆相淡水输入量相对较大(图9)。

4.3 遗迹相特征差异

生物遗迹化石的类型、组合和强度记录了特定环境下生物活动的行为、习性和生活条件等特征,因此对沉积环境具有重要的指示意义^[22-23]。本次研究选取了西湖凹陷西部斜坡带钻遇宝石组的已钻井岩心,通过生物遗迹化石专项研究,分析其差异及沉积环境。平北区北部岩心显示泥质含量较高,生物扰动强度高,原始沉积构造已经被生物扰动破坏,但遗迹化石分异度低,主要发育偏垂向且短小的石针迹(*Skolithos*)和墙迹

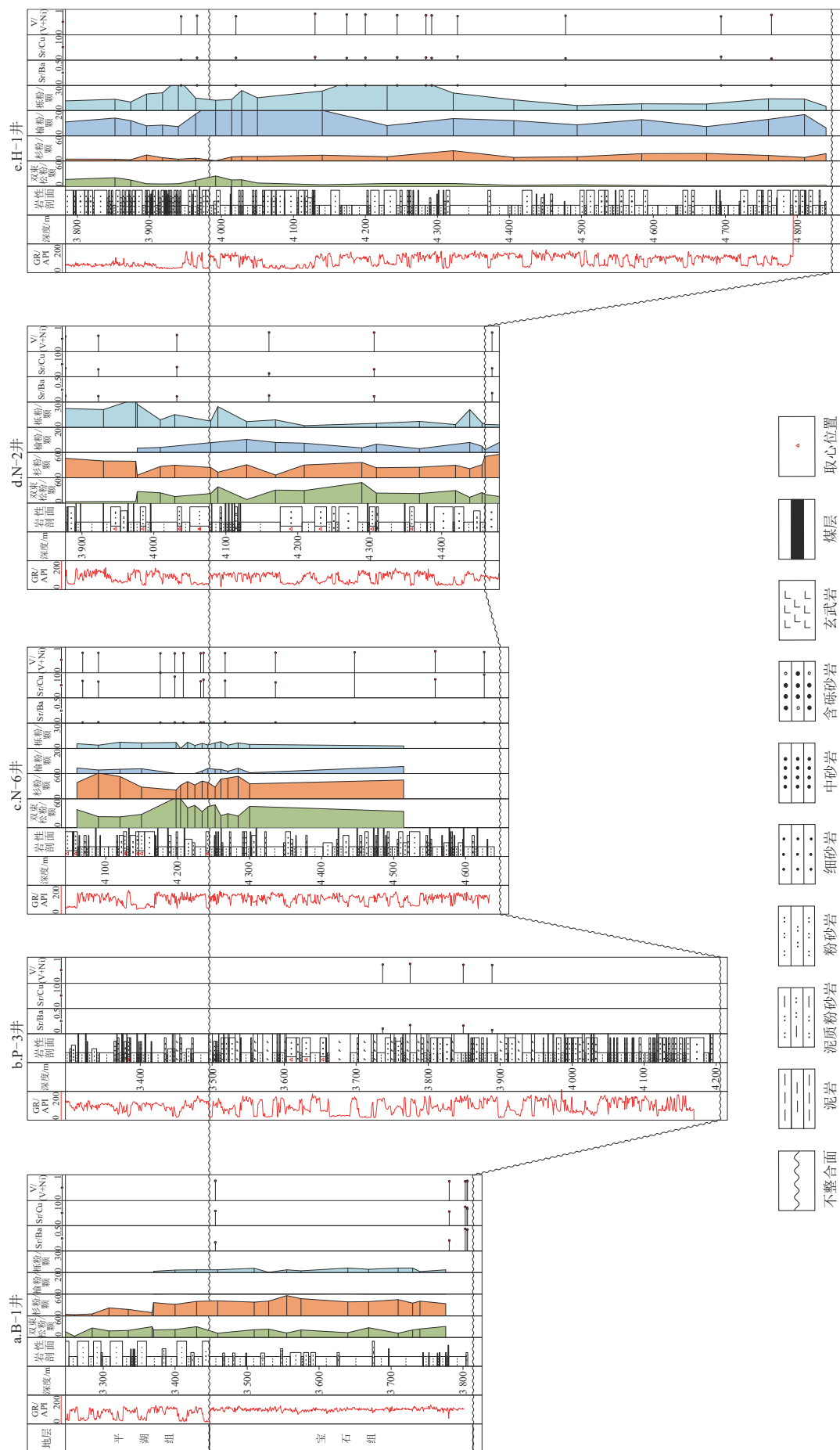


图9 西湖凹陷宝石组典型井古生物组合及地球化学特征
Fig. 9 Paleontological assemblages and geochemical characteristics of the Baoshi Formation in typical wells, Xihu Sag

(*Teichichnus*), 缺乏海相遗迹化石组合, 指示环境压力较大, 只适宜少数广盐性生物活动, 整体反映了三角洲分流间湾沉积环境(图10a)。平北区南部岩心主要为泥岩和粉砂岩互层, 潮汐影响下的波痕发育, 生物扰动强度中等, 富含墙迹和漫游迹(*Planolites*), 可能指示偏低能的潟湖沉积环境(图10b)。天台斜坡带岩心显示砂岩及泥岩互层, 具有强烈的生物扰动和丰富的海相生物遗迹化石, 包括丛藻迹(*Chondrites*)、沙蚕迹(*Nereites*)和动藻迹(*Zoophycos*)等, 整体反映水体较深的浪基面附近远源风暴的活跃期—间歇期浅海环境(图10c)。

4.4 地球化学特征差异

元素地球化学分析是研究古环境的常用方法, 沉积作用过程中, 沉积环境不同, pH值、 E_h 值、盐度和温度等不同, 各种化学元素的聚集受到古环境、古气候和母源差异的影响, 导致其相对含量或比值发生变化, 利用这些元素含量或比值的变化, 可以反映沉积时期的古环境和古气候特征^[24-26]。

通过对西湖凹陷微量元素的统计分析, 可以对比南、北沉积物在沉积过程中的环境异同。锶/钡元素含量比(Sr/Ba)是目前最为常用的判别古盐度的方法^[25]。西湖凹陷以海—陆交互沉积为特征, 勘探实践表明, $Sr/Ba \geq 0.30$ 通常指示半咸水环境(西湖主要表现为局限海, 目前尚未发现 $Sr/Ba \geq 1.00$ 的咸水样品, 且西湖凹陷锶/钡比整体偏低, 其他盆地中锶/钡比0.50~1.00指示半咸水、锶/钡比小于0.50指示淡水的标准在西湖不适

用), Sr/Ba 在0.10~0.30指示微咸水的海—陆过渡环境(如潮坪), $Sr/Ba < 0.10$ 指示淡水环境(如三角洲平原)。宝石组中杭州斜坡带和平北区探井的 Sr/Ba 比值为0.01~0.20, 天台斜坡带B-1井的 Sr/Ba 比值为0.30~0.50(图9)。 Sr/Cu 元素含量比值对气候变化较为敏感, Sr 是典型的喜干型元素, 低含量指示潮湿气候, 高含量代表干旱气候。因此, Sr 和 Cu 的含量以及 Sr/Cu 比值是判别古气候环境的常用指标。 $Sr/Cu \geq 10.0$ 指示干热气候, $Sr/Cu < 10.0$ 指示温湿气候。通过数据分析, 宝石组 Sr/Cu 比值基本都小于10.0, 表明其古气候为温湿气候。且杭州斜坡带 Sr/Cu 比值为0.5~1.5, 天台斜坡带 Sr/Cu 比值为5.0~8.0, 平湖斜坡带 Sr/Cu 比值介于两者之间(图9)。氧化—还原条件分析则依据 $V/(V+Ni)$ 元素含量比值^[25], $V/(V+Ni) > 0.8$ 指示出现 H_2S 的缺氧环境, $V/(V+Ni)$ 比值介于0.6~0.8则为水体分层不强的贫氧环境, $V/(V+Ni) < 0.6$ 指示分层弱的含氧环境。从微量元素统计可知, 宝石组沉积时期 $V/(V+Ni)$ 比值在0.6~0.8, 表明其为水体分层不强的贫氧环境(图9)。综合上述元素地球化学参数特征, 可以得出西湖凹陷宝石组不同构造带的沉积环境存在差异: 北部杭州斜坡带与中部平北区主体为淡水及微咸水环境; 而南部天台斜坡带为咸水环境; 宝石组整体为贫氧环境。

姥鲛烷/植烷含量比值(Pr/Ph)是反映沉积水体氧化—还原条件的有效参数, 伽马蜡烷(Ga)被认为是与水体分层有关的化合物。伽马蜡烷与 C_{30} 藿烷含量比值($Ga/C_{30}H$)常用来指示水体盐度。 Pr/Ph 与 $Ga/C_{30}H$

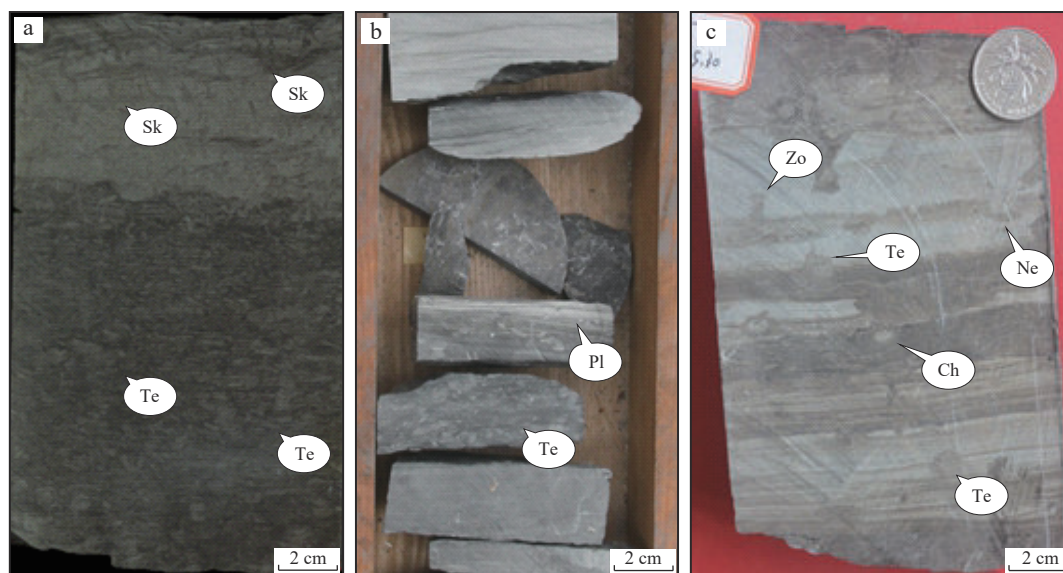


图10 西湖凹陷不同构造带宝石组岩心典型遗迹相照片

Fig. 10 Typical ichnofacies in cores from the Baoshi Formation in different tectonic zones of the Xihu Sag

a. N-3井遗迹相, 埋深3 632.7 m, 存在Sk(*Skolithos*, 石针迹)和Te(*Teichichnus*, 墙迹); b. N-10井遗迹相, 埋深3 753.8 m, 存在Pl(*Planolites*, 漫游迹)和Te(*Teichichnus*, 墙迹); c. B-1井遗迹相, 埋深3 805.3 m, 存在Ne(*Nereites*, 沙蚕迹), Zo(*Zoophycos*, 动藻迹), Ch(*Chondrites*, 丛藻迹)和Te(*Teichichnus*, 墙迹)

交汇分析显示,宝石组泥岩的Pr/Ph比值基本在3.0以上, $Ga/C_{30}H$ 主体为0.1~0.2,表明宝石组整体泥岩有机质沉积环境为弱氧化-弱还原的淡水-微咸水条件,且呈现出天台斜坡带和杭州斜坡带稍咸、平北区稍淡的特征。甯烷的分析结果显示,杭州斜坡带水生生物母源特征明显,平湖斜坡带(主要为平北区)具有混源特征,天台斜坡带以陆生生物母源特征为主^[6]。

5 宝石组沉积相展布及相模式

西湖凹陷宝石组的地质结构总体表现为在张性构造背景下发育的复杂半地堑形式,其内部充填了巨厚的

碎屑岩沉积。该沉积时期处于断陷阶段,并具有“幕式”沉积特征^[27-29],宝石组的沉积充填显示出宝上段和宝下段各存在一个与可容纳空间变化相关的区域性沉积旋回,即各存在一次大规模海侵事件所对应的沉积旋回。

宝石组沉积时期西湖凹陷的水体范围和沉积范围均较广,泥岩厚度大,具裂陷早期的强分隔特征。各注陷相对独立,横向厚度变化大。沉积中心位于平湖断裂下降盘一侧和北部杭州斜坡,西斜坡边缘断层上升盘构造高部位缺失。岩性组合、单井沉积相特征分析、地震相特征分析及地震剖面沉积相侧向展布等特征研究表明,宝石组沉积时期西湖凹陷主要发育三角洲、潮坪、潟湖和局限海等沉积相类型(图11a)。

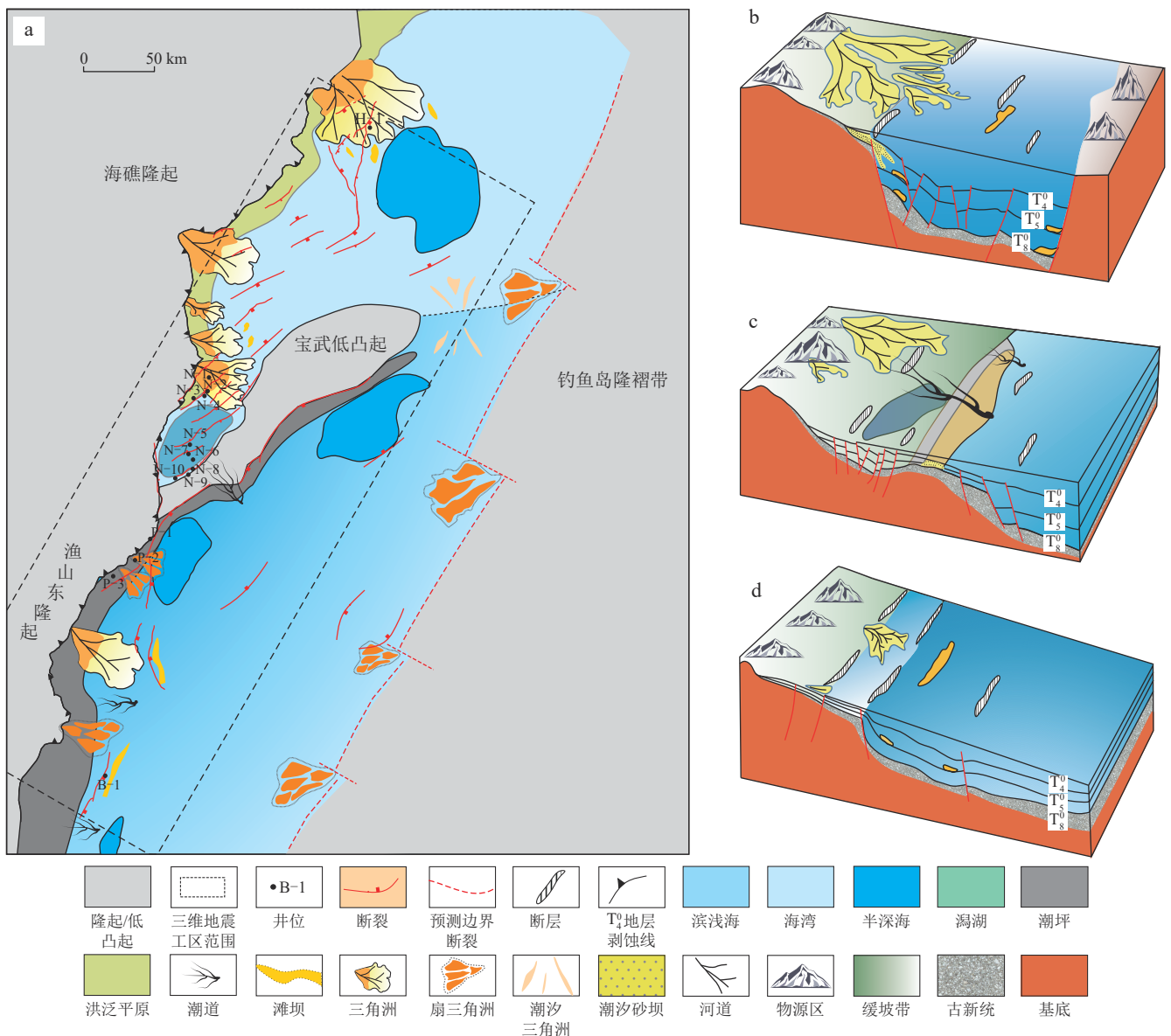


图11 西湖凹陷宝石组沉积体系展布及沉积模式

Fig. 11 Distribution of sedimentary systems and sedimentary model of the Baoshi Formation, Xihu Sag

a. 西湖凹陷宝石组沉积体系展布; b. 宝石组杭州斜坡带沉积模式; c. 宝石组平湖斜坡带(平北地区)沉积模式; d. 宝石组天台斜坡带沉积模式

杭州斜坡带主要发育三角洲-海湾沉积体系,发育范围和规模较大的三角洲相沉积(图11b)。由于宝武低凸起强烈分隔作用,向东部凹陷内部形成了面积较大的海湾沉积。辫状河三角洲相前缘亚相的水下分流河道砂体粒度较粗、分选较好,是本区的主力储层,有利于发育构造圈闭。海湾厚层泥岩为本区烃源岩。

平北区宝武低凸起的地层遮挡作用,在低凸起西侧形成潟湖,发育的含煤系泥岩是西湖凹陷宝武组的良好烃源岩^[6]。低凸起东侧发育潮汐砂坝、且在高水位期低凸起之上间歇性发育潮道,有利于发育地层-岩性圈闭(图11c)。

平湖斜坡带(除平北区)和天台斜坡带发育扇三角洲-局限海沉积体系,仅局部发育三角洲(图11d)。在近剥蚀区,盆地边缘存在一定高差,有利于浊积体的发育,从而形成构造-岩性圈闭和地层-岩性圈闭。(局限)海相泥岩为本区烃源岩。

6 结论

1) 西湖凹陷宝武组为一套夹持于地震反射界面 T_4^0 与 T_8^0 之间的碎屑岩地层,且上、下地层存在明显的上超和削截现象。宝武组在凹陷中心厚度可达2 000 m,具备重要的烃源潜力。宝武组受断层组合及活动性控制,形成多隆多洼的构造格局。在西部斜坡带的不同位置,分别形成了同向协调构造缓坡型、多期断裂叠加陡坡型和反向协调构造缓坡型等构造样式。

2) 西湖凹陷西部斜坡带宝武组形成于微咸水、湿润、弱氧化-弱还原的沉积环境,整体表现为水体较浅且水位变化频繁的海-陆过渡沉积体系,古盐度自北向南呈增加趋势。

3) 西湖凹陷西斜坡宝武组的南、北沉积体系存在差异。北部主要发育辫状河三角洲-海湾沉积体系;南部主要发育潮坪-潮汐三角洲-滨浅海沉积体系,属于局限海湾沉积环境。中部水下低凸起分隔了南、北沉积体系,低凸起遮挡下的局限环境中发育的潟湖和海沉积厚层泥岩,是西湖凹陷宝武组的主力烃源岩。

参 考 文 献

- [1] 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 Xinhui, 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.
- [2] ZHU Weilin, ZHONG Kai, FU Xiaowei, et al. The formation and evolution of the East China Sea Shelf Basin: A new view[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 190: 89-111.
- [3] WANG Bing, DOUST H, LIU Jingyan. Geology and petroleum systems of the East China Sea Basin[J]. Energies, 2019, 12(21): 4088.
- [4] 顾惠荣, 陈琳琳. 东海陆架西湖凹陷宝武一井深层微体化石及地层意义[J]. 古生物学报, 2003, 42(4): 620-623.
GU Huirong, CHEN Linlin. Microfossils and chronostratigraphy of the deep beds in the Well Baoshi 1# from Xihu Sag, the East China Sea[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2003, 42(4): 620-623.
- [5] 李纯洁, 李上卿, 许红. 西湖凹陷中-下始新统宝武组油气地质与勘探潜力[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(4): 81-87.
LI Chunjie, LI Shangqing, XU Hong. Petroleum geologic characteristics and exploration potential of Middle-Lower Eocene Baoshi Formation in the Xihu Sag[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(4): 81-87.
- [6] 丁飞, 蒋一鸣, 赵洪, 等. 西湖凹陷始新统宝武组烃源岩分布差异及控制因素[J]. 中国海上油气, 2024, 36(5): 68-82.
DING Fei, JIANG Yiming, ZHAO Hong, et al. Distribution differences and controlling factors of source rocks of Eocene Baoshi Formation in Xihu Sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(5): 68-82.
- [7] 蒋海军, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 西湖凹陷古近系沉积环境分析——以微体古生物化石为主要依据[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(1): 74-78.
JIANG Haijun, HU Mingyi, HU Zhonggui, et al. Sedimentary environment of Paleogene in Xihu Sag: Microfossil as the main foundation[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(1): 74-78.
- [8] 胡明毅, 吴玉坤, 徐艳霞, 等. 西湖凹陷深层宝武组沉积相特征及沉积相模式[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(8): 1-5.
HU Mingyi, WU Yukun, XU Yanxia, et al. Sedimentary facies and depositional mode of deep reservoirs of Baoshi Formation in Xihu Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(8): 1-5.
- [9] 张喜林. 东海盆地西湖凹陷中-下始新统宝武组沉积特征[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(3): 31-37.
ZHANG Xilin. Sedimentary characteristics of Baoshi Formation of Lower-Middle Eocene in Xihu Sag of East China Sea Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(3): 31-37.
- [10] 李昆, 周兴海, 吴嘉鹏, 等. 西湖凹陷中下始新统宝武组沉积相研究[J]. 海洋石油, 2017, 37(1): 16-20, 79.
LI Kun, ZHOU Xinghai, WU Jiapeng, et al. Sedimentary facies of Middle-Lower Eocene Baoshi Formation in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Offshore Oil, 2017, 37(1): 16-20, 79.
- [11] 李磊, 黄晓松, 肖晓光, 等. 西湖凹陷西部斜坡带宝武组沉积相研究[J]. 上海国土资源, 2023, 44(3): 23-27.
LI Lei, HUANG Xiaosong, XIAO Xiaoguang, et al. Sedimentary facies of Baoshi Formation in western slope zone of Xihu Sag[J]. Shanghai Land & Resources, 2023, 44(3): 23-27.
- [12] 何贤科, 姜敏, 蔡华, 等. 西湖凹陷C油田花港组浅水三角洲储集层构型[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(5): 517-527.
HE Xianke, LOU Min, CAI Hua, et al. Architecture of shallow-water delta reservoir of Huagang Formation in C Oilfield, Xihu Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(5): 517-527.
- [13] 李宁, 季兴开, 唐贤君, 等. 东海盆地西湖凹陷B1井中始新世

- 微体古生物及其古环境意义[J]. 微体古生物学报, 2024, 41(2): 161-173.
- LI Ning, JI Xingkai, TANG Xianjun, et al. Eocene micropaleontology and its eoenviromental significance in well B1, Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Acta micropalaeontologica Sinica, 2024, 41(2): 161-173.
- [14] 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.
- [15] 余浪, 余一欣, 蒋一鸣, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷天台斜坡构造变换带发育特征及形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 753-763.
- YU Lang, YU Yixin, JIANG Yiming, et al. Characteristics and forming mechanisms of transform zone in the Tiantai slope, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 753-763.
- [16] 唐贤君, 李宁, 黄晓松, 等. 东海盆地西湖凹陷中下始新统宝石组再认识[J]. 地层学杂志, 2024, 48(4): 404-418.
- TANG Xianjun, LI Ning, HUANG Xiaosong, et al. Reassessment of the Baoshi Formation of the Middle-Lower Eocene series in the Xihu Sag of the East China Sea Basin [J]. Journal of Stratigraphy, 2024, 48(4): 404-418.
- [17] 张迎朝, 邹玮, 陈忠云, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷中央反转构造带古近系花港组气藏“先汇后聚”机制及地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1256-1269.
- ZHANG Yingzhao, ZOU Wei, CHEN Zhongyun, et al. The mechanism of “convergence ahead of accumulation” and its geological significance for gas reservoirs in Paleogene Huagang Formation across the central inverted structural zone of Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1256-1269.
- [18] 赵军, 唐贤君, 蒋一鸣, 等. 东海盆地西湖凹陷西北缘中始新世构造变革厘定及成因探讨[J]. 地质科技通报, 2020, 39(3): 58-67.
- ZHAO Jun, TANG Xianjun, JIANG Yiming, et al. Confirmation and genesis of the Middle Eocene tectonic transformation in northwestern margin of Xihu Depression, East China Sea Basin [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(3): 58-67.
- [19] 贾进华, 邹才能. 中国古生代海相碎屑岩储层与油气藏特征[J]. 地球科学, 2012, 37(增刊2): 55-66.
- JIA Jinhua, ZOU Caineng. Reservoir and oil-gas pool characteristics of Paleozoic marine clastic rocks in China [J]. Earth Science, 2012, 37(S2): 55-66.
- [20] 李盛谦, 曾澍辉, 刘亚洲, 等. 东海盆地西湖凹陷孔雀亭地区古近系平湖组储层成岩作用及孔隙演化[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(5): 49-61.
- LI Shengqian, ZENG Jianhui, LIU Yazhou, et al. Reservoir diagenesis and pore evolution of Paleogene Pinghu Formation in Kongqueting area of Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(5): 49-61.
- [21] 郭刚, 李鑫, 韩雅坤, 等. 东海盆地西湖凹陷平湖斜坡始新统平湖组成岩相类型及对储层的控制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(5): 1494-1505.
- GUO Gang, LI Xin, HAN Yakun, et al. Diagenetic Facies Types and Their Control on Reservoirs of Eocene Pinghu Formation in Pinghu Slope, Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(5): 1494-1505.
- [22] 王宇飞, 杨健, 徐景先, 等. 中国新生代植物演化及古气候、古环境重建研究进展[J]. 古生物学报, 2009, 48(3): 569-576.
- WANG Yufei, YANG Jian, XU Jingxian, et al. Research highlights on the evolution of Cenozoic plants and the reconstruction of palaeoclimate and palaeoenvironments in China [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2009, 48(3): 569-576.
- [23] SEILACHER A. Trace fossil analysis [M]. Berlin; Springer, 2007.
- [24] BAI Yueyue, LIU Zhaojun, SUN Pingchang, et al. Rare earth and major element geochemistry of Eocene fine-grained sediments in oil shale- and coal-bearing layers of the Meihe Basin, northeast China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 97(Part A): 89-101.
- [25] 万俊雨, 朱建辉, 姚素平, 等. 鄂尔多斯盆地中、东部奥陶系马家沟组成烃生物及烃源岩地球生物学评价[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 393-405.
- WAN Junyu, ZHU Jianhui, YAO Suping, et al. Geobiological evaluation of hydrocarbon-generating organisms and source rocks in the Ordovician Majiagou Formation, east-central Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 393-405.
- [26] 童晓宁, 胡建芳, 祝孟博, 等. 松辽盆地姚家车站剖面嫩江组一段下部湖相有机质组成及其沉积环境特征[J]. 地球化学, 2019, 48(2): 149-160.
- TONG Xiaoning, HU Jianfang, ZHU Mengbo, et al. Paleoenvironmental changes during the deposition of the lower Member 1 of the Nenjiang Formation in the Songliao Basin, northeastern China [J]. Geochimica, 2019, 48(2): 149-160.
- [27] 林杨松, 张燕梅, 李思田, 等. 中国东部新生代断陷盆地幕式裂陷过程的动力学响应和模拟模型[J]. 地球科学, 2004, 29(5): 583-588.
- LIN Changsong, ZHANG Yanmei, LI Sitian, et al. Episodic rifting dynamic process and quantitative model of Mesozoic-Cenozoic faulted basins in eastern China [J]. Earth Science, 2004, 29(5): 583-588.
- [28] 董鑫旭, 周兴海, 李昆, 等. 海上稀疏井区高精度地层格架约束下的地震沉积学刻画——以东海盆地西湖凹陷中央背斜带X区块古近系花港组为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 293-308.
- DONG Xinxu, ZHOU Xinghai, LI Kun, et al. Seismic sedimentological characterization of an offshore area with sparse well control under the constraint of a high-resolution stratigraphic framework: A case study of the Paleogene Huagang Formation in block X of the central anticlinal zone in the Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 293-308.
- [29] 唐贤君, 钟荣全, 陈永军, 等. 东海盆地西湖凹陷斜坡区平湖断裂带分段性及其成因机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(6): 2047-2060.
- TANG Xianjun, ZHONG Rongquan, CHEN Yongjun, et al. Segmentation and genetic mechanism of Pinghu fault zone in Xihu Sag slope area, East China Sea Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 2047-2060.